

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Civil



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

## Mémoire de Master en Génie Civil

Présenté par :

**BENBELLIL Bilal**

Ingénieur d'état en Génie Civil

**BENBOURAS Mohamed Amine**

Ingénieur d'état en Génie Civil

Intitulé

# Réparation des ponts en béton armé

Soutenu publiquement le 05 / 09 / 2013 devant le jury composé de :

Présidente	Mme.KETTAB Ratiba	Professeur	ENP
Promotrice	Mme.CHERID Djamilia	M.A.A	ENP
Promotrice	Mme.MOHABEDDINE Hafida	M.A.A	ENP
Examineur	Mr.LEKHAL Saadi	M.A.A	ENP

**ENP 2013**

# شكر

نشكر الله تعالى الذي وفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع ، كما لا يفوتنا أن نشكر كذلك كل الأساتذة الذين سهروا على تدريسنا طوال المشوار الدراسي وعملوا على إنجاح هذا العمل ، على رأسهم الأستاذتين : جميلة شريد وحفيظة محب الدين ، وأعضاء لجنة التحكيم ومديرية الأشغال العمومية لولاية الجزائر ممثلة في الأستاذ سعد الله الذي لم يبخل علينا بعلمه في مجال إصلاح المنشآت الفنية.

نشكر كل من ساهم معنا من قريب أو بعيد ولو بالدعاء ،

الشكر موصول إلى الوالدين الكرماء وكل أفراد أسرتي بن بليل وبن بوراس ،

وإلى كل الأصدقاء في الإقامة الجامعية بوراوي عمار وخارجها ،

لا ننسى أن نشكر في الأخير "جمعية المعرفة العلمية" وكامل أعضائها ، والتي كان فضلها علينا عظيم ولا يرد ، إذ فتحت أمامنا أبواب النجاح والتخطيط الفعال في

الحياة ، شكرا لكم جميعا

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 خبراء 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 في الجزائر العاصمة وهما على التوالي جسر جبين البحر وجسر تافورة وختاما قمنا بتلخيص كل هذا العمل في شكل توصيات جد مهمة.

### الكلمات المفتاحية:

أضرار- منشآت -دراسات تجريبية -عملية إصلاح -تقوية المنشآت

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 cas pratiques de pont situés à Alger : Pont Front de Mer et Pont Tafourah ; Enfin des recommandations ont été proposées.

### Les mots clés :

Désordres- ouvrages d'art - béton armé- méthodes de réparation-renforcement des ouvrages

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

## Introduction

### Chapitre 01 : Généralités

1. Données concernant les ouvrages : .....	3
1.1 Introduction : .....	3
▪ Bâtiments : .....	3
▪ Bâtiments industriels : .....	3
▪ Parkings .....	4
▪ Ponts et ouvrages d'art .....	5
▪ Réservoirs (enterrés, au sol, aériens) : .....	6
▪ Silos : Aéroréfrigérants industriels, de centrale nucléaire.....	6
▪ Cheminées, Structures portuaires .....	6
▪ Canalisations en béton armé et précontraint : .....	9

### Chapitre 02 : Dégradation des matériaux

Introduction : .....	10
1. Définition de la dégradation : .....	10
1.1 Classement des différents désordres : .....	10
1.2 Origine de la dégradation : .....	11
1.2.1 Les enlever les articles écrire altérations.....	11
1.2.1.1 Dégradations d'origine physique ou mécanique .....	11
1.2.1.2 Dégradations d'origine physico-chimique.....	11
1.2.1.3 Dégradations d'origine chimique.....	12
1.2.2 Corrosion de l'acier : .....	13
1.2.2.1 Corrosion atmosphérique : .....	13
1.2.2.2 Corrosion des armatures dans les structures en béton armé : .....	14
1.3 Défauts probables de ce phénomène et leur cause probable : .....	14
1.4 Fissures : .....	17
Conclusion : .....	20

## Chapitre 03 : Technique de diagnostic

Introduction :	21
1.1 Évaluation de la résistance du béton in situ :	21
1.1.1 Essai pull-off :	22
1.1.2 Essai pull-out :	23
1.1.3 Essai au marteau Schmidt (scléromètre) :	25
1.2 Évaluation de la rugosité de surface :	26
1.2.1 Tache de sable :	27
1.2.2 Peigne articulé :	27
1.2.3 Profil mètre d'état de surface :	28
1.2.4 Triangulation laser :	29
1.2.5 Moiré de projection :	29
1.3 Radar géophysique et le pachomètre :	30
1.4 Mesure de Potentiel d'Électrodes :	33
1.5 Mesure de la vitesse de corrosion des armatures :	34
1.6 Mesures d'humidité par capacimètre électrique :	35
Conclusion :	36

## Chapitre 04 : Méthodes de réparation

Introduction :	37
1. Traitements de surface :	37
1.1 Ragréages :	37
1.2 Injection des fissures :	38
1.2.1 Deux grandes catégories de traitements :	39
1.2.2 Produits pour injection :	39
2 Protection du béton et des armatures :	40
2.1 Techniques de protection du béton :	40
2.1.1 Hydrofuges de surface :	40

# Table des matières

2.1.2	Minéralisateurs :	40
2.1.3	Peinture :	40
2.1.4	Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère :	41
2.1.5	Revêtements plastiques épais :	41
2.2	Protection cathodique des armatures :	41
3	Ajout de forces ou de déformations :	41
3.1	Généralités :	41
3.2	Renforcement des ouvrages en flexion :	42
3.3	Renforcement des ouvrages vis-à-vis de l'effort tranchant :	42
3.4	Exemples de traitement d'autres types de défauts :	42
3.5	Protection de la précontrainte additionnelle :	43
4	Ajout de matière :	43
4.1	4.1. Béton projeté :	43
4.1.1	Principaux problèmes qui peuvent survenir :	44
4.1.2	Caractéristiques du béton projeté :	44
4.1.3	Deux principaux types de projections :	44
4.1.4	Formulation du béton :	46
4.1.5	Mise en œuvre du béton projeté :	46
4.1.6	Précautions particulières :	47
4.2	Renforcement par collage de tissus composites :	47
4.2.1	Propriétés des fibres de carbone :	47
4.2.2	Propriétés du tissu de fibres de carbone :	48
4.2.3	Propriétés de la résine de collage :	48
4.2.4	Procédure de mise en œuvre définir TFC :	49
4.3	Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés :	50
4.4	Coulage ou injection de béton ou de mortier :	51
4.5	Ajout d'armatures :	51
	Conclusion :	52

## Chapitre 05 : Cas pratiques

1. Introduction :.....	53
2. Objectifs de l'étude.....	53
3. Cas du Pont FRONT DE MER .....	55
3.1 Description de l'ouvrage:.....	55
3.2 Relevés, auscultations et essais réalisés .....	56
3.3 Interventions : .....	57
4. Pont TAFOURAH .....	60
4.1 Description de l'ouvrage .....	61
4.2 Inspection de l'ouvrage .....	62
4.3 État général de l'ouvrage .....	62
4.4 Reparation de l'ouvrage .....	66
5. Conclusion .....	68

## Conclusion générale

## Chapitre 01

Figl.1 : Eclats en formation.....	3
Fig I.2 : Poutre support de réservoir.....	4
Fig I.3 : Poteau porteur sous garage.....	4
Fig I.4 : Poteau support de ligne électrifiée.....	4
Fig I.5 : Pile de pont.....	5
Fig I.6 : Paroi d'aéroréfrigérant.....	6
Fig I.7 : Pile en zone de marnage.....	7
Fig I.8 : Poutre de tablier.....	8
Fig I.9 : Quai en zone de marnage.....	9
Fig I.11 : Parement en béton armé dans un monastère classé.....	9

## Chapitre 02

Fig II.1 : Nids de cailloux dus à une insuffisance de vibration.....	17
Fig II.2 : Eclatement de béton et la corrosion des armatures.....	17
Fig II. 3 : Gonflement de béton et corrosion des armatures.....	18

## Chapitre 03

Fig. III.1. Essai pull-off.....	22
Fig III.3. Essai pull-out noyé [selon Bungey et Soutsos, 2001].....	23
Fig.III.4. Essai pull-out foré [selon Bungey et Soutsos, 2001].....	24
Fig.III.5. Internal fracture [selon Bungey et Soutsos, 2001].....	25
Fig.III.6. Essai au marteau Schmidt.....	25
Fig.III.7. Modèle des profils de surface de ICRI .....	26
Fig.III.8. Peigne articulé [Silfwerbrand, 2000] .....	27
Fig.III.9. Évaluation des paramètres Da et R.G.....	28
Fig.III.10. Profil mètre d'état de surface à contact.....	28
Fig.III.11 Moiré de projection .....	29
Fig III.12. L'utilisation du radar géophysique. ....	32
Fig III.13. L'utilisation du pachomètre. ....	33
Fig III.14. La mesure de Potentiel d'Électrodes.....	34
Fig III.15. Méthode par impulsions galvano-statiques.....	35
Fig III.16. Les mesures d'humidité par capacimétrie électrique.....	36

## Chapitre 04

Fig VI.1. Photos montrent le renforcement par le TFC.....	49
Fig VI.2. Renforcement d'un pont par le TFC (E.T et M.F).....	50

## Chapitre 05

Fig 5.1 Pont FRONT DE MER.....	55
Fig 5.2 travaux de réhabilitation réalisés à court terme sur le pont Front de mer.....	58
Fig 5.3 Les travaux de réhabilitation effectués.....	59
Fig 5.4 Pont TAFOURAH (2 ET 3) .....	60
Fig 5.5 Vue générale de l'ouvrage de Tafourat.....	61
Fig 5.6 Pont 2, travée 7, coté extérieur, Est de dalle.....	63
Fig 5.7 Vue d'ensemble de la culée .....	63
Fig 5.8 Mur en retour de la culée, Délaminage de dessus du mur .....	63
Fig 5.9 Corrosion légère de l'armature.....	64
Fig 5.10 Pont 3, axe 8, pile coté.....	65
Fig 5.11 Infiltration d'eau par du béton et corrosion légère de l'armature.....	65
Fig 5.12 Pont 3, axe 6, appareil d'appui D. Corrosion très importante des frettes.....	66

# Introduction

Les ouvrages en béton subissent, au cours de leurs vie de service, des modifications structurelles en fonction de leur importance, leur exploitation et leur position environnementale. Ces causes sont dues soit à l'accroissement des charges qui sollicitent la structure soit aux défauts dans le calcul ou dans l'exécution de l'ouvrage.

Dans la plupart des cas ces modifications sont néfastes à la pérennité des ouvrages. Vu le coût et les contraintes inhérentes à la construction de nouveaux ouvrages, le recours à la conservation et la réhabilitation de la structure est recommandée.

A cet effet plusieurs méthodes et matériaux sont utilisés pour le confortement et la réparation de ces derniers. Actuellement, les matériaux les plus adaptés sont les matériaux composites

Au cours de ces dernières années, l'industrie de la transformation des matériaux composite a bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications.

Cependant, comparativement à d'autres secteurs tels que celui de l'automobile et de l'aérospatiale, il fait son apparition dans le domaine du Génie-Civil. Pour cela, il existe de réelles perspectives dans les prochaines années quant à leur utilisation structurelle pour la réhabilitation et la réparation des constructions civiles et industrielles ; un intérêt est accordé dans le domaine de la recherche à travers le monde, durant cette décennie pour l'étude des différents aspects du renforcement et de la réparation des éléments structuraux en béton par des matériaux composites.

Notre pays qui compte un large réseau routier de plus en plus vieillissant et situé en zone sismique, nous a interpellé d'où l'objectif de notre mémoire.

Le plan de travail est organisé après une introduction générale en cinq chapitres : **Le premier chapitre** présente un résumé sur les dégradations par corrosion des ouvrages en béton armé.

**Le deuxième chapitre** est consacré à l'étude du phénomène de dégradation des matériaux, leur origine physico-chimique et ainsi que mécanique.

**Le troisième chapitre** traite des méthodologies de diagnostic permettant de connaître l'origine de ces endommagements et par conséquent de faciliter le choix postérieur des actions et des matériaux requis lors de l'intervention sur la structure.

**Le quatrième chapitre** concerne les principales méthodes de réparation ou de renforcement des ouvrages en béton armé.

**Le cinquième chapitre** est dédié à la présentation de la réparation de deux cas pratiques : Pont FRONT DE MER et Pont de TAFOURAH.

**Et en fin nous achevons ce travail par une conclusion générale et des recommandations.**

**Chapitre 01**

# **Généralités**

## 1. Données concernant les ouvrages :

### 1.1 Introduction :

Ce chapitre traite d'une part, des dégradations par corrosion des ouvrages en béton armé en service et, d'autre part, des techniques de prévention ou de réparations de ces désordres.

Les ouvrages et les éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants :

- **Bâtiments** : acrotères et balcons, dans toutes les atmosphères, éléments verticaux et terrasses, en milieu industriel et maritime. Ce sont bien sûr les éléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisants [15].



Figl.1 : Eclats en formation

- **Bâtiments industriels** : poteaux et dalles. Ces éléments sont en effet soumis assez souvent à des expositions d'agents chimiques. Les poutres sont également des éléments particulièrement sensibles des constructions industrielles, car supportant parfois les dalles de plancher. Certaines d'entre elles sont parfois dans des états assez surprenants [7].



Fig I.2 : Poutre support de réservoir

- **Parkings** : poutres et dalles, en milieu maritime ou montagneux. Cela est lié dans les deux cas à la présence des chlorures (provenant respectivement de l'eau de mer et des sels de déverglaçage) .



Fig I.3 : Poteau porteur sous garage



Fig I.4 : Poteau support de ligne électrifiée

- **Composants de structures préfabriquées** : il ne semble pas que des problèmes importants soient à signaler dans cette rubrique, du fait probablement que les bétons sont mieux soignés et mieux mis en œuvre. Toutefois, les poteaux de lignes électriques par exemple semblent être un objet de préoccupation. Il existe également une importante pathologie touchant divers éléments de construction, due à l'utilisation dans les années 60-80 d'accélérateurs de prise à base de chlorures de calcium. Cela concerne des panneaux de façade, des acrotères, jardinières, etc.
- **Ponts et ouvrages d'art** : dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, les appuis en superstructures, et les équipements de tablier où l'influence des sels de déverglaçage est importante.



Fig I.5 : Pile de pont

- **Réservoirs (enterrés, au sol, aériens) :** le principal problème de ces structures est lié aux circulations d'eau dues soit à la présence de fissures d'origines diverses (thermiques, mécaniques,...) ou de défauts d'enrobages des armatures, notamment si le milieu contient des sels agressifs (chlorures notamment).  
Sur les structures existantes souffrant de fissures, ou de fuites diffuses, les réparations consistent à colmater les défauts ou à installer une étanchéité.
- **Silos :** les silos pour le stockage des matériaux granuleux ou poudreux (céréales, ciments,...) sont soumis à de fortes contraintes, notamment pendant les périodes de chargement et de déchargement. Ces contraintes induisent des fissures, verticales ou horizontales. Celles-ci peuvent être à l'origine de pénétration d'eau, engendrant une corrosion des armatures.
- **Aéroréfrigérants industriels, de centrale nucléaire :** ces structures sont soumises à un environnement sévère (brouillard d'eau sous forme de vapeur ou de gouttelettes entraînées à l'intérieur, soleil, pluie ou gel à l'extérieur) engendrant des contraintes amorçant des fissures. Par ailleurs le fort gradient hydrique est à l'origine d'un transfert de vapeur d'eau pouvant être la source d'altération du béton.



Fig I.6 : Paroi d'aéroréfrigérant

- **Cheminées** : les cheminées (industrielles notamment) sont soumises à un environnement très sévère, acide particulièrement (acide sulfurique et acide chlorhydrique).
- **Structures portuaires** : celles situées en bord de mer souffrent de l'agression due aux chlorures. L'intensité de la corrosion est liée à l'agressivité du milieu (zone de marnage, d'éclaboussures, d'embruns). Des défauts d'enrobage ou de qualité du béton sont alors immédiatement mis en évidence.



Fig I.7 : Pile en zone de marnage



Fig I.8 : Poutre de tablier



Fig I.9 : Quai en zone de marnage

- **Canalisations en béton armé et précontraint** : la plupart sont enterrées, et des ruptures surviennent lorsque la protection du béton n'est plus suffisante (défauts locaux d'enrobage, présence de chlorures).



**Fig I.10** : Tuyau en béton armé

Il faut également signaler les monuments historiques protégés en béton armé, de plus en plus nombreux, qui possèdent leurs contraintes propres, notamment en termes de réparation.



**Fig I.11** : Parement en béton armé dans un monastère classé

Certaines structures sont au contact de l'atmosphère : il s'agit par exemple des piles et tabliers de ponts, des silos ou des réservoirs. D'autres sont au contact avec le sol et éventuellement de l'eau : il s'agit par exemple de canalisations ou de pieux pour fondations. Enfin certaines structures sont au contact à la fois du sol et de l'eau ou de l'atmosphère et de l'eau. Il s'agit par exemple de culées de ponts, de quais (fluviaux ou maritimes), de tunnels ou de murs de soutènement.

Les milieux naturels que sont l'atmosphère, les sols ou les eaux, peuvent également contenir des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton armé, par exemple des engrais ou des sels de déverglaçage.

Il convient aussi de remarquer que le béton lui-même peut être dégradé de diverses façons. Mais, le processus de corrosion des armatures dépend en fait assez peu de son origine.

**Chapitre 02**

# **Dégradation des matériaux**

## Introduction :

La méthode de réparation ou de renforcement repose sur l'analyse et l'examen de la structure à renforcer. Cette analyse suppose une exacte connaissance des raisons et des causes qui amènent à se poser le problème.

### 1. Définition de la dégradation :

Les ouvrages en béton armé subissent, au cours de leurs vie de service, des modifications structurelles importantes selon leurs importance, leurs exploitation et leurs position environnementale. Dans la plupart des cas ces modifications sont néfastes à la pérennité des ouvrages.

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.

#### 1.1 Classement des différents désordres :

Les désordres dont souffrent les structures peuvent en général se classer en trois catégories :

- **les vices de conception de construction ou d'exécution** qui affectent les ouvrages neufs, et qui vont de l'erreur de calcul à la mauvaise qualité du béton, en passant par les erreurs de ferrailage ou le manque de soins pour l'exécution de certains détails : gousset, appuis, joints, etc.
- **les maladies de vieillesse** dues aux agressions du milieu : corrosion due aux atmosphères industrielles, aux ambiances marines, aux sels de déverglaçée, à l'action des intempéries, en particulier des cycles gel-dégel ;
- **les accidents** dus à des causes mécaniques : surcharges non prévues à l'origine, chocs dus à des véhicules et s'exerçant sur les parties sensibles d'une structure, secousses sismiques ou mouvements de terrains se traduisant par des affaissements, des tassements ou des tassements différentiels.

## 1.2 l'origine de la dégradation :

### 1.2.1 Les altérations du béton :

Les structures en béton vieillissent. Ce matériau subit de nombreuses agressions physiques, physico-chimiques et chimiques dont l'intensité est liée à la cinétique de pénétration de l'eau et des gaz. Cette dernière est fonction de la structure, de la porosité, et de la perméabilité du béton.

#### 1.2.1.1 Dégradations d'origine physique ou mécanique

- Cycle de gel-dégel

Les dégradations dues aux cycles de gel-dégel affectent principalement les parties non protégées par un revêtement étanche et sont amplifiées par l'utilisation de sels anti-verglas. 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.

- Phénomènes d'abrasion et d'érosion :

**L'abrasion** : c'est l'usure de la surface par suite de frottement répété et les tempêtes dans les zones dessertes peuvent conduire à l'abrasion des matériaux.

**L'érosion** : les ouvrages en site fluvial ou maritime sont sujets à l'érosion due au charriage d'éléments solides soit, du fait d'un fort courant ou sous l'action des vagues pour les ouvrages côtiers.

#### 1.2.1.2 Dégradations d'origine physico-chimique

**Le retrait** : On distingue :

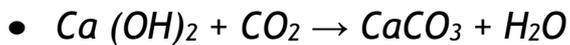
- Le retrait de prise du béton lors de la construction : les variations de volume au début de la prise du béton tendent à provoquer la formation en surface de petites fissures. Ces fissures présentent l'aspect caractéristique des écailles de crocodile
- Le retrait de durcissement : les réactions chimiques 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.

### 1.2.1.3 Dégradations d'origine chimique

#### 1.2.1.3.1 Action du gaz carbonique : la carbonatation du béton

- Mécanisme

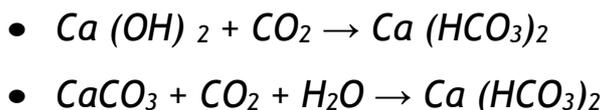
La teneur en CO<sub>2</sub> de l'air naturellement de 0,03% varie avec la température, la pression et le milieu (agglomération, industries, ...) et peut atteindre 0,10 %. La chaux libérée par l'hydratation des silicates peut se carbonater suivant la réaction :



Cette réaction, catalysée par l'humidité atmosphérique progresse de l'extérieur vers l'intérieur du béton et provoque la neutralisation progressive de l'alcalinité du ciment : le milieu basique (11-12) perd cette alcalinité et son pH devient inférieur à 9. La protection naturelle des armatures n'est alors plus assurée.

Par ailleurs, l'eau chargée de gaz carbonique donne naissance à un acide faible

(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> : acide carbonique) et attaque la chaux et le carbonate de chaux suivant les réactions:



Le bicarbonate de chaux ainsi formé est soluble dans l'eau et la destruction du béton a lieu par délavage progressif du liant avec parfois formation de stalactites.

- Facteurs influant sur la carbonatation.
  - nature du ciment ;
  - dosage en eau et ciment ;
  - mise en œuvre ;
  - milieu ambiant.

#### 1.2.1.3.2 Action des sulfates :

L'attaque du ciment par les ions sulfates se traduit par une expansion.

Par exemple, le sulfate de magnésium contenu dans l'eau salée qui comporte également des sels de type chlorure de sodium NaCl, chlorure de magnésium MgCl<sub>2</sub>, sulfate de calcium CaSO<sub>4</sub>, hydro-géo carbonate de potassium KHCO<sub>3</sub> est le plus nuisible parmi ces sels.

Il réagit avec la chaux hydratée pour donner du gypse CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O et de la brucite.

Mg(OH)<sub>2</sub>. Par ailleurs, son action sur les aluminates du ciment se traduit par la formation d'étrangéité (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, 3CaSO<sub>4</sub>, 31H<sub>2</sub>O). L'expansion due à la cristallisation de l'étrangéité (de 300 % environ) provoque la fissuration et la pénétration de l'eau de mer jusqu'aux armatures.

### 1.2.1.3.3 Action des chlorures :

Les deux principales sources de chlorures susceptibles de contaminer le béton sont les sels anti-verglas et l'eau de mer. Les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion et réagissent avec les aluminates de calcium pour former le chlore-aluminate, produit stable et qui se forme sans expansion susceptible de provoquer la dégradation du matériau. Les problèmes apparaissent, en fait, lorsque les ions chlorures non fixés atteignent les armatures, ce qui peut se produire assez facilement dans un tablier de pont.

### 1.2.1.3.4 L'alcali-réaction :

Certains types de granulats contenant des minéraux sensibles en milieu alcalin, sont susceptibles de relarguer de la silice, qui en réagissant avec les éléments de la solution interstitielle, provoque la formation de gels. Ces derniers aux propriétés expansives conduisent à des désordres structurels sous la forme de faïençage, fissures, etc.

La réaction alcali granulats ne se produit que si les conditions nécessaires à son développement sont réunies à savoir :

- des granulats réactifs (riches en silice) ;
- une teneur en alcalins ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) suffisante dans la phase interstitielle du béton ;
- un milieu ambiant favorable (humidité, température, ...).

## 1.2.2 La corrosion de l'acier :

La corrosion de l'acier vient généralement sous l'effet d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, mais les facteurs de corrosion sont très nombreux. D'une manière simplifiée, on peut dire que les uns dépendent du métal lui-même et que les autres dépendent du réactif. Les facteurs dépendant du métal se répartissent en facteurs métallurgiques (composition, traitements thermiques, mécaniques et de surface) et en facteurs liés aux conditions d'utilisation (conception des pièces et des assemblages, sollicitation mécaniques, état de surface). Les facteurs dépendant du réactif sont essentiellement sa nature, sa concentration, son PH, sa teneur en oxygène, la présence d'impuretés.

### 1.2.2.1 La corrosion atmosphérique :

Un acier ordinaire, laissé sans protection spéciale à l'air libre, se couvre d'une couche d'oxydes constituant ce qu'on appelle la rouille. Cette rouille possède un volume très supérieur à celui de l'acier dont elle est issue : plus du sextuple en cas de renouvellement non limité de l'oxygène.

### 1.2.2.2 Corrosion des armatures dans les structures en béton armé :

La corrosion des armatures passives dans un ouvrage en béton résulte d'un :

- processus complexe faisant intervenir à la fois des facteurs chimiques, physiques et mécaniques.
- L'important gonflement résultant du passage de l'acier à l'état de rouille entraîne un éclatement du béton de protection, tandis que la section
- résistante des armatures diminue. Mais c'est surtout leur ductilité et leur résistance à la fatigue qui sont affectées.

### 1.3 Les défauts probables de ce phénomène et leur cause probable :

Les principaux défauts dans les ouvrages en béton armé sont résumés dans le tableau suivant avec les causes probables de chaque désordre, le classement de ces défauts est donné par l'ordre alphabétique.

Nom du défaut	Causes probables
Aciers dénudés	Disparition ou enrobage insuffisant du béton. Attaque du béton. Choc mécanique. mauvaise étanchéité.
Basculement	La poussée des terres, tassement, consolidation, sous-pression, affouillement.
Corrosion aciers	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prise en compte ou évaluation insuffisante de la notion de fissuration.</li> <li>▪ Acier dénudé, mauvaise étanchéité, enrobage insuffisant,</li> <li>▪ erreurs de calculs.</li> <li>▪ Conséquences : 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.</li> </ul>
Corrosion béton	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Action de l'eau ou d'ambiance agressive ;</li> <li>▪ Formation de sels de Candlot;</li> <li>▪ Effet du gel.</li> </ul>

Défaut du parement	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mauvaise réalisation ou mauvaise conception du coffrage ;</li> <li>▪ Tassement du cintre ;</li> <li>▪ Décoffrage prématuré.</li> </ul>
Déformation- Flèche permanente	<p>Diminution de la précontrainte dans le temps ; ayant pour origine :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Surcharge de tout ou partie d'ouvrage</li> <li>▪ Diminution de la précontrainte dans le temps</li> <li>▪ Déformations des parois</li> </ul>
Déformation permanente anormale de la superstructure	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Qualité du béton insuffisante ;</li> <li>▪ La hauteur de construction réduite ;</li> <li>▪ Décoffrage prématuré.</li> </ul>
Désintégration généralisée	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corrosion chimique du béton, corrosion des aciers ;</li> <li>▪ Gel ; Effort mécanique excessif.</li> </ul>
Efflorescence	Mauvaise étanchéité de l'ouvrage.
Epaufrure	Le 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 (faïençage).
Nids de cailloux	Béton mal confectionné

Porosité	C'est un cas important de défaut de (suite) qualité du béton. Il faut distinguer ce défaut des simples défauts de parement. Peut avoir pour conséquences : des suintements, des efflorescences, des stalactites, corrosion béton, corrosion acier, gonflement, désintégration, fissures.
Stalactite	Porosité ou Fissuration du béton

Tab II.1 : Défauts affectant les ponts en béton armé et leurs causes probables

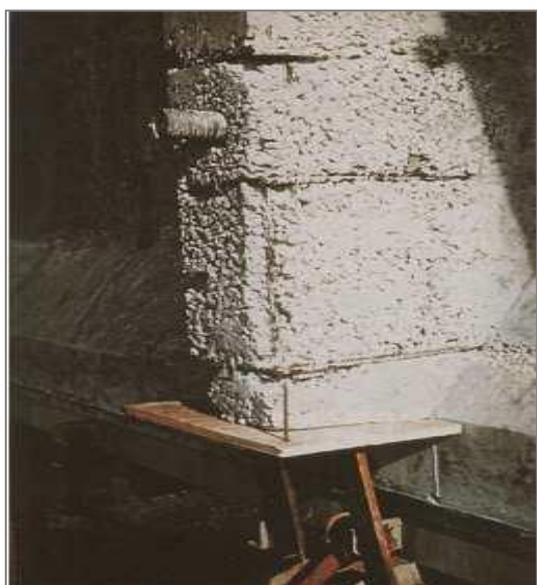


Fig II.1 : Nids de cailloux dus à une insuffisance de vibration



Fig II.2 : Eclatement de béton et la corrosion des armatures



Fig II. 9 : gonflement de béton et corrosion des armatures

#### 1.4 Les fissures :

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. Car elles peuvent rendre le matériau plus sensible à certaines agressions. Soit le tableau suivant qui donnent les différents types de fissures.

Nom du défaut	Causes probables
Fissures courantes (Dans la masse)	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	Compression excessive ; Effet de gel
Fissures en écailles de crocodile	Retrait de prise du béton.
Fissures inclinées dans l'âme	Cisaillement.
Fissures internes	Déplacement du coffrage, Variation de température et Variation de l'hygrométrie.
Fissures isolées	Dépassement de résistance causé par : Le retrait ou les variations de température.
Fissure oblique	Tassement des fondations.
Fissures produites pendant la prise du béton	La vibration due à la circulation des véhicules ; Mouvement des coffrages.
Fissures reproduisant le ferrailage	Apparaissent à la construction par suite d'une vibration des armatures (s'observe en général sur l'ouvrage non revêtu).
Fissures superficielles	Phénomène de retrait

Tab II.2 : Différents types de fissures affectant les ponts en béton armé et leurs causes probables

**Conclusion :**

Une connaissance aussi précise que possible des indicateurs potentiels d'endommagement est évidemment indispensable pour définir le fonctionnement probable de l'ouvrage, la possibilité puis, le cas échéant, les modalités de la réhabilitation. Ce sont des indicateurs pertinents pour le choix des solutions thérapeutiques et qui facilitent surtout la démarche de diagnostic.

## **Chapitre 03**

# **Les techniques de diagnostic**

## Introduction :

La première étape à franchir pour intervenir efficacement sur un ouvrage en béton consiste à déterminer les causes des dommages existants. Cette étape peut aussi être la plus importante du processus de réfection ou d'entretien. En effet, si le phénomène qui provoque la détérioration du béton de base n'est pas contrôlé ou si son diagnostic est incorrect, il est fort probable que ce mécanisme de dégradation affecte aussi le béton de réparation. Une identification incorrecte de la source du problème se traduit alors par des interventions coûteuses, infructueuses et surtout récurrentes, ce qui n'est certainement pas intéressant du point de vue de la durabilité des travaux et des budgets, parfois limités, des gestionnaires.

Il est donc important en premier lieu de mettre en place une méthodologie de diagnostic afin de préciser convenablement l'origine de ces endommagements. Ceci permettra d'améliorer l'interprétation des symptômes des défauts et par conséquent de faciliter le choix postérieur des actions et des matériaux requis lors de l'intervention sur la structure.

### 1. Essais d'identification de source du problème :

Les essais d'identification in situ comportent deux classes : essais destructifs et essais non destructifs.

#### 1.1 Évaluation de la résistance du béton in situ :

En laboratoire, des essais de compression et de fendage sont souvent réalisés afin de déterminer respectivement les résistances en compression et en traction du béton. Sur chantier toutefois, la réalisation de ces essais nécessite le prélèvement de carottes afin de les tester en laboratoire. Pour simplifier l'évaluation de ces propriétés, divers essais destructifs in situ, ont été développés au cours des dernières années. Des essais destructifs réalisés à l'aide d'appareils portatifs ont été effectués.

Selon le cas, ces essais permettent d'évaluer soit la résistance du béton en place (cohésion), soit l'adhérence d'une réparation.

La cohésion traduit l'existence de forces particulières entre les macromolécules ou les molécules et explique les caractéristiques du produit final. En fait, la cohésion d'un béton est directement liée à l'adhésion de la pâte de ciment sur le granulat ainsi qu'à l'enrobage

du sable et des granulats par cette même pâte. In situ, la cohésion du béton est le plus souvent évaluée par l'entremise d'essais d'arrachement : pull-off et pull-out.

### 1.1.1 Essai pull-off :

L'essai pull-off permet de déterminer la résistance en traction du béton en appliquant un effort de tension sur une pastille métallique liée au béton par l'entremise d'un adhésif époxy. Tel que schématisé à la figure 2.1, la surface soumise à l'effort de traction peut être délimitée ou non par un carottage partiel. La norme BS 1881: définit cet essai. Il est également possible de consulter la norme ASTM C1583 [2004] relative à cette méthode d'essai.

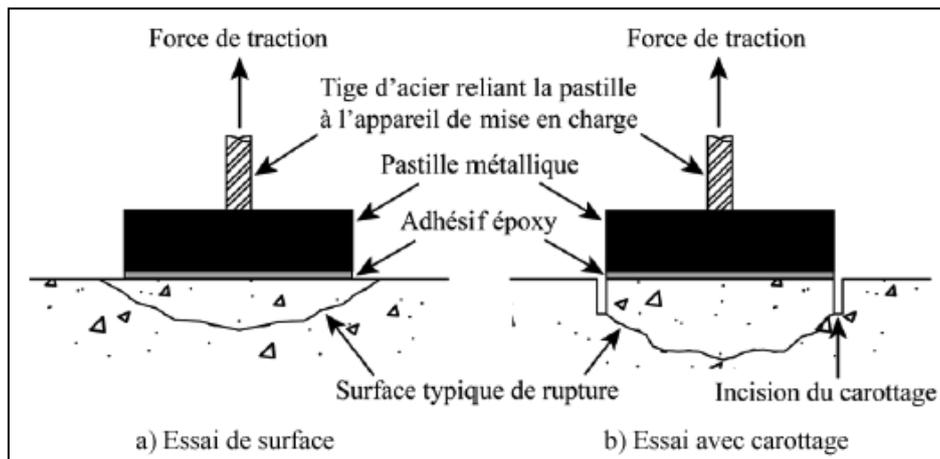


Fig. III.1. Essai pull-off

Cette méthode peut également être utilisée afin d'évaluer l'adhérence en traction des réparations. Dans ce cas, le carottage doit atteindre le substrat jusqu'à une profondeur établie selon la norme utilisée. Par exemple, la norme canadienne exige un carottage minimal de 30 mm dans le substrat, alors que la norme européenne prEN 1542 [1994] recommande au moins 15 mm. Certaines normes mentionnent des valeurs seuil de cohésion qui seraient caractéristiques d'une bonne adhérence de la réparation. Le tableau 2.1 présente un résumé de celles-ci.

Normes	Prescriptions	
	Cohésion	Adhérence
G0007 [1995]	$\geq$ adhérence	1,8 MPa (réparations non structurales) 2,4 MPa (réparations structurales)
G0008 [1995]	$\geq$ adhérence	1,3 MPa (revêtements LH et LHM) 2,0 MPa (revêtements résineux)
	toujours $\geq$ 1 MPa	
prEN 1766 [1995]	3,0 MPa (mélange MC 0,40)	
	2,5 MPa (mélange MC 0,45)	

Note : LH = liant hydraulique; LHM = liant hydraulique modifié; MC = mortier de ciment

Tab. III.1. Normes relatives à la cohésion du substrat [Courard et Bissonnette, 2004]

### 1.1.2 Essai pull-out :

Un essai pull-out consiste à arracher une pièce métallique ancrée dans un élément en béton. Une fois détachée, la pièce est composée d'un fragment de béton de forme conique. La force d'arrachement nécessaire pour retirer le cône de béton est ensuite corrélée à la résistance en compression du béton, obtenue expérimentalement. Il y a trois principales variantes pour ce type d'essai :

- L'essai pull-out noyé « Lok-test » qui utilise une tige d'acier composée d'une extrémité élargie noyée dans le béton frais. La force de traction maximale exercée sur celle-ci permet d'évaluer la résistance du béton et de déterminer, par exemple, le moment où il est possible de décoffrer et permettre la circulation des véhicules.

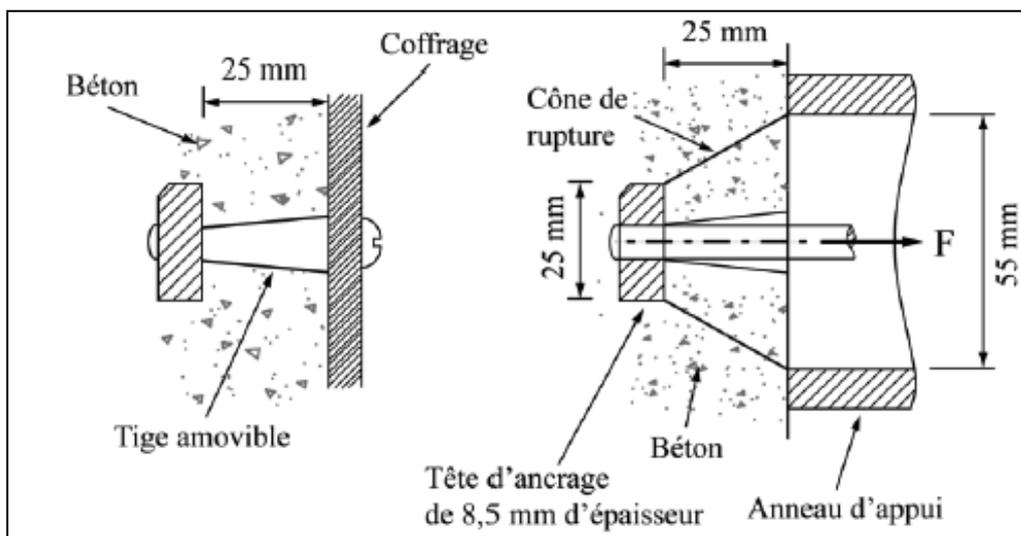


Fig III.3. Essai pull-out noyé [selon Bungey et Soutsos, 2001]

- L'essai pull-out foré « Capo-test » s'apparente à celui noyé, à la différence qu'il est réalisé sur un ouvrage en béton existant. La même surface de béton est sollicitée en insérant une tige d'acier dans un forage de 18,3 mm de diamètre. Toutefois, afin de confiner le béton, une rainure de 25 mm de diamètre est réalisée pour permettre l'expansion d'un anneau introduit sur la tige d'acier. L'expansion de l'anneau est réalisée par l'application d'un couple de torsion et assure le confinement du béton. La figure III.4 illustre cet essai.

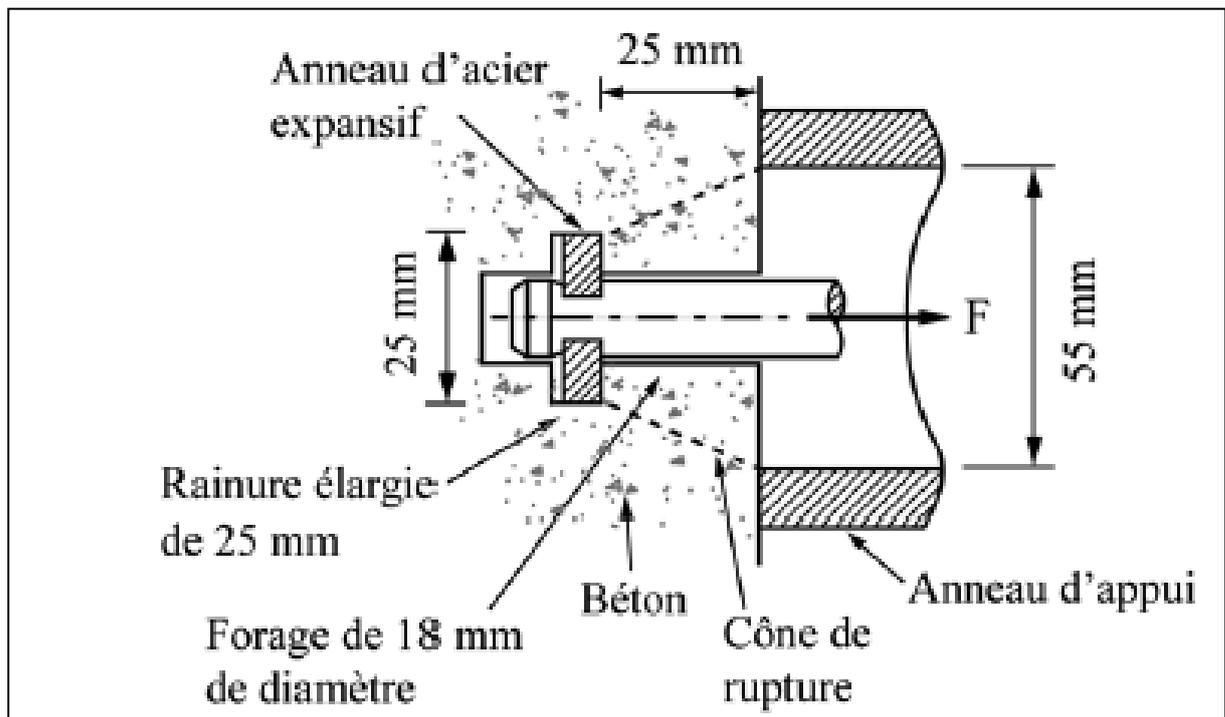


Fig.III.4. Essai pull-out foré [selon Bungey et Soutsos, 2001]

- L'essai « Internal fracture » permet également d'évaluer le béton durci par l'entremise d'un ancrage expansif inséré à une profondeur de 20 mm, tel que représenté sur la figure 2.4 selon la norme britannique BS 1881. Il présente l'avantage d'être réalisé rapidement et l'équipement nécessaire est peu coûteux. Toutefois, selon Bungey et Soutsos [2001], les résultats obtenus avec cet essai sont très variables.

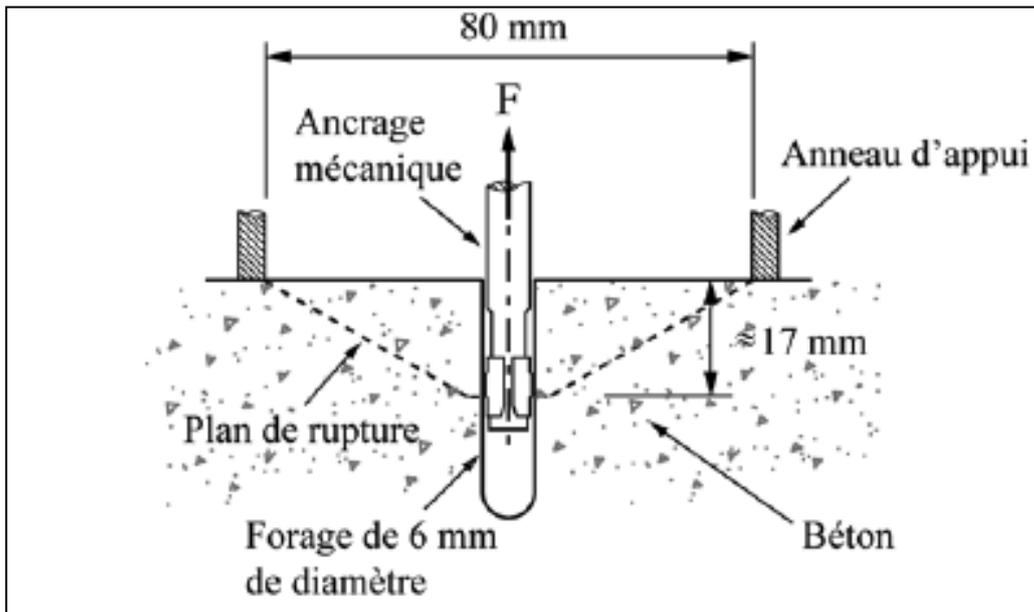


Fig.III.5. Internal fracture [selon Bungey et Soutsos, 2001]

### 1.1.3 Essai au marteau Schmidt (scléromètre) :

L'essai au marteau Schmidt, ou essai au scléromètre, est également un essai qui permet d'évaluer la résistance du béton in situ. 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 potentielle fixe d'énergie 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. La figure III.6 permet de visualiser cet appareil.



Fig.III.6. 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.

## 1.2 Évaluation de la rugosité de surface :

Dans le domaine de la réparation des structures, le seul outil recommandé et régulièrement utilisé afin de déterminer la qualité d'une surface préparée est celui produit par « l'International Concrete Repair Institute (ICRI) ». Il s'agit de déterminer à quel modèle de profils de surface, numérotés de 1 à 9 dans l'ordre croissant de la rugosité, correspond la surface. Ces profils sont présentés à la figure III.7.

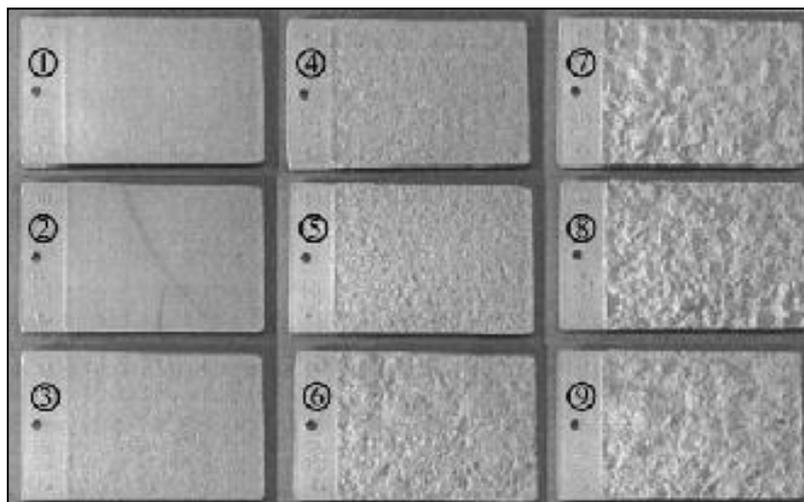


Fig.III.7. Modèle des profils de surface de ICRI [Galecki et coll., 2001]

En pratique, il n'est pas toujours facile de déterminer à quel profil correspond une surface car la perception des formes de l'œil humain a ses limites. Il est donc préférable de recourir à des méthodes plus systématiques et plus objectives et qui permettent de caractériser, de manière quantitative, la rugosité d'une surface sans l'intervention du jugement humain. Cette section présente différentes méthodes qui caractérisent de manière quantitative la rugosité d'une surface.

### 1.2.1 Tache de sable :

L'essai de la tache de sable consiste à étendre uniformément un volume fixe de sable normalisé sur la surface à évaluer, formant ainsi une tache de sable. Dans le projet de la norme européenne [CEN TC104, 1992], la rugosité des surfaces est classée selon l'indice de rugosité de surface (SRI), qui est obtenu en évaluant le diamètre moyen couvert par le sable. Plus le SRI est élevé, plus la rugosité de surface est faible. Un SRI inférieur à 200 mm représente une surface rugueuse, alors qu'un SRI supérieur à 250 mm indique une faible rugosité. Réalisé selon la méthode du Centre de Recherches Routières [1969] de Bruxelles, la rugosité est obtenue en calculant le quotient du volume de sable par rapport à la surface occupée par celui-ci. La rugosité est alors représentée par le paramètre H, soit la hauteur moyenne de nivellement. L'essai de la tache de sable ne permet pas de déterminer des paramètres qui offrent une représentation 2D ou 3D de la rugosité. Des méthodes plus élaborées et plus rigoureuses ont alors été développées.

### 1.2.2 Peigne articulé :

Silfwerbrand a mis au point une méthode qui lui a permis de distinguer les profils de surface engendrés par différentes préparations de surface au niveau macroscopique. Il s'agit d'un peigne articulé, composé d'aiguilles régulièrement espacées d'une valeur  $\Delta$ , à partir duquel le profil moyen d'une surface peut être représenté en déterminant deux paramètres de rugosité. Il y a la longueur d'onde ( $\lambda$ ), soit la distance moyenne entre deux irrégularités, et l'amplitude moyenne double ( $2a$ ), qui est en fait la moyenne des hauteurs entre les pics et les creux successifs sur la longueur considérée.

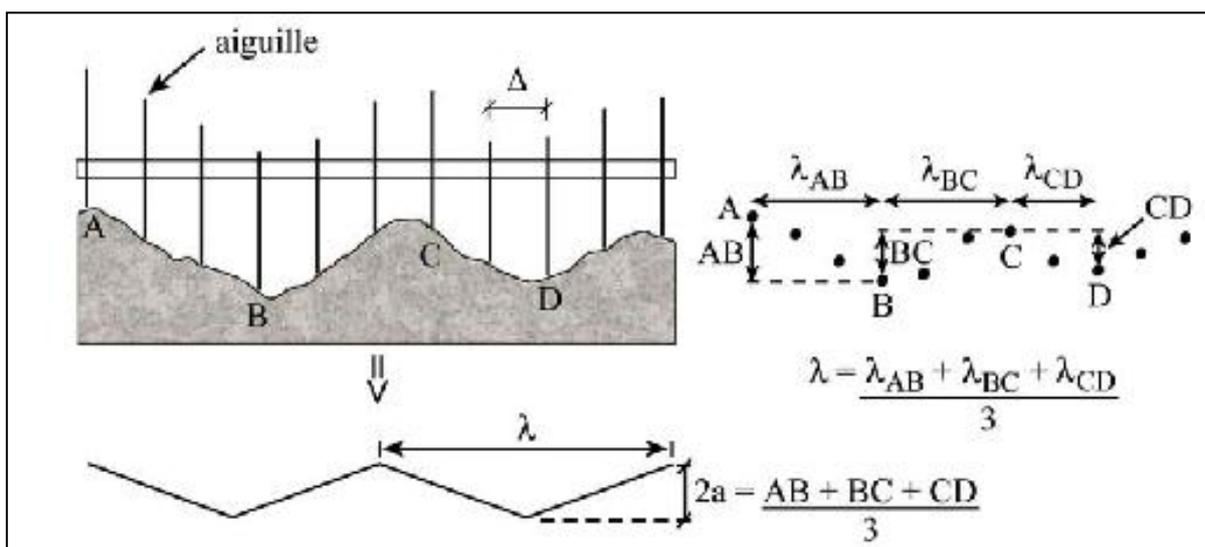


Fig.III.8. Peigne articulé [Silfwerbrand, 2000]

Abu-Tair et coll. [2000] ont également utilisé cette technique, mais avec des aiguilles plus petites et plus rapprochées. De plus, ils ont proposé un paramètre de rugosité, appelé «gradient de rugosité (R.G.) », qui représente la moyenne arithmétique des amplitudes moyennes doubles (Da). La figure 2.8 présente les équations utilisées afin d'évaluer les paramètres Da et R.G.

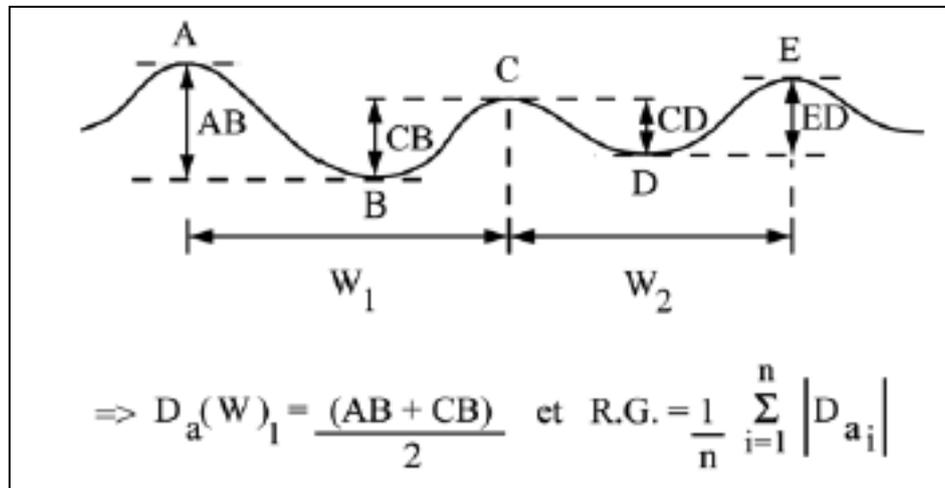


Fig.III.9. Évaluation des paramètres Da et R.G. [selon Abu-Tair et coll., 2000]

### 1.2.3 Profil mètre d'état de surface :

L'appareil est caractérisé par une aiguille se déplaçant à une vitesse constante sur la surface et dont le déplacement vertical permet l'enregistrement du profil. Il est également constitué d'un conditionneur/amplificateur, d'une unité mécanique d'avancement, d'un ordinateur et, selon le cas, d'enregistreurs (imprimantes, tables traçantes, etc.). La figure III.10 permet de visualiser l'appareil.

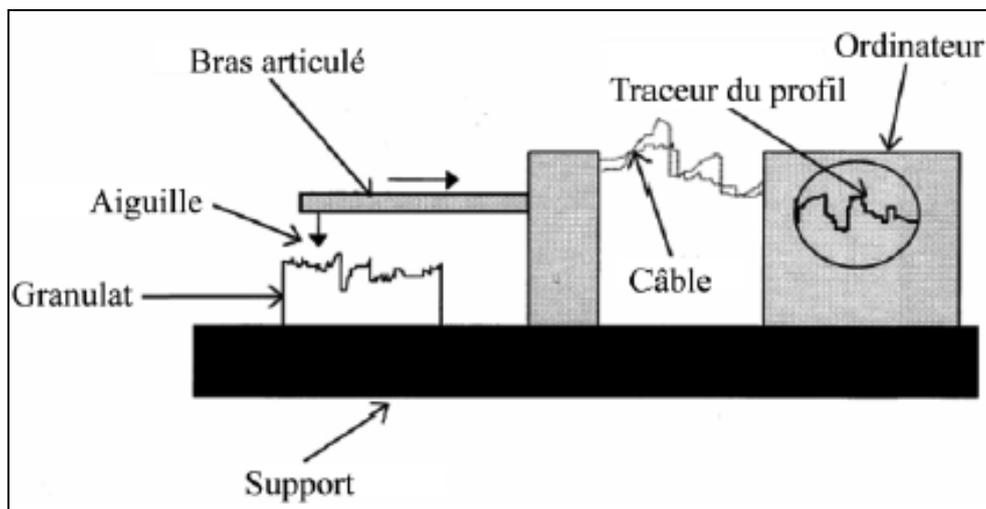


Fig.III.10. Profil mètre d'état de surface à contact [selon Tasong et coll., 1998]

Malgré une précision verticale pouvant aller jusqu'à  $10\ \mu\text{m}$ , le profil mètre d'état de surface présente plusieurs inconvénients. Par exemple, l'appareil utilisé par Couard [1999] ne permet pas d'enregistrer des amplitudes dépassant  $1\ \text{mm}$ . Les observations avec ce type d'appareil se limitent donc à des surfaces polies ou légèrement sablées. De plus, le temps nécessaire afin d'analyser une surface est directement relié au pas de mesure. Une augmentation du pas de mesure entraînera une réduction du temps d'analyse, mais la précision de cette analyse s'en trouvera affectée.

#### 1.2.4 Triangulation laser :

La triangulation laser consiste à projeter sur la surface de l'objet un faisceau (ou rayon) laser. La ligne de contact du faisceau avec la surface est captée par une caméra à dispositif de transfert de charge (DTC). Le déplacement de l'objet permet d'obtenir un profil de la surface dont la profondeur réelle est obtenue en évaluant la distance entre chaque point de contact du faisceau avec la surface et le plan de référence. Wu et coll. [2000] ont quantifié les surfaces de rupture de matériaux cimentaires en établissant deux paramètres de caractérisation, soient  $D$  et  $R_s$ , qui représentent respectivement la dimension fractale et l'indice de rugosité d'une surface. La précision de cette méthode est fonction de la largeur du faisceau laser et de la résolution de la caméra.

Maerz et coll. [2001] ont également fait appel à cette méthode afin de pouvoir contrôler la rugosité des surfaces et assurer un lien résistant et durable des laminés de polymères renforcés de fibres. Ils ont développé un appareil portable permettant des mesures tant en laboratoire que sur chantier et faisant appel au principe de projection d'ombre, l'image projetée étant composée de bandes rouges espacées. La rugosité de la surface est alors caractérisée par un paramètre  $i_A$  semblable au paramètre  $R_a$  utilisé par Courard [1999], soit l'écart arithmétique moyen du profil.

#### 1.2.5 Moiré de projection :

Le moiré de projection est une méthode optique dont le principe général consiste à projeter un réseau de franges (alternance de bandes ombragées et claires) sur la surface à caractériser. Lorsque le réseau de franges rencontre la surface, il se déforme et l'image est alors captée par une caméra DTC. La géométrie de la surface est obtenue par le traitement des images numérisées. La figure III.11 permet de visualiser le principe de cette méthode de caractérisation.

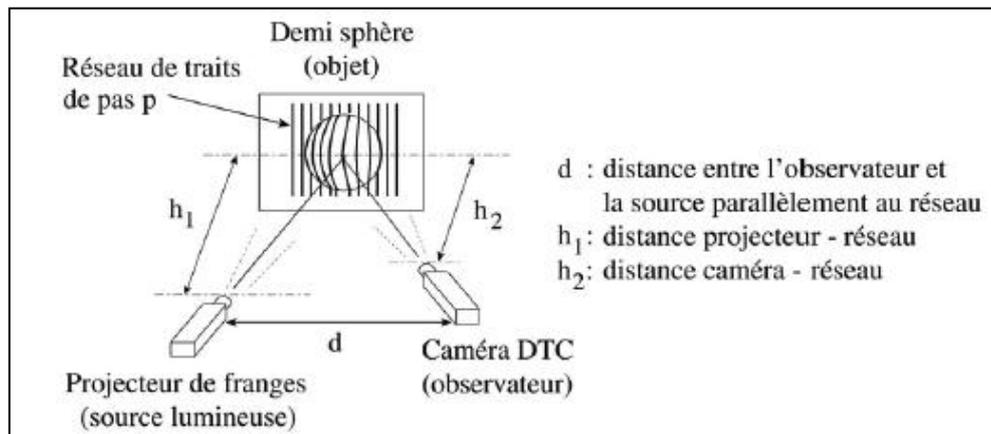


Fig.III.11 Moiré de projection [selon Perez, 2005; Aubouin et coll., 2001]

La précision des mesures est grandement améliorée lorsque la procédure du décalage de phase est utilisée. Elle permet l'analyse du réseau de franges en transformant celui-ci en un champ de phases  $\varphi$  dont les images (au moins trois) sont déphasées les unes par rapport aux autres. La précision obtenue avec cette technique est d'environ  $10 \mu\text{m}$  dans des conditions usuelles d'utilisation [Aubouin et coll., 2001]. La méthode du moiré de projection permet d'évaluer des surfaces présentant des amplitudes dépassant le millimètre, qui est la limite du profil mètre utilisé par Courard [1999].

Elles représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées soit aux structures de bâtiments, soit dans ouvrages d'Art ou de Génie civil en général.

Comme leur nom l'indique, il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions. Ces essais sont rapides et légers à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.

Ces essais sont basés sur les techniques de mesures suivantes :

### 1.3 Le radar géophysique et le pachomètre :

Ce sont deux méthodes complémentaires mises en œuvre pour reconstituer le plan de ferrailage d'une structure en béton armé, ou détecter et positionner avec précision un fer ou tout autre élément métallique, par exemple dans le cadre d'un projet de restructuration d'un pont en béton armé de contrôle après travaux ou en cours de chantier, ou encore préalablement à un sondage. L'application de ces méthodes nécessite néanmoins un accès direct à la surface de l'ouvrage ausculté.

La précision sur le positionnement en profondeur est meilleure si l'analyse des radargrammes s'appuie sur un étalonnage par un contrôle destructif ponctuel et léger, de

même que pour la mesure du diamètre des armatures. Ces contrôles destructifs légers (perforateur) ainsi que le rebouchage du trou sont réalisés soigneusement et directement à l'issue des mesures.

La méthodologie d'application du radar géophysique est la suivante :

Transducteurs	Profondeur d'investigation (typique)	Domaine d'application préférentiel
Très haute fréquence (LERM )	2 à 50 cm	Structures et revêtements (béton, maçonneries) ; Contrôle d'épaisseur Détection de cibles (armatures...) Détection d'anomalies (vides...)
Haute fréquence (GSSI)	5 à 100 cm	Structures, ouvrages d'art, chaussées, pistes, etc... Contrôle d'épaisseur, suivi d'interfaces ; Détection d'anomalies Positionnement de réseaux
Bi-fréquence (exclusivité LERM)	3 cm à 3 m	Structures et revêtement, ouvrages d'art, tunnels, chaussées, pistes, etc... Contrôle d'épaisseur, suivi d'interfaces Détection d'anomalies, structures enfouies Positionnement de réseaux
Basse fréquence (LERM)	0,5 à 10 m	Reconnaisances géologiques (zones hétérogènes, fractures, karsts), suivi d'horizons, recherche de structures enfouies
Très basse fréquence	5 à 30 m	Reconnaisances géologiques
Sondes forage Basse et moyenne fréquence (LERM )	0,2 à 8 m	Reconnaisances géologiques et géotechniques (zones hétérogènes, fractures, karsts, épaisseurs de structures béton)

Tab III.1. La méthodologie d'application du radar géophysique



Fig III.12. L'utilisation du radar géophysique.

Concernant le pachomètre :

- Les principes de la méthode :

Plusieurs principes sont utilisés, tous sont basés sur la mesure des perturbations créées par la présence d'un objet métallique placé dans un champ électromagnétique (courant alternatif sinusoïdal ou courant pulsé).

Lorsque le capteur est situé à l'aplomb d'une armature, le pachomètre analyse le signal reçu et calcule, selon le type de matériel utilisé, l'enrobage et/ou le diamètre de l'acier.

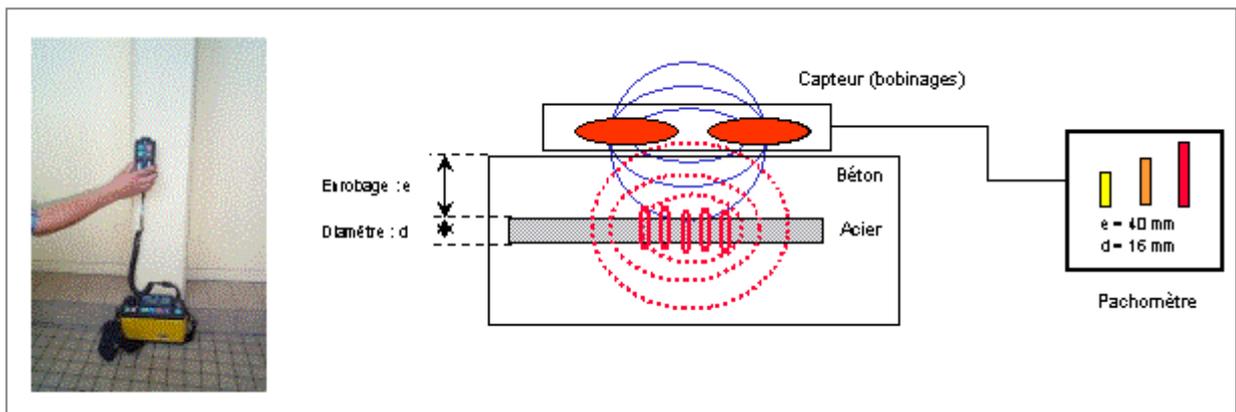


Fig III.13. L'utilisation du pachomètre.

- Les limites de la méthode:
  - La profondeur d'investigation est de 10 à 20 cm au maximum.
  - Seul le premier réseau d'armatures est détecté.
  - La résolution (plus petit espacement mesurable entre les armatures) est sensiblement égale à l'enrobage
  - Le diamètre des armatures n'est mesurable avec précision que si les aciers sont suffisamment espacés.

Le pachomètre est très souvent utilisé en complément du radar.

## 1.4 La mesure de Potentiel d'Électrodes :

La mesure de Potentiel d'Électrode consiste à mesurer le champ de potentiel électrique créé par la corrosion des aciers dans le béton

La cartographie des zones auscultées est faite par traitement informatique des mesures. Dans le cadre d'un diagnostic complet de l'état de corrosion des aciers d'un ouvrage, par exemple dans le cadre d'une étude de durabilité, des mesures de la vitesse de corrosion permettent de suivre ou d'anticiper l'évolution du phénomène de corrosion dans le temps, par calcul de la perte de section des aciers par unité de temps.

- Le principe de la méthode :
  - La corrosion active des aciers s'accompagne de phénomènes électrochimiques comparables à ceux des piles électriques (métal baignant dans un électrolite). La corrosion produit donc un courant électrique mesurable.
  - Les phénomènes d'enrouillement apparaissent lorsque certaines conditions chimiques et/ou physiques sont réunies dans le béton (carbonatation, présence de chlorures, humidité, apport d'oxygène, fissuration etc...).
  - Les différences de potentiel provoquées par ces phénomènes varient donc en fonction de nombreux paramètres et ce type de mesure ne donne qu'une probabilité plus ou moins forte de corrosion dite "active".
  
- La mise en œuvre :
  - Le champ de potentiel est mesuré entre le réseau d'armatures et la surface du béton à l'aide d'un millivoltmètre sensible et d'une électrode de référence impolarisable (cuivre sulfate de cuivre par exemple).
  - La prise de mesures est réalisée point par point ou en continu (roue-électrode) selon un maillage régulier ; les valeurs de potentiel, déjà interprétables sur site, sont mémorisées pour élaborer des cartes d'anomalies (cartes d'isopotential).

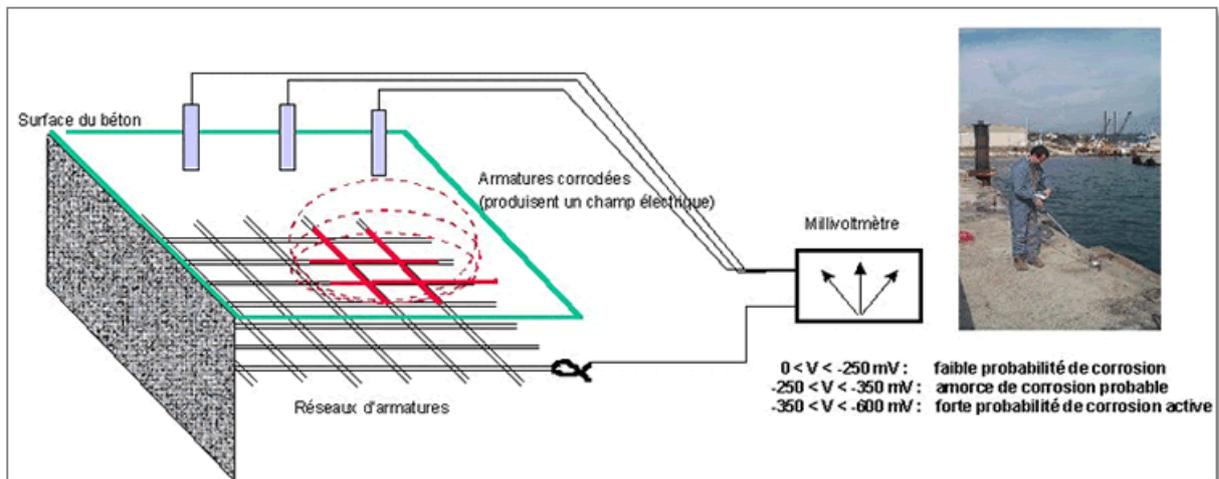


Fig III.14. La mesure de Potentiel d'Électrodes

### 1.5 La mesure de la vitesse de corrosion des armatures : (méthode par impulsions galvano-statiques)

Les méthodes traditionnelles pour évaluer la corrosion des armatures sont basées sur des techniques électrochimiques telles que la mesure du potentiel spontané pour détecter les zones de corrosion active et la mesure de la résistance de polarisation pour estimer la vitesse de corrosion .

Récemment mise au point, une nouvelle technique non destructive de polarisation, dite méthode par impulsions galvanostatiques, permet la réalisation rapide de mesures de vitesse de corrosion (10 à 30 secondes par mesure).

Cette méthode est basée sur l'analyse de la courbe des variations de potentiel des aciers sous l'influence d'impulsions électriques de faible intensité, émises dans le béton dans un volume déterminé.

La mesure simultanée du potentiel d'électrode, de la résistance électrique du béton et des variations de potentiel provoqué par l'injection de ces impulsions permet, par calcul, de déterminer la résistance de polarisation. Cette résistance de polarisation peut être convertie en vitesse de corrosion par une relation déduite des lois de Faraday.

La vitesse de corrosion, exprimée en micromètres par an, traduit la perte de section des aciers soumis à la corrosion et, par conséquent, permet d'aborder les questions de durabilité d'une structure.

L'appareillage utilisé au LERM est le GALVAPULSE de la Société Germann-Instrument.

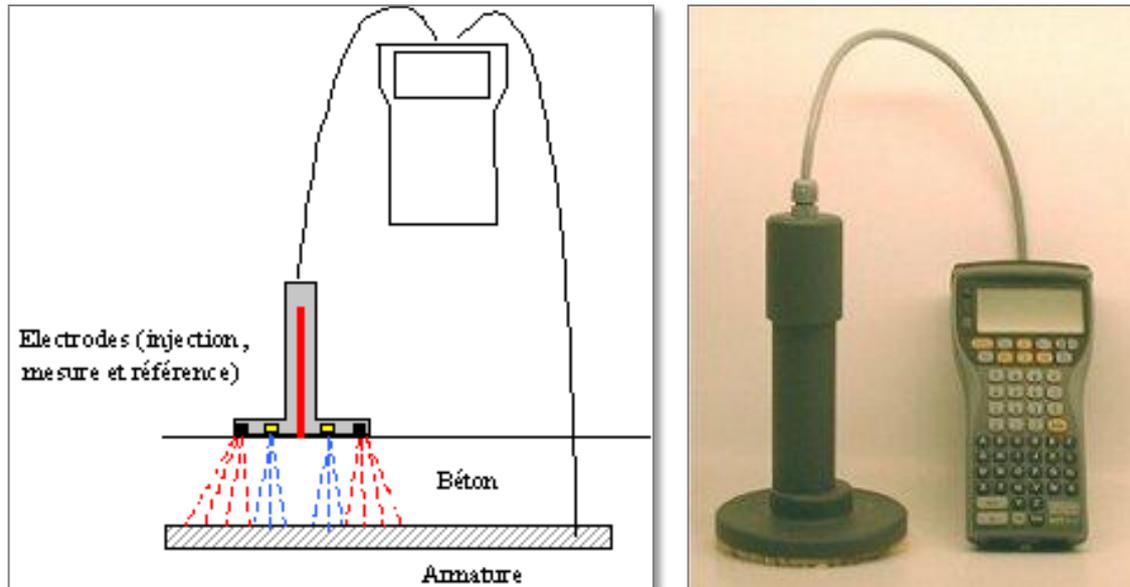


Fig III.15. Méthode par impulsions galvano-statiques

### 1.6 Les mesures d'humidité par capacimètre électrique :

Pour localiser des zones humides en surface de parements, sols, etc.

Le principe de la méthode :

- Le principe est basé sur la mesure de la capacité électrique (caractéristique électronique d'un condensateur dans lequel l'isolant est remplacé par le matériau ausculté).
- La capacité dépend de la constante diélectrique du matériau or ce paramètre varie beaucoup en fonction teneur en eau.
- En revanche, cette mesure ne dépend pas de la résistivité électrique ; elle n'est donc pas influencée par la présence éventuelle de sels
- La conversion des valeurs de capacité en teneur en eau est obtenue par calcul, après étalonnage (par étuvage) sur des prélèvements bien ciblés.

La mise en œuvre :

- La prise de mesures en surface est réalisée point par point selon un maillage régulier. Les premiers résultats permettent de repérer sur site les variations relatives de teneur en eau d'un point à un autre, entre 0 et 5 cm de profondeur environ
- Une sonde spécifique a été mise au point pour réaliser les mesures jusqu'à plus de 50 cm de profondeur dans des perforations de petit diamètre.

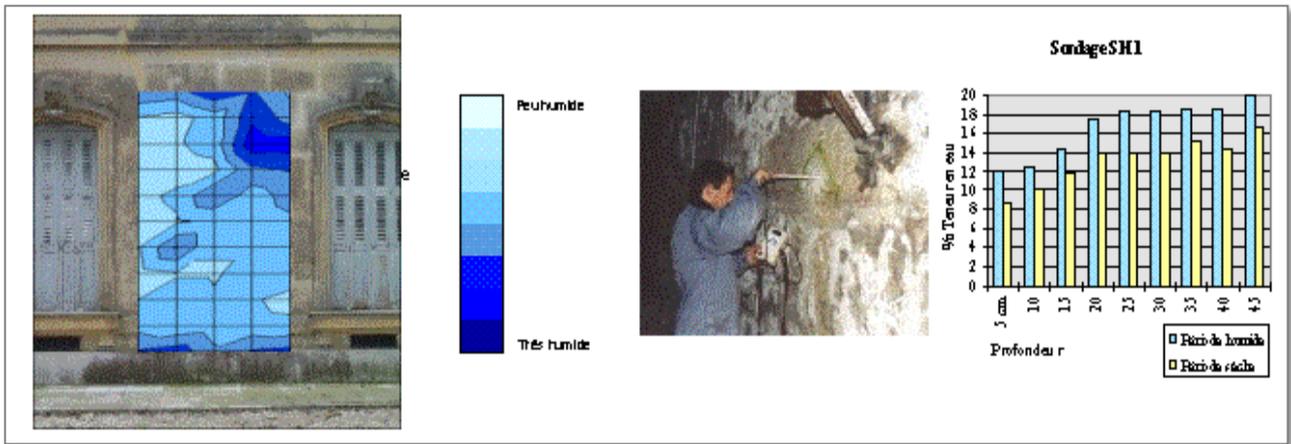


Fig III.16. Les mesures d'humidité par capacimétrie électrique.

CONCLUSION :

La détermination des causes des dégradations du béton est essentielle pour réussir les interventions en termes de qualité, durabilité et rentabilité. Le diagnostic des ouvrages en béton armé est une étape primordiale dans l'opération du renforcement qui permet d'améliorer le choix des méthodes et des produits les plus aptes à combler les déficiences causées par l'endommagement sur l'ouvrage.

**Chapitre 04**

# **Méthode de réparation**

## 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 (auxquelles s'ajoute, dans les cas extrêmes, la solution de la démolition reconstruction) :

- 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.

L'ingénieur peut cependant aussi faire appel à des techniques de réfection modernes au moyen de matériaux composites qui sont 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 parties de l'art de construire et, en particulier, de la réparation et le renforcement des constructions.

On peut situer les principales méthodes de réparation ou de renforcement des ponts en béton [5]:

### 1. Traitements de surface :

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

#### 1.1 Ragréages :

Avant de procéder à un ragréage, il est nécessaire de préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydrodé-molition, le décapage au marteau pneumatique ou, dans les cas extrêmes, au brise-béton, le bouchardage, le burinage et le piquage au petit marteau pneumatique. Elles sont toutes traumatisantes pour le support à des degrés divers et doivent donc être sélectionnées avec soin en fonction des objectifs recherchés [15].

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

En présence d'aciers apparents corrodés, il est indispensable de les décapier (Par

sablage ou grenailage), puis de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire de les remplacer dans les cas extrêmes. Il est essentiel de dégager les armatures non seulement sur leur face apparente mais sur tout leur pourtour de façon à éliminer toute la partie dépassivée du béton.

Il existe sur le marché une grande quantité de produits de ragréage qui peuvent être classés en trois catégories principales [15]:

- Les produits à base de liants hydrauliques ;
- Les produits à base de résines de synthèse ;
- Les produits mixtes.

## 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 [18].

Les fissures sont caractérisées par [6]:

- 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 de facteurs extérieurs tels que 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.

### 1.2.1 Les deux grandes catégories de traitements [24]:

- **Les traitements de surface**, sont des traitements 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. Dans les zones soumises au gel, ce type de traitement peut en atténuer très efficacement les effets destructeurs. 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 ;
- **Le pontage**, qui rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielle d'un film généralement armé et adhérent (épaisseur 3 mm) de part et d'autre des lèvres de la fracture. Le pontage s'insère le plus souvent dans un complexe de revêtement général ;
- **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. Il adhère à la surface et, en général, pénètre sur quelques millimètres dans les microfissures.
- **Le traitement dans la masse** : 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.

### 1.2.2 Les produits pour injection :

Deux grandes familles de produits existent, utilisables en traitement de surface comme en traitement dans la masse selon leur origine (minérale ou organique).

#### 1.2.2.1 Les produits minéraux :

Sont des produits compatibles avec les milieux humides. Pendant la mise en œuvre sur le site, ils se présentent sous forme de solution ou de suspension aqueuse. Il s'agit principalement de coulis à base de ciments spéciaux [22].

#### 1.2.2.2 Les produits organiques :

Sont des produits synthétiques à macromolécules formant une chaîne réticulaire : ce sont principalement des résines époxydiques, systèmes bicomposants thermodurcissables, modifiables par des charges inertes.

## 2 Protection du béton et des armatures :

### 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 plus grande durabilité de la réparation [21]. On distingue :

- Les hydrofuges de surface ;
- Les minéralisateurs ;
- Les peintures ;
- Les revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère ;
- Les revêtements plastiques épais.

#### 2.1.1 Hydrofuges de surface :

Les hydrofuges de surface, encore appelés produits d'imprégnation, sont destinés à rendre la surface du béton imperméable à l'eau tout en assurant une perméabilité à la vapeur d'eau [5].

#### 2.1.2 Minéralisateurs :

Ce sont des produits d'imprégnation qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de "minéralisation du support". Les plus couramment utilisés sont les silicates alcalins qui sont parfois associés à des molécules organiques [5].

#### 2.1.3 Peinture :

Les principales familles de peintures utilisées en génie civil sont [5]:

- Les copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse ;
- Les copolymères acryliques en phase solvant ;
- Les résines époxydiques ;
- Les résines polyuréthanes ;
- Les ciments-latex bicomposants.

Même si elles assurent une légère protection, les peintures ont essentiellement un rôle esthétique. Les peintures à base de résines thermodurcissables (époxydiques, polyuréthanes) présentent en général de meilleures performances que les peintures à base de résines thermoplastiques (acryliques et vinyliques).

### 2.1.4 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 [18].

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

### 2.1.5 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. Le liant est souvent une résine acrylique en émulsion, Jusqu'à présent, leur intérêt n'a pas été prouvé dans le domaine de la protection des ponts.

## 2.2 Protection cathodique des armatures :

La protection cathodique est une technique permettant de stopper un processus de corrosion. Elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient importants. Couramment utilisée pour protéger les matériaux métalliques immergés ou enterrés.

## 3 Ajout de forces ou de déformations :

### 3.1 Généralités :

La précontrainte permet d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définis, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est qualifiée d'additionnelle lorsqu'on l'applique à des ouvrages existants pour augmenter leur capacité portante ou prolonger leur durée d'exploitation.

La précontrainte additionnelle est, en général, extérieure. Ce n'est que pour des précontraintes très courtes (étriers actifs) ou pour des précontraintes prévues dès le projet pour être mises en place dans des réservations spécifiques que la précontrainte additionnelle peut être placée à l'intérieur même du béton. En règle générale, son application suppose un traitement préalable des fissures par injection car elle ne peut, à elle seule, refermer les fissures.

Il est rare que l'on cherche à modifier le schéma statique initial théorique d'un pont en le renforçant ou en le réparant. Cela s'est rencontré dans le cas de tabliers à travées indépendantes, qui ont été rendus continus en supprimant les joints de dilatation (continuité géométrique) et en appliquant une précontrainte additionnelle sur toute leur longueur (continuité mécanique).

Dans tous les cas, la précontrainte additionnelle doit être démontable pour pouvoir être facilement remplacée en cas de défaillance.

### 3.2 Renforcement des ouvrages en flexion [5]:

La plupart des renforcements par précontrainte de tabliers de ponts visent à augmenter leur résistance en flexion. Le tracé des armatures de précontrainte additionnelles peut être rectiligne ou polygonal. Un câblage rectiligne est facile à mettre en œuvre et les pertes d'effort par frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrage (donc très faibles). Il n'est véritablement efficace que dans le cas d'un tablier de hauteur variable puisqu'il bénéficie de l'effet d'arc dû à la courbure de la fibre moyenne. Il est nettement moins efficace dans un tablier de hauteur constante lorsqu'il s'agit de renforcer la résistance en flexion à la fois sur appuis et en travée.

Un tracé polygonal permet de mieux optimiser l'efficacité de la précontrainte tant vis-à-vis de la flexion que vis-à-vis de l'effort tranchant. Les pertes par frottement restent modérées.

### 3.3 Renforcement des ouvrages vis-à-vis de l'effort tranchant :

Comme on l'a dit précédemment, 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  $10^\circ$  à  $15^\circ$  [5].

Lorsque le problème majeur est celui de la résistance à l'effort tranchant, et si l'inclinaison de câbles de précontrainte additionnelle n'est pas possible ou suffisante pour le traiter, on recourt à l'emploi d'étriers actifs, généralement verticaux et constitués de fils, de barres ou de monotorons.

### 3.4 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 ferrillés, 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 [8].

### 3.5 Protection de la précontrainte additionnelle [17]:

Les armatures de précontrainte les plus utilisées sont les torons pour le renfort longitudinal et les barres pour le serrage et les étriers. Dans certains cas, lorsque les efforts à appliquer et la longueur des éléments sont faibles, il peut être intéressant d'utiliser des boulons à serrage contrôlé. Certains projets peuvent spécifier l'emploi d'armatures inoxydables ou galvanisées, ou même des armatures revêtues en usine d'une protection par résine époxydique.

L'injection des câbles au coulis de ciment est utilisée pour la précontrainte extérieure, qu'elle soit disposée en précontrainte initiale ou en précontrainte de réparation. Les câbles étant en général de grande longueur, il est préférable d'injecter des coulis du type retardé, qui permettent de combler des volumes importants sans redouter un épaissement prématuré du coulis par début de prise du ciment. Pour permettre le démontage ultérieur de câbles injectés au coulis, il convient de prévoir un double gainage dans les zones de déviation.

## 4 Ajout de matière :

### 4.1 Béton projeté [12]:

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.

### 4.1.1 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.

### 4.1.2 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 [4].
- 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 utilise généralement des gros granulats de faible diamètre (1 cm).
- 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.

### 4.1.3 Les deux principaux types de projections :

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

#### 4.1.3.1 Projection par voie sèche (avec ou sans prémouillage) [20]:

Avec cette technique, le mélange des constituants (à l'exception de l'eau) est introduit dans la machine à projeter, puis propulsé dans une canalisation par un flux d'air comprimé. Dans la projection sans prémouillage, l'eau est introduite au droit de la lance de projection, tandis qu'avec prémouillage l'eau est ajoutée dans la conduite deux à trois mètres avant la lance, ce qui a pour effet de diminuer l'émission de poussières.

**Avantages :**

- Les boyaux sont plus légers ;
- On peut interrompre et redémarrer les travaux plus rapidement car il n'est pas nécessaire de vider les boyaux pendant les arrêts ;
- Pas besoin d'une usine à béton à proximité ;
- Permet de fabriquer des bétons avec des propriétés mécaniques plus élevées (E/C plus faible).

**Inconvénients :**

- Taux d'application plus faible ;
- Plus de pertes (jusqu'à 20%) ;
- Plus de rebond, Plus de bruit et de poussière ;
- Béton plus hétérogène ;
- Contrôle du rapport E/C plus difficile.

**4.1.3.2 Projection par voie mouillée [20]:**

Le mélange de tous les constituants du béton, y compris l'eau, est introduit dans la machine à projeter. Le transport est effectué dans une canalisation, soit par un flux d'air comprimé pour la voie mouillée à flux dilué, soit par pompage pour la voie mouillée à flux dense. Dans les deux cas, une injection d'air comprimé à la lance de projection est nécessaire pour accélérer la vitesse de projection. Le béton peut être fabriqué dans une centrale à béton de chantier ou une centrale de béton prêt à l'emploi.

**Avantage :**

- Taux d'application plus élevé ;
- Moins de perte (5%) ;
- Moins de rebond, Moins de poussière ;
- Meilleur contrôle du rapport E/C ;
- Meilleure homogénéité du béton en place.

**Inconvénients :**

- Les boyaux plus lourds ;
- Besoin d'une usine de béton à proximité ;
- Il y a toujours une certaine proportion de matériaux qui rebondissent lors de la projection.

Alors, il convient donc de choisir le mode de projection à utiliser suivant la nature des travaux à réaliser. Actuellement, l'emploi de la voie sèche est fortement recommandé pour la réparation des ouvrages d'art.

#### 4.1.4 Formulation du béton :

La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons spéciaux mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté, par exemple :

- Les bétons à base de ciment fondu ou de ciment prompt ;
- Les bétons légers à base de granulats légers (argile ou schiste expansé) ;
- Les bétons à base de fibres métalliques, de verre ou de polypropylène ;
- Les bétons avec incorporation de fumée de silice.

Concernant le béton projeté utilisé en réparation ou renforcement d'ouvrages d'art, la dimension maximale des granulats se trouve être limitée par la nécessité de réaliser la mise en place du béton projeté en plusieurs passes d'épaisseur 5 à 7 cm, sans recours à l'emploi d'accélérateur de prise.

#### 4.1.5 Mise en œuvre du béton projeté :

Le processus de mise en place du béton est différent selon le type de voie utilisé.

##### 4.1.5.1 En voie sèche :

Les divers éléments sortent de la lance avec une vitesse très élevée (de l'ordre de 100 m/s), et les gravillons qui arrivent avec une forte énergie sur le support rebondissent, alors que les grains de ciment et les gouttelettes d'eau forment un film de pâte pure qui adhère au support et qui accueille des grains de sable de plus en plus gros. La couche de mortier ainsi formée permet ensuite aux gravillons de s'insérer ; le rebond des gravillons diminue et la forte énergie cinétique des gravillons qui viennent frapper le béton en place assure son compactage et procure à ce matériau de meilleurs performances mécaniques que celles du béton mis en œuvre par voie mouillée. Ce mécanisme d'adhésion rend inutile toute interposition d'une résine d'accrochage. Selon cette méthode, il est possible de transporter le béton sur des distances importantes : plus de 500 m à l'horizontale, et plus de 100 m à la verticale [5].

La voie sèche, en raison d'une résistance élevée, d'une bonne adhérence au support et d'une faible fissuration du béton projeté mis en œuvre, est donc bien adaptée à la réparation du béton et aux renforcements structuraux de ponts en béton ou en maçonnerie.

##### 4.1.5.2 4.1.5.2. Pour la voie mouillée :

Les rebonds de gravillons sont beaucoup plus faibles qu'en voie sèche, car ceux-ci arrivent sur le support en étant déjà enrobés par du liant, ce qui facilite leur accrochage. La projection d'un matériau mouillé évite la production de poussières qui constitue un inconvénient de la voie sèche. Dans le cas de la voie mouillée à flux

dense, la vitesse de sortie du béton à la lance est relativement faible (de l'ordre de 1 m/s), et les caractéristiques mécaniques du matériau s'en trouvent diminuées par comparaison avec la voie sèche. La voie mouillée à flux dilué constitue une solution intermédiaire de mise en œuvre, qui fournit un béton projeté dont les caractéristiques mécaniques se rapprochent davantage de celles du béton projeté par voie sèche. La voie mouillée est donc employée préférentiellement dans le domaine des tunnels, de la projection sur terrain (talus, fouilles, berges...) et de la réparation des maçonneries (garnissage de vides, rejointoiements...) [5].

#### 4.1.6 Précautions particulières :

Certaines précautions sont nécessaires pour obtenir une réparation durable en béton projeté [7].

- La compétence de l'équipe de mise en place est essentielle (pré qualification, inspecteurs expérimentés);
- Le matériau doit être le plus homogène possible de manière à minimiser les rebonds (bon enrobage des granulats);
- Il est important de bien mûrir les surfaces réparées pendant au moins 7 jours.
- La profondeur de la zone à réparer doit être la plus constante possible. Les variations brusques de profondeur peuvent diminuer l'adhérence et favoriser les décollements.

### 4.2 Renforcement par collage de tissus composites [1]:

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.

#### 4.2.1 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 de caractéristiques

sans équivalent et de propriétés physiques très étendues [4]:

- 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.

#### 4.2.2 Propriétés du tissu de fibres de carbone :

Le TFC, du type T700, est formé d'une chaîne et d'une trame dont les sections relatives peuvent être modulées à la demande de façon à présenter une résistance anisotrope. Il est livré en rouleaux de largeur standard, soit 150 et 300 mm, prêts à l'emploi. Sa souplesse lui permet de s'appliquer sans difficulté sur des surfaces courbes telles que les colonnes cylindriques par exemple; moyennant un calepinage convenable, il peut même être utilisé sur des surfaces non développables.

D'un transport et d'une manutention faciles (il ne pèse que 800 g par mètre carré), le TFC peut être aisément découpé sur place à la forme désirée ; sa mise en œuvre n'exige qu'un échafaudage léger.

À l'inverse des tôles d'acier, le TFC ne nécessite aucune pression de contact pendant le durcissement de la résine. Sa faible épaisseur (0,8 mm) permet son entraînement en traction par la résine durcie sans flexion parasite notable [1].

#### 4.2.3 Propriétés de la résine de collage :

L'un des avantages du procédé TFC réside aussi dans le fait que la résine est utilisée à double fin ; elle réalise à la fois l'imprégnation du tissu et son collage au support. Il en résulte, d'une part, une plus grande simplicité de mise en œuvre et, d'autre part, un fonctionnement mécanique amélioré, le renfort ne comportant qu'une seule surface de contact au lieu de deux dans le cas du collage d'une plaque rigide.

La résine peut être appliquée sur un support humide ; après mélange des deux composants, sa durée de prise et de durcissement est de quelques heures ; cette durée varie faiblement en fonction de la température. Pendant le durcissement de la résine, il n'est pas nécessaire de maintenir une pression de contact comme dans le cas des plaques rigides.

#### 4.2.4 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. Dans le cas du bois, il est nécessaire de mettre à nu le matériau sain en éliminant par exemple les couches de peinture ou les parties contaminées après un incendie.

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/m<sup>2</sup>. Le TFC, protégé par une feuille de polyéthylène, est ensuite appliqué. Si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes bord à bord. Puis, une couche d'imprégnation de la même résine est mise en place à la spatule à raison de 700 g/m<sup>2</sup> 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 [13].

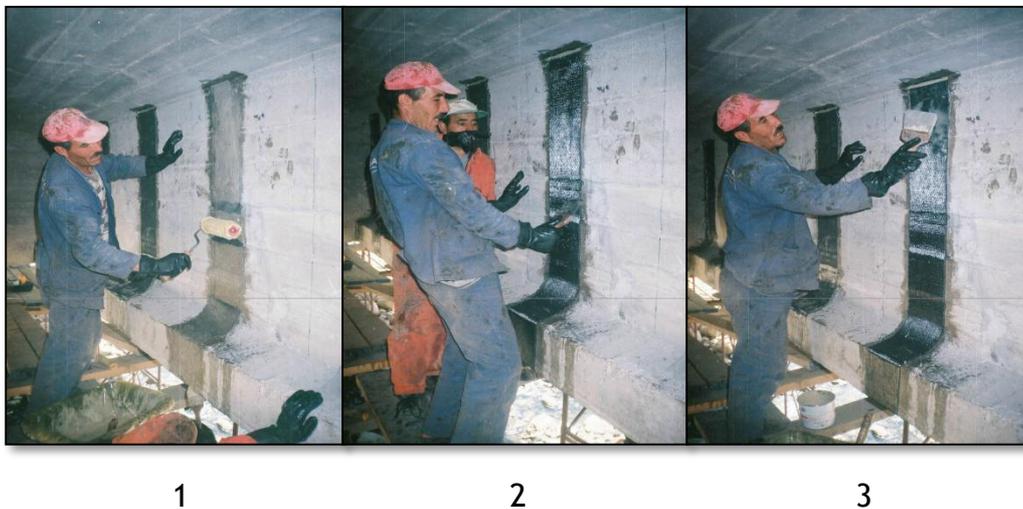


Fig VI.1. Photos montrent le renforcement par le TFC



Fig VI.2. Renforcement d'un pont par le TFC (E.T et M.F)

#### 4.3 Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés :

- La technique des tôles collées a permis 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 (burinage, bouchardage) 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 E 24-3. 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 [20].

- La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée.

- Le primaire d'accrochage est destiné à assurer une bonne adhérence entre la colle et le béton.
- 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.

#### 4.4 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 [22]. 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.

#### 4.5 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 [24].

**Conclusion :**

Malgré la diversité des méthodes de réparation et de renforcement, leur utilisation reste parfois limitée :

- Elles ne sont, parfois, pas adaptées aux ouvrages considérés,
- Elles nécessitent une grande maîtrise technologique pour leur réalisation,
- Elles nécessitent, parfois, un matériel non disponible chez nos entreprises de réalisation.

Donc, le choix d'une méthode dépend de la situation concrète et des objectifs définis pour la réparation. Aussi, il reste encore de nombreux points à éclaircir, par des études théoriques et expérimentales, afin de pouvoir définir la technique judicieuse et le matériau adéquat pour une réparation donnée.

**Chapitre 05**

# **Cas pratiques**

## 1. Introduction :

Dans le cadre de la nouvelle politique de gestion et de réhabilitation du patrimoine national d'ouvrages d'art, La Direction de l'Exploitation et de l'Entretien Routiers du Ministère Algérien des Travaux Publics (D.E.E.R./ M.TP) a initié un programme d'action visant à réhabiliter des ouvrages d'art à travers le territoire national.

La DEER a retenu conjointement avec la BIRD, un lot d'ouvrages d'art stratégiques, composé de 25 ponts à réhabiliter, lesquels présentent de nombreux problèmes pathologiques. Ainsi, un Appel d'Offres a été lancé afin de retenir un Bureau d'Études Techniques (B.E.T.) pour la réalisation de ce projet. Parmi ces ouvrages on a choisi de présenter deux ouvrages : le Pont du Front de mer et le pont de Tafourat .

Pour pouvoir réparer, il faudra d'abord faire une étude d'expertise pour établir d'abord un diagnostic pour ensuite le réparer.

## 2. Objectifs de l'étude

L'étude d'expertise consiste à inspecter et ausculter les ouvrages de façon à pouvoir établir leur.

L'identification exhaustive des 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 (3) phases principales ou trois Missions. Ces missions sont identifiées comme suit :

- **Première Mission :** Inspection détaillée et auscultation des ouvrages;
- **Deuxième Mission :** Diagnostic et rapport final;
- **Troisième Mission :** Dossiers d'Appel d'Offres des travaux de réhabilitation

Les activités principales des trois missions sont établies comme suit :

### ● Première Mission :

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

Cette étude d'expertise doit aboutir à l'identification exhaustive des causes des dégradations et à fournir la solution de correction optimale, tant du point de vue technique qu'économique relative aux problèmes pathologiques identifiés.

### 3. Cas du Pont FRONT DE MER



Fig 5.1 : Pont FRONT DE MER

#### 3.1 Description de l'ouvrage:

L'ouvrage « Front de Mer » est situé sur la Route National RN 11 (point kilométrique 4 + 844), dans la commune de Bab El Oued, à Alger. Cet ouvrage permet de franchir une brèche de 50 mètres de longueur par 10 mètres de profondeur le long du front de mer. L'année de construction du pont est indéterminée.

L'ouvrage, d'une longueur totale de  $\pm 61$  mètres ( $\pm 42$  mètres d'axe en axe), est constitué de quatre travées continues de 10,4 m, appuyées sur deux culées massives en maçonnerie et trois piles en maçonnerie. Ce pont, de type voûte en maçonnerie possède quatre arcs identiques de 8,4 m d'ouverture et de 13,7 m de hauteur. La nature des fondations est inconnue.

Aucun plan et aucun document relatif à la construction ou à la réparation de cet ouvrage n'est disponible. La date de construction de l'ouvrage est inconnue mais, sur la base du type d'ouvrage, elle peut être approximativement établie vers le début du vingtième siècle.

À notre connaissance, il n'y a eu aucune modification importante de la géométrie de l'ouvrage depuis sa construction.

La fonction principale de cet ouvrage est d'assurer la continuité de la route longeant le front de mer qui permet la liaison routière directe entre la banlieue Ouest d'Alger située le long de la côte et le centre. Aujourd'hui, le pont a encore une vocation strictement reliée à des fins routières.

### 3.2 RELEVÉS, AUSCULTATIONS ET ESSAIS RÉALISÉS

Pour cet ouvrage, les relevés, auscultations et essais suivants ont été réalisés :

- **Relevé topographique**: de l'ouvrage afin de pouvoir reconstituer, de concert avec les mesures prises lors de l'inspection, la géométrie de l'ouvrage, de ses approches ainsi que des éléments connexes (murs de soutènement, etc.).
- **Sondages géotechniques** : Cet ouvrage est localisé en bordure de la mer et les culées et piles prennent appui partiellement sur le roc et partiellement dans l'eau. Compte tenu de l'emplacement, il n'est pas possible de réaliser des sondages géotechniques à proximité des culées et piles.

Heureusement, les appuis ne montrent aucun signe de déplacement ou de mouvement de sorte que des sondages géotechniques à proximité des appuis ne sont pas nécessaires. Pour ce qui est des piles prenant appui dans l'eau, la possibilité de minage à leur base peut être plus adéquatement décelée par un examen dans l'eau à la nage que par la réalisation de sondages.

Deux sondages ont toutefois été prescrits sur le dessus de l'ouvrage, dans le remblai routier pour connaître la nature du remblai sous la surface de roulement. Des sondages carottés ont été préférés à des puits d'exploration car les dommages causés sont moins importants, et plus facilement réparables. De plus, le carottage permet la réalisation d'un sondage sous le trottoir sans abîmer ce dernier de façon importante.

- **Carottage du béton et de la maçonnerie**: En raison de la constitution de l'ouvrage entièrement en maçonnerie, des carottages de béton n'ont pas été préconisés. Prélèvement d'une (1) carotte de maçonnerie de pierre sur l'ouvrage.
- **Essais sur les matériaux** : Un (1) essai de résistance à la compression sur la carotte de pierre de maçonnerie a été prescrit. En raison des observations faites lors de l'inspection et de l'absence de signes de pathologies particulières, aucun essai chimique sur l'échantillon n'a été jugé nécessaire

Étant donné l'inexistence de plans de construction, plusieurs mesures ont été prises sur les lieux.

Dans l'ensemble, l'ouvrage se comporte bien et ne présentent pas actuellement des dommages affectant sa capacité structurale. Cependant, à court terme les dommages aux béquilles (avant-bec et arrière de la béquille) risquent d'être assez importants pour mettre en péril l'intégrité structurale de l'ouvrage si aucune intervention de réparation n'est effectuée.

De plus, il y a désintégration légère à moyenne généralisée du mortier et présence d'efflorescence et de stalactites à plusieurs endroits.

### 3.3 Interventions :

#### ➤ **Les travaux de réhabilitation réalisés à court terme sur le pont Front de mer sont résumés ci-après :**

- Travaux de rejointoiement du mortier, désintégration supérieure à 50 mm :
  - Rejointoiement de toute désintégration du mortier supérieure à 50 mm de profondeur. Cette réparation s'applique à toutes les surfaces de maçonnerie présentant une dégradation supérieure à 50 mm de profondeur.
- Travaux d'injection de fissures au coulis cimentaire :
  - Injection au coulis cimentaire de la fissuration du mortier
- Travaux majeurs de réparation des béquilles :
  - Enlèvement des pierres fissurées et désolidarisées et pose de nouvelles rangées de pierres sur l'avant-bec des béquilles
  - Pose de sacs de sable-ciment (ou enrochements) contre les zones endommagées de l'arrière des béquilles
- Travaux de renforcement (gainage) des béquilles :
  - Gainage des béquilles 2, 3 et 4 à l'aide de plaques métalliques courbées de 20 mm d'épaisseur sur l'avant-bec et les côtés des béquilles.

- Travaux de réparation des garde-corps :
  - Peinturage du côté extérieur des garde-corps sur tout l'ouvrage (incluant les murs en retour).
- Travaux de réparation du drainage :
  - Réfection de tout le système de drainage;



Fig 5.2 : Les travaux de réhabilitation réalisés à court terme sur le pont Front de mer

- **Les travaux de réhabilitation effectués à moyen terme sur l'ouvrage « Front de Mer » sont résumés ci-après.**
  - Rejointoiement de toute désintégration du mortier se situant entre 20 et 50 mm de profondeur. Cette réparation s'applique à toutes les surfaces de maçonnerie présentant une telle détérioration.
- **En plus des travaux de réhabilitation à court et moyen terme réalisés sur l'ouvrage, il est recommandé de mettre en place un programme d'entretien préventif de l'ouvrage afin de lui assurer**

une longévité optimale. Les interventions minimales à inclure à ce programme sont les suivantes :

- Nettoyage des cuvettes de drainage idéalement à tous les ans, mais au minimum à tous les trois ans;
- Inspection sommaire de l'ouvrage à tous les cinq ans afin de prendre conscience de l'avancement des dégradations, de la propagation de défauts et de l'apparition de nouveaux défauts nécessitant une intervention planifiable ou d'urgence.



Fig 5.3 : Les travaux de réhabilitation effectués

#### 4. Pont TAFOURAH



Fig 5.4 : Pont TAFOURAH (2 ET 3)

L'ouvrage de Tafourah est situé sur la Route National RN 05 (point kilométrique 2+ 000), à Alger centre. Cet ouvrage permet de franchir deux voies ferrées à la hauteur de la Grande Poste, et un chemin de Wilaya.

#### 4.1 DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage a été réalisé vers les années 1962. L'ouvrage est constitué de trois structures, soient les ponts 1, 2 et 3. Cependant, le mandat ne concerne que les ponts 2 et 3. Les deux ponts à l'étude sont identiques à quelques exceptions près.

Les deux ponts, d'une longueur totale de  $\pm 113,6$  mètres, sont constitués chacun de huit travées continues (13,3m, 4x17,25 m, 19,5m et 11,8m). Ces ponts, de type dalle épaisse d'épaisseur constante de  $\pm 0,80$  m et de 12,5 m de largeur repose sur des colonnes en béton armé.

Chaque pile est constituée de quatre colonnes circulaires de 0,72 m de diamètre et d'une hauteur moyenne hors-sol de  $\pm 3,3$  m. La culée 1 (côté Sud) de chaque structure est constituée par le prolongement d'un mur de soutènement tandis que la culée 8 (côté Nord) est de type voile en béton armé.



Fig 5.5 : Vue générale de l'ouvrage de Tafourat

## 4.2 INSPECTION DE L'OUVRAGE

Pour cet ouvrage, les relevés, auscultations et essais suivants ont été réalisés :

- Relevé topographique de l'ouvrage : afin de pouvoir reconstituer, de concert avec les mesures prises lors de l'inspection, la géométrie de l'ouvrage, de ses approches ainsi que des éléments connexes (murs de soutènement, etc.).
- Sondages géotechniques : Aucun sondage géotechnique n'a été effectué pour cet ouvrage. Puisque aucun mouvement apparent ou problème relié au sols n'a été relevé au niveau des appuis, des murs de retenue ou des talus, et qu'il n'existe pas de possibilités d'affouillement pour cet ouvrage, la réalisation de sondages n'a pas été jugée nécessaire.
- Carottage du béton : Deux campagnes de carottages ont été réalisés sur les ouvrages. Dans la première, deux (2) carottes de béton ont été prélevées dans la dalle des ponts 2 et 3, pour un total de 4 carottes. Compte tenu d'inconsistances dans les résultats obtenus, il a été décidé de reprendre, dans une deuxième campagne de carottage, deux (2) nouvelles carottes sur la dalle du pont 3.
- Essais sur les matériaux : Au total six (6) essais de résistance à la compression sur les carottes de béton prélevés ont été effectués. En raison de la bonne condition du béton constaté visuellement et de l'absence de signes de pathologies particulières, aucun essai chimique sur les échantillons de béton n'a été jugé nécessaire.

## 4.3 ÉTAT GÉNÉRAL DE L'OUVRAGE

Les principaux défauts identifiés lors de cette inspection sont :

- Premièrement, de l'écaillage, du délaminage et de l'éclatement sont présents sur plusieurs colonnes des deux ponts ainsi qu'à quelques endroits aux culées.
- La dalle est en très bon état, quoiqu'à certains joints froids, il y a infiltration d'eau. Les réparations du côté extérieur de dalle du pont 2, à la travée 7, montrent des signes de détérioration. En ce qui a trait aux appareils d'appui, certains ont des frettes métalliques corrodées de façon très importante et présentent des déformations de la matrice d'élastomère voir photo.
- Quelques dallages de trottoir sont déformés et quelques défauts sont présents sur les garde-corps.

- Tous les joints de dilatation sont interrompus au cours d'eau, permettant l'infiltration d'eau au droit des chasse-roues et des trottoirs.



Fig 5.6 : Pont 2, travée 7, coté extérieur est de dalle.



Fig 5.7 : Vue d'ensemble de la culée



**Fig 5.8 :** Mur en retour de la culée, Délaminage de dessus du mur Pont 2, axe 6, colonne D.  
Éclatements multiples sur toute la longueur végétation nuisible de 200 mm de diamètre



**Fig 5.9 :** Corrosion légère de l'armature.



Fig 5.10 : Pont 3, axe 8, pile coté.



Fig 5.11 : Infiltration d'eau par du béton et corrosion légère de l'armature.



Fig 5.12 : Pont 3, axe 6, appareil d'appui D. Corrosion très importante des frettées.

#### 4.4 REPARATION DE L'OUVRAGE

La réparation des éléments est divisée en trois sections selon la priorité des interventions, soit des interventions à court terme, à moyen terme ainsi que l'entretien préventif. Cette section schématise les interventions par priorité et permet au propriétaire de l'ouvrage d'avoir une vision à long terme de l'état de l'ouvrage et des sommes à investir pour les prochaines années. De plus, cette section sert également de prélude aux tableaux des sommes à investir sur l'ouvrage afin de conserver ce dernier opérationnel dans l'optique d'un rendement optimal de l'investissement à réaliser.

Les travaux de réhabilitation qui ont été réalisés, à court terme, sur l'ouvrage Tafourah (2 et 3) 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 de 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 complet de toute trace de corrosion ;
  - Pose d'un béton de réparation coulé en place.
- Travaux de remplacement de joints de dilatation :
  - Remplacement de tous les joints de dilatation des deux ponts par des joints se prolongeant sur les trottoirs, jusqu'aux bords extérieurs du tablier.
- Travaux de réparation des trottoirs :
  - Changer et colmater tous les carreaux de dallage de tous les trottoirs qui sont endommagés sur les deux ponts.
- Travaux de réparation des garde-corps :
  - Remplacement partiellement ou totalement des ancrages des sections de garde-corps ;
  - Réduction des ouvertures entre les garde-corps et le fût des lampadaires à moins de 150 mm.
- Travaux de réparation du drainage :
  - Nettoyage de tous les drains obstrués partiellement ou totalement par des déchets ou de l'enrobé bitumineux ;
  - Installation ou remplacement de toutes les descentes de drainages de tous les drains.
- Travaux divers :
  - Nettoyage de l'assise des culées ;
  - Enlèvement de tous les arbustes qui ont pris racine sur l'ouvrage.
  - Les travaux de réhabilitation à moyen terme, sur l'ouvrage Tafourah (2 et 3) sont résumés ci-après.
- Pose de bandes de membrane d'étanchéité de 600 mm de largeur sur le dessus de la dalle à l'endroit de chaque joint froid, sur toute la largeur de la voie carrossable lors du remplacement complet de la surface de roulement ;
- Remplacement des appareils d'appui des deux ponts, incluant ceux non inspectés ;

- Le remplacement de la surface de roulement des ponts ;
- Aménager une légère couronne avec l'enrobé bitumineux lors du remplacement complet de la surface de roulement ;
- Peinturage de l'ensemble des garde-corps de l'ouvrage.

En plus des travaux de réhabilitation, à court et moyen termes effectués sur l'ouvrage, il est recommandé de mettre en place un programme d'entretien préventif de l'ouvrage afin de lui assurer une longévité optimale. Les interventions minimales à inclure à ce programme sont les suivantes :

- Nettoyage de l'assise des culées tous les cinq ans ;
- Nettoyage au jet d'air de la garniture enclenchée de tous les joints de dilatation, idéalement à tous les ans, mais au minimum à tous les trois ans ;
- Inspection sommaire de l'ouvrage à tous les cinq ans afin de prendre conscience de l'avancement des dégradations, de la propagation de défauts et de l'apparition de nouveaux défauts nécessitant une intervention planifiable ou d'urgence.

## 5. Conclusion

Une inspection détaillée de tout ouvrage doit être réalisée afin de relever sa condition ainsi que les problèmes qui l'affectent. Cette inspection doit être complétée par la réalisation d'un relevé topographique ainsi que des sondages dans la chaussée et le remblai.

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

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

Les résultats de toute étude doit être consignés dans un rapport qui présentera également une évaluation préliminaire du devis quantitatif et des coûts des travaux de réhabilitation proposés.

# Conclusion

Lors d'un projet de renforcement, on doit soigneusement analyser les données du problème pour ensuite peser les avantages et inconvénients des divers matériaux. Cela ne se révèle pas toujours facile car souvent les bases techniques et scientifiques manquent ou sont lacunaires. De plus, certaines techniques de réparation se basent sur des autorisations particulières délivrées aux entreprises spécialisées. Elles sont souvent applicables dans un cadre bien particulier et ne sont donc pas appropriées à toutes les situations.

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 :

- Tous les membres de bureau d'étude travaillent en collaboration.
- Respecter les dispositions des normes de l'art.
- Harmoniser la structure porteuse et les éléments non-porteurs.
- Privilégier les configurations compactes.
- Tenir compte du danger de liquéfaction du sol.
- Pour éviter les chocs des véhicules, les appuis doivent être protégés.
- Une bonne continuité de différentes phases de coulage de béton.
- Le bon calcul des armatures transversales.
- Protection des armatures de 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 et la bonne qualité de l'étanchéité pour empêcher l'infiltration de l'eau.
- Nettoyage des sommiers d'appui, de l'intérieur du tablier.
- Nettoyage et entretien des équipements de l'ouvrage (joints de chaussée, joints de trottoirs, éclairage, dalles de trottoirs) ;

En fin, ce projet de master est une synthèse de tout ce qu'on a appris durant notre cursus au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique, et aussi une occasion pour intégrer le milieu professionnel.

## Bibliographie

- [1]- Jean Armand CALGARO et Roger LACROIX «techniques des ingénieurs, Projet de renforcement ou de réparation d'un pont», C4 503
- [2]- Rapport de diagnostic, Document préparé pour la DTP Alger, Juin 2004
- [3]- Dr. CHERID « Cours de ponts », l'école nationale polytechnique, ENP Alger, 2012/2013
- [4]- Pr. Bali « Cours de Matériaux de construction », l'école nationale polytechnique, ENP Alger, 2010
- [5]- Mr. BENZAOUZ Ibrahim Khalil, « PFE, ETUDE DES PONTS SOUMIS A DESDEGRADATIONS », ENP 2004
- [6]- Pr.BALI Abderrahim Projets de Recherche Scientifique «Valorisation et Recyclage des Matériaux Locaux » laboratoire de construction et environnement ENP ; mai 2001
- [7]- S.DJENDER «Expertise et renforcement des ouvrages en béton armé» dirigé par Mme BAUCHE, ENP, soutenu en juin 2002.
- [8]- Mr. Mahfoud BENZERZOUR, thèse de magister « Etude expérimentale et numérique du renforcement des tabliers de ponts en béton armé», USTHB 2004
- [9]- Mr. LAIB ABDELGHANI « THEME DE RECHERCHE, REPARATION ET RENFORCEMENT DES STRUCTURES EN BETON ARME » USTHB 2006.
- [10]- M.H. BALUCH, M.K. RAHMAN, A.H. AL-GADHIB. Risks of Cracking and Delamination in Patch Repair. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002.
- [11]- B. BENMOKRANE, R. MASMOUDI, B. TIGHIOUART. Tablier de pont armé à l'aide de matériaux composites (à base de fibre de carbone) : essais en laboratoire et application au pont Joffre. Rapport de recherche, Université de Sherbrooke, Ministère des transports du Québec, 2000.
- [12]- M. BENZERZOUR. Etude du renforcement et de la modélisation des tabliers de ponts en béton armé par des rechargements adhérents. XXIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Université de La Rochelle, France, 2-3 Juin 2003.
- [13]- 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
- [14]- H. FARHAT. Durabilité des réparations en béton de fibres : effets du retrait et de la fatigue. Thèse de doctorat Université Paul SABATIER, Toulouse, 1999.

## Bibliographie

- [15]- D. VEZINA. Techniques de réparations utilisées pour la réfection du boulevard métropolitain. Premier colloque sur la réfection des infrastructures de béton en services, CRIB, Sherbrooke, 1991.
- [16]- J.A. CALGARO et R. LACROIX « Maintenance et réparation des ponts », presse de l'école nationale des ponts et des chaussées, 1997
- [17]-R.LACROIX et J.L. CLEMENT « Comportement structural des bétons armés et précontraints », 2002
- [18]- J. A. CALGARO et R. LACROIX « Maintenance et réparation des ponts», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1997
- [19]- D. DAVI, P. SCHMITT « Annales du bâtiment et des travaux publiques : Structure » n° 5-6,
- [20]- 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-»
- [21]- F. OUALI « Étude statique et pathologique des ouvrages d'art », mémoire de projet de fin d'étude, Université de Blida, Institut de Génie Civil, 2002/2003
- [22]- S. M. JOHNSON « Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du Génie Civil », (Traduction française de M. LONDEZ), Paris, 1969
- [23]- LCPC, SETRA «Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art- Ponts et viaducs en maçonnerie, fascicule 30-31»
- [24]- S.DJENDER «Expertise et renforcement des ouvrages en béton armé» dirigé par Mme BAUCHE, ENP, soutenu en juin 2002
- [25]- CTTTP, direction de l'exploitation et de l'entretien routiers « Guide de la surveillance des ouvrage d'art », décembre 1996