République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de technologie

Département de génie civil

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de

Master en génie civil

Option: Matériaux en génie civil

THEME

Diagnostic du béton armé dégradé Par la corrosion

Préparé par :

CHABA MOUNA Mohamed

KOUADRI Hamza

Proposé et encadrer:

Mr. ZEMIR Ismail

2O17/2018

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH

pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur Mr. ZEMIR Ismail que pour l'encadrement de ce mémoire, son aide, sa patience et la confiance qu'il nous a accordé durant tout notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à Mlle. HADJA Kawthar qui nous a assisté et orienter, sans oublier nos chers enseignants du département de Génie civil qui ont participé à notre formation.

Un grand merci est adressé à nos chers parents pour leurs contributions, leurs soutiens, leurs sacrifices et leurs patiences pour nous voir arrivé a ce stade.

Et nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire et surtout Bureau AFR (Conseilles Bureau d'étude spécialisé) Chiraga coopérative El Kods Alger

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

A mes très chères parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutiens permanents durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consentis tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes frères et sœurs

Je remercie mon ami et binôme HAMZA qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

A tous mes Amis

A toute la promotion de génie civil 2017/2018.

MOHAMED

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire:

A mes très chères parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutiens permanents durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consentis tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mes frères et sœurs

Je remercie mon ami et binôme MOHAMED qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

A tous mes Amis

A toute la promotion de génie civil 2017/2018.

HAMZA

SOMMAIRE

Dédicace
Remerciement
Résume
Liste des illustrations, tableaux et graphiques

Introduction Générale……..…… 1

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA DEGRADATION DE BETON ARME PAR LA CORROSION

Introduction ……..……..…….. **3**

I.1 : Notion sur le béton armé :

I.1.1 : le béton……...……...… 3

I.1.1.1 : Définition…… 3

I.1.1.2 : composition……...… 3

I.1.1.3 : caractéristiques…… 5

I.1.2 :L'acier……..…… 5

I.1.2.1 : Définition……. 5

I.1.2.2 : Composition et structure……..…… 6

I.1.2.3 : caractéristiques……..... 7

I.1.3 : Le béton armé…….……. 7

I.1.3.1 : Définition……..… 7

I.1.3.2 : Relation béton/acier……. 8

I.1.3.3 : Caractéristiques…… 8

I.2 : Notion sur les dégradations de béton armé…… 8

I.2.1 : Définition……..….. 9

I.2.2 : les phases de dégradation de béton……..… 9

I.2.3 : Les causes de dégradation……..…. 9

I.3 : Notion sur la corrosion……... 9

I.3.1: Définition……..... 9

I.3.2: Les types de corrosion……..... 10

I.3.3: processus de corrosion……..... 11

I.3.4: corrosion d'acier……...… 11

I.3.5: Application de diagramme potentiel-PH…….…. 12

I.4 : Notion sur corrosion d'acier dans béton armé…….. 12

I.4.1: Différent types de corrosion…….…… 13

I.4.2:Principales causes de corrosion…….…… 13
I.4.3: Rôle du béton…… 14
I.4.4 :L'état d'acier dans le béton……..……..... 14
I.4.5 : Dépassivation des armatures ……..... 15
I.4.6 : Amorçage et propagation de la corrosion…… 18
I.4.6.1 : Corrosion généralisée……..… 20
I.4.6.2 : Corrosion localisée…….…. 26
I.4.7: Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures…….. 28
I.5 : Notion sur la protection contre la corrosion……... 28
I.5.1 : Protection contre la corrosion ……..... 28
I.5.1.1 : Moyens de lutte contre la corrosion……. 28
I.5.1.2 : Généralités sur les inhibiteurs de corrosion……..... 29
I.5.1.2.1 : Définition……..... 29
I.5.1.2.2 : Propriété et classe d'inhibiteur…….. 29
I.5.2 : Protection contre la corrosion des armatures dans le béton……... 30
I.5.2.1 : Couverture des armatures……... 30
I.5.2.2 : Revêtements anticorrosion……... 30
I.5.2.3 : Protection cathodique…….. 30
I.5.2.4 : Protection des armatures par inhibiteurs…….. 31

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC D'UN OUVRAGE EN BETON ARME

II. METHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC D'UN OUVRAGE EN BETON ARME…….. 32
II.1:Diagnostic de la corrosion des armatures …….. 32
II.1.1: Objectif du diagnostic de la corrosion des armatures……. 32
II.2 : Les principales étapes d'un diagnostic …… 33
II. 2.1 : Visite préliminaire…… 33
II.2.2 : Collecte des documents……... 34
II. 2.3 : Préparation de l'intervention……. 34
II.2.4 : Inspection détaillée……..….. 34
II. 2.4.1 : Préparation de l'inspection…….….. 34
II.2.4.2 : Inspection……..…. 35
II. 2.5 : Essai en laboratoire…….…. 35
II. 2.6 : Traitement des résultats……... 35

II.2.7 : Commentaires et avis de réparation…….. 35
II. 2.8 : Investigation in situ…….. 36
II. 2.8.1 : Choix d'investigation……..... 36
II.2.8.2 : Types d'investigation…….. 37
II.2.8.3 : Mesures relatives aux corrosions d'armatures dans béton…….. 38
A : Mesure du potentiel de corrosion…… 38
B: Estimation de vitesse de corrosion…… 40
II.2.8.4 : Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement……. 42
A: Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers……... 42
B: Mesure la profondeur de la carbonatation…… 43
C: Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agent agressif…… 44
D: Mesure de la résistivité du béton pour estimer le risque de corrosion…….. 46
D.1: Résistivité du béton de surface……. 46
D.2 : Résistivité du béton d'enrobage…… 46
E: Mesure de la perméabilité à l'air du béton de surface pour estimer le risque de corrosion….. 48
II.2.8.5 : Inspection visuelle (marteau et carottage)…….. 51
A: Carottage d'éléments en béton armé……. 51
B: Prélèvements d'acier……. 53
II.3 : Rapport diagnostic…… 54
Conclusion……. 56

CHAPITRE III: LES METHODES DE REPARATION ET PREVENTION DU BETON ARME DEGRADE PAR LA CORROSION

Introduction …….... 57
III.1 : Méthodes de réparation……..... 57
III.1.1 : Réparation des surfaces……..... 57
III.1.1.1 : Dégagement des armatures……..... 57
III.1.2 : Le ragréage ……...… 63
III.1.3 : Le béton projeté……. 69
Conclusion…….. 74
III.2 : Méthode de protection…….. 74
Introduction…….. 74
III.2.1 : Protection des ouvrages…… 76
III.2.1.1 : Imprégnation…….. 76

III.2.1.2 : Inhibiteurs…….. 77
III.2.1.3 : Les revêtements……. 80
III.2.2 : Protection des armatures…….. 81
III.2.2.1 : Armatures résistantes à la corrosion…….. 81
III.2.2.1.1 : Les armatures en acier inoxydable……..… 81
III.2.2.2 : Revêtements des armatures……... 82
III.2.2.2.1 : Barres recouvertes d'époxy…… 82
III.2.3 : Protection par méthodes électrochimiques…… 83
III.2.3.1 : Protection cathodique…… 84
III.2.3.2 : Déchloruration…… 86
III.2.3.3 : Ré-alcalinisation……. 87
Conclusion……..... 89

CHAPITRE IV : CAS D'ETUDE PRESENTATION DU PONT SUR OUED MECHAAB SUR RN 26 AU PK 039+200

IV: EXPERTISE D'OUVRAGES D'ART SUR ROUTES NATIONALES PONT SUR OUED MECHAAB SUR RN 26 AU PK 039+200……..…….. 90
IV.1:Mission 01 : Inspection préliminaire……...…….. 90
IV.1.1 : Fiche signalétique d'ouvrage…… 90
IV.1.2 : Fiche d'inspection et relevé des désordres ……..…. 91
IV.1.3 : Points de prélèvement d'échantillons……..…… 98
IV.1.4 : Avis sur l'état apparent de l'ouvrage……..……. 99
IV.2 : Mission 2 : Auscultation et diagnostic…… 100
IV.2.1 : Programme d'auscultation……...……..… 100
IV.2.1.1 : Prélèvement d'échantillons de béton……...……..…….. 100
IV.2.1.2 : Essais sur carottes……...……..…… 100
IV.2.2 : Résultats…….……..…… 100
IV.2.2.1 : Résultats des mesures des vitesses ultrasoniques…….. 100
IV.2.2.2 : Résultats des essais de compression……..…… 100
IV.2.2.3 : Résultats des essais de carbonatation…….…… 101
IV.2.2.4 : Analyse chimique sommaire ……..……..…… 102
IV.2.3 : Interprétation & diagnostic……...…….…….. 102
IV.2.3.1 : Interprétation…….…… 102
IV.2.3.2 : Diagnostic…….. 102

IV.3 : Mission 3 : Final d'expertise……... 102
IV.3.1 : Projet de réhabilitation…….. 102
IV.3.1.1 : Nature des travaux…….. 102
1/ Travaux de préparation…….. 102
2/ Travaux sur les culées…… 103
3/ Travaux sur les remblais d'accès…….. 103
4/ Travaux en intrados de tablier…… 104
5/ Travaux sur les équipements……. 105
IV.3.1.2 : Quantitatifs des travaux……. 106
1/ Désignation des travaux…….. 106
Conclusion Générale…….. 109
Référence bibliographie
Annexes

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Méthodologie de diagnostic d'un ouvrage en béton armé

Tab II.1 : Exemples des valeurs de courant de corrosion données par l'appareil GECOR…...40

Tab II.2 : Risque de corrosion associé à la résistivité du béton (ciment portland, 20°C)…….47

Chapitre IV : Présentation du cas d'étude pont sur Oued Mechaab RN 26 PK 39+200

Tab II.3 : Fiche signaletique d'ouvrage ……...…92

Tab II.4 : Fiche d'inspection et relevé des désordres ……..94

Tab II.5 : Résultats des mesures des vitesses ultrasoniques ……94

Tab II.6 : Résultats des essais de compression ……..102

Tab II.7 : Résultats des essais de carbonatation ……103

Tab II.8 : Analyse chimique sommaire ……....104

Tab II.9 : Quantitatifs des travaux:…….107

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1: Les constituants du béton (Fabrication du béton frais)……..…….……4
Fig.I.2: Vue en plan d'un acier lisse (collection technique CIMBéton L'armature de béton…..6
Fig.I.3: Vue en plan et coupe d'un acier haute adhérence (collection technique CIMBéton L'armature de béton) ……..…….……..…….7
Fig.I.4 : adhérence d'une armature dans le béton (http://www.concretecorrosion.net)..... 8
Fig.I.5 : les types de corrosion ……..……10
Fig.I.6: Diagramme de stabilité du fer dans l'eau……...……..13
Fig.I.7 : L'état d'acier dans le béton…….……15
Fig.I.8: l'état passive d'acier…….……16
Fig.I.9: dépassivation d'acier……...……...16
Fig.I.10:mécanisme de réaction de carbonatation (www.cete –méditerranée.fr)…….……...…...17
Fig.I.11 : dépassivation par carbonatation (www.cete –méditerranée.fr)…….…….17
Fig.I.12 : mécanisme de pénétration des CL- (www.cete –méditerranée.fr)……18
Fig.I.13 : dépassivation par chlorures (www.cete –méditerranée.fr)…….……..18
Fig.I.14 : Processus de corrosion des armatures du béton armé (www.cerib.com).....19
Fig.I.15 : schéma de processus de corrosion (Les collections de l'Ifsttar) …….……..19
Fig.I.16 : processus de carbonatation (www.febelcem.be).....20
Fig.I.17 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la profondeur de carbonatation …….21
Fig.I.18 : les étapes de carbonatation…….……..……..23
Fig.I.19 : Corrosion initiée par la carbonatation (www.febelcem.be).....23
Fig.I.20: Profil d'humidité et front de carbonatation (www.febelcem.be).....24
Fig.I.21: Apparition de fissures par formation d'oxydes hydroxyde à l'interface couche passive-fer…….…27
Fig.I.22: attaque de chlorure……..27
Fig.I.23 : Corrosion initiée par des chlorures (www.febelcem.be).....27
Fig.II.1 : Schéma du choix d'investigation…….……..……..36
Fig.II.2 : Les appareils de mesure du potentiel de corrosion……39
Fig.II.3: Mesure de vitesse de corrosion…….……..……..41
Fig.II.4 : Profomètre ou pachomètre …….……...42
Fig.II.5: Ferro-scan…….……..42
Fig.II.6: Profondeur de carbonatation…….……...44
Fig.II.7 : Dispositif de récupération des poudres…….……..45
Fig.II.8 : Mesure de la résistivité du béton de surface…….……..46
Fig.II.9 : Mesure de la résistivité du béton d'enrobage……..……...47

Fig.II.9 : Matériel BT Cris……..……...49
Fig.II.10 : Matériel TORRENT…….50
Fig.II.11 : Inspection visuelle d'une dalle en béton armé……..51
Fig.II.12 : Prélèvements par carottage……...53
Fig.II.13 : Prélèvement d'aciers……..…….……..……54
Fig.II.14 : Méthodologie du diagnostic……..…...55
Fig.III.1: Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101……...58
Fig.III.2 : remplacement des armateurs…….……...……60
Fig.III.3 : assemblage d'armatures par manchonnage……..……60
Fig.III.4 : assemblage par soudés……..61
Fig.III.5 : renforcement avec ajout d'armatures de poutre……..……..61
Fig.III.6 : Enlèvement du béton pollué et de la rouille…….……63
Fig.III.7 : Enlèvement toute rouille……...64
Fig.III.8 : Enlèvement du béton dégradé…….……..64
Fig. III.9 : les étapes de préparation de surface……..……..……..65
Fig. III.10 : coulage de béton…….69
Fig.III.11 : projection par voie sèche……..…….…….70
Fig. III.12 : projection par voie mouillée……...71
Fig.III.13 : lance de machine de béton projeté……..…….……...72
Fig.III.14 : réparation par projection de béton…….……..73
Fig.III.15 : Résumé des méthodes de protections…….……75
Fig.III.16 : Catégories des inhibiteurs de corrosion…….……78
Fig.III.17 : exemple de revêtement des surfaces…….……..81
Fig.III.18 : Traitement électrochimique sous « courant imposé » …….....84
Fig.III.19 : Traitement électrochimique avec une anode " galvanique "…….…..85
Fig.III.20 : le principe de la protection cathodique appliquée au béton armé……..….86
Fig.III.21: une réaction cathodique à toutes les armatures…….……...86
Fig.III.22 : Extraction des chlorures par un traitement électrochimique…….…..87
Fig.III.23 : Traitement de ré-alcalinisation de l'enrobage autour d'une armature……..88
Fig.IV.1 : le schéma de La localisation des prélèvements…….…99
ANNEXE N° 1 Schémas De L'ouvrage…….……..…..107
ANNEXE N° 2 Détails De Réparation……..……..109

LISTE DES PHOTOS

Phot.I.1 : le béton armé……..... 7

Phot.I.2 : mesure de carbonatation…….. 25

Phot I.3 : Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure…… 28

Phot.III.1 : renforcement avec ajout d'armatures de poutre ……..... 62

Phot.III.2 : Renforcement avec ajout d'armatures de précontraint……..... 62

Phot.III.3 : Enlèvement du béton dégradé et détourage des armatures…….…….. 66

Phot.III.4 : Mise en place d'un passivant si nécessaire…… 67

Phot.III.5: ragréage manuelle de mortier……. 69

Phot.III.6 : béton projeté sur chantier…….…….. 73

Phot.III.7 : Imprégnation hydrophobe……. 76

Phot.III.8 : Action d'un produit hydrofuge…….……. 77

Phot.III.9 : Application d'inhibiteurs de corrosion dans ou sur le béton…….. 78

Phot.III.10 : inhibiteurs de corrosion…….…. 79

Phot.III.11 : Application de la finition ……..……..…. 80

Phot.III.12 : les enduits de façade……..... 80

Phot III.13 : armatures inox…….……. 82

Phot.III.14 : armatures recouvertes d'époxy…… 82

Phot.III.15 : Mise en place du treillis anodique…….……. 85

Phot.III.16 : Application d'un potentiel électrique…….. 85

Phot.III.24 : Enrobage d'une anode pour traitement de ré alcalinisation à l'aide d'anode galvanique…… 88

Phot.IV.1 : Vue du trottoir coté amont vers Bejaia…….……. 92

Phot.IV.2 : culée rive gauche…….…….. 93

Phot.IV.3 : Elévation aval…… 93

Phot.IV.4 : la semelle culée rive gauche coté aval…….. 94

Phot.IV.5 : Culée rive droite…… 94

Phot.IV.6 : Efflorescence et trace d'humidité au droit des abouts des poutres……..……. 95

Phot.IV.7 : Vue de l'intrados coté trottoir…… 95

Phot.IV.8 : Fissures transversales multiples en sous-face avec espacement régulier (20cm) sur les deux poutres de rive coté amont et aval…… 96

Phot.IV.9 : Eclatement du béton sous-face poutres de rive coté amont et aval……..…… 96

Phot.IV.10 : intrados de hourdis au droit des sorties d'avaloirs……..…… 97
Phot.IV.11 : la culée rive gauche coté aval……..…… 97
Phot.IV.12 : Vue du trottoir coté amont vers Bejaia……..... 98
Phot.IV.13 : Carbonatation sur carotte D4 prise sur mur de culée…….….. 101
Phot.IV.14 : Carbonatation de la carotte D5…… 101

ملخص المذكرة

إن الصدأ الحاصل في قضبان الخرسانة المسلحة هو إحدى الأمراض التي تؤثر على أداء الهياكل. هذا الصدأ قد ينتج من جراء تواجد أملاح الكلور في المناطق الخاضعة للتجمد و / أو رذاذ البحر. غاز ثاني اوكسيد الكربون يعتبر مصدر آخر للتدهور. النتائج المترتبة على هذا الصدأ هو تغيير سلوك الفولاذ وانهيار موضع التقاء الفولاذ بالخرسانة وهما العاملان اللذين يحفزان على إلحاق الضرر بالخرسانة. هذا النوع من الضرر هو المسؤول عن التكاليف المالية الهائلة التي تنفق سنويا في إصلاح هياكل تدهورت في جميع أنحاء العالم.

نستطيع أن نستنتج أن هناك عدة أسباب لتدهور المنشئات بسبب التآكل. نذكر على سبيل المثال عدائية الوسط المحيط (الأرضية و المياه الجوفية)، نوعية وخصائص تركيبة الخرسانة...الخ. بعد هذا التشخيص الحقيقي والذي يرتكز على الفحص البصري ، اقترحنا طرق إصلاحية ووقائية التي تتكون من تلبيس خراساني أو استعمال ميلاط إصلاحي و ذالك حسب الحالة الملاقاة لكي يتم استبدال الخرسانة المنفكة. طريقة إصلاحنا تصر أيضا على استخدام الطلاء لحماية الخرسانة وطبقات تشريب وقائية من أجل تجنب المزيد من خلايا الصدأ.

الكلمات المفتاحية : منشات خراسانية مسلحة ، التشخيص ، التدهور، الصدأ ، الإصلاح ، التقوية

RESUME

La corrosion des armatures du béton arme´ est une des pathologies qui altèrent les performances des structures. La corrosion peut être provoquée par les sels de déverglaçage dans les zones soumises au gel et/ou aux embruns marins. La carbonatation constitue une autre source de dégradation. Les conséquences de cette corrosion sont la modification du comportement de l'acier et la dégradation de l'interface acier béton, qui ont favorisé la structure a endommagé. Ce type d'endommagement est responsable des coûts financiers énormes dépensés chaque année dans la réparation des structures détériorées à travers le monde.

On peut conclure qu'il s'agit de nombreuses causes de dégradation par la corrosion, on cite par exemple l'agressivité du milieu environnant (sol et eaux souterraines), la qualité et les propriétés de la composition du béton, … etc. après ce diagnostic qui est basé sur une inspection visuelle, nous avons proposé des méthodes de réparation et prévention qui consiste à un chemisage remplacer le béton décollé, aussi à employer des revêtements pour protéger le béton et des couches d'imprégnation préventives dans le but d'éviter d'autres cellules de corrosion.
Mots clés : Ouvrages en béton armé, diagnostic, dégradation, corrosion, réparation, renforcement.

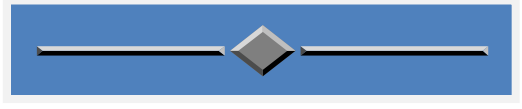
ABSTRACT

The rebar corrosion in reinforced concrete is one of the most extensive pathologies affecting the performance of concrete structures. Chloride-induced rebar corrosion damage results mainly from the use of deicing salts in cold climates and/or exposure to marine environments. Carbonation damage is a further important degradation mechanism. The internal consequences of corrosion are the modification of the steel behavior and degradation of the steel–concrete bond, which supported the damaged structure. This type of damage is responsible for the huge financial costs spent each year in the repair of the deteriorated structures all over the world.

It can be concluded that there are many causes of degradation by corrosion, for example the aggressiveness of the surrounding environment (soil and groundwater), the quality and properties of the composition of concrete, etc. after this diagnosis which is based on a visual inspection, we proposed methods of repair and prevention which consists of a lining to replace the peeled concrete, also to use coatings to protect the concrete and preventive impregnation layers for the purpose to avoid other corrosion cells.

Key words: reinforced concrete, Diagnosis, Degradation, corrosion, repair, reinforcement.

Introduction Générale



La durabilité du béton est un fait reconnu et attesté par la pérennité des ouvrages exposés à des conditions climatiques ou environnementales les plus variés. Les ouvrages usuels résistent au fils des années aux multiples agressions physico-chimiques auxquelles ils sont soumis.

Néanmoins, il arrive que des défauts de conception, de mise en œuvre ou des causes accidentelles soient à l'origine des désordres, et la notion de durabilité est ainsi indissociable de celle de la qualité. Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité de l'ouvrage dépend essentiellement de la tenue des armatures à la corrosion.

La grande majorité des ouvrages d'art et des bâtiments sont construits en béton armé. Une des principales causes de la pathologie du béton est la corrosion des armatures, liée en partie aux problèmes environnementaux. Cela représente 55 % des dégradations observées par la British Cement Association. On comprend l'intérêt d'étudier ce type de pathologie et d'évaluer l'état des armatures par l'une des techniques non destructives de façon précoce afin de suivre son évolution et d'y remédier au plus tôt.

Les deux mécanismes les plus courants contribuant au développement de la corrosion sont la pénétration des chlorures et la carbonatation du béton. Ceux-ci génèrent deux types de corrosion respectivement par piqûres et généralisée.

La réaction de corrosion est un processus électrochimique qui se manifeste par la transformation graduelle du fer en oxydes de fer. Cette réaction engendre respectivement :

- Une perte de section d'acier ;
- Une expansion volumique autour des armatures et provoque d'une part, la disparition de l'effet des nervures et d'autre part, la fissuration du béton de recouvrement ;
- La corrosion provoque une dégradation de l'interface acier / béton qui diminue l'adhérence entre les deux matériaux.

Dans le monde, des sommes importantes sont engloutis, chaque année dans la réparation des structures endommagées par ce phénomène, sans compter les conséquences que peuvent avoir des travaux de construction et de réfection répétés sur l'environnement. Les coûts de maintenance représentent actuellement 1 % par an du coût de l'investissement global d'un ouvrage. Ils augmentent d'environ 8 % par an (Source FNTP, France).

Les recherches et les études touchant à la durabilité des bétons vis-à-vis de la corrosion en Algérie connaissent moins d'engouement par rapport à ceux qui se font dans les pays avancés malgré l'existence des conditions plus au moins sévères et les pertes économiques colossales engendrées par l'entretien et les réparations souvent employé chez nous.

Non prise en charge de cette problématique au sérieux dans notre pays nous a conduit à travailler sur ce thème qui a pour titre « **DIAGNOSTIC DU BETON ARME DEGRADE PAR LA CORROSION** ».

Sur le même contexte nous visons les objectifs suivants :

- Expliquer les mécanismes de la corrosion des armatures du béton ;
- Présenter les techniques d'investigation pour la détection de la corrosion des armatures et l'évaluation de son ampleur ;
- Présenter et expliquer les méthodes de réparation des ouvrages corrodés ;
- Proposer une démarche à suivre pour réhabiliter efficacement les ouvrages corrodés ;
- Donner des mesures préventives pour empêcher ou retarder le plus longtemps possible la corrosion des armatures conformément à l'adage qui dit que : « prévenir vaut mieux que guérir » ;
- Faire un état de lieu des ouvrages corrodés dans la région afin de résumer les principaux facteurs qui influent sur la durabilité vis-à-vis de la corrosion.

Pour cela, notre travail de recherche réalisé au cours de la préparation de ce mémoire est présenté en quatre grands chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. Elle comporte des généralités et de définitions sur le béton armé et ses constituants ainsi que sur la corrosion et son processus sans oublier aussi de parler de désordres affectant le béton armé et sa durabilité.

Le deuxième chapitre décrit la Méthodologie de diagnostic d'un ouvrage en béton armé, les étapes d'un diagnostic in situ et en laboratoire et conclu par un rapport de diagnostic.

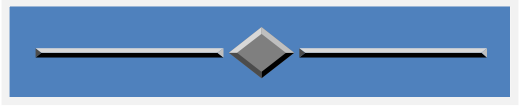
Le troisième chapitre expose les méthodes de réparation existants déjà autour du monde entier ainsi que les méthodes de prévention utilisées pour étendre le plus possible la durée de vie des ouvrages en béton armé.

Le quatrième chapitre concerne l'étude d'Expertise d'ouvrages d'art sur routes nationales le cas du Pont oued Mechaab sur RN 26 au PK 039+200

Enfin le travail est terminé par une conclusion générale sur notre thème.

Chapitre I

Généralité sur la dégradation de béton armé par la corrosion



Introduction :

Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité de l'ouvrage dépend essentiellement de la tenue des armatures à la corrosion. Afin de bien comprendre le phénomène de corrosion des aciers dans le béton, on définira le matériau béton et la corrosion, et on décrira les mécanismes de corrosion des aciers dans le béton et leur protection.

I.1 : Notion sur le béton armé :

I.1.1 : le béton :

I.1.1.1 : Définition :

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland. Les composants sont très différents: leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m3. Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile

I.1.1.2 : composition :

Mélange d'agrégat (sable plus granulat) et de la pâte composée: de ciment, d'eau et d'adjuvant

1. Pate 30 à 40%
   - Ciment portland 7% to 15% par volume
   - Eau 14% to 21% par volume
2. Agrégats 60% à 80%
   - Gros granulats
   - Granulats fins
3. Adjuvants chimiques

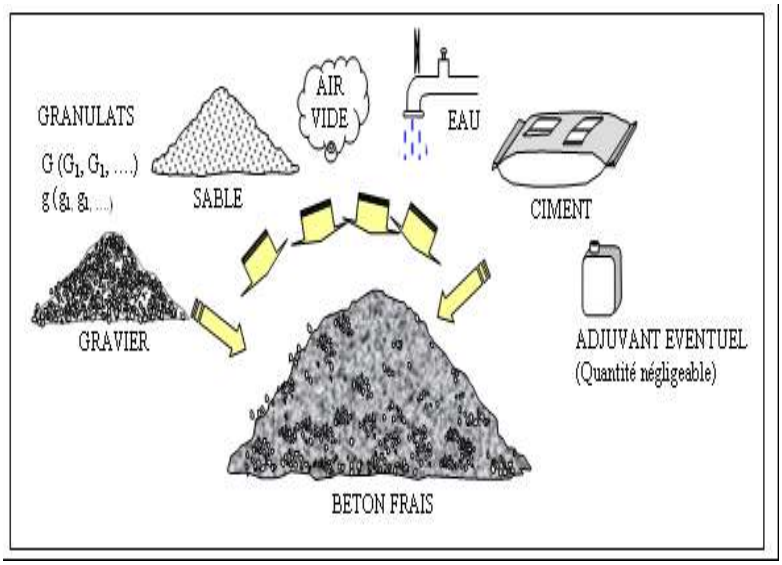


Fig.I.1: Les constituants du béton [rero mon beau béton octobre 2008]

- **Le ciment**

Le ciment est la partie « noble » du béton au sens où c'est son développement qui a rendu possible la construction en béton. Son rôle est en fait celui d'une «colle à cailloux ».
Il existe plusieurs sortes de ciment qui offrent des caractéristiques différentes, le plus usuel est le ciment dit «**portland** ».

- **Eau de gâchage**

L'eau intervient par ses propriétés physico-chimiques, à toutes les étapes de la vie du béton.

Elle confère à ce matériau une plasticité qui permet son écoulement et son moulage. Elle assure ensuite l'hydratation du ciment et participe à la cohésion du matériau durci. Elle peut être un facteur de dégradation si elle contient des ions agressifs.

- **Granulats**

Les granulats constituent la phase dominante du béton, (**70%** du volume). La sélection et le dosage constituent un aspect essentiel pour l'obtention d'un béton satisfaisant

- **Adjuvants chimiques**

Pour améliorer certaines propriétés des bétons on a recours à des adjuvants chimiques. Les adjuvants sont des produits organiques et inorganiques qui, quand ils sont ajoutés en petite quantité, modifient certaines propriétés des bétons. [1]

I.1.1.3 : caractéristiques :

Le béton possède deux comportements: **l'état frais et l'état durci**

✓ **Caractéristiques du béton frais :**

La caractéristique essentielle du béton frais est **l'ouvrabilité** (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferraillage, mais également ses performances à l'état durci.

Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place.

Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton:

- Méthode et durée de transport
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats) Forme, granulométrie et type de granulats
- Le volume d'air
- Le dosage en eau

✓ **Caractéristiques du béton durci :**

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours).

Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité etc... Pour maximiser les performances du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat. [1]

I.1.2 :L'acier :

I.1.2.1 : Définition :

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier. Si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié.

Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié. [3]

I.1.2.2 : composition et structure :

Les composants essentiels de l'acier :

Des éléments d'addition viennent s'ajouter à **l'alliage fer-carbone**. Ces éléments augmentent la résistance de l'acier aux sollicitations mécaniques, chimiques, voir même des deux à la fois. Ajouté au fer et au carbone, **le manganèse (Mn)** rend l'acier beaucoup moins corrosif. Il préserve donc l'acier contre les intempéries. **Le chrome (Cr)** améliore également la résistance de l'acier à la corrosion, mais apporte également un fini brillant aux pièces d'acier. **Le nickel (Ni),** résistant à l'oxydation et la corrosion permet de rendre l'acier inoxydable. Une faible quantité de **molybdène (Mo)** augmente considérablement la dureté de l'acier et sa trempabilité. Le molybdène améliore efficacement la capacité de résistance des aciers à de hautes températures et permettra d'éviter les effets de fluage**.** [3]

Les formes d'acier et de leur surface :

On distingue deux types d'aciers pour béton armé en fonction de leur forme et de leur surface :

• **Les aciers lisses** :

barres lisses ou fils tréfilés lisses. Elles sont de section circulaire sans aucune gravure.



Fig.I.2: Vue en plan d'un acier lisse BAEL (A4,3,4) et Eurocode 2[3.1]

• **Les aciers à haute adhérence :**

Dont la surface présente des saillies ou des creux. La surface de ces armatures présente des aspérités en saillies inclinées par rapport à l'axe de la barre appelée verrous ou des aspérités en creux appelées empreintes qui sont destinées à favoriser l'adhérence des armatures au sein du béton.

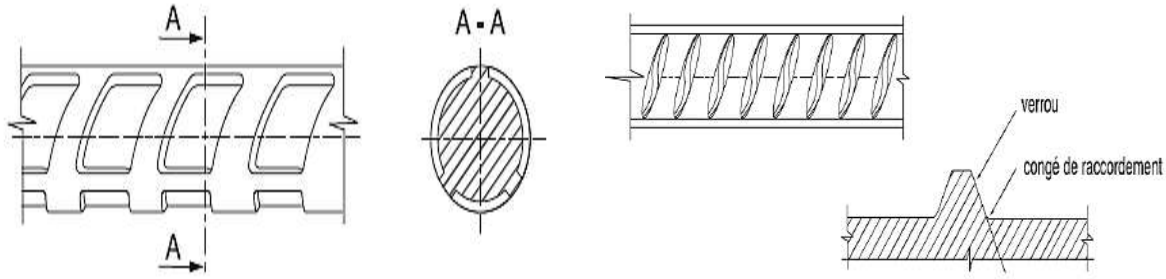


Fig.I.3: Vue en plan et coupe d'un acier haute adhérence [BAEL] et Eurocode 2[3.2]

I.1.2.3 : les caractéristiques :

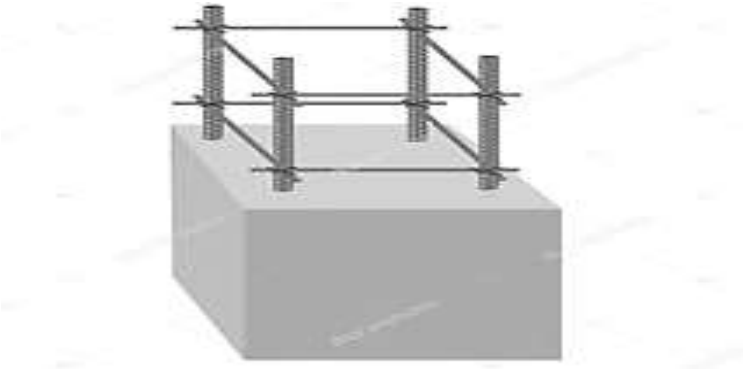
Les caractéristiques de l'acier sont :

- Une grande ductilité afin de subir des déformations importantes sans dégradation importante en conservant sa résistance et de sa rigidité.
- Une grande résistance à la fatigue pour supporter un grand nombre de cycles dynamiques sur des ouvrages d'art de ponts et de passerelles.
- Une grande résistance lors d'accident dans le cas d'explosions de tremblement, de terre entraînant des surcharges très importantes.
- Un grande facilité de réparation du fait de sa structure homogène dans le cas de reprises sur des ouvrages endommagés et à réhabiliter. [3]

I.1.3 : le béton armé :

I.1.3.1 : Définition :

Le béton armé est l'intime assemblage de barres d'acier et de béton afin de compenser la mauvaise tenue de ce dernier à la traction .Cet assemblage est rendu possible grâce à la dilatation comparable des deux matériaux. [4]



Phot.I.1 : Ferraillage d'un poteau en béton armé

I.1.3.2 : Relation béton/acier :

Le béton possède une grande résistance à la compression et une résistance moindre à la traction. Dans les structures en béton se développe un ensemble de contraintes générées par les diverses actions auxquelles elles sont soumises.

La résistance à la compression du béton lui permet d'équilibrer correctement les contraintes de compression. Par contre, du fait de la relative faiblesse de sa résistance à la traction, il n'en est pas de même pour les contraintes de traction. C'est pourquoi l'on dispose dans les parties tendues d'une pièce en béton, des armatures (barres ou treillis soudés) en acier (matériau qui présente une bonne résistance à la traction). Chaque constituant joue ainsi son rôle au mieux de ses performances : le béton travaille en compression et l'acier en traction. Ce matériau est appelé béton armé**.** [4]

Liaison acier béton adhérence

La résistance d'un élément en béton armé et la maîtrise de la fissuration supposent que l'acier ne puisse pas glisser à l'intérieur du béton, c'est-à-dire qu'il y ait adhérence parfaite entre les deux matériaux.

L'adhérence des armatures est fonction de leur forme, de leur surface (les saillies ou les creux améliorent l'adhérence) et de la résistance du béton.

Le fonctionnement du béton armé suppose une « association » entre l'acier et le béton qui met en jeu l'adhérence des armatures au béton. Pour utiliser pleinement des aciers plus performants, il faut donc aussi que leur adhérence soit améliorée

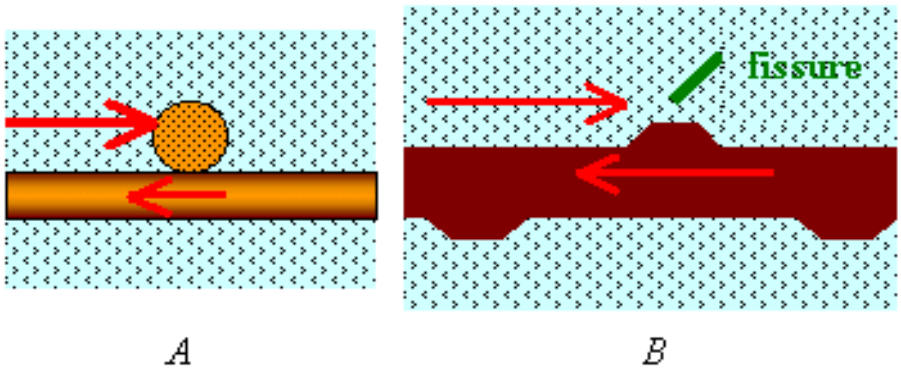


Fig.I.4 : Adhérence d'une armature dans le béton [concrete corrosion rero décembre 2008Fr]

I.1.3.3 : caractéristiques :

- La résistance mécanique
- Esthétisme et qualité du parement
- Durabilité (propriétés de transfert)

I.2 : Notion sur les dégradations de béton armé par la corrosion :

I.2.1 : Définition :

La dégradation du béton est sa perte de performance elle se manifeste par détérioration, déformation ou changement de ces propriétés. La fissure constitue le signe d'une première manifestation apparente de dégradation possible, comme elle peut prendre l'aspect des éclats ou couleurs de rouille. [5]

I.2.2 : les phases de dégradation de béton armé par la corrosion :

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives :

- Une phase d'incubation : elle correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage du béton, sans corroder les armatures. Cette phase s'arrête lorsqu'au niveau de ces dernières, la teneur en agents agressifs atteint un certain seuil.
- Une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations du matériau. La phase de développement est celle où les dégradations sont visibles. A ce stade les réparations deviennent lourdes et coûteuses.

I.2.3 : Les causes de dégradation :

Les bétons se dégradaient à cause des milieux dans lesquels ils sont placés: agressions physiques et chimiques. Certaines autres causes, essentiellement dues à des événements extérieurs, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

Bien que ces causes soient multiples, nous limiterons notre étude à la corrosion des armatures, phénomène préalable désastreux puisque la formation de rouille expansive fait passer le volume du métal oxydé de 1 à 7 et provoque l'éclatement du béton. [5]

I.3 : Notion sur la corrosion :

I.3.1: Définition :

La corrosion est la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métalliques par leur environnement. C'est, en fait, le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxyde, sulfate, carbonate ... plus stable par rapport au milieu corrosif, et ainsi à subir une dégradation de leurs propriétés. On pourrait en conclure que la corrosion étant la manifestation de l'affinité chimique des métaux pour certains éléments constitue une branche de la chimie.

Malheureusement ce concept purement chimique ne permet pas d'interpréter bien des phénomènes de corrosion qui font intervenir un certain nombre de facteurs présentant un caractère chimique, électrochimique, métallurgique, mécanique, et agissant souvent simultanément. [6]

I.3.2: Les types de corrosion :

Il existe plusieurs types de corrosions :

La corrosion uniforme :

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée sur les métaux exposés aux milieux acides.

La corrosion galvanique ou corrosion bimétallique :

Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. Le métal ayant le potentiel de corrosion le plus négatif, subit une corrosion accélérée provoquée par l'autre métal.

La corrosion caverneuse :

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.

La corrosion par piqûres :

Elle est produite par certains anions, notamment les halogénures, et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre.

La corrosion sous contrainte : C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

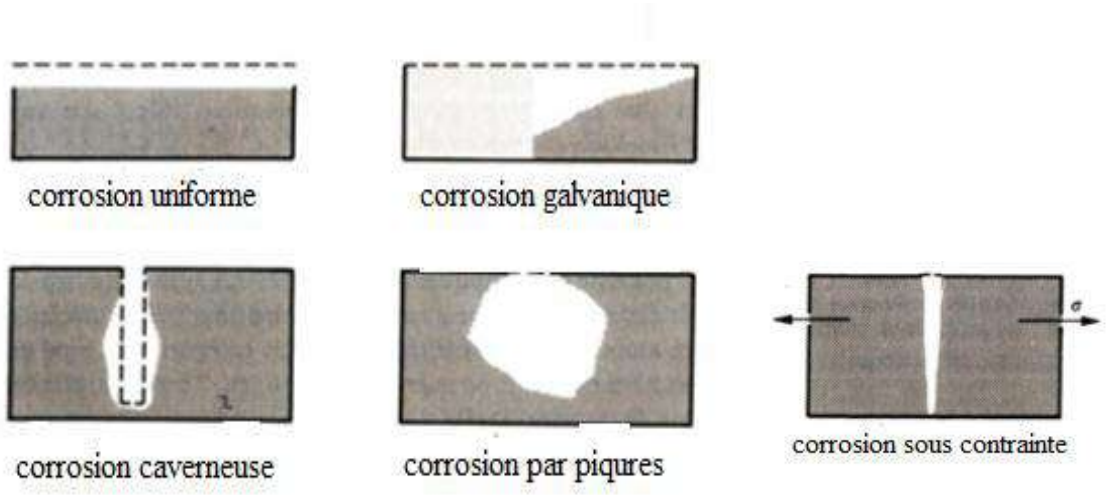


Fig.I.5: Les types de corrosion [1973 Published by Elseried Ltd]

I.3.3: processus de corrosion :

La corrosion peut se développer suivant différents processus qui définissent chacun un type de corrosion.

La corrosion chimique est la conséquence d'une réaction hétérogène entre une phase solide et une phase liquide. Elle ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique. Il est très difficile d'en donner des exemples car elle est le plus souvent accompagnée de corrosion électrochimique.

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe des hétérogénéités, soit dans le métal, soit dans la solution corrosive. Ces hétérogénéités déterminent la formation à la surface du métal de micro-anodes et de micro-cathodes qui constituent des micropiles.

Un courant électrique circule entre les électrodes. Les zones appelées anodes sont attaquées et les zones appelées cathodes sont le siège d'une ou plusieurs réactions de réduction. Nous reviendrons plus loin sur ce type de corrosion dont l'importance est prédominante dans l'industrie laitière.

La corrosion bactérienne est l'attaque des métaux par les produits du métabolisme de certains micro-organismes. Ce type de corrosion n'a pas été, à notre connaissance, rencontré dans l'industrie laitière. On l'observe le plus souvent sur les canalisations enterrées et sur les ouvrages immergés en eau de mer.

Enfin, la corrosion avec érosion peut se produire lorsqu'une couche de produits de corrosion adhérente et continue à la surface du métal est détruite localement par abrasion consécutive au mou. [6]

I.3.4: corrosion d'acier :

La corrosion électrochimique de l'acier peut être décrite de manière simplifiée, l'acier se dissout selon la réaction suivante :

$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^-$ ……..... (I-1)

Quand le fer se corrode, la vitesse est généralement contrôlée par la réaction cathodique, qui en principe est beaucoup plus lente (contrôle cathodique).

En solution désaérée, la réaction cathodique est la suivante :

$H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{2} H_2$……..... (I-2)

Cette réaction est assez rapide dans les acides mais elle est lente dans les milieux aqueux neutres ou basiques.

La réaction cathodique peut être accélérée par l'oxygène dissous suivant la réaction suivante: (processus appelé dépolarisation)

$2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2\,e^- \rightarrow H_2O$……...… (I-3)

En ajoutant les équations (I-1) et (I-3) qui font intervenir la réaction:

$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$…… (I-4)

On obtient l'équation (I-5)

$Fe + H_2O + ½ O_2 \rightarrow Fe(OH)_2$……..… (I-5)

L'hydroxyde ferreux, Fe (OH) 2 compose la barrière de diffusion à l'interface métal solution à travers laquelle l'O2 doit diffuser. Le pH de Fe (OH) 2 saturé est d'environ 9.5. La couleur de Fe(OH) 2 bien que blanche quand il est pur, et normalement verte ou noir-vert à cause d'un début d'oxydation à l'air. La surface extérieure du film d'oxyde exposée à l'oxygène dissous, se transforme d'hydroxyde ferreux en hydroxyde ferrique hydraté ou en hydroxyde ferrique :

$Fe(OH)_2 + ½ H_2O + ¼ O_2 \rightarrow Fe(OH)_3$.....(I-6)

L'hydroxyde ferrique hydraté de couleur orange à brun-rouge compose la plus grande partie de la rouille ordinaire. Le Fe (OH) 3 saturé a un pH presque neutre. [7]

I.3.5: Application de diagramme potentiel-PH :

En milieu acide **(pH< 4) ;** la présence de Fe^{2+} est élevée ; l'hydroxyde ferreux est dissous. Le taux de corrosion est important et ne dépend pratiquement que de la vitesse de diffusion de l'hydrogène et de l'oxygène.

En milieu neutre **(4< pH >10)** le taux de corrosion est pratiquement indépendant du pH car il se forme en surface de l'hydroxyde ferreux, soluble mais continuellement renouvelable par la corrosion sous – jacente. La surface du fer est donc toujours en contact avec un film de solution alcaline saturée d'hydroxyde ferreux hydraté dont le pH est environ 9.5quel que soit le pH du milieu.

En milieu basique **(pH >10)** le fer se passive surtout en présence d'oxygène et la vitesse de corrosion diminue.

Le professeur **Pourbaix** à établi pour nombreux métaux des diagrammes basés sur les tentions d'équilibre des réactions électrochimiques en fonction du pH de la solution. Ces diagrammes indiquent les limites thermodynamiques de stabilité du métal considéré par rapport à ses ions dans le milieu et aux produits de réaction, en fonction du pH et de la tension. Ces diagrammes, sont établis généralement à 25^0C.

Dans le cas du fer, il apparaît trois domaines distincts **(**Fig.I.6) [8]

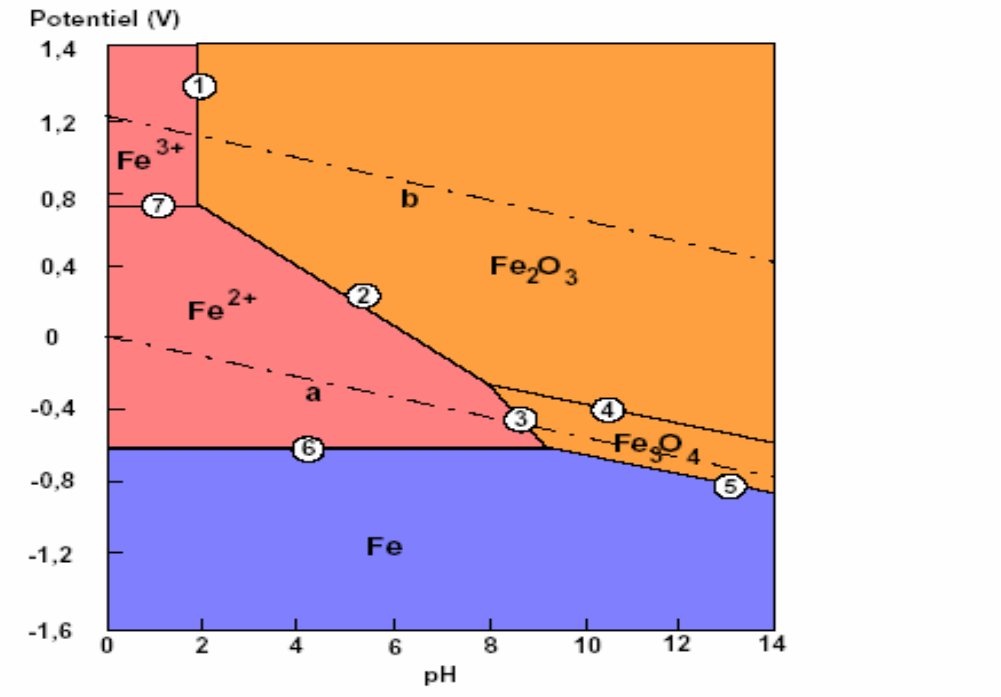


Fig.I.6 : Diagramme de stabilité du fer dans l'eau [Karine HEDUIT-ESTCO Angers]

I.4 : Notion sur corrosion d'acier dans béton armé :

La corrosion des armatures est le principal paramètre limitant la durée de vie des ouvrages en béton armé : génie civil, ouvrages d'Art, industrie, bâtiment, monuments historiques. [9]

I.4.1: Différent types de corrosion :

Il existe plusieurs types de corrosion des armatures du béton dépendant de l'environnement et du milieu agressif.

La corrosion des aciers dans les ouvrages en béton armé est de deux types :

- Corrosion localisée par piqûres : attaque par les chlorures ;
- Corrosion généralisée par carbonatation du béton : elle se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques élémentaires.

La corrosion des armatures en anaérobie démontrée par Raharinaivo est nommée la (rouille verte). [9]

I.4.2:Principales causes de corrosion :

La corrosion de l'acier dans le béton ne peut se produire que lorsque certaines conditions physicochimiques sont réunies. L'existence de conditions particulières conduit au démarrage d'un processus électrochimique qui tend à dissoudre localement le fer métallique afin de former des produits plus stables (oxydes, oxyhydroxydes...).

I.4.3: Rôle du béton :

Le béton protège l'acier de la corrosion du fait d'une part de la forte alcalinité (pH élevé de l'ordre de 12,5 à 13) de sa solution interstitielle et d'autre part, de son rôle de barrière contre la pénétration d'agents agressifs. Pour comprendre l'influence du milieu sur la corrosion des armatures, il est nécessaire de connaître la composition de la solution interstitielle au voisinage de l'acier dont dépendent les processus électrochimiques. Le béton enrobant l'acier est un matériau poreux constitué de trois phases : solide, liquide et gazeuse.

La phase solide est constituée de granulats et de la pâte de ciment. Les granulats inactifs en général sur la corrosion des armatures peuvent, par leur présence, ralentir la pénétration d'agents agressifs (Garboczi, 1998). Toutefois la présence de liquides dans leurs pores peut influer sur la cinétique de corrosion. La pâte de ciment poreuse, composée de silicates de calcium hydraté C-S-H (50 à 70% du volume), de portlandite Ca(OH)2 et ettringite joue un rôle important parce que la pénétration des agents agressifs se fait par les pores.[10]

La phase liquide, d'après les travaux de Powers et al, se présente sous quatre formes : l'eau liée chimiquement, l'eau adsorbée à la surface des C-S-H, l'eau interfeuillet et l'eau contenue dans les pores capillaires (Powers, 1947). La solution des pores est thermodynamiquement en équilibre avec la phase solide et fortement chargée en ions. Lorsque des agents extérieurs pénètrent, la solution, change et a des effets sur la matrice cimentaire.[11]

La phase gazeuse est contenue dans la porosité. C'est l'air contenu dans la porosité connectée qui favorise la pénétration des agents agressifs vers les aciers. Cette pénétration s'accompagne de l'acidité de la solution et de la dépassivation de l'acier.

I.4.4 :L'état d'acier dans le béton :

L'acier est un alliage passivable c'est-à-dire capable de former une couche protectrice, dense, étanche et isolante électriquement, qui s'oppose au passage de ses ions métalliques vers l'électrolyte. Cette passivation est fonction du pouvoir oxydant de l'électrolyte et de la morphologie de la couche formée.

Les propriétés oxydantes de la solution entraînent une réaction entre la barre de fer et la solution électrolytique qui conduit à la croissance initiale d'adsorbats hydroxylés en surface du métal. Ensuite, il se forme une couche oxydée continue non poreuse qui constitue une phase homogène nouvelle. L'acier se trouve en principe à l'état d'oxydes, de sulfates et de carbonates. L'acier est recouvert d'une couche passive, une couche d'oxydes, qui le protègent des agressions extérieures.

Dès lors que le milieu environnant change, la stabilité de l'ensemble béton/acier est «modifiée». La couche passive disparaît et la corrosion peut s'amorcer.

Les conditions alcalines (pH>13) dans un béton favorisent la formation d'une couche passive sur l'acier (Fig.I.7)

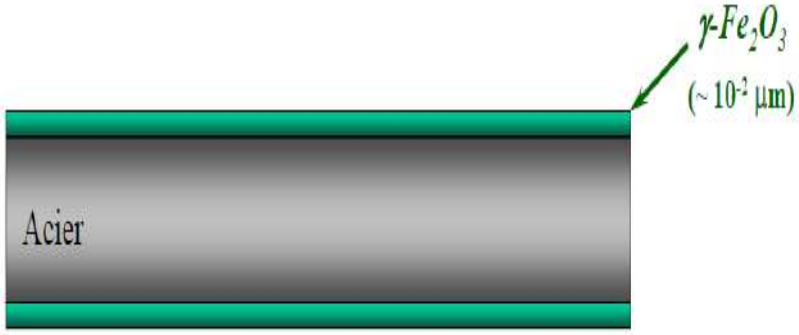


Fig.I.7 : L'état d'acier dans le béton [Rapport VSS NV558, septembre 2001 Deutsch]

I.4.5 : Dépassivation des armatures :

Si un acier est préalablement recouvert de produits passivants (cas du béton sain), cette protection est altérée par l'introduction d'un excès de chlorure. Il se produit alors une dépassivation dont le mécanisme comprend les étapes suivantes: la couche passivant est détruite localement, là où la teneur en chlorure est très forte, de la " rouille verte " se forme là où la passivation a disparu la " rouille verte " se transforme en des oxydes (ou hydroxydes) poreux, si la teneur en oxygène est assez élevée. [9]

Les transformations de la " rouille verte " formée en présence de chlorures n'ont pas encore été vulgarisées. Pourtant, elles expliquent les constatations pratiques suivantes: La corrosion des armatures sous une chape d'étanchéité se produit en l'absence d'oxygène. Dans ce cas, les produits de corrosion sont de couleur très sombre et sont mous. Ceci correspond à la transformation de la rouille verte en magnétite.

Lorsque les produits de corrosion sont assez épais, ils forment des strates, où la teneur en chlore est variable. Ceci correspond aux diverses transformations de la rouille verte. En effet, à cause des transformations de la rouille verte, les ions chlores sont en grande partie éjectés de la structure cristalline et se trouvent à l'état dissous dans la solution.

La teneur en chlorure dans le béton au voisinage d'une armature se corrodant est plus élevée qu'ailleurs. Ceci correspond, comme indiqué ci-dessus, à la sortie des ions chlore hors des produits de corrosion, la quelle produit ainsi une sorte de recyclage des ions chlorures dans le processus de corrosion du fer.

Lorsque le pH du béton est inférieur à environ 9, les teneurs critiques en chlorures ou carbonates, provoquant le dépassivation de l'acier, sont très faibles et correspondent à des eaux naturelles, potables. C'est pourquoi, en pratique, ce pH est souvent considéré comme étant la valeur critique de dépassivation des aciers.

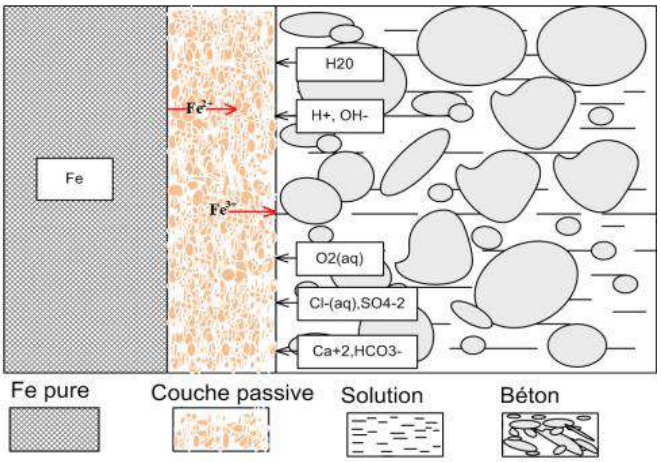


Fig.I.8: l'état passive d'acier

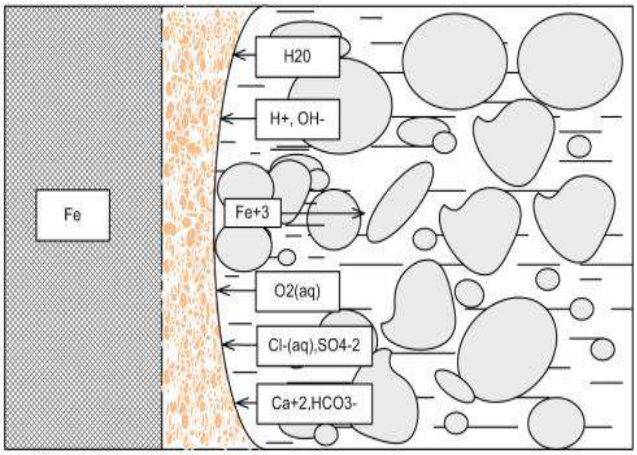


Fig.I.9: Dépassivation d'acier [Article de R.renz Raulin et L.Thiery]

- **Dépassivation par carbonatation du béton :**

Le CO2 peut être dissous par la solution interstitielle du béton, et réagir avec certains composés calciques pour former des carbonates (carbonatation). Il en résulte une baisse du pH de la solution interstitielle du béton (de 13 à 9).

La pénétration du dioxyde de carbone dans le béton est un phénomène de diffusion. Elle est rapide lorsque le béton est assez sec. Mais la réaction de carbonatation n'a lieu que s'il reste de la solution interstitielle dans le béton.

C'est pourquoi, les conditions les plus favorables à la pénétration du dioxyde de carbone correspondent à une alternance d'humidité et de séchage**.**

Réaction de carbonatation : mécanisme

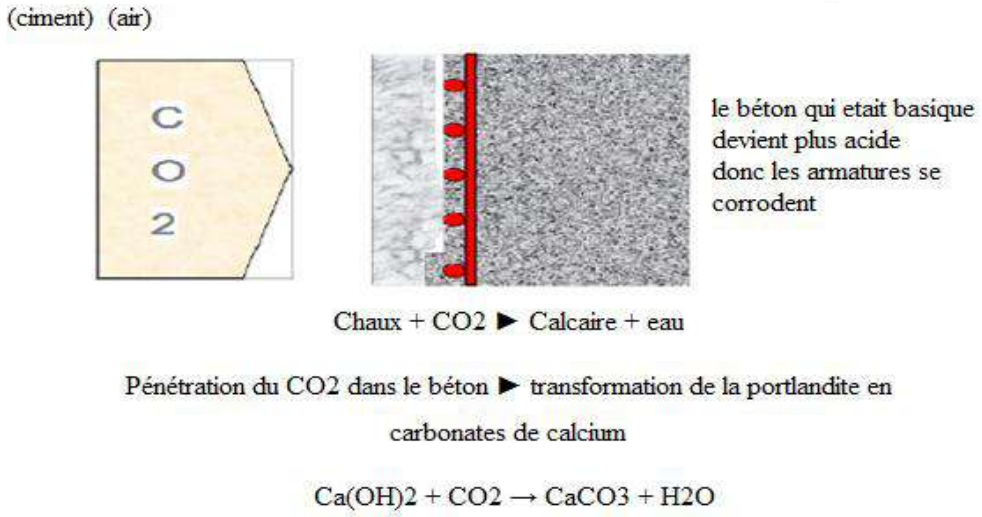


Fig.I.10:mécanisme de réaction de carbonatation [cete-méditerranée.fr 2004]

Les produits de corrosion d'un volume plus important font fissurer puis éclater le béton.

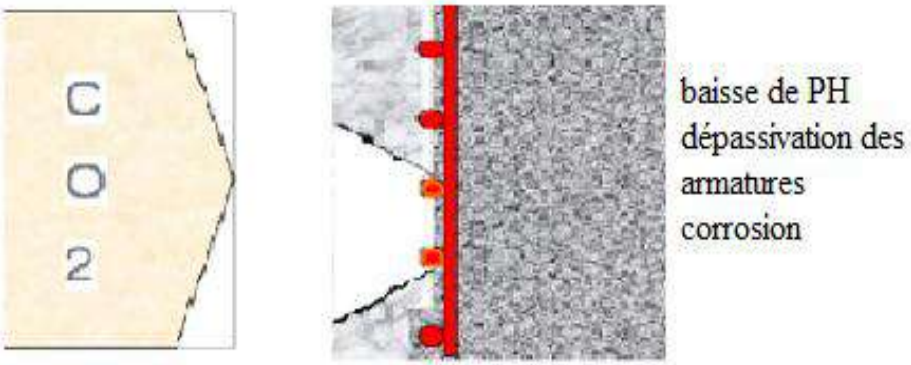


Fig.I.11 : Dépassivation par carbonatation [cete-méditerranée.fr 2004]

➢ **Dépassivation par l'attaque des chlorures :**

Mécanisme de pénétration des ions Cl- :

- Entrainement mécanique par l'eau
- Gradient de concentration si béton constamment humide

Sources de Cl- :

- Constituants du béton (sables, gravillons, adjuvants)

- Sels de déverglaçage

- Sels marins

La pénétration des chlorures

La pénétration est généralement favorisée par le béton qui est :

- fissuré,

- mal mis en œuvre,

Pas suffisamment compact (adéquation de la formulation à l'environnement)

La pénétration des chlorures nécessite de l'eau.

Les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou absorption capillaire.

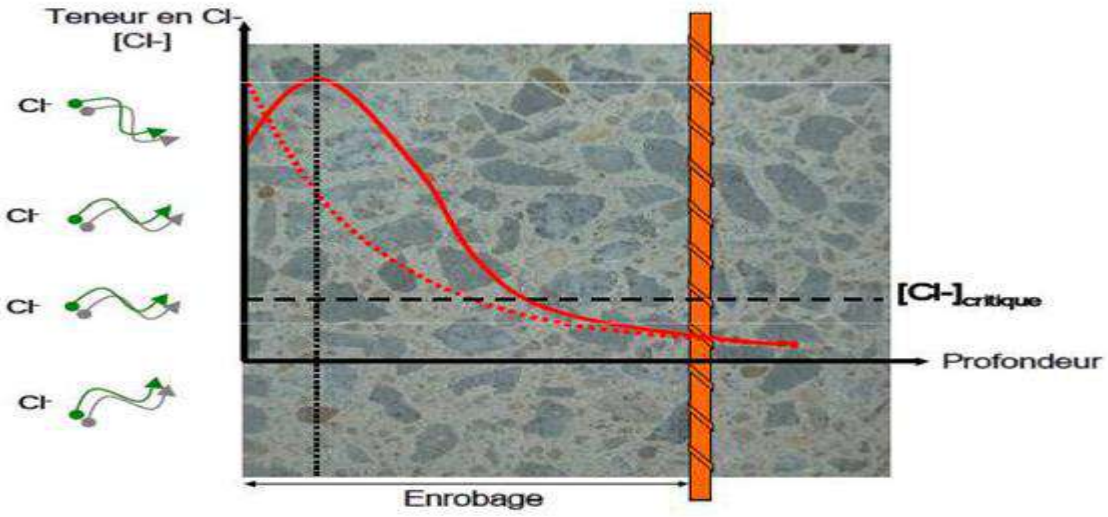


Fig.I.12 : Mécanisme de pénétration des CL^- [cete-méditerranée.fr décembre 2008]

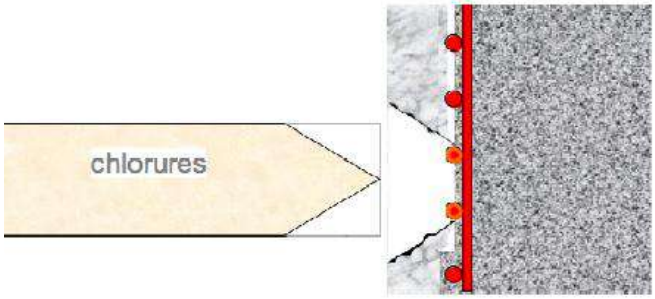


Fig.I.13 : Dépassivation par chlorures [cete-méditerranée.fr décembre 2008]

I.4.6 : Amorçage et propagation de la corrosion :

La corrosion des armatures se manifeste par des éclats du béton d'enrobage, des épaufrures locales ou la présence de taches de rouille sur le parement. Elle engendre une perte de section de l'acier pouvant entrainer sa rupture fragile et une altération de la capacité portante de la structure. Les principales conséquences résident dans la perte de fonction de la structure en termes d'esthétisme ou de sécurité pour les usagers. En règle générale, on considère que la corrosion ne s'amorce que lorsque les agents agressifs ont pénétré dans le béton d'enrobage sain et ont atteint les armatures. Les principales étapes du processus de corrosion des armatures sont donc :

La propagation des agents agressifs extérieurs tels que le gaz carbonique CO2 ou les ions chlorure Cl- . L'amorçage de la corrosion (dépassivation des armatures) ; la propagation de la corrosion conduisant à l'endommagement du béton d'enrobage (éclats, épaufrures, ruptures…). La dégradation du béton est progressive et s'accélère après la destruction de l'enrobage. Le diagramme de Tuuti illustre deux étapes de la corrosion (Fig.I.21). [12]

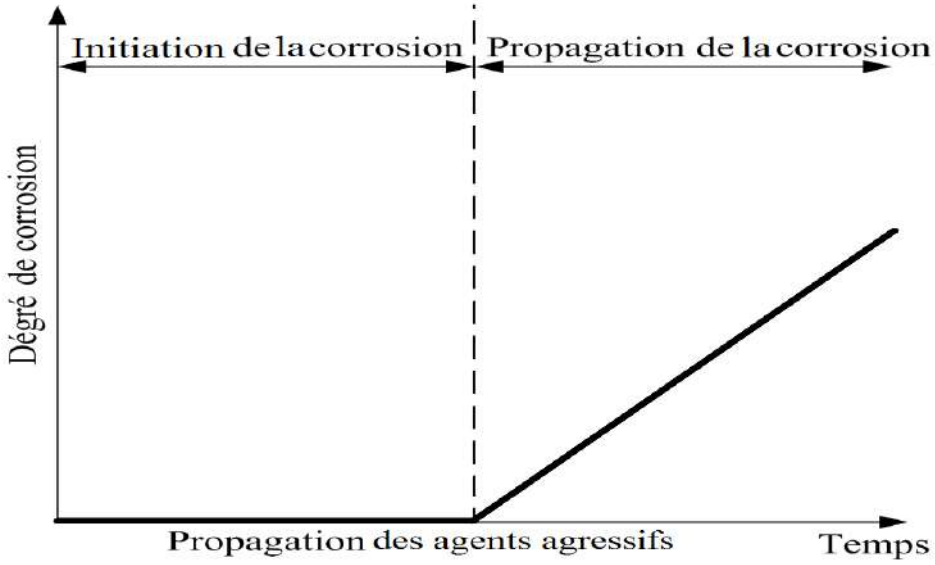


Fig.I.14 : Processus de corrosion des armatures du béton armé

(*Modèle de Tuutti -tiré de Bertolini et col, 2004)*

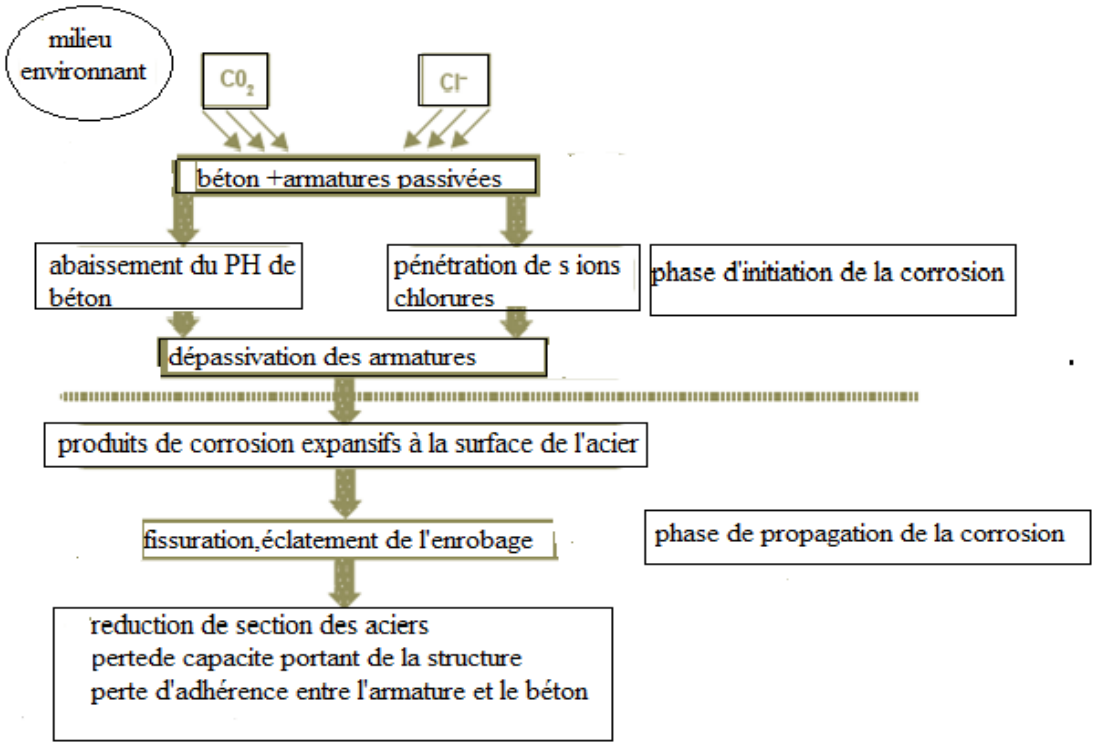


Fig.I.15 : schéma de processus de corrosion (Les collections de l'Ifsttar)

I.4.6.1 : La corrosion initiée par la carbonatation (Corrosion généralisée) :

a. Processus de carbonatation (phase d'initiation) :

La réaction du dioxyde de carbone (CO2) issu de l'air avec les substances alcalines du béton s'appelle la carbonatation. La combinaison du dioxyde de carbone avec l'hydroxyde de calcium -l'hydroxyde de calcium encore appelé portlandite est formé lors des réactions d'hydratation du ciment- donne lieu à un carbonate de calcium, comme le montre la réaction ci-après : $Ca(OH)2 + CO2\ H2O \rightarrow CaCO3 + H2O$ Cette réaction ne se déroule qu'en milieu aqueux .D'abord, il faut que le dioxyde de carbone se dissolve dans l'eau des pores, ce qui entraîne une chute du pH (d'environ 13 à 9). Par cette chute de pH, l'hydroxyde de calcium entre également en solution. Les deux produits réagissent et se précipitent sous la forme de carbonate de calcium. L'humidité relative du milieu environnant qui détermine la teneur en eau du béton est un paramètre fondamental. En effet, pour que le processus se poursuive, il faut un apport de dioxyde de carbone frais. Or, la diffusion du dioxyde se déroule 10.000 fois plus rapidement dans l'air que dans l'eau. L'humidité relative doit donc être suffisamment faible pour que la diffusion du gaz carbonique soit possible mais elle doit aussi être suffisamment importante pour que la réaction de carbonatation proprement dite, qui ne peut être réalisée qu'en phase aqueuse, puisse avoir lieu. [13]

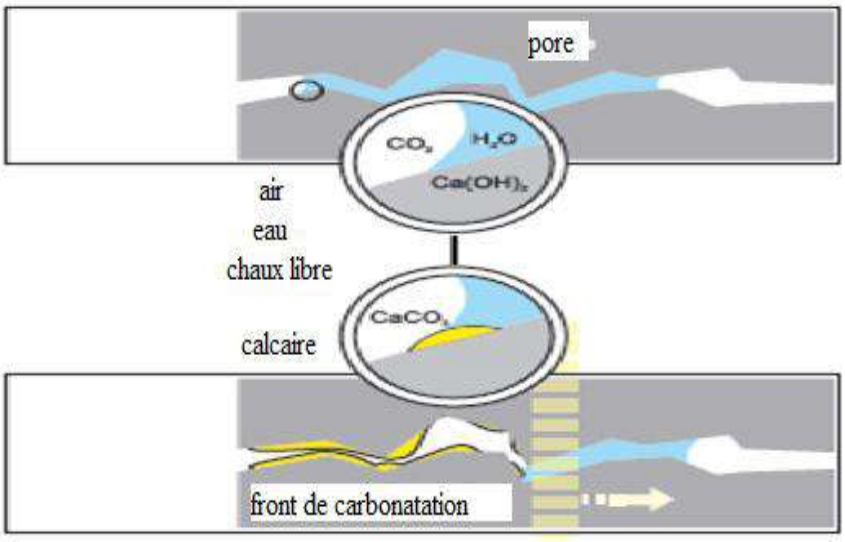


Fig.I.16 : processus de carbonatation [site febelcem.be]

La vitesse de carbonatation diminue avec le temps. Au fur et à mesure que la zone de carbonatation (front de carbonatation) progresse, le carbonate de calcium forme colmate progressivement les pores du béton. Le CO2 doit parcourir une distance plus longue pour trouver les substances alcalines, et des lors, le processus se ralentit. La carbonatation est

maximale lorsque l'humidité relative se situe entre 40 et 70 %, elle diminue, ensuite, rapidement. La *figI.24* donne l'ordre de grandeur de la profondeur de carbonatation à laquelle on peut s'attendre en fonction du rapport E/C du béton. Attention, avec un béton mal réalise, à forte porosité, des profondeurs de carbonatation importantes (30 à 40 mm) sont observées. Un béton constamment immerge dans l'eau ne présentera pour ainsi dire aucune carbonatation ; la résistance de l'eau a la diffusion du dioxyde de carbone est trop élevée. Un béton expose a un climat intérieur normal présentera une carbonatation rapide mais très superficielle par manque d'eau. En ce qui concerne un béton expose a un climat extérieur, il faut faire la distinction entre les situations ou le béton est, soit abrite de la pluie, soit expose à celle-ci. Pour la situation extérieure et non abritée, les pores sont régulièrement remplis d'eau, ce qui rend l'apport de dioxyde de carbone plus difficile. Pour la situation extérieure abritée, par contre, le processus de carbonatation se déroule plus rapidement, étant donne que les pores sont rarement satures.

A noter que les silicates (CSH) et les aluminates (CAH) hydrates, ainsi que les composes du clinker sont aussi susceptibles de réagir avec le dioxyde de carbone pour former du carbonate de calcium.[14]

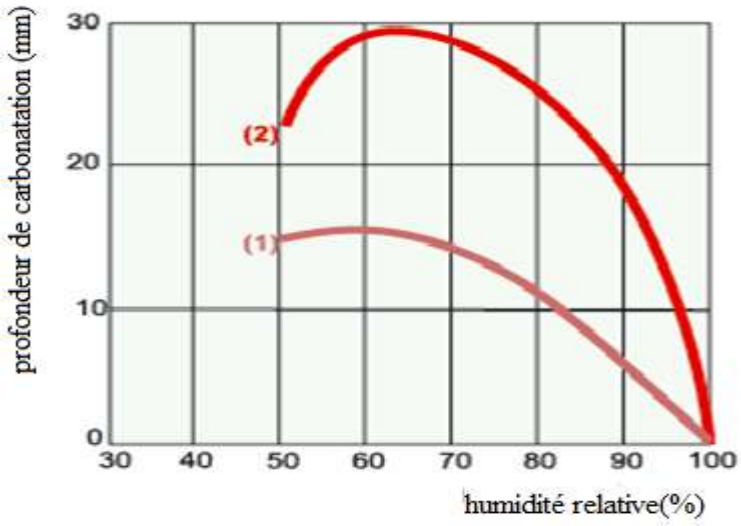


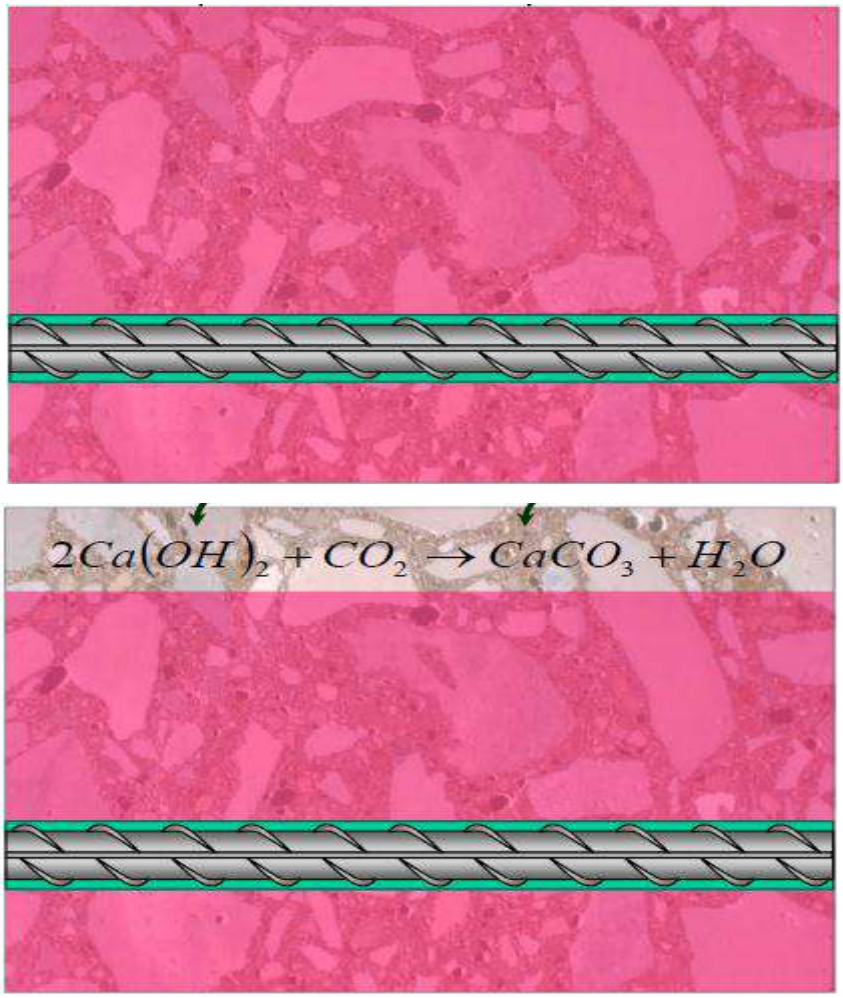
Fig.I.17 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la profondeur de carbonatation **(courbe 1 : E/C = 0,60 ; courbe 2 : E/C = 0,80)** [site febelcem.be]

a. Processus de corrosion (phase de propagation) :

Dans le béton non armé, la carbonatation n'a pas d'influence négative sur la durabilité. Au contraire, la formation de CaCO3 insoluble fait diminuer la porosité.

Pour le béton armé, la carbonatation peut être néfaste par l'abaissement du pH. En effet, les substances alcalines disparaissent progressivement et l'acier n'est plus protégé. On dit qu'il n'est plus passivé.

La question qui se pose alors est de savoir si l'acier va se corroder et, dans l'affirmative, à quelle vitesse. L'acier ne peut se corroder que s'il est mis simultanément en présence d'eau et d'oxygène.



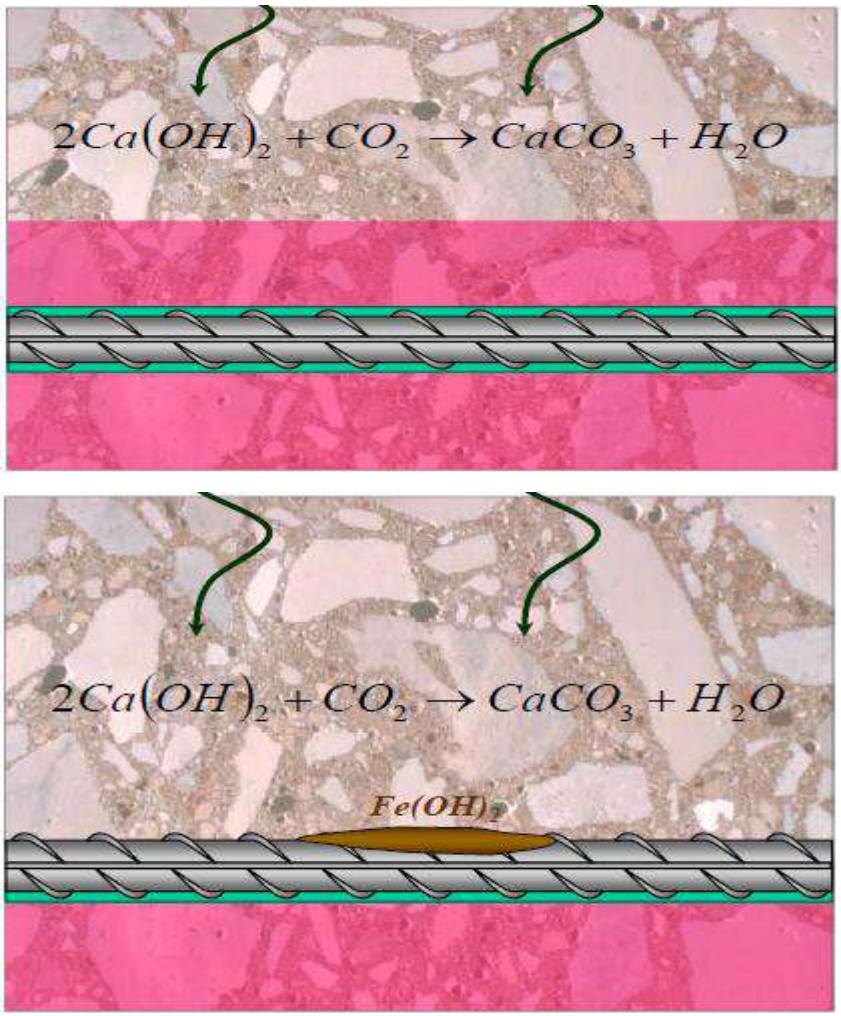


Fig.I.18 : Les étapes de carbonatation

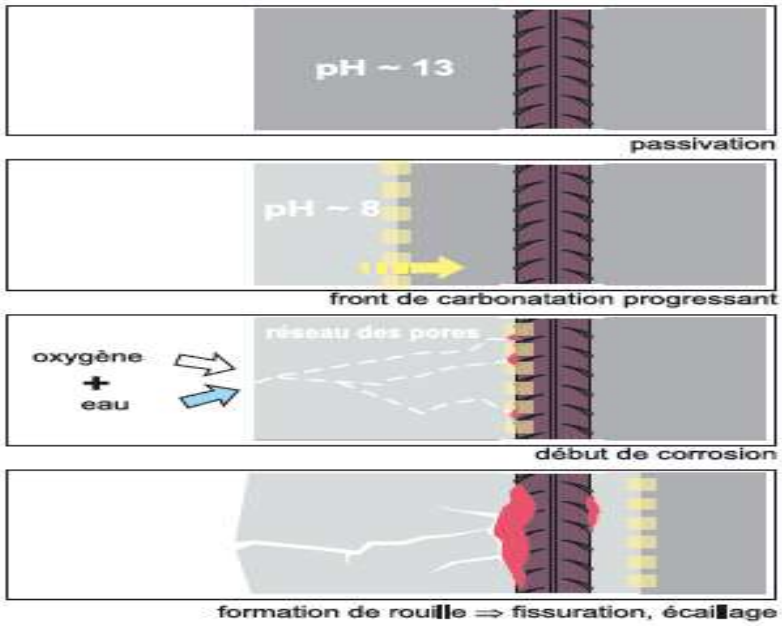


Fig.I.19: Corrosion initiée par la carbonatation [site febelcem.be 2009.fr]

Il existe une relation entre la vitesse de corrosion et l'humidité relative dans le béton carbonate. L'expérience montre que la corrosion est le plus à craindre lorsque l'armature est régulièrement ≪humidifiée≫ (couverte d'eau) et que l'oxygène peut facilement pénétrer jusqu'à l'armature (Fig.I.20).

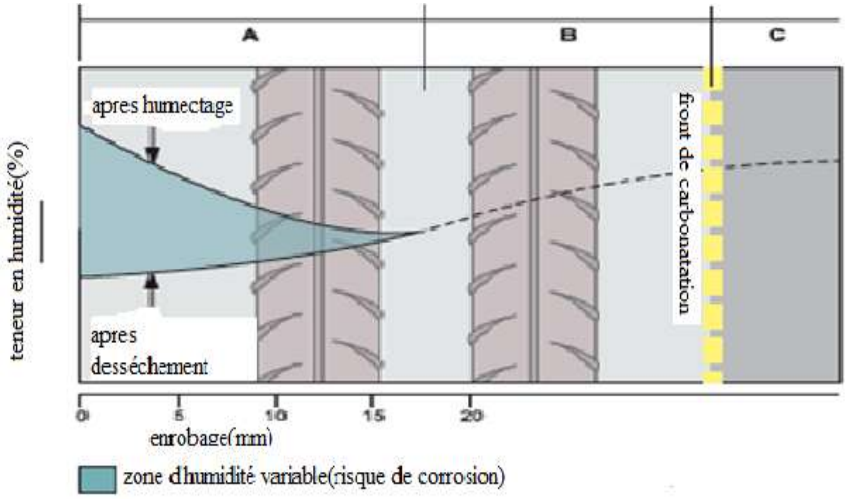


Fig.I.20 : Profil d'humidité et front de carbonatation [site febelcem.be 2009.fr]

Dans un béton carbonaté, la probabilité d'une formation de rouille dépend donc des caractéristiques de l'environnement. Les armatures d'un béton exposé à un climat intérieur normal ne rouillent pas par manque d'eau. Pour les armatures d'un béton exposé à l'extérieur, la distinction doit être faite entre les 3 situations suivantes qui dépendent du profil d'humidité et du front de carbonatation.

• Présence d'armatures dans la zone carbonatée et plus particulièrement dans la zone soumise à des variations d'humidité (zone où s'alternent des phases de mouillage et de séchage (zone A) Cette zone s'étend sur les 15 à 20 premiers millimètres à compter à partir de la surface du béton). Dans ce cas, l'armature va se corroder. Le fait que le béton soit abrité ou non détermine la vitesse de corrosion. La rouille se produira plus vite dans un endroit abrité (par exemple la face inférieure d'un balcon), car, dans pareil cas, l'oxygène pénètre relativement facilement dans les pores qui ne sont que partiellement remplis d'eau. La rouille progresse lentement et uniformément.

• Présence d'armatures dans la zone carbonatée mais en dehors de la zone sujette aux variations d'humidité (zone B). Dans une telle situation, la corrosion peut se produire lorsqu'il y a suffisamment d'humidité et d'oxygène. L'étude de cas pratiques démontre que la probabilité que cela se produise est plutôt faible. Dans la majorité des cas, il ne faut pas s'attendre à une détérioration notable due à la rouille pendant la durée d'existence de la

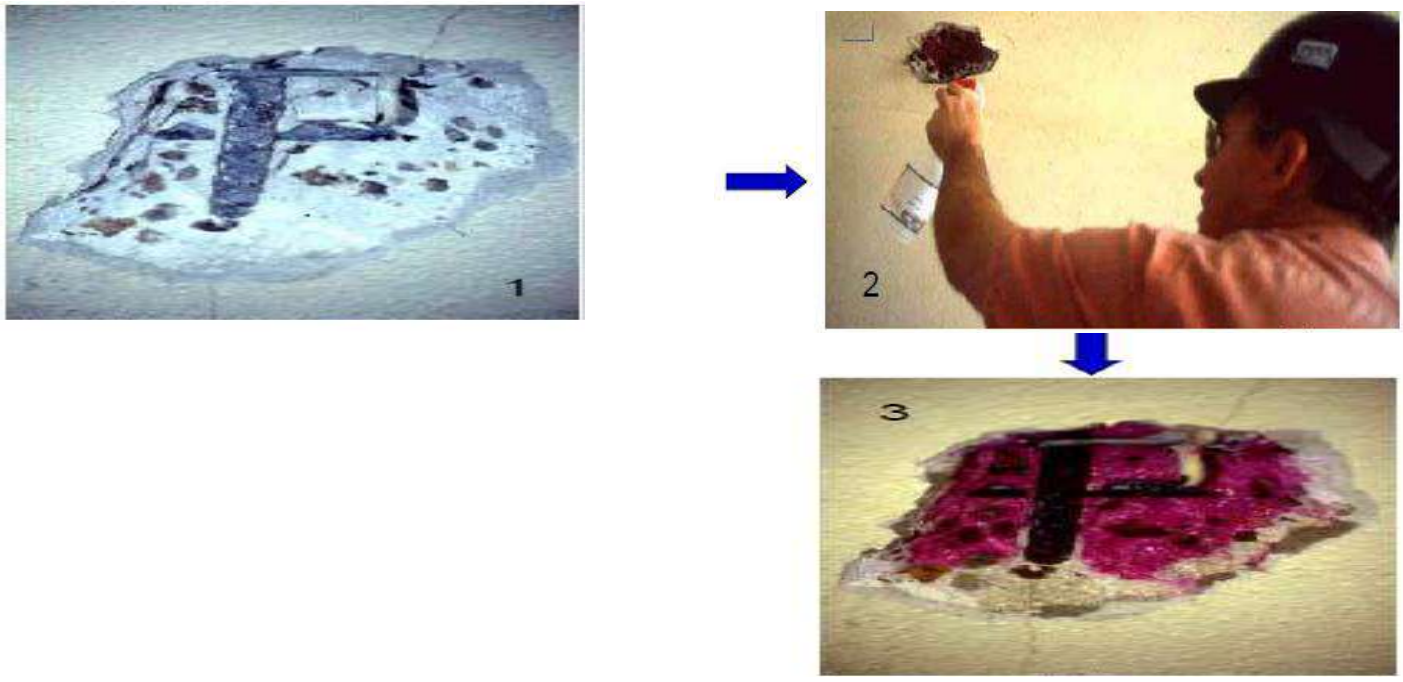
construction.

• Présence d'armatures dans la zone non carbonatée (zone C). Aucun danger de corrosion. On notera que la corrosion initiée par la carbonatation est une corrosion généralisée de l'acier se traduisant par une diminution progressive de la section des armatures. L'accumulation des produits de corrosion volumineux au niveau des armatures génère des gonflements et fait alors éclater le béton d'enrobage (formation d'épaufrures sur les ouvrages).

- **MESURE DE LA PROFONDEUR DE CARBONATATION :**

La carbonatation du béton s'accompagne d'une diminution du pH.

Afin de mesurer la profondeur de carbonatation, la profondeur à laquelle le pH atteint une valeur de l'ordre de 9 est mesurée. La technique la plus simple est le test à la phénolphtaléine qui, consiste à examiner, quelques instants après pulvérisation, le changement de couleur de cet indicateur coloré (violet) en fonction du pH. Dans les zones carbonatées, l'indicateur devient incolore. Le virage de la phénolphtaléine est représentatif d'une zone de pH de l'ordre de 9,5. La mesure de la profondeur de carbonatation, s'effectue de manière normalisée en faisant la moyenne des valeurs mesurées en différents points.[14]



Phot.I.2 : Mesure de carbonatation [doc. lerm.fr 2002]

I.4.6.2 : La corrosion initiée par les chlorures (Corrosion localisée par piqûres) :

Des ions chlorures véhiculés par l'eau peuvent être présents dans le béton : ils peuvent être présents dans les composants du béton (granulats marins, …), être incorporés au moment du malaxage (adjuvants accélérateurs de prise chlorés, …) ou encore pénétrer dans l'ouvrage

au fil du temps par diffusion à partir du milieu extérieur (eau de mer, sels de déverglaçage, …). A partir d'une teneur critique en chlorures, une armature peut se corroder localement pour autant qu'elle soit mise en présence d'eau et d'oxygène : des cratères de faible dimension, affectent l'acier et s'agrandissent progressivement figure 23). En effet, les ions Cl- réagissent avec les ions Fe++ pour former du chlorure de fer. Celui-ci consomme les ions hydroxyle, migre et s'oxyde plus loin en déposant de la rouille. De là, les tâches de rouille en surface du béton, typiques d'une corrosion par les chlorures. Les réactions se déroulent comme suit :

$Fe^{++} + Cl^- \rightarrow FeCl_2$ (chlorure de fer)

$FeCl_2 + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 2Cl^-$

$Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow$ rouille

On constate donc que les ions chlore, Cl-, sont recyclés, ce qui explique que la rouille ne contient pas de chlorures, même si des chlorures ferreux sont formés lors des étapes intermédiaires de la réaction. Ainsi, cette corrosion est susceptible de continuer au même endroit. La corrosion initiée par les chlorures est donc une corrosion localisée par piqûres de l'acier. Elle est extrêmement dangereuse car elle entraîne une réduction locale de la section d'armature. Lorsque celle-ci devient trop petite, elle se rompra brusquement, ce qui peut avoir des conséquences désastreuses.

En ce qui concerne la teneur critique en chlores, on a constaté qu'il n'existe pas de valeur limite unique. La corrosion des armatures s'amorce dès que la teneur en ions chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation.

Ce seuil peut varier en fonction de nombreux facteurs (cation associé aux chlorures, teneur en oxygène, humidité relative, température, degré d'hydratation du ciment, teneur en C3A, porosité, ajouts, composition de l'acier, …). Toutefois, un rapport [Cl-] libre/ [OH-] égal à 0,6 est souvent admis. Cette seule teneur en chlorures limite est insuffisante pour déterminer si la corrosion aura lieu. Comme elle dépend du pH, il y a un rapport indirect avec la carbonatation. La corrosion peut se produire dans un béton carbonaté à des teneurs en chlorures plus faibles que pour un béton non carbonaté.

Un rapport [Cl-]libre/[OH-] compris entre 0,6 et 1 conduit généralement à une concentration «critique» en ions chlorure totaux de l'ordre de 0,4 % de la masse de ciment pour un béton non carbonaté et donc à des concentrations «critiques» comprises entre 0,04 et 0,1 % par rapport à la masse de béton suivant la formulation.

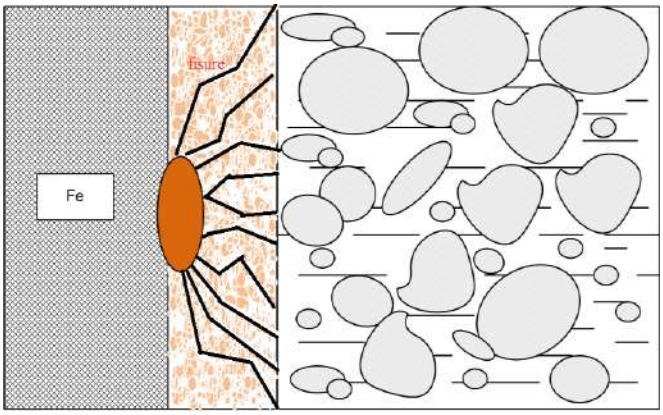


Fig.I.21: Apparition de fissures par formation d'oxydes hydroxyde à l'interface couche passive-fer. [Pastel. archivves-ouvertes.fr]

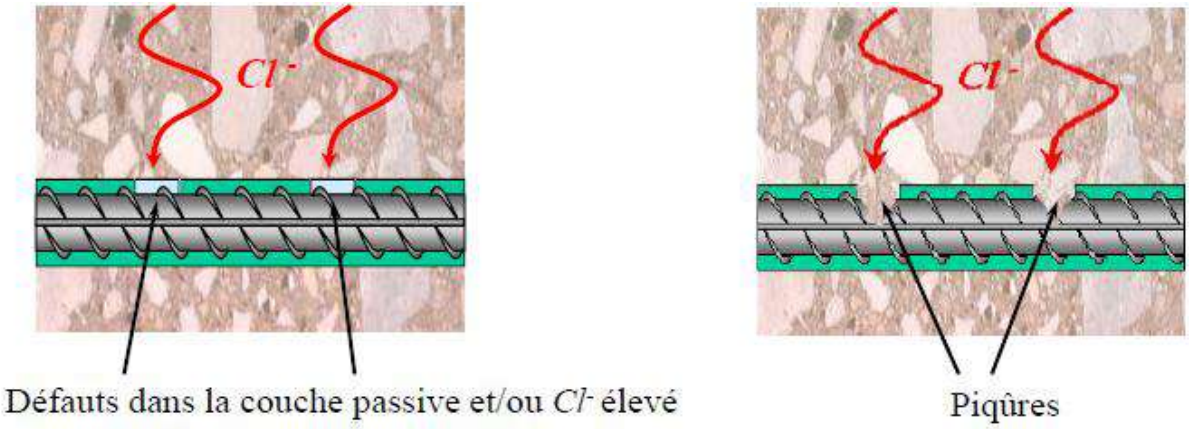


Fig.I.22: attaque de chlorure [eduscol. education.fr]

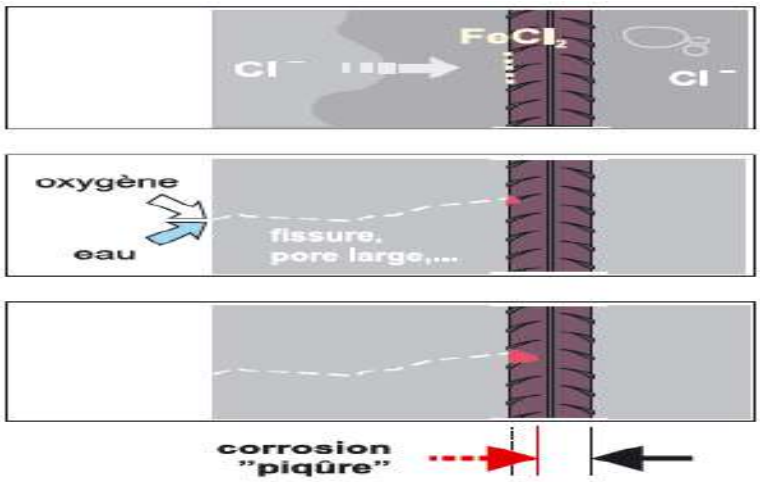


Fig.I.23 : Corrosion initiée par des chlorures [Febelcem. be juin 2004.fr]

- **CHLORURES LIBRES ET CHLORURES TOTAUX :**

  - Les chlorures libres se trouvent sous forme ionique dans la solution interstitielle. Ils sont extractibles à l'eau et sont de ce fait appelés également «chlorures solubles dans l'eau».

- Les chlorures totaux incluent, outre les précédents, ceux fortement adsorbés sur les C-S-H et ceux chimiquement liés dans la matrice cimentaire sous forme de composés tels que les chloroaluminates de calcium. Seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassivation et de corrosion des armatures.



Phot I.3 : Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure [Lewi site- compound pubchen janvier 2007]

I.4.7 : Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures :

- Des expansions qui conduisent à la formation des fissures qui provoquent éventuellement du couvert du béton.
- Perte de l'adhérence des barres et la diminution de leur diamètre effectif, qui engendrent une perte de capacité en traction.
- Un éclatement de béton, car la rouille résulte de la formation de produits fortement gonflants qui dépendent de l'état de l'oxydation dont le volume peut être jusqu'à six fois supérieures au volume initial.
- Perte de section des barres d'acier**.**

I.5 : Notion sur la protection contre la corrosion :

I.5.1 : Protection contre la corrosion :

I.5.1.1 : Moyens de lutte contre la corrosion :

Compte tenu, en particulier, des impératifs de sécurité et d'économie, les problèmes de la corrosion sont souvent délicats à résoudre. Le choix des moyens de protection doit être soigneusement analysé. Nous ne citons ici que les principaux procédés applicables à l'anticorrosion. [15]

- **Protection par revêtements**

A- Revêtements non métalliques

- ✓ Peintures.
- ✓ Matières plastiques.

B- Revêtements métalliques

- ✓ Immersion dans un bain fondu.
- ✓ Electrolyse.
- ✓ Métallisation au pistolet.

➢ **Protection électrochimique**

- ✓ Protection anodique.
- ✓ Protection cathodique.

➢ **protection par inhibition.**

- ✓ Les inhibiteurs organiques.
- ✓ Les inhibiteurs minéraux.

I.5.1.2 : Généralités sur les inhibiteurs de corrosion :

I.5.1.2.1 : Définition :

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte original contre la corrosion des métaux. L'originalité vient du fait que le traitement anticorrosion ne se fait pas sur le métal lui-même mais par l'intermédiaire du milieu corrosif. [16]

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique. Celle retenue par l'association américaine "National Association of Corrosion Engineers (NACE)" est la suivante: "un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration. [17]

I.5.1.2.2 : Propriété et classe d'inhibiteur :

Partant de cette définition, un inhibiteur de corrosion doit donc vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales: abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier; être stable en présence d'autres constituants en particulier vis-à-vis de certains biocides; être stable dans le domaine de température utilisé; être efficace à faible concentration; peu onéreux par rapport aux économies qu'il permet de réaliser et finalement, être compatible avec les normes en vigueur de non-toxicité et de protection de l'environnement.

Il existe plusieurs façons de classer les inhibiteurs de corrosion. Généralement, ils sont classés en fonction de leur domaine d'application, de la formulation des produits (inhibiteur organique, inhibiteur inorganique), de la réaction électrochimique inhibée (inhibiteur cathodique, inhibiteur anodique ou mixte), ou du mécanisme réactionnel mis en jeu (adsorption et/ou formation d'un film). [18]

I.5.2 : Protection contre la corrosion des armatures dans le béton :

I.5.2.1 : Couverture des armatures :

Les essais de laboratoire et l'examen de bétons détériorés montrent qu'un facteur essentiel pour la durabilité est l'épaisseur du recouvrement des armatures. La couverture doit être de 1.5 cm au moins pour les constructions à l'abri des intempéries et de 2.5cm si elles ne sont pas à l'abri. Le recouvrement est à augmenter jusqu'à un maximum de 5cm dans les milieux agressifs.

La couverture de 1 cm pour les pièces préfabriquées et pour lesquelles on peut assurer un béton de haute qualité. Cette couverture est en réalité insuffisante et conduit fréquemment à des dégâts à court terme. La couche superficielle contient toujours un excès de sable, car les gros granulats n'ont pas de place entre le coffrage et l'armature. Cette couche est donc plus poreuse et se carbonate plus rapidement que le béton normal.

I.5.2.2 : Revêtements anticorrosion :

Les revêtements anticorrosion peuvent être classés en différentes catégories :

I- Imprégnation en profondeur (résines en solution ou en émulsion aqueuse).

II- Revêtements pelliculaires non armés (résines époxydes, polyuréthanes).

III- Revêtement armé (1à3 mm d'épaisseur, résines époxydes et polyuréthanes).

IV- Mortiers de résines (3 à 20 mm d'épaisseur, résines époxydes et polyuréthanes chargés).

Pour protéger le béton de la carbonatation et de la pénétration des chlorures, on utilise un revêtement constitué d'une couche d'accrochage en résine époxydes sans solvant et de deux couches de résines époxydes souples.

I.5.2.3 : Protection cathodique :

La protection cathodique des armatures consiste à leur imposer un potentiel électrique suffisamment négatif pour que le fer ne puisse pas se dissoudre. C'est une méthode qui n'est que peu employée et qui est appliquée à des ouvrages particuliers (ponts, plates-formes pétrolières). [19]

I.5.2.4 : Protection des armatures par inhibiteurs :

Les inhibiteurs de corrosions sont utilisés avec succès dans les canalisations, les réservoirs en acier etc. pendant beaucoup de décennies. Leur utilisation dans le béton a un intérêt croissant puisqu'il peut considérer comme technique prometteuse offrant une pratique facile avec des coûts réduits. Pour cette raison, une gamme étendue des inhibiteurs est, de nos jours, disponible pour le client.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classifiés de différentes manières: selon leurs méthodes d'application, selon leur mécanisme de la protection, ou leur contenu. Les méthodes principales d'application pour des inhibiteurs de corrosion sont:

_ Ajoutés comme mélange au béton frais

_ Appliqué sur la surface du béton durci

Les inhibiteurs peuvent aussi être ajoutés

_ Soient aux mortiers de réparation.

_ Utilisés comme traitement extérieur sur les barres d'acier. [20]

Conclusion

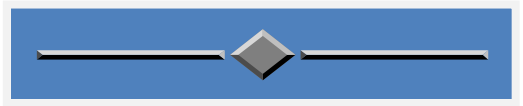
La tenue, face à la corrosion des armatures dans le béton est fonction des paramètres concernant l'acier et le béton ainsi que des propriétés existantes à leur interface. Cela est déterminé par la composition de la solution interstitielle du béton et des caractéristiques métallurgiques de l'acier. Les facteurs environnementaux (humidité, température, dioxyde de carbone, ions chlorure) ne peuvent affecter directement le processus de corrosion mais ils peuvent causer des dégradations du béton et accélérer l'entrée d'espèces agressives rendant la solution interstitielle en contact avec l'acier plus corrosive.

Lorsqu'ils atteignent les armatures, les ions chlorure et le dioxyde de carbone sont tenus pour responsables de la plupart des cas de corrosion des structures en béton armé. La température et l'humidité, tout comme les autres facteurs pouvant détériorer le béton, jouent aussi un rôle important dans la corrosion des armatures.

La corrosion de l'acier n'est donc pas dépendante d'un unique paramètre mais de plusieurs dont les interactions concourent ou non à la corrosion.

Chapitre II

Méthodologie de diagnostic d'un ouvrage en béton armé



II. Méthodologie de diagnostic d'un ouvrage en béton armé

De nos jours, le béton est un des matériaux de construction les plus usuels. Ce matériau, outre ses nombreux avantages, évolue et réagit avec son environnement. En effet, au cours du temps, les ouvrages en béton armé développent de nombreuses pathologies (corrosion des aciers, gel-dégel, fluage, réactions chimiques, etc.). Sous l'action de ces agressions physico-chimiques, ce dernier se dégrade et présente alors des désordres allant de la simple fissure à la détérioration structurale grave. La majorité des infrastructures existantes ont été construites avec ce matériau et cela depuis plus d'une cinquantaine d'années. Ce patrimoine national est donc vieillissant ce qui nécessite un entretien et un suivi régulier. Cependant, la maintenance des ouvrages de ce patrimoine bâti est très onéreuse. Une démarche scientifique rigoureuse est donc nécessaire pour réduire ce budget par la mise en place d'outils visant à optimiser et fiabiliser le diagnostic structural des ouvrages.

II.1. Diagnostic de la corrosion des armatures

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

La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépendent à la fois de la position des armatures (enrobage et espacement), de la qualité du béton d'enrobage (compacité et homogénéité), et de l'environnement (nature de l'agent agressif : chlorures, sulfates). Ainsi, lorsqu'une corrosion se manifeste, il est raisonnable de s'attendre à ce que le processus de dégradation s'étende au-delà de la dégradation visible.

La plupart des méthodes d'investigation employées sont donc orientées vers la détermination de caractéristiques liées à ces paramètres. [2]

II.1.1. Objectifs du diagnostic de la corrosion des armatures

Les objectifs d'un diagnostic de corrosion sont :

- L'identification de l'origine (carbonatation, chlorures externes ou internes, autres)
- l'évaluation de l'étendue dans l'espace ;
- la prédiction de l'évolution probable, dans le temps ou dans l'espace ;
- l'estimation des conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ou des personnes ;
- la définition des suites à donner et entre autres le principe des solutions de réparation.

Des considérations d'ordre esthétique sont par ailleurs à prendre en compte dans de nombreux cas : bâtiments, monuments historiques, du fait de la nature des matériaux de base,

de leur texture, de leur couleur et de la nature du ciment. Ceci est à prendre en compte dans l'établissement du programme d'investigations. [2]

II.2. Les principales étapes d'un diagnostic

L'ingénieur chargé des opérations de diagnostic doit avoir des compétences sur la physico-chimie des matériaux, l'instrumentation, les méthodes de réparation et de traitement. Dans les cas délicats, il devra s'associer avec un ingénieur spécialiste des structures (pour les problèmes d'ordre mécanique), ou un ingénieur chimiste de laboratoire (pour les problèmes liés aux gonflements du béton, etc.).

II. 2.1. Visite préliminaire

La visite préliminaire (selon AFGC, 2003) a pour objet d'améliorer la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles, l'accessibilité des parties dégradées. Cette inspection débouche sur un pré-diagnostic et sur un programme d'investigations. Elle comprend :

La collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage : historique, documents, dossiers, rapports, implantation, orientation, date de construction, plans décoffrage et de ferraillage, environnement (nature chimique, vents dominants), matériaux (ciment, agrégats, dosage), etc.

Un examen succinct de l'intégralité de la structure, et le relevé de tous les symptômes avec prise de photographies. On utilisera les moyens d'accès les plus adaptés : il est nécessaire de voir de près les surfaces dégradées. Quelques tests simples (profondeur de carbonatation, présence de chlorures, alcali-réaction) pourront être envisagés à cette étape, afin d'orienter le programme d'analyse futur.

Après cette visite, l'ingénieur doit être capable :

- D'émettre un pré-diagnostic sur les causes probables des désordres ;
- D'effectuer la mise au point du programme des investigations. Ce dernier tiendra compte de toutes les sujétions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc.;
- D'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garanties est nécessaire ;
- Et de faire évoluer les mesures de sauvegarde (limitation du trafic, mise sous surveillance renforcée...);
- Il doit également estimer le coût probable et la durée des investigations, si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage... [2]

II.2.2. Collecte des documents

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

- Date de construction afin de connaître le code selon lequel la structure a été calculée et les dispositions constructives de l'époque;
- L'histoire de la structure ;
- Les plans de coffrage et de ferraillage ;
- Les rapports d'éventuelles études antérieures;
- L'orientation de la structure;[9]

II. 2.3. Préparation de l'intervention

A partir de la visite sur site et de l'étude des documents collectés on peut déterminer précisément le nombre et le type de mesures à réaliser pour répondre au mieux à la demande du client. Avant l'intervention il faut déjà avoir déterminé quelles informations sont importantes pour réaliser la mission, quelles sont à priori les dégradations que l'on veut mettre en évidence.[9]

II.2.4. Inspection détaillée

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

II. 2.4.1. Préparation de l'inspection

Il s'agit tout d'abord de vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire, de rechercher des documents de synthèse déjà établis, tels que précédents rapports d'expertise, etc.

Les moyens d'accès seront recensés et définis au préalable, et toutes les dispositions prises (sécurité, accès, nettoyage, etc.).

II.2.4.2. Inspection

L'inspection proprement dite comprend le relevé, éventuellement sur plans, de tous les désordres visibles, et de tous renseignements utiles quant à l'aspect du béton : (présence d'anciens revêtements, ou de produits d'imprégnation, aspect de la surface du béton, (stalactites, efflorescences, traces de rouille), traces d'humidité, fissures, (ouverture, réseau), détérioration de la peau du béton, armatures apparentes, épaufrures, détection des zones sonnant creux et éventuellement déformation de la structure.[9]

II. 2.5. Essai en laboratoire

Si des échantillons ont été prélevés dans les zones représentatives des états de

dégradation, ceux-ci sont envoyés en laboratoire pour analyse chimique ou microstructurale afin de qualifier le béton. Lorsque des carottes ont été prélevées sur la structure elles sont écrasées afin de connaître la résistance à la compression du béton.[5]

II. 2.6. Traitement des résultats

L'ensemble des résultats d'analyse et des relevés des défauts sont récapitulés dans des tableaux ou sur des plans dans le rapport de diagnostic. Si l'inspection de la structure était complète, il faudrait pour chaque type de désordres effectuer un linéaire en vue d'une éventuelle réparation. [5]

II.2.7. Commentaires et avis de réparation

A partir de tous les éléments dont il dispose, l'ingénieur chargé d'affaires doit indiquer dans son rapport :

- L'origine probable des désordres, leur étendue, et leur probable évolution;
- Si la structure garantit toujours la sécurité des personnes et des bien qu'elle abrite (bâtiments) ou qu'elle ne menace pas de s'écrouler;
- Les zones à traiter en priorité
- Des conseils sur l'exploitation de l'ouvrage, maintien, renforcement ou suivi, conseil sur des éventuels compléments d'étude
- Des recommandations relatives aux éventuelles méthodes de réparation les mieux adaptées

Il est à rappeler que le rapport de diagnostic doit être compréhensible pour un non initié.

II. 2.8. Investigation in situ

Une investigation type se compose d'une série de tests différents suivie d'une phase d'analyse permettant le choix de la stratégie optimale de réparation. La réalisation du même genre de tests est également un moyen de contrôle de qualité pour les ouvrages récents.

Le programme des investigations est établi en tenant compte des contraintes et impératifs suivants :

- L'importance de la structure ;
- la nature, la gravité et l'intensité des phénomènes, la sécurité des personnes ;
- les délais et les coûts ;
- l'accessibilité ;
- l'environnement, etc. [2]

II.2.8.1. Choix d'investigation

Le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres. Il est primordial de les évaluer afin de mettre en œuvre mission. Ces différents paramètres sont décrits dans la figure II.1.

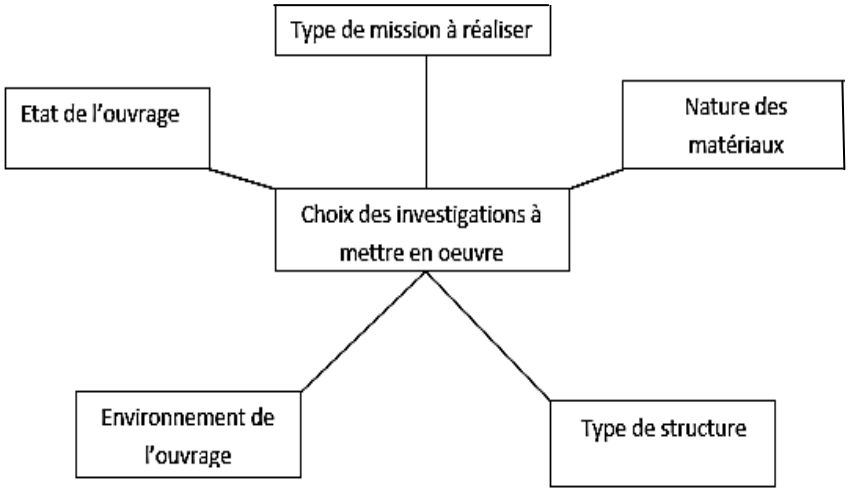


Fig. II.1 : Schéma du choix d'investigation [ASTOLFI J-P 2002 les cahiers pédagogique 409]

En effet, le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend :

- Du type de mission à réaliser ; selon ce que souhaite le client, il est possible de réaliser différents types de missions à savoir : Une inspection de l'ouvrage, un diagnostic, un diagnostic approfondi, un suivi d'ouvrage. Chacune de ces missions met en œuvre différentes méthodes de diagnostic, de plus ou moins grande ampleur, mais aussi une interprétation des résultats plus ou moins poussée.
- De la nature des matériaux ; Le diagnostic d'un ouvrage en béton armé ne fera pas appel aux mêmes techniques d'investigation que pour un ouvrage en bois, en acier ou en pierre. De plus, chacun de ces matériaux a ses propres pathologies types.
- Du type de structure ; Les moyens à mettre en œuvre seront différents selon qu'il s'agisse d'un ouvrage d'art ou bien d'un bâtiment industriel ou un bâtiment d'habitations.

La géométrie et la taille de l'ouvrage rentrent aussi en compte dans le choix des investigations.

- De l'environnement de l'ouvrage ; Il est important de prendre en considération l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage, car il peut être à l'origine de ces pathologies. C'est le cas notamment pour les structures en milieu chimique ou pour les structures en milieu chimique ou pour le bâtiment « La Saline » pour lequel sa structure se trouve dans un milieu, avec beaucoup d'éléments de chlorures, directement lié à l'activité se déroulant dans le bâtiment.

- De l'état de l'ouvrage ; Les investigations dépendent d'une part des désordres qui affectent l'ouvrage, le matériel et le type d'investigation à mettre en œuvre seront différents pour des armatures corrodées ou pour des fissures .Mais cela dépend aussi de la fragilité de l'ouvrage. [21]

II.2.8.2. Types d'investigation

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

✓ **Investigations non destructives**

Le principe de ces méthodes de diagnostic réside dans le fait que l'on analyse l'ouvrage ou une partie de l'ouvrage sans porter atteinte à son intégrité. Ceci est à privilégier dans différents cas, par exemple les bâtiments classés monuments historiques, pour lesquels il est difficile de faire accepter aux architectes des bâtiments de France qu'il soit utile d'effectuer de prélèvements de la structure pour pouvoir la caractériser. Ces méthodes sont à favoriser aussi dans le cas d'ouvrage dont la structure est très atteinte et affaiblie. Effectuer des prélèvements sur ce type de structure risque de la fragiliser encore plus. [21]

✓ **Investigation destructives**

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendre plusieurs formes. Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaitre ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, soit c'est pour avoir accès à des éléments interne ou sous-jacent à la structure. Cela permet aussi de connaitre leur état d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies. [21]

II.2.8.3. Mesures relatives aux corrosions d'armatures dans béton

A. Mesure du potentiel de corrosion

Cette technique permet d'évaluer de l'état d'enrouillement des armatures du béton armé. Ce dernier peut être appréhendé de manière qualitative en effectuant des mesures de potentiels libres ou potentiels de corrosion.

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un voltmètre à haute impédance (10 MΩ au minimum), la différence de potentiel entre l'armature du béton (la connexion nécessite un forage) et une électrode de référence (en général Cu/CuSO4) placée sur le parement de béton.

La conductivité électrique est assurée par mouillage de la surface du parement.

Dans le passé, les valeurs des potentiels libres mesurés sur ouvrage étaient ensuite comparées aux valeurs citées dans la norme ASTM C-876-91 (ré-approuvée en 1999) qui

délimitaient les probabilités de corrosion (ρ en %) suivantes (pour une électrode de référence Cu/CuSO4) :

- Si Ep ≥-200 mV, ρ< 10%1
- Si -350 mV ≤Ep < -200 mV, ρ= 50%
- Si Ep < -350 mV, ρ= 50 à 90%.

Elles permettaient ainsi d'estimer, dans des conditions normales d'exposition du béton, le degré d'enrouillement éventuel des aciers.

Le retour d'expérience a montré que ces règles n'étaient pas fiables et maintenant il convient de se reporter à la recommandation RILEM TC 154 qui conseille d'interpréter les mesures en gradients de potentiels et non pas en seuils de potentiels.

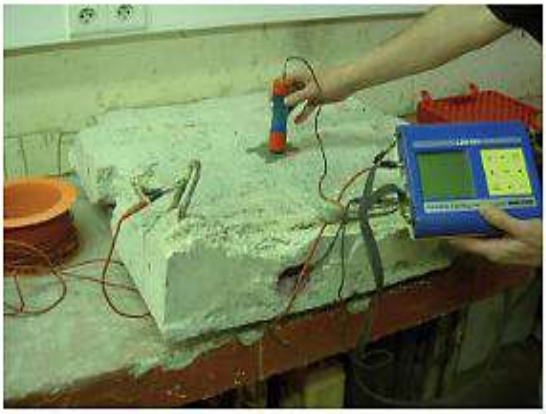
La nouvelle version de la norme ASTM C 876-09 se base maintenant aussi sur des cartes isopotentielles, mais continue à citer les valeurs de seuil mentionnées ci-dessus.

Caractère destructif de la méthode :

Non-destructif (forage ponctuel pour se connecter à une armature dans le béton).

Matériel spécifique employé :

- Matériel électromagnétique de détection d'armatures ;
- règle (traçage des treillis d'armatures) ;
- Craie (marquage des treillis d'armatures) ;
- Perceuse à percussion (puissance minimale de 600 W) avec mèche à béton ;
- pulvérisateur (mouillage du support avant exécution des mesures pour assurer la continuité électrolytique du béton) ;
- dispositif type « pince-crocodile » ou « pince-étau » pour connexion à l'armature ;
- voltmètre à haute impédance (10 MΩ au minimum) ou matériel de mesure de type CANIN
- électrode Cu/CuSO4 saturée ;
- mortier de ciment (rebouchage du trou de connexion à l'armature).



Appareil de mesure type CANIN (CEREMA)



Electrode Cu/CuSO4 (CEREMA)



Mesure de potentiel à grand rendement à l'aide d'une roue d'électrodes (CEREMA)

Fig.II.2 : Les appareils de mesure du potentiel de corrosion

Domaine d'application : Structures en béton (ouvrages d'art, bâtiments, etc.)

Limites d'utilisation : Les mesures ne sont pas réalisables dans les cas suivants :

- Aciers séparés de la surface du béton par un écran isolant ou métallique (par exemple armatures protégées par un produit passivant riche en zinc).
- Revêtement sur le béton électriquement isolant.
- Béton trop sec.
- Discontinuité électrique des armatures.

La méthode n'est donc pas applicable pour évaluer l'état de corrosion des armatures de précontrainte par post-tension intérieure au béton.

Avantage :

- Rapidité d'exécution et de lecture des mesures (en temps réel).
- Interprétation graphique (carte d'équipotentiels) des résultats après traitement informatique

Inconvénients :

- Connexion à l'armature parfois difficile.
- L'interprétation des résultats peut s'avérer difficile car les mesures sont très dépendantes de l'humidité du béton, de sa pollution par les chlorures.
- C'est pourquoi il est conseillé de confirmer les mesures par des examens ponctuels et directs de l'état de conservation des aciers.

- Les seuils de la norme ASTM C 876-09 demandent à être adaptés lorsque les mesures sont faites sur des ouvrages en site maritime. [22]

B. Estimation de la vitesse de corrosion

Cette méthode permet déterminer la densité de courant instantané de corrosion des armatures du béton armé. Les valeurs de densité de courant de corrosion (Icorr) sont obtenues à l'aide d'un appareil dont le principe de fonctionnement est basé sur la mesure de la résistance de polarisation. Cette densité de courant peut ensuite être traduite en vitesse de corrosion instantanée (Vcorr).

L'appareil est relié d'une part à une armature et d'autre part à son capteur spécifique. A titre d'exemple, l'appareil de type GECOR 06 qui a servi au groupe de travail de la RILEM TC154 se compose d'une électrode centrale de référence Cu/CuSO4, de contre-électrodes et d'un anneau de garde. La conductivité électrique dans ce cas est assurée par mouillage de la surface du parement.

Les niveaux de corrosion en fonction de la valeur de la densité de courant de corrosion et la détermination de la vitesse instantanée de corrosion sont indiqués dans le tableau ci-dessous (RILEM TC154-EMC) :

I_{corr} (µA/cm^2)	V_{corr} (mm/an)	Niveau de corrosion
< 0.1	0.001	Négligeable
0.1-0.5	0.001-0.005	Faible
0.5-1	0.005-0.010	Moyen
>1	>0.010	élevé

Tab II.1 : Exemples des valeurs de courant de corrosion données par l'appareil GECOR

Caractère destructif de la méthode : Très peu destructif (forage ponctuel pour se connecter à une armature dans le béton).

Matériel spécifique employé :

- Matériel de détection d'armatures ;
- Règle (traçage des treillis d'armatures) ;
- Craie (marquage des treillis d'armatures) ;
- Perceuse à percussion (puissance minimale de 600 W) avec mèche à béton ;
- Pulvérisateur (mouillage du support avant exécution des mesures pour assurer la conductivité électrique) ;
- Dispositif type « pince-crocodile » ou « pince-étau » pour connexion à l'armature ;

- Appareil de mesure : il existe différents types de matériel : GECOR 06, GECOR 08, GALVAPULSE, RAPICOR, etc. ;
- Eponge plate (à humidifier avant essai et à disposer entre le capteur et la surface du béton) ;
- Mortier de ciment (rebouchage du trou d'armature).


Appareil de mesure GECOR 06 (CEREMA)

Fig.II.3: Mesure de vitesse de corrosion

Domaine d'application : Structures en béton-armé (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Limites d'utilisation : Les mesures ne sont pas réalisables dans les cas suivants :

- Aciers séparés de la surface du béton par un écran isolant ou métallique (par exemple armatures Protégées par un produit passivant riche en zinc) ;
- revêtement sur le béton électriquement isolant ;
- béton trop sec ;
- discontinuité électrique des armatures.
- éviter les zones présentant des risques de courants vagabonds (train, métro, tram, etc.) et les structures protégées cathodiquement (structures portuaires, pipe-lines, structures de génie civil protégées par courant imposé, etc.);
- éviter les surfaces dégradées (vides, délamination, écaillages, fissures, etc.).

Avantage :

- Mesures permettant de compléter et d'affiner le diagnostic de l'état de corrosion des armatures
- Matériel peu encombrant
- Disponibilité immédiate des résultats

Inconvénients :

- Résultats dépendant du matériel utilisé
- Matériel sensible aux conditions climatiques et à l'état du béton
- Raccord parfois difficile avec l'armature
- Mesures quelquefois difficiles à obtenir
- Interprétation des résultats à faire par un spécialiste
- Méthode encore en cours de développement [22]

II.2.8.4. Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement

A. Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers

Cette méthode permet de localiser les armatures et de déterminer leur diamètre et leur profondeur d'enrobage par méthode électromagnétique basse fréquence.

Le matériel mesure les courants induits (courants de Foucault) générés dans les armatures par un champ magnétique variable dans le temps et créé par une ou plusieurs bobines électromagnétiques déplacées à la surface du béton.

Le signal mesuré augmente avec le diamètre des armatures en acier et diminue avec l'épaisseur de recouvrement des aciers par le béton.

Caractère destructif de la méthode : Non destructif

Matériel spécifique employé :

Craie et règle si traçage des armatures détectées sur le parement.



Fig.II.4 : Profomètre ou pachomètre



Fig.II.5 : Ferro-scan

Domaine d'application :

- Structures en béton armé (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).
- Structures en béton précontraint (conduits métalliques de précontrainte, fils adhérents (prétention)).
- Maçonnerie armée ou contenant des inclusions métalliques.

Limites d'utilisation :

- Profondeur limite de détection variable suivant les appareils et le diamètre des armatures, couramment de l'ordre de 70 à 80 mm Difficultés d'interprétation lorsque les armatures sont groupées ou présentent des recouvrements.
- Les surfaces auscultées doivent être relativement planes et sans relief prononcé (difficultés sur certains parements).

Avantage:

- Rapidité de détection (en temps réel).
- Interprétation par imagerie de la position des armatures avec certains appareils.
- Résultats fiables sur la localisation et la profondeur d'enrobage.

Inconvénients:

- Profondeur limite de détection des armatures.
- Difficultés d'évaluation précise des diamètres. [22]

B. Mesure la profondeur de la carbonatation

La technique permet d'évaluer la profondeur de béton carbonaté d'un parement en béton à partir de mesures effectuées sur carottes (diamètre 50 mm) prélevées sur des structures en béton.

La mesure de la profondeur de carbonatation du béton s'effectue en laboratoire sur les cassures fraîches des carottes prélevées sur l'ouvrage (fendage suivant une génératrice). Immédiatement après fendage, pour éviter la carbonatation de surface, on pulvérise une faible quantité d'eau distillée ou déminéralisée sur la tranche pour l'humidifier. Puis après absorption de l'eau par le béton on pulvérise l'indicateur coloré de pH (de préférence la phénolphtaléine, mais on peut aussi utiliser la thymolphtalèine).

Mesure de la zone décolorée où le pH passe de 13 (initialement) à environ 9 (avec la phénolphtaléine) ou environ 10 (avec la thymolphtaléine). De manière plus précise, la phénolphtaléine est incolore pour un pH inférieur à 8,2 et rose soutenu pour un pH supérieur à 9,9, et la thymolphtaléine est incolore pour un pH inférieur à 9,3 et bleu pour un pH supérieur à 10,5.

Pour la mesure :

Le fendage libérant les deux faces, il peut être intéressant d'utiliser deux indicateurs colorés différents, l'un à base de phénolphtaléine (virage pH~9), l'autre à base de thymolphtalèine (virage pH~10).

Caractère destructif de la méthode : Destructif

Matériel spécifique employé :

- Presse hydraulique ;
- pied à coulisse – jauge de profondeur (1/10 mm) ;
- réglet ;
- solution à base de phénolphtaléine (à 1% dans l'alcool éthylique) ;
- solution à base de thymolphtaléine (à 1% dans l'alcool éthylique) ;
- vaporisateur contenant l'eau distillée ou déminéralisée.



Fig.II.6: Profondeur de carbonatation [info ciments. fr SB.OA 2012]

Domaine d'application : Structures en béton armé (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Avantages : Simplicité d'exécution.

Inconvénients : Précautions d'utilisation pour la phénolphtaléine.

C. Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agent agressif

Il s'agit d'effectuer des prélèvements de poudre en béton pour déterminer la teneur en agents agressifs de type chlorures, et éventuellement sulfates, etc. Elle permet d'évaluer la teneur en chlorures libres et en chlorures totaux.

Les prélèvements s'effectuent à l'aide d'une perceuse par pas de 10mm à partir de la surface jusqu'au niveau théorique des armatures (il est utile en cas d'environnement particulièrement agressif de poursuivre et d'effectuer un ou plusieurs prélèvement(s) supplémentaire(s) au-delà de la nappe d'armatures).

L'extraction et le dosage des chlorures libres (extraits à l'eau) et totaux (extraits à l'acide) dans un béton durci font l'objet d'un mode opératoire de l'AFGC ; le dosage est effectué à l'aide d'une solution titrée de nitrate d'argent par titrage potentiométrique.

Caractère destructif de la méthode : Destructif

Matériel spécifique employé :

- Perceuse à percussion (puissance minimale de 600 W) avec butée de profondeur ;
- Mèche à béton pour effectuer un avant-trou (pointe en carbure de tungstène ou équivalent) de diamètre 16 mm ;
- Trépan de diamètre 35 mm (un trépan de 45 mm peut être employé pour obtenir une quantité plus importante de poudres) ;
- Dispositif de récupération des poudres de béton ;
- Réglet (pour caler l'épaisseur des tranches) ;
- Source d'énergie électrique ;
- Pinceau (pour récupération de la poudre en fond de trou de perçage) ;
- Soufflète (air comprimé) pour nettoyage du trou avant chaque nouveau prélèvement, nettoyage du trépan et nettoyage du dispositif de récupération des poudres ;
- Sacs (pour stocker les poudres) ;
- Etiquettes d'identification ;
- Dispositif de soudage des sacs ;
- Mortier de ciment (rebouchage des trous).



Fig.II.7 : Dispositif de récupération des poudres

Domaine d'application : Structures en béton (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Avantages: Simplicité d'exécution.

Inconvénients : Précision des profils difficile à obtenir (± 1 mm). [22]

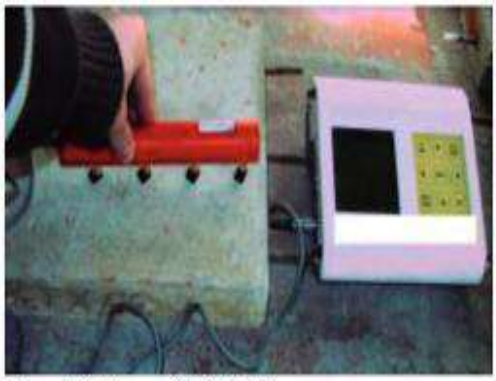
D. Mesure de la résistivité du béton pour estimer le risque de corrosion

Cette méthode permet d'évaluer le risque de corrosion des armatures du béton armé. Il existe 2 types de mesures de la résistivité électrique du béton :

D.1. Mesure de la résistivité du béton de surface

Un appareil porte-électrodes est plaqué sur le parement, puis un courant d'intensité I est envoyé dans le béton à partir des 2 électrodes de courant. La différence de potentiel V créée est mesurée entre les 2 électrodes de potentiel.

La résistivité est déduite du rapport V/I, de la distance entre 2 électrodes voisines, et de la géométrie du dispositif utilisé (dispositif Wenner : 4 électrodes alignées ; ou dispositif carré, ou dispositif bipolaire, etc.).



Dispositif Wenner (CEREMA)

Fig.II.8 : Mesure de la résistivité du béton de surface

D.2. Mesure de la résistivité du béton d'enrobage (méthode par polarisation d'une armature- exemple d'appareil : GECOR 06).

Une électrode placée à la surface du béton est raccordée à une armature. L'appareil calcule la résistivité du béton à partir de la résistance (obtenue par la chute ohmique à partir d'une impulsion entre l'électrode et le ferraillage) et du diamètre de l'électrode.



Appareil de mesure GECOR 06 (CEREMA)

Fig.II.9 : Mesure de la résistivité du béton d'enrobage.

Les zones de faible résistivité présentent une forte humidité et/ou une forte teneur en sels (chlorures) et sont donc des zones où le risque de corrosion des armatures est important.

Les valeurs de résistivités mesurées sur ouvrage sont comparées aux valeurs citées dans la recommandation RILEM TC 154-EMC (tab II.2) :

Résistivité du béton (ohm. Mètre)	Risque de corrosion
<100	Élevée
100-500	Modérée
500-1000	Faible
>1000	Négligeable

Tab II.2 : Risque de corrosion associé à la résistivité du béton (ciment portland, 20°C)

Caractère destructif de la méthode :

Non-destructif (forage ponctuel pour se connecter à une armature dans le béton nécessaire pour la méthode par polarisation d'une armature).

Matériel spécifique employé :

- Matériel de détection d'armature ;
- Règle (traçage des treillis d'armatures) ;
- Craie (marquage des treillis d'armatures) ;
- Pour la mesure de la résistivité du béton de surface, en plus :
- appareil de mesure porte électrodes.

Pour la mesure de la résistivité du béton d'enrobage, en plus :

- Appareil de mesure (GECOR 06 par exemple) ;
- éponge plate (à humidifier avant essai et à disposer entre le capteur et la surface du béton) ;
- perceuse à percussion (puissance minimale de 600 W) avec mèche à béton ;
- dispositif type « pince-crocodile » ou « pince-étau » pour connexion à l'armature ;
- mortier de ciment (rebouchage du trou de connexion à l'armature).

Domaine d'application : Structures en béton armé (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Limites d'utilisation : Les mesures ne sont pas réalisables dans les cas suivants :

- Déformations de surface du béton ou présence de couches isolantes (peintures, débris divers, tags, etc.) ;
- surfaces dégradées (vides, délamination, écaillages, fissures, etc.) ;
- béton trop sec ;
- discontinuité électrique des armatures (méthode par polarisation).

Avantages :

- Rapidité d'exécution et de lecture des mesures (en temps réel).
- Mesures permettant de compléter et d'affiner le diagnostic de l'état de conservation des armatures.

Inconvénients :

- Mesure sensible à l'humidité relative, à la porosité, à la carbonatation et à la température du béton.
- Connexion parfois difficile avec l'armature (méthode par polarisation d'une armature). [22]

E. Mesure de la perméabilité à l'air du béton de surface pour estimer le risque de corrosion

Cette technique permet d'évaluer l'amplitude des échanges gazeux entre le béton et le milieu ambiant. Le principe de l'essai consiste à créer une dépression au moyen d'une pompe à vide dans une chambre étanche plaquée sur un parement de béton. L'augmentation de pression en fonction du temps permet ensuite de calculer soit une constante de temps « Ti » (matériel BT CRIS), soit un coefficient de perméabilité kT (matériel TORRENT), et de caractériser la perméabilité à l'air de la peau du béton.

Matériel BT CRIS :

La mesure de « Ti » obtenue permet d'affecter au béton de couverture une classe de perméabilité à l'air :

- Si 1 s $\leq$Ti $\leq$400 s, perméabilité de surface forte.
- Si 401 s $\leq$Ti $\leq$2500 s, perméabilité de surface moyenne.
- Si 2501 s $\leq$Ti $\leq$4999 s, perméabilité de surface faible.
- Si Ti > 5000 s, perméabilité de surface très faible.

Matériel TORRENT :

La mesure de « kT » obtenue permet d'affecter au béton de couverture une classe de qualité vis à vis de la perméabilité :

- Si kT > 10.10-16m², très mauvaise qualité.
- Si 1.10-16m². <kT $\leq$10.10-16m², mauvaise qualité.
- Si 0,1.10-16m² < kT $\leq$1.10-16m², qualité moyenne.
- Si 0,01.10-16m² < kT $\leq$0,1.10-16m², bonne qualité.
- Si kT < 0,01.10-16m², très bonne qualité.

Caractère destructif de la méthode : Non-destructif

Matériel spécifique employé :

- Matériel de détection d'armature ;
- règle (traçage des treillis d'armatures) ;
- craie (marquage des treillis d'armatures).

Matériel BT Cris comprenant :

- Un module d'alimentation et de commande ;
- une cellule de mesure de diamètre 60 mm ;
- un ordinateur et son logiciel BT Cris ;
- des câbles de raccordement.



(CEREMA) (CEREMA)

Fig.II.9 : Matériel BT Cris

Matériel TORRENT comprenant :

- Un instrument indicateur électronique ;
- Une unité de réglage ;
- Une cellule à vide à 2 chambres ;
- Une pompe à vide.



(CEREMA)

Fig.II.10 : Matériel TORRENT

Domaine d'application : Structures en béton armé (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Limites d'utilisation :

- La zone à tester doit être de dimensions suffisantes pour positionner la cellule (dimensions minimales : 700 mm x 700 mm pour le matériel BT CRIS, 150 mm x 150 mm pour le matériel TORRENT)
- La surface du béton doit être suffisamment plane.
- Le béton de couverture ne doit pas présenter une perméabilité trop élevée.
- Les mesures ne doivent pas être effectuées sur une surface mouillée.

Avantages :

- Mesure non destructive.
- Simplicité d'exécution.
- Rapidité d'exécution et de lecture des mesures (TORRENT).

Inconvénients :

L'interprétation des résultats peut s'avérer difficile car les mesures sont dépendantes de l'humidité du béton.[22]

II.2.8.5. Inspection visuelle (marteau et carottage)

L'essai par le marteau permet de délimiter les zones dégradées suivant un son grave (béton délaminé) ou aigu (béton sain). Il ne peut être appliqué que directement sur le béton.

Le carottage permet de prélever des carottes dans le béton pour l'inspection visuelle et pour déterminer les paramètres mécaniques du béton.

L'inspection visuelle a révélé de signes apparents de corrosion ou de délamination du béton.

Les résultats obtenus par le marteau sont présentés sur la figure II.11. La cartographie permet de distinguer entre un béton non dégradé et un béton dégradé. Donc, cette méthode est limitée à deux possibilités (noir ou blanc).

Il est très difficile à partir du son du marteau d'établir un état intermédiaire. De plus, cette méthode est très subjective. La fatigue de l'oreille de l'opérateur après certain temps rend très difficile de différencier entre un son aigu et un son grave.

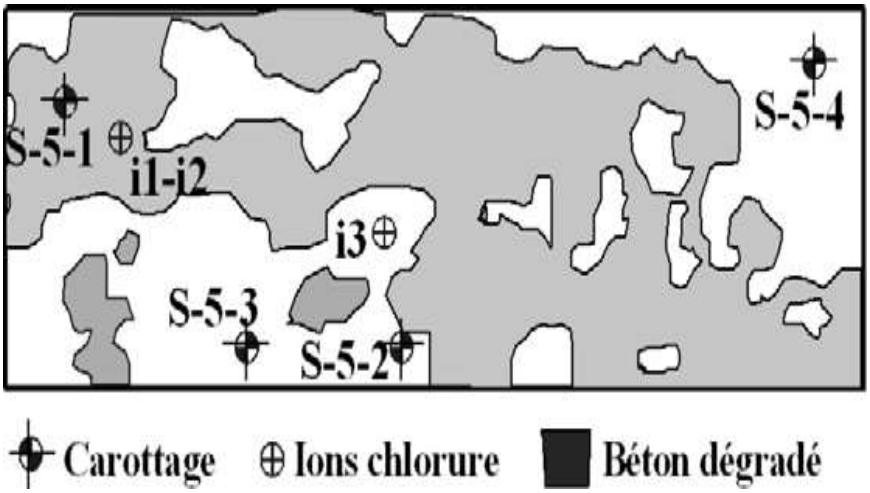


Fig.II.11 : Inspection visuelle d'une dalle en béton armé

A. Carottage d'éléments en béton armé

La méthode a pour objectif de préciser sous quelles conditions doivent être effectués les prélèvements d'échantillons de béton durci par carottage sur une partie d'ouvrage, en vue de réaliser de simples observations ou des essais mécaniques, physiques ou chimiques.

Le carottage se déroule selon les opérations suivantes :

- Repérer préalablement les armatures métalliques internes au béton pour implanter le carottier et éviter les armatures ;
- Fixer la carotteuse sur la partie d'ouvrage à partir de laquelle la carotte doit être extraite ;
- Carotter à l'aide d'un carottier de diamètre adapté pour l'examen ou l'essai à réaliser ;
- Extraire la carotte et la conditionner en fonction de l'essai à réaliser ;
- Reboucher à l'aide d'un produit adapté (béton ou mortier sans retrait).

Caractère destructif de la méthode : destructif

Matériel spécifique employé- Carotteuse:

- Carottier de diamètre adapté pour l'examen ou l'essai à réaliser (par exemple, pour les essais mécaniques et physiques, le diamètre du carottier doit être d'au moins 3 fois le diamètre nominal du plus gros granulat du béton et il est conseillé d'aller jusqu'à 5 fois le diamètre ; pour certaines analyses minéralogiques et chimiques du béton, le diamètre doit être « excédentaire » compte – tenu du délavage de la zone périphérique extérieure lors du carottage à l'eau).

- Rallonges pour le carottier selon la profondeur du prélèvement (pour certaines analyses minéralogiques et chimiques du béton, le carottage doit être réalisé jusqu'au cœur de la pièce).
- Moyens d'accès et moyens de mise en sécurité du personnel adaptés à la localisation des prélèvements (nacelle positive ou négative, échafaudage, etc.).
- Moyens d'alimentation en eau (réseau sur site ou pompe pour alimentation dans rivière ou citerne).
- Moyens d'alimentation électrique (secteur sur site ou groupe électrogène).
- Moyens d'alimentation pneumatique (air comprimé) pour des carottages sous l'eau ou en plafond avec de l'eau.
- Système de fixation de la carotteuse (cheville ou ventouse).
- Système de détection des aciers (type Ferroscan ou Profometer par exemple).
- Système de récupération des carottes (pinces adaptées).
- Moyen d'identification des prélèvements (marqueur, etc.).
- Sacs de conservation après extraction (sac plastique ou film cellophane).
- Nécessaire pour le rebouchage (auge, mortier, truelle, taloche, etc.).
- Nécessaire pour le nettoyage (éponge, serpillière, aspirateur, etc.).



Fig.II.12 : Prélèvements par carottage

Domaine d'application : Parties d'ouvrage en béton armé ou précontraint ; technique adaptable sans difficulté à la maçonnerie.

Limites d'utilisation :

Encombrement et moyens d'accès. Pour les carottages réalisés « en plafond », le matériel doit être adapté et se conformer aux règles de sécurité pour éviter tout risque

d'électrocution. Les prélèvements de béton durci destinés aux essais mécaniques ne doivent pas être effectués avant que le béton ait suffisamment durci pour permettre le prélèvement sans dégrader l'adhérence entre matrice cimentaire et granulats. Le béton doit avoir au moins 7 jours d'âge lors du prélèvement ; cet âge est cependant fonction du type de ciment, de la nature des granulats et de celle des adjuvants : dans le cas d'emploi d'accélérateurs de prise ou de durcissement, cet âge pourra être réduit (cas des bétons projetés en tunnel par exemple).

Avantages : Seul moyen de prélever des échantillons in situ en vue d'examens visuels ou d'essais mécaniques, physiques ou chimiques.

Inconvénients :

- Matériel lourd à la manutention.
- Risques vis à vis de la sécurité.
- Parfois, difficulté d'extraction de carottes (rupture en partie courante). [23]

B. Prélèvements d'acier

Le prélèvement d'aciers peut se faire par tronçonnage de l'armature, après l'avoir préalablement dégagé du béton adjacent. Il est préférable de le faire dans des zones saines pour ne pas risquer de fragiliser encore plus la structure à cet endroit.

Il peut parfois s'avérer utile de prélever localement des armatures dans des zones touchées par des pathologies, telle que la corrosion des armatures afin de pouvoir déterminer son avancement ainsi que la section restante d'acier pouvant être exploité afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale.



Fig.II.13 : Prélèvement d'aciers

II.3. Rapport de diagnostic

Rapport de diagnostic présente (selon AFGC, 2003) l'ensemble des résultats et leur Interprétation, mais doit être compréhensible par un non initié, il comprend :

- L'identification de la structure, le nom du demandeur ;
- l'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) chargé de l'étude, la date ;
- une brève description de la structure ;
- le rappel des objectifs de l'étude ;
- la liste des documents consultés ;
- les résultats de l'inspection détaillée ;
- les résultats des essais in situ et de laboratoire ;
- une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable, et leur incidence sur la sécurité ;
- des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude ;
- une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer ;
- des recommandations relatives aux méthodes de réparation les plus adaptées.[2]

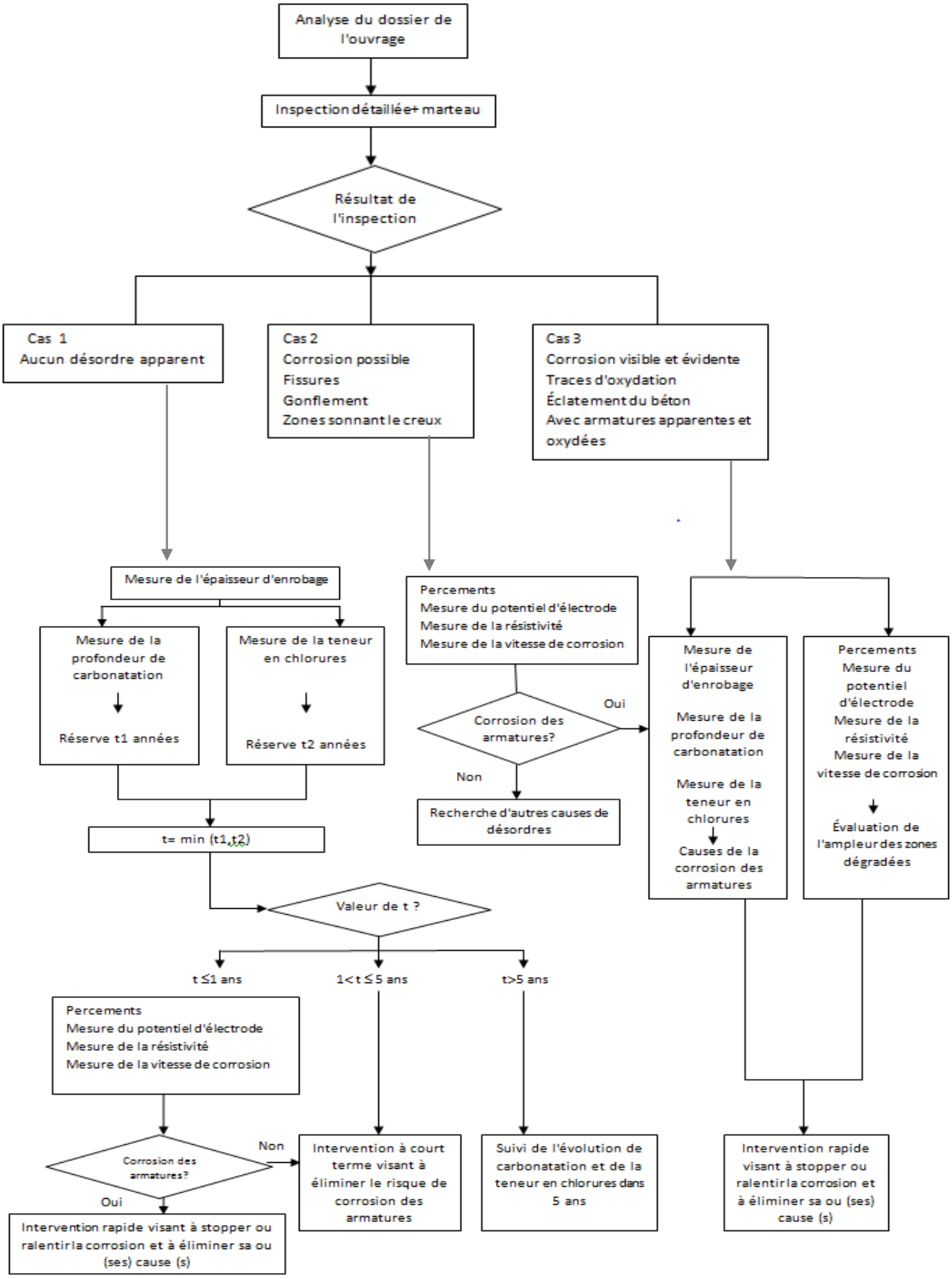


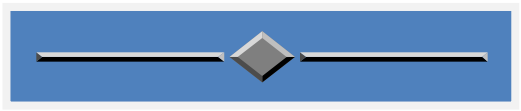
Fig.II.14 : Méthodologie du diagnostic [eprints 2-insa-strasboug.fr]

Conclusion

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

Chapitre III

Les méthodes de réparation et prévention du béton armé dégrade par la corrosion



Introduction :

Dans le secteur du bâtiment, il existe plusieurs interventions de maintenance, de réparation et de renforcement, correspondant à des métiers différents. Mais dans tous les cas, il est indispensable de bien connaître l'existant, d'être « réactif » aux gens et aux choses et de mesurer l'enjeu véritable de chaque opération envisagée.

Toutefois, il faut noter que les domaines d'action auxquels correspondent ces interventions, bien que comportant une partie commune qui est bien sûr le diagnostic, doivent être distingués l'un de l'autre.

III.1: Méthode de réparation :

Définitions:

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, choc ,séisme, …)

Réparation des ouvrages en béton armé :

Suite à un propre diagnostic, les procédés de réparation d'un ouvrage ne viennent pas seulement ramener les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire remettre la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

III.1.1 : Réparation des surfaces :

III.1.1.1 : Dégagement des armatures :

La préparation des surfaces à réparer est très importante pour la longueur de vie des réparations. Il convient dans un premier temps de dégager toutes les zones de faible cohésion. S'il y a corrosion des armatures, il est important de dégager les aciers corrodés pour arriver à une zone saine apparaisse ; plusieurs techniques sont valables pour vérifier qu'on atteint des zones sous corrosion (burinage, repiquage, bouchardage, jet d'eau, sablage).

Pour être sûr d'une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir un dégagement comme le montre le schéma suivant selon AFNOR :

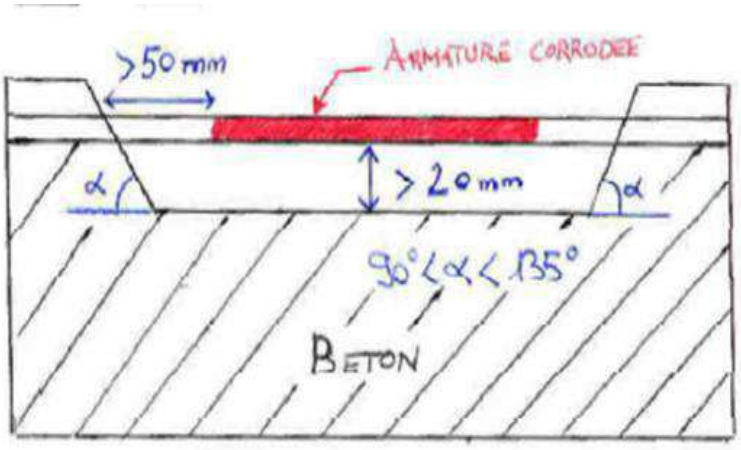


Fig.III.1 : Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101

Il faut ensuite nettoyer la surface du béton afin d'enlever toute trace de poussière et souillure. Si la perte de section de l'acier est très élevée, il est alors nécessaire de remplacer l'armature ; par scellement ou soudure.

Il est important qu'après cette opération, de respecter la section d'armatures (au moins égale à la section initiale), les longueurs d'ancrage et de recouvrement, et les armatures de couture.

Pour limiter les risques d'apparition de la corrosion, une protection immédiate des armatures, par un produit convenablement choisi, est nécessaire surtout si l'enrobage final ne pourra pas être de la même valeur prévue dans les règlements.

Il est possible, après cette étape, de commencer la réparation. [24]

➢ **Armatures passives additionnelles Cas d'utilisation :**

1. Remplacement d'armatures de béton armé:

Structure affectée par des désordres mettant en jeu sa capacité portante (modification des caractéristiques mécaniques des armatures suite à un incendie, rupture des armatures suite à un choc, forte réduction des armatures suite à la corrosion…).[24]

2. Ajout d'armatures de béton armé:

Changement d'affectation (mise en place d'équipements augmentant les charges permanentes), renforcement de la structure (précontrainte additionnelle nécessitant l'augmentation de la section en béton armé).

➢ **Armatures passives additionnelles Etudes préliminaires :**

• Caractéristiques et état des armatures de béton armé (HA ou lisse, diamètre, limite d'élasticité et contrainte de rupture, soudabilité, importance de la corrosion…);

• Caractéristiques et état du béton (composition, résistance, défauts, désordres…);

• Types d'actions subies par la structure (statiques et dynamiques);

• Capacité portante de la structure;

• Agressivité de l'environnement;

• Exigences du Maître d'Ouvrage (maintien du gabarit par exemple).[24]

➢ **Réparation avec remplacement d'armatures :**

• Choix des matériaux

– Armatures:

• Si désordres limités à une partie de la structure, (cas courants de chocs), les armatures BA sont remplacées après travaux de préparation adaptés;

• Si désordres liés à la corrosion et concernent une partie importante de la structure et que l'environnement est agressif, il est envisageable de remplacer les armatures
BA par des armatures non corrodables, (inoxydables, matériaux composites).

– Mortier ou béton:

• Caractéristiques du béton ou mortier de ré-enrobage des armatures remplacées doivent être compatibles avec les caractéristiques du béton existant et l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage.

Principe de remplacement d'un ferraillage endommagé par un choc au niveau du talon d'une poutre en BA : enlèvement du béton endommagé, dégagement des armatures transversales et longitudinales endommagées puis mis en place du ferraillage de remplacement.

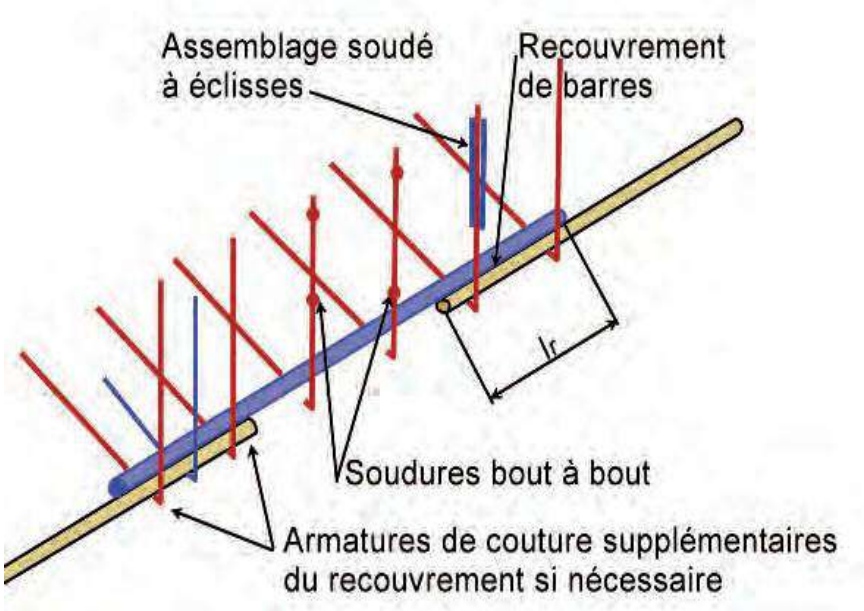


Fig.III.2: Remplacement des armatures

Techniques de raboutage :



Fig.III.3 : Assemblage d'armatures par manchonnage

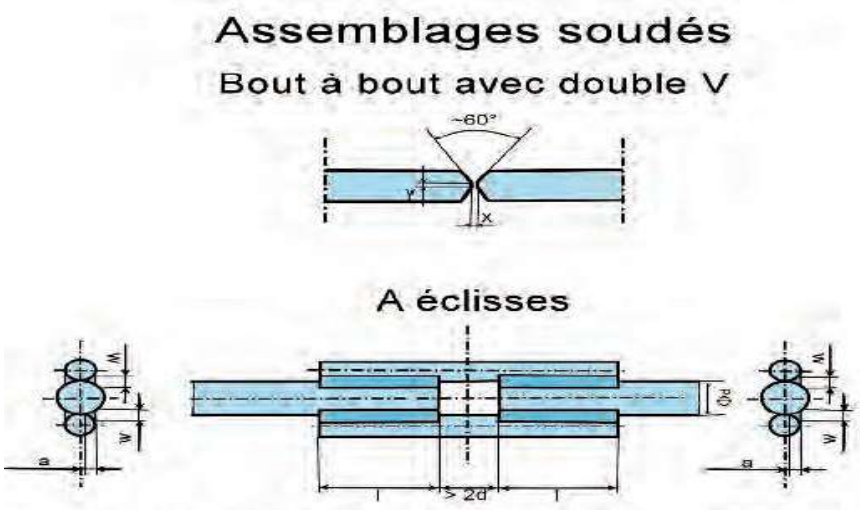


Fig.III.4 : Assemblage par soudés [Baronj. Ollirier jp. 1997, la durabilité de béton]

- **renforcement avec ajout d'armatures :**

• Exemple de renforcement d'une poutre par ajout de béton et d'armatures passives (insuffisance de capacité portante vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant).

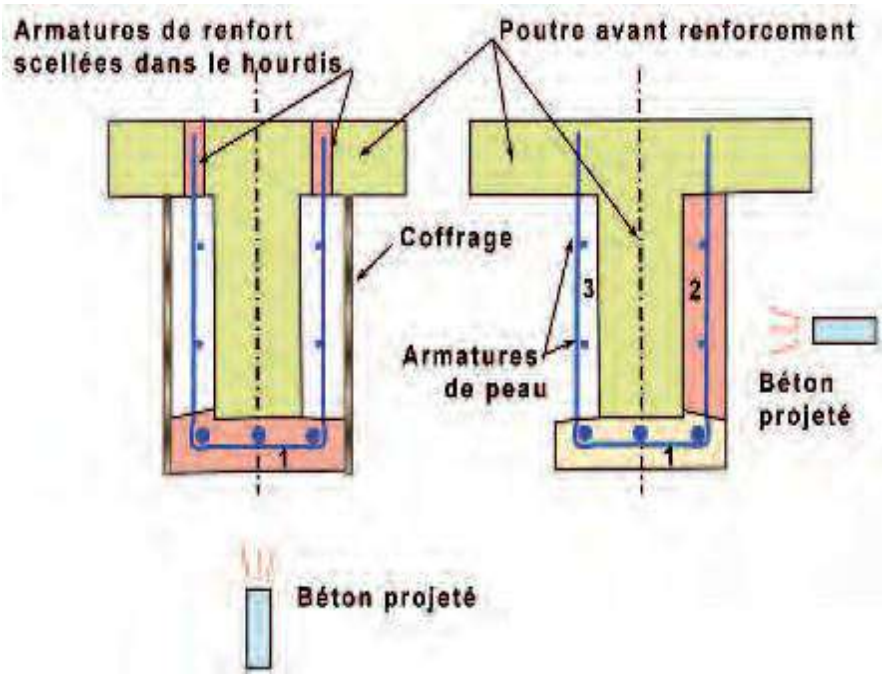
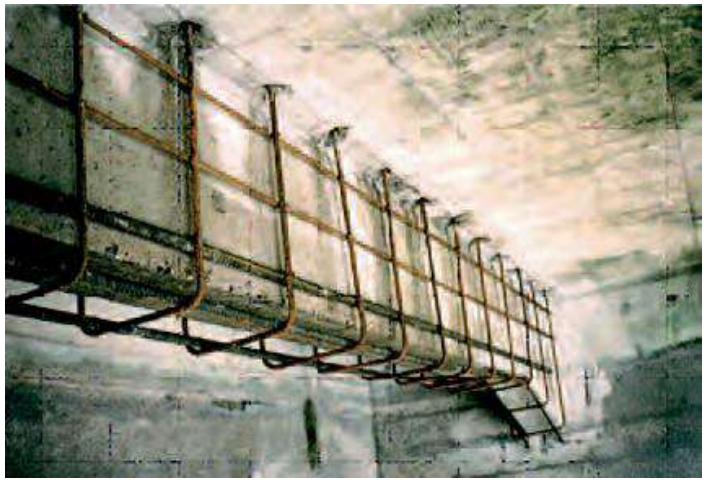


Fig.III.5 : Renforcement avec ajout d'armatures de poutre



Phot.III.1 : Renforcement avec ajout d'armatures de poutre

• Exemple du viaduc d'accès Sud du pont de Saint-Nazaire - Mise en place de précontrainte additionnelle nécessitant une augmentation de la section BA des poutres VIPP pour éviter des contraintes de compression trop importantes.



Phot.III.2 : Renforcement avec ajout d'armatures de précontraint

III.1.2 : Le ragréage :

Le ragréage est une méthode de réparation locale, qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation possédant des propriétés qu'on verra plus loin.

Afin de limiter la réapparition de corrosion dans les zones réparées on choisit de mélanger des inhibiteurs de corrosion dans la formulation de ce mortier. [25]

- **Préparation de surface :**

Objectif de la préparation de surface : créer un support sain, propre, rugueux afin d'assurer une bonne adhérence sur la surface de reprise :

● enlever les parties de béton non adhérentes

● enlever le béton contaminé par les chlorures ou la carbonatation

● Si les armatures doivent être complètement dégagées, prévoir de 1 à 2 cm (détourage des aciers)

● Bords de la zone dégagée francs et taillés, (angle compris entre 90 et 135), pour assurer une bonne liaison mécanique entre le matériau d'origine et celui d'apport [25]

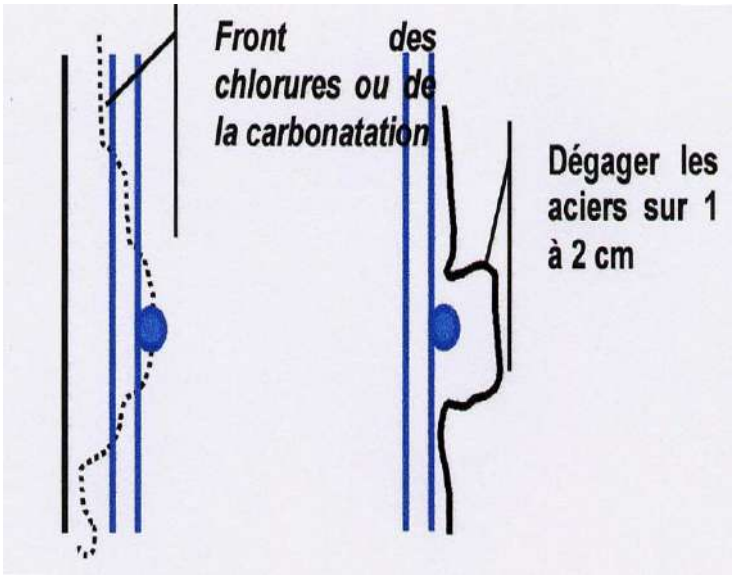


Fig.III.6 : Enlèvement du béton pollué et de la rouille

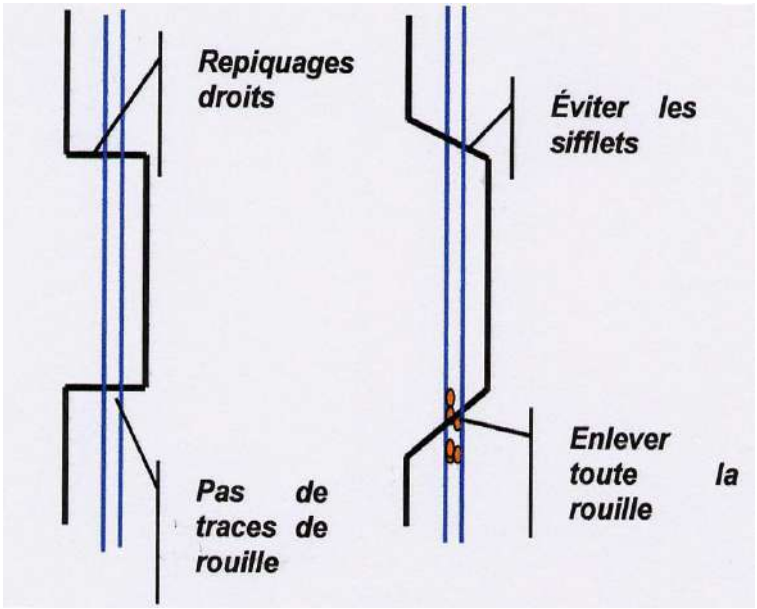


Fig.III.7 : Enlèvement toute rouille

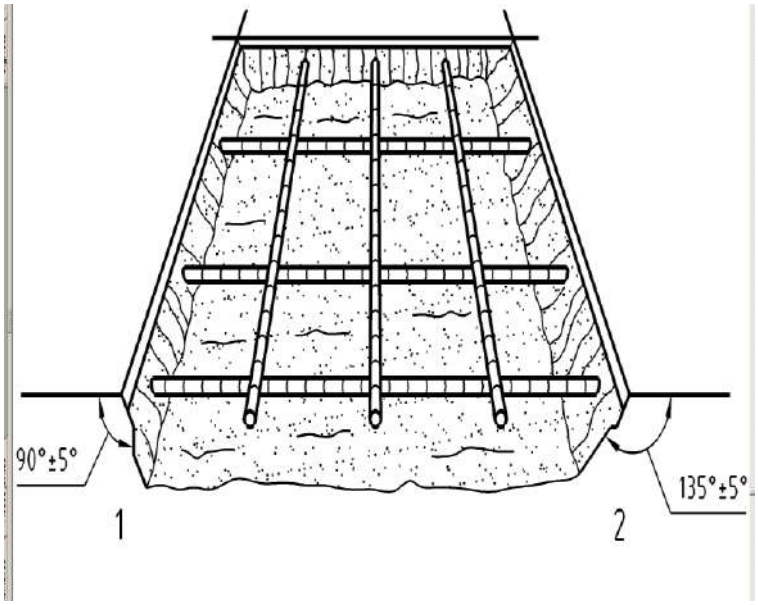


Fig.III.8 : Enlèvement du béton dégradé

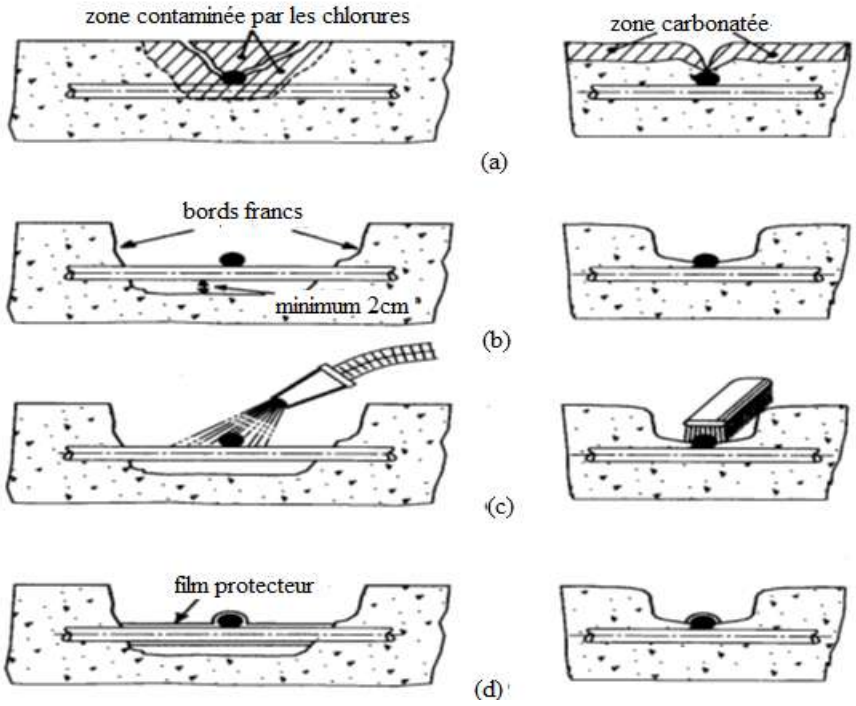


Fig. III.9 : Les étapes de préparation de surface

Les techniques conseillées :

- Hydrodémolition (fortes épaisseurs)
- Sablage (à sec ou humide)
- Décapage à l'eau à très haute pression

● Piquage au petit marteau pneumatique

Les techniques peu conseillées :

● Bouchardage et burinage

Les techniques déconseillées :

● Le brise-béton

● Décapage thermique et décapage chimique

● Rabotage mécanique

● Ponçage



Phot.III.3 : Enlèvement du béton dégradé et détourage des armatures [rero béton. Res 2008]

Nettoyage de la surface :

● Lavage à l'eau sous pression

● Brossage, aspiration, soufflage…

● Selon compatibilité avec le produit de réparation [25]

Protection des aciers :

● Décapage des aciers

● Revêtement anticorrosion (passivant), sans déborder sur le béton, si mortier ou béton ne peut être mis en œuvre immédiatement et/ou en épaisseur suffisante

● Barbotine à base de liants hydrauliques (mettre en œuvre le mortier ou béton de recouvrement avant prise de la barbotine)



Phot.III.4 : Mise en place d'un passivant si nécessaire

➢ **Les produits :**

A base de liants hydrauliques (LH, ie H) : NF EN 197-1 &197-2, NF 314 (ciment prompt naturel), 315 & 316 (ciment alumineux fondu), 317 (PM), 318 (CP), 319 (ES)…

LH avec ajout :

● Granulats

● Fibres

● Adjuvants

Préparation sur chantier :

● soit à partir de mortiers industriels prêts à l'emploi (CE et NF)

● soit par malaxage des différents composants (béton projeté)

Pour améliorer la liaison entre support et mortier, application d'un produit d'adhérence (résine ou liants hydrauliques modifiés).

A base de liants hydrauliques modifiés par polymères organiques (LHM, ie PCC) :

Deux formes :

● Monocomposant : composant sous forme de poudre et ajout d'eau sur chantier.

● Bicomposant :

● Composant A : polymère + eau nécessaire à l'hydratation du ciment;

● Composant B : ciment, sable, fines, ajouts et additions.

Mélange sur chantier sans addition d'eau.

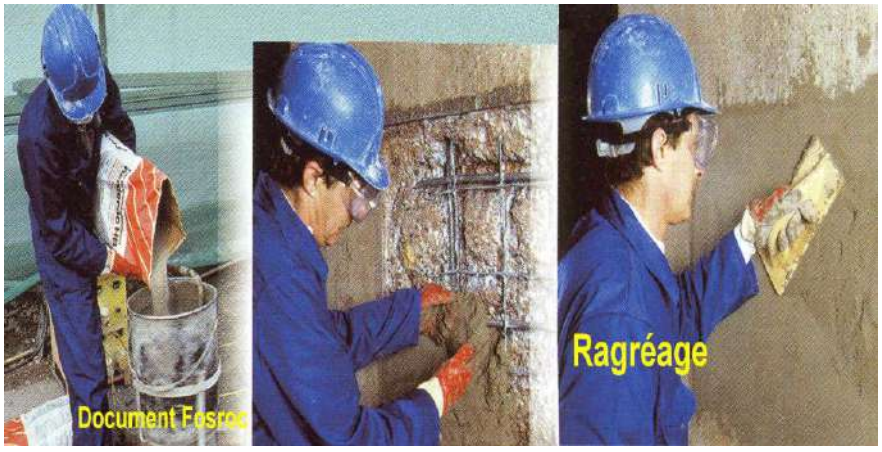
NF EN 1504-3, marquage CE - Certains produits admis à la marque NF.

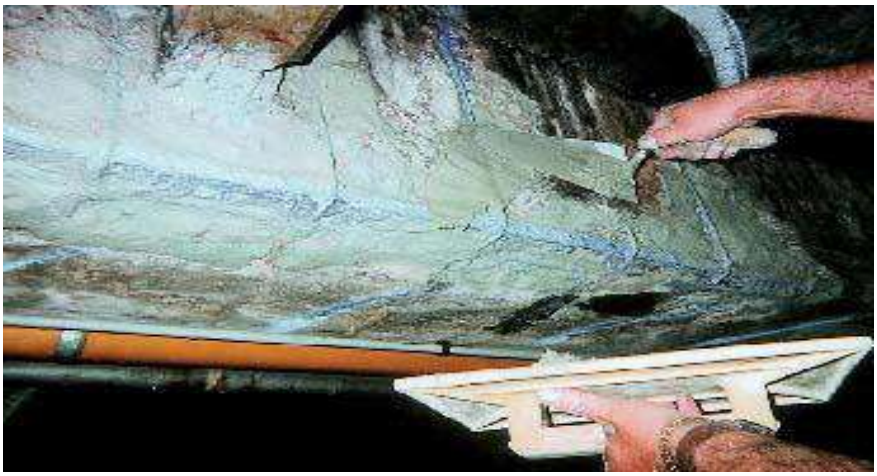
Pour améliorer la liaison entre support et mortier, application d'un liant hydraulique modifié ou à défaut humidification du support.

A base de résines synthétiques (LR, ie PC ou P) : Utilisés lorsque les deux types de produits précédents ne peuvent être mis en œuvre (réparation sous l'eau, forte résistance à l'abrasion…). Nécessité d'un personnel d'exécution spécialement formé et qualifié pour l'emploi des résines. Mise en œuvre nécessitant le respect rigoureux de la durée pratique d'utilisation (DPU) en fonction des conditions du chantier, (température, hygrométrie…).
Couche d'accrochage parfois nécessaire entre mortier et support, (spécifique à chaque produit et fonction de la qualité du support). [25]

- **Application manuelle :**

La mise en place des mortiers est réalisée classiquement à la truelle en serrant fortement pour éviter les bulles d'air et obtenir ainsi une bonne adhérence.
Pour le dressage des arêtes, une règle peut être utilisée.





Phot.III.5: Ragréage manuelle de mortier

➢ **Bétonnage en place :**

Coulage ou injection de béton ou mortier

Pour des volumes de béton importants ou des épaisseurs de béton d'au moins 5 à 10 cm :

● Pour le coulage, possibilité de connexions avec le support

● Ajustement nécessaire des coffrages

● éviter l'emprisonnement d'air… [25]

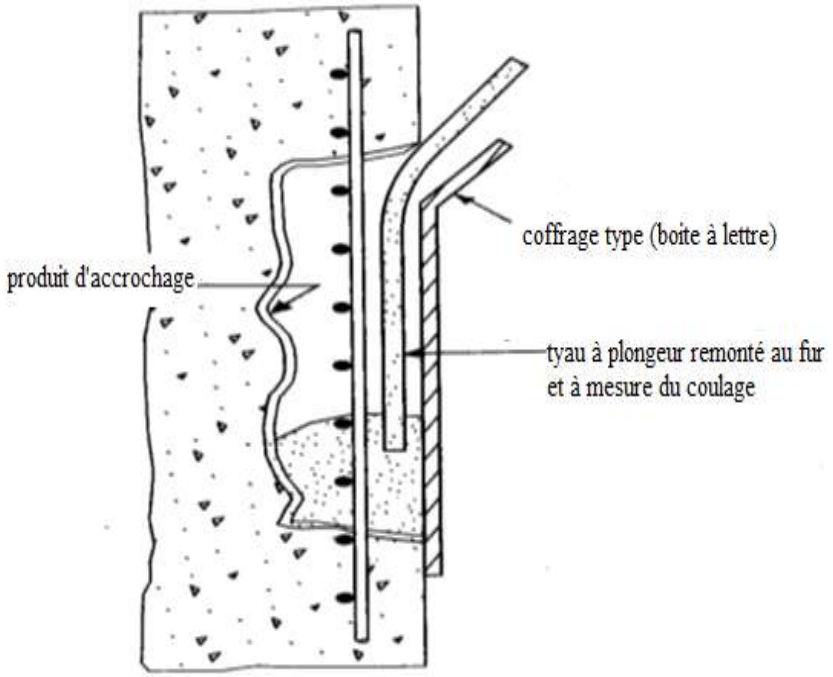


Fig. III.10 : Coulage de béton

III.1.3 : Le béton projeté :

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

La technique consiste à :

1. Malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, fibres…) à l'état sec ou en incorporant l'eau de gâchage ;
2. Transporter le mélange par des canalisations avec l'aide d'une pompe ;
3. Projeter le matériau sur le support

A revêtir grâce à un jet d'air comprimé.

Il existe deux techniques de projection: Par voie sèche ou par voie mouillée.

La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors du malaxage du béton, soit lors de l'application du béton). [26]

Projection par voie sèche :

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur puis propulsé par de l'air comprimé vers la lance de projection. Cette lance est associée à une lance de projection d'eau (et éventuellement d'accélérateur de prise sous forme liquide)

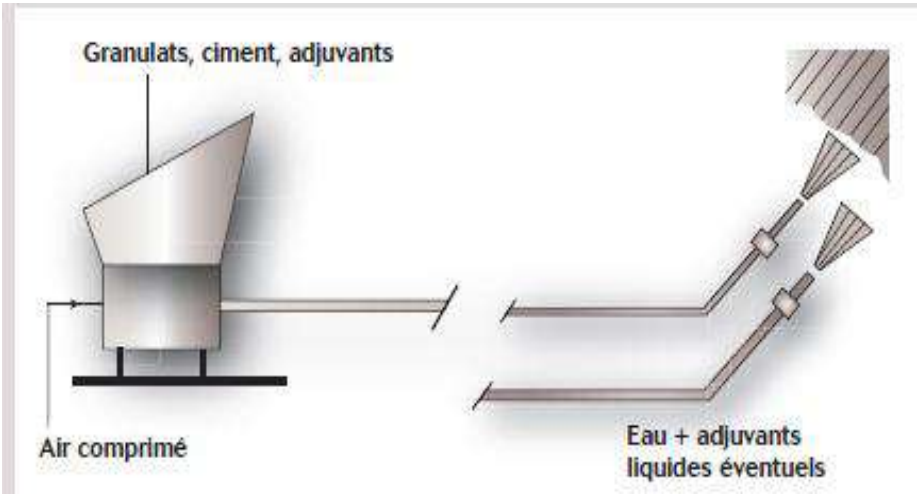


Fig.III.11 : Projection par voie sèche

Projection par voie mouillée :

Le mélange comprenant l'eau est stocké après malaxage dans une trémie. Il est ensuite pompé jusqu'à la lance de projection et projeté grâce à l'air comprimé

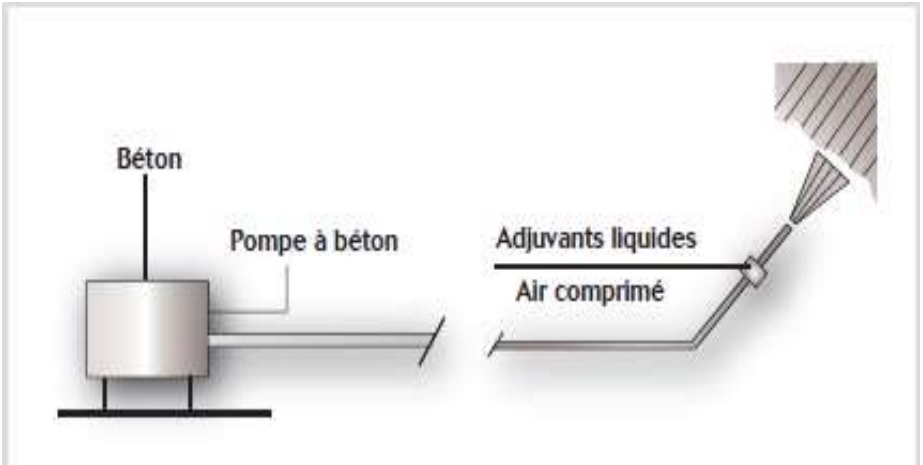


Fig. III.12 : Projection par voie mouillée

Intérêt de la technique :

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhérent parfaitement.

Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures…).

Le choix de la technique de projection est fonction :

1. De l'importance du chantier. La technique par voie sèche qui offre une grande souplesse d'utilisation est privilégiée pour des chantiers de faible importance ou nécessitant des arrêts fréquents ;
2. de la nature des travaux à effectuer ;
3. des cadences de réalisation souhaitées la technique par voie humide permet des capacités de production élevées ;
4. des performances mécaniques à obtenir : la technique par voie sèche permet d'obtenir des résistances élevées.

L'adjonction de fibres (dosage 35 à 50 kg/m3) offre au béton projeté des propriétés complémentaires, fonction du type de fibres : limitation des effets du retrait, amélioration des résistances mécaniques, meilleure cohésion du béton à l'état frais.[26]

Avantages et domaines d'emploi :

Avantages du BP voie sèche :

- Souplesse d'utilisation
- Grandes distances de transport
- Possibilité de fortes épaisseurs en une couche sans accélérateur
- Résistance élevée : augmentation E/C
- Béton à haute performance
- Possibilités de robotisation

Domaines d'emploi du BP voie sèche :

- Réparation et renforcement de structures
- voiles minces armés
- Protection immédiate des terrains (volume restreint)
- Projection en talus
- Rénovation des ouvrages souterrains

Limites d'emploi :

Limites d'emploi et inconvénients du BP voie sèche :

- Capacité de production limitée
- Dégagement de poussières
- Qualification du porte-lance
- Perte par rebond
- nécessité d'une bonne qualité du support

Matériels utilisés :

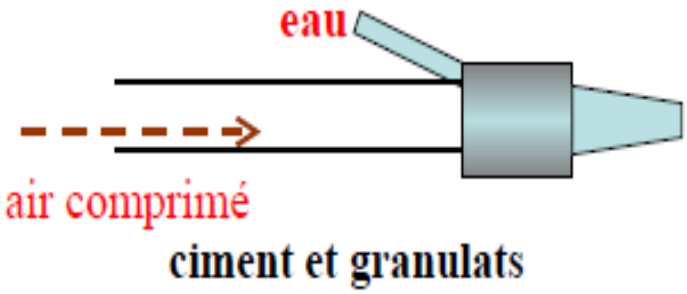


Fig.III.13 : Lance de machine de béton projeté



Phot.III.6 : Béton projeté sur chantier

Principes de réparations :

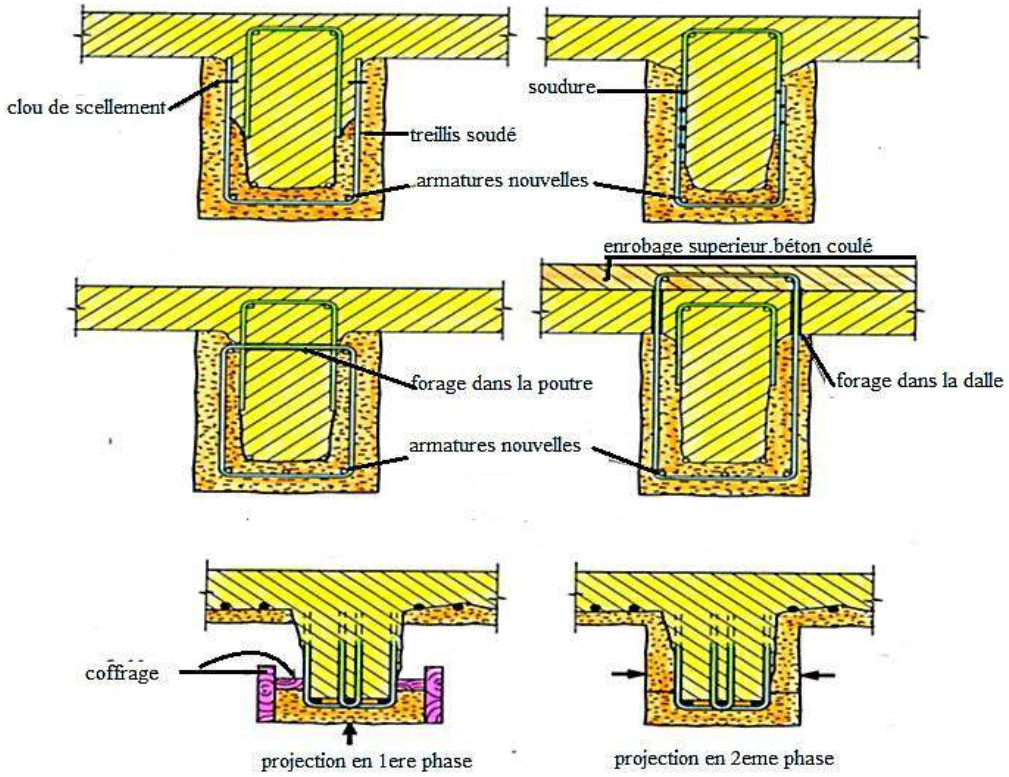


Fig.III.14 : Réparation par projection de béton

Procédure opératoire :

L'opération de bétonnage respecte la chronologie suivante :

– Préparation du support

– Scellements éventuels de connecteurs

– Mise en place éventuelle du ferraillage et des piges de contrôle d'épaisseur (inox)

– Projection du béton en respectant le phasage (de bas en haut sur des bandes de largeur déterminée)

– Passes successives (respect du nombre et délai entre passes)

– Arrêt de bétonnage en fin de lot ou de journée selon les règles de l'art

– Couche de finition éventuelle (toujours distincte de la couche structurelle

– Protection par cure (si nécessaire**)** [26]

Conclusion :

Concernant les différents techniques de réparation nous somme appuyer sur des recherches menées sur les projets de réhabilitation diveres. Il en est ressorti plusieurs techniques particuliers, le ragréage, le béton projeté et lu de tissus de fibre de carbon.

ces technique redonner a la structure ses capa cotes a rependu, les efforts qui lui sont appliques

On cherche à ce que la structure puisse reprendre les charges qui lui sont appliquées et même un supplément de charge si c'est nécessaire pour que l'ouvrage réponde à l'évolution des besoins des propriétaires.

III.2 : Méthode de protection

Introduction :

Une fois diagnostiqué puis réparé, il est utile de prévoir une protection de l'ouvrage afin de rendre durables les réparations pour éviter une réapparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Protection des ouvrages en béton armé :

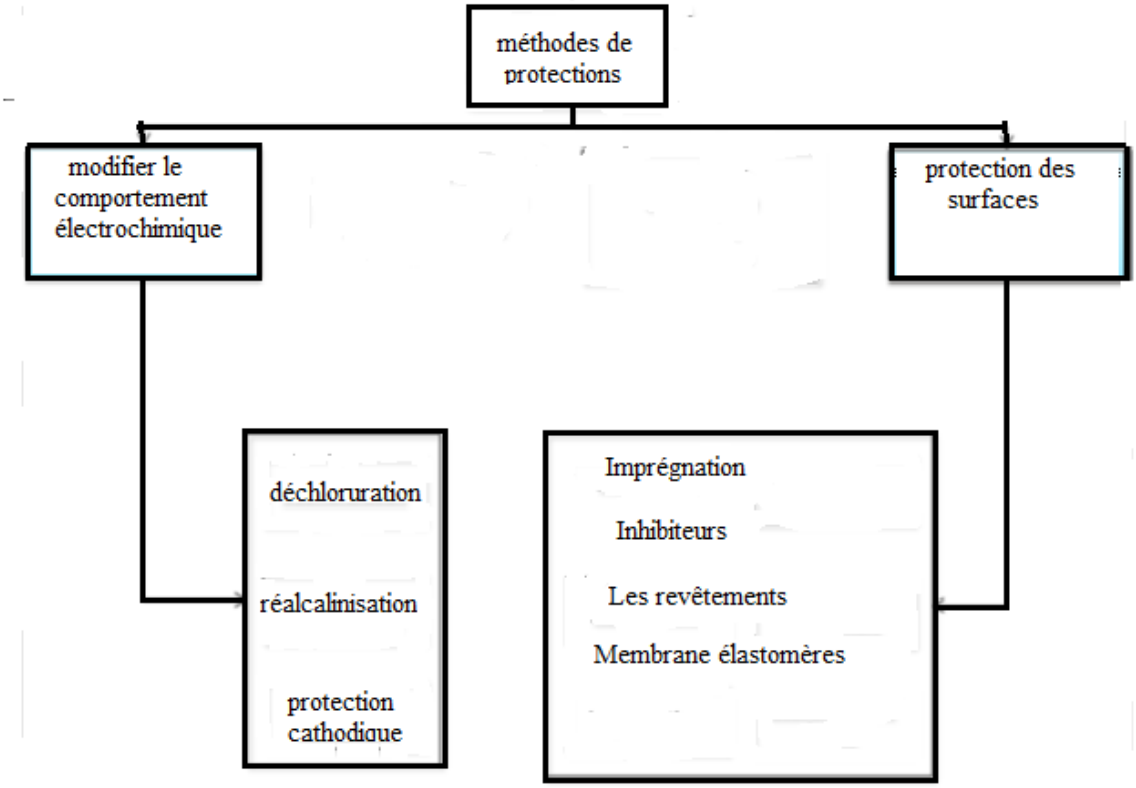


Fig.III.15 : Résumé des méthodes de protections

Ces méthodes permet soit de ramener au béton ces caractéristiques mécaniques et chimiques initiales, soit de le protéger contre les attaques structure. Dans le but de rallonger sa durée de vie ainsi qu'augmenter ses capacités à absorber ces attaques et la vieillesse.

Dans un premier temps, le procédé de protection le plus logique sera d'éviter ces problèmes en supprimant les sources de ceux-ci, et en renforçant le matériau faible ; modifier les

conditions de service et d'exposition, Améliorer les propriétés physiques des matériaux de réparation ou du béton initial.

Puisqu'on est en face des ouvrages déjà construits puis réparés, on ne s'intéressera pas dans cette partie à ces méthodes de protection nécessitantes une analyse en stade de pré-construction ; mais on se dirigera vers des procédés de protection des surfaces et à la modification du comportement électrochimique des matériaux ; en stade de post-construction et souvent de post-réparation.

III.2.1 : Protection des ouvrages (surfaces) :

Un grand nombre de méthodes de protection en usage utilisent une barrière qui isole ou modifie l'état de service agressif. L'isolation et modification de l'état de service permet au béton protégé de durer plus longtemps et/ou d'améliorer sa performance. Les barrières appliquées sont une vaste catégorie de revêtements, produits d'étanchéité, membranes, scellement des joints et des techniques d'injection de coulis.

III.2.1.1 : Imprégnation :

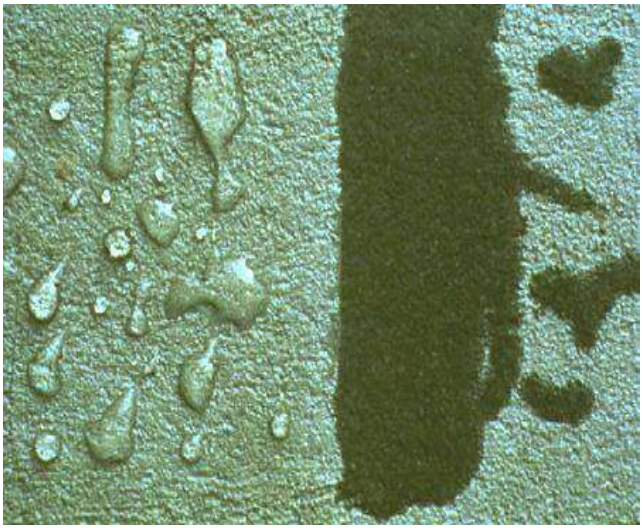
C'est le traitement d'une surface de béton avec un matériau qui pénètre ultérieurement dans les pores de la structure. Il y a trois types de base: hydrophobe, de remplissage partiel et de remplissage complet. Chaque type modifie le comportement de la surface y compris la transmission de vapeur d'humidité et l'absorption du liquide.



Phot.III.7 : Imprégnation hydrophobe

L'imprégnation des surfaces en béton est une technique courante qui est généralement utilisé pour contrôler le flux de l'humidité entrant et sortant de béton. Les techniques d'imprégnation nécessitent une surface propre capable d'absorber des solutions avec des pores et capillaires ouverts, qui peuvent être obtenus par décapage abrasif, hydro décapage ou grenaillage des surfaces en béton.

L'imperméabilité des surfaces en béton peut être réalisée en revêtant les surfaces des pores avec un composé hydrophobe. Les silanes et siloxanes3 sont les plus communs. Lorsque ces composés sont absorbés dans la structure des pores (mais ne les remplient pas), une réaction chimique se produit entre les scellants et le silicate de la structure en béton. Ils produisent une barrière efficace contre l'infiltration de l'eau et des agents agressifs, tout en permettant à la vapeur d'eau de passer.



Phot.III.8 : Action d'un produit hydrofuge

Un autre procédé d'imprégnation de la surface de béton comporte des composés qui sont absorbées dans la structure de pores et remplient, ou partiellement remplient, les passages dans le béton. Il existe deux types de matériaux utilisés: d'une part, ceux qui réagissent avec les constituants de la matrice de ciment (tels que le silicate de sodium), et d'autre part, ceux qui réagissent et durcissent seuls (comme l'époxy, méthacrylate et polyester).

Les avantages offerts par ces enduits protecteurs sont les suivants:

1. Résistance au gel-dégel augmenté.
2. Réduction de l'infiltration de l'eau et des produits chimiques agressifs, tels que les chlorures. [27]

III.2.1.2 : Inhibiteurs :

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques permettant de réduire l'exposition à la corrosion, même tout le processus de corrosion entièrement.

En général, le mécanisme de l'inhibiteur est un ou plusieurs des trois qui sont citées ci-dessous:

1. l'inhibiteur est chimiquement adsorbé sur la surface du métal et formes un film mince de protection à effet inhibiteur ou par combinaison entre les ions d'inhibiteur et de la surface métallique.
2. l'inhibiteur entraîne une formation d'un film de protection d'oxyde de métal.
3. l'inhibiteur réagit avec un composant corrosif potentiel présent dans les milieux aqueux et le produit est un complexe.

Il existe différentes catégories d'inhibiteurs de corrosion. Il est possible de les classifier selon leur mode d'action, à savoir :

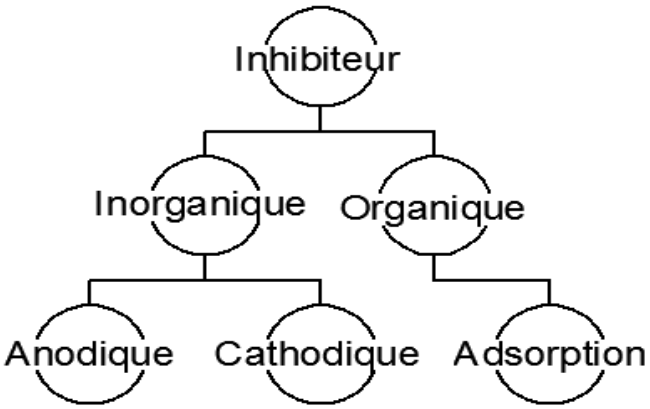


Fig.III.16 : Catégories des inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs anodiques réagissent avec les cations métalliques produits sur l'anode, formant généralement, des hydroxydes insolubles qui se déposent sur la surface métallique en tant que film insoluble et imperméable à l'ion métallique. De l'hydrolyse des inhibiteurs se traduit par des ions OH-. Les chromates, nitrates, tungstates, molybdates sont des exemples d'inhibiteurs anodiques.[28]



Phot.III.9: Application d'inhibiteurs de corrosion dans ou sur le béton

Les inhibiteurs cathodiques agissent soit en ralentissant la réaction cathodique elle-même ou en formant une barrière de précipités insolubles sur le métal. Ainsi, limitent le contact métallique avec l'environnement, ce qui empêche l'apparition de la réaction de corrosion. Pour cette raison, l'inhibiteur cathodique est indépendant de la concentration, par conséquent, ils sont beaucoup plus sûrs que l'inhibiteur anodique.



Phot.III.10 : Inhibiteurs de corrosion

Les composés organiques utilisés comme inhibiteurs, agissent comme cathodiques, anodiques ou comme inhibiteurs cathodiques et anodiques en même temps. Néanmoins, d'une manière générale, agissent par l'intermédiaire d'un processus d'adsorption de surface, désignée comme une filmogène. Ces inhibiteurs accumulent un film protecteur hydrophobe par adsorption des molécules sur la surface métallique, ce qui fournit une barrière à la dissolution du métal dans l'électrolyte. Ils doivent être solubles ou dispersibles dans le milieu environnant le métal. [28]

III.2.1.3 : Les revêtements :

Les revêtements protecteurs de béton comprennent une grande variété de produits chimiques. Des formulations sont disponibles pour répondre à diverses conditions d'exposition et de services. Pour développer une spécification de la méthode et du matériel.

Les fonctions d'un revêtement pour le bâtiment diffèrent sensiblement de celles d'un revêtement pour le génie civil. Il s'agit de :

La fonction esthétique sur les surfaces nues ou vieillies (couleur, aspect de brillance, etc.) ;

La correction des défauts de surface (porosité, fissurés) ;

La fonction technique, par la protection du support vis-à-vis de l'environnement. Les produits de revêtement sur béton doivent en effet empêcher l'eau et ses éléments agressifs de pénétrer dans le béton et assurer des fonctions d'étanchéité à l'eau, à la vapeur d'eau ou au gaz carbonique.

Les produits doivent être conformes aux normes qui les concernent.

La finition est destinée à augmenter la protection des réparations et des surfaces non réparées. Elle peut être constituée de plusieurs produits classés selon leurs performances attendues pour le bâtiment :

· Revêtements à vocation essentiellement décorative. [28]



Phot.III.11 : Application de la finition



Phot.III.12 : Les enduits de façade

Revêtement d'imperméabilité, appliqué à titre curatif pour pallier les désordres susceptibles d'affecter le clos (fissures infiltrantes), Il est important que ces matériaux aient une élasticité suffisante pour résister aux fissures. [28]

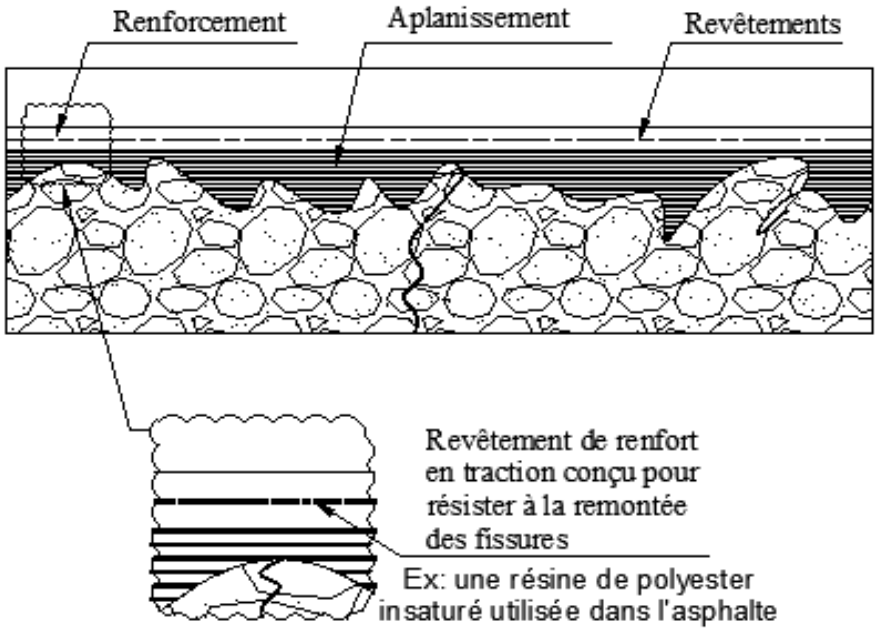


Fig.III.17 : Exemple de revêtement des surfaces

III.2.2 : Protection des armatures :

III.2.2.1 : Armatures résistantes à la corrosion :

III.2.2.1.1 : Les armatures en acier inoxydable :

Un acier inoxydable est un acier qui contient au minimum 10,5% de chrome (EN 10088). Ce chrome participe à la formation d'une couche superficielle dite couche « passive »

; elle est composée d'un film très mince de quelques nanomètres, invisible à l'œil nu ; ce film est constitué d'oxydes et d'hydroxydes de chrome. Cette couche fait partie intégrante du métal et elle assure une sorte de protection anti - corrosion durable.

Les aciers inoxydables sont divisés en quatre groupes: ferritique, ferro-austénitique, martensitique et austénitique.

L'acier inoxydable solide ne montrait aucun signe de corrosion lorsque la concentration de chlorure dans le béton adjacent aux barres en acier inoxydable a été 15 fois plus élevée que le seuil d'initiation de la corrosion classique.

Bien que beaucoup d'études aient indiqué le rendement élevé des aciers inoxydables dans le béton, le principal obstacle à son utilisation dans les structures en béton armé est leur coût initial élevé. [29]



Phot III.13 : Armatures inox

III.2.2.2 : Revêtements des armatures :

III.2.2.2.1 : Barres recouvertes d'époxy :

La barre recouverte d'époxy (ECR) est utilisée dans de nombreux ponts aux États-Unis, elle est produite par application de poudre époxy sur les surfaces fraîchement décapées en acier à haute température. Les barres d'armature recouverte d'époxy fondu sont trempées, le plus souvent dans un bain d'eau pulvérisée. ASTM A 775 (Spécification standard pour les barres d'armature en acier recouvert d'époxy) et A 934 (Spécification pour les barres d'armature en acier préfabriqué recouvert d'époxy) fournit des spécifications de contrôle de la qualité des revêtements époxy lors de l'enduction, la manutention, l'expédition et de stockage.



Phot.III.14 : Armatures recouvertes d'époxy

Bien que la barre recouverte d'époxy ait été couramment utilisé depuis les années 1970 dans les, tabliers de pont, des études récentes ont signalé que (ECR) peut ne pas fournir la durée de vie souhaitée en raison de problèmes de décollement cathodique.

Actuellement de nombreuses entreprises cherchent à développer les barres modifiées de l'ECR. Pour résoudre le décollement cathodique et le problème de corrosion et apporter de nouveaux produits sur le marché.

III.2.3 : Protection par méthodes électrochimiques :

Cette partie présente les principales techniques électrochimiques utilisées pour réduire la corrosion dans les structures de béton armé : Protection cathodique(PC), Déchlorurations(DC), Ré-alcalinisation(RA).

Toutes les méthodes de maintenance électrochimiques ont en générale le même principe et méthode d'application pratique. Les principales différences sont la quantité de courant circulant à travers le béton et la durée du traitement.

Par l'intermédiaire d'un conducteur externe, dite anode; un courant continu est dirigé à travers le béton de l'armature qui est ainsi amenée à agir en tant que cathode dans une cellule électrochimique. Le résultat final de la circulation du courant est d'arrêter la corrosion par repassivation des armatures par polarisation de l'armature à un potentiel plus négatif(PC), ou en enlevant les ions agressifs (DC), ou en rétablissant l'alcalinité de la solution interstitielle(RA).

III.2.3.1 : Protection cathodique :

La protection cathodique est basée sur le changement du potentiel de l'acier à des valeurs plus négatives, pour que le métal agit comme cathode et ainsi de réduire le courant de corrosion à des valeurs négligeables.

Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton, à l'aide d'une anode placée de façon permanente sur le parement ou parfois dans l'enrobage. Le courant de polarisation, qui circule de l'anode vers l'armature, se situe entre 2 et 50 mA par mètre-carré de surface d'armature.[30]

Il existe deux techniques de protection cathodique :

- La protection Cathodique par Courant Imposé (PCCI) utilise un générateur de courant continu branché entre l'ouvrage à protéger (cathode) et une ou des anodes auxiliaires (appelées déversoirs de courant) utilisant tout matériau conducteur d'électricité (de préférence inattaquable).

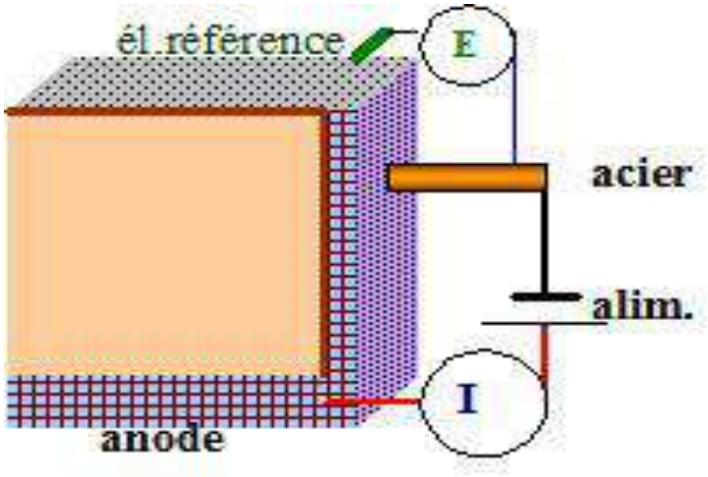


Fig.III.18 : Traitement électrochimique sous « courant imposé »
(L'anode est dans un mortier ou une pâte.)

- La protection Cathodique par Courant Galvanique (PCCG) utilise un couplage galvanique entre l'ouvrage à protéger et une ou des anodes sacrificielles constituées d'un métal ou alliage moins noble que le métal que l'on veut protéger.

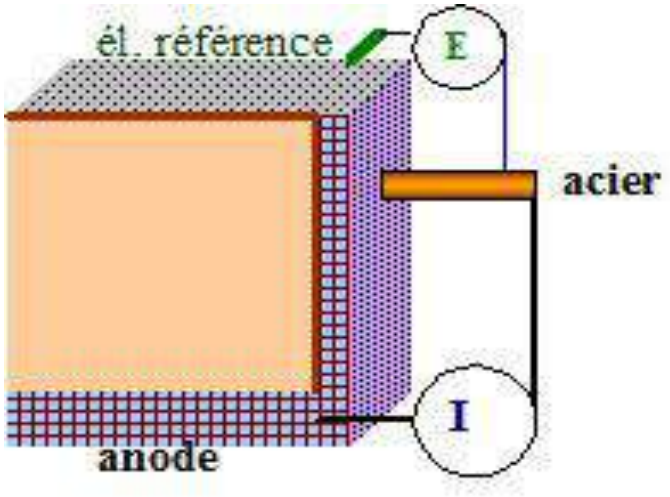
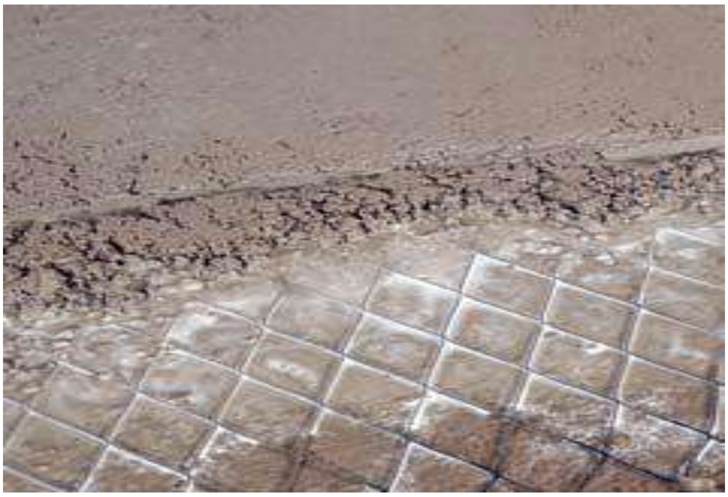


Fig.III.19 : Traitement électrochimique avec une anode " galvanique ".

L'anode est fixée à la surface du béton ou inséré dans celui-ci



Phot.III.15 : Mise en place du treillis anodique



Phot.III.16 : Application d'un potentiel électrique

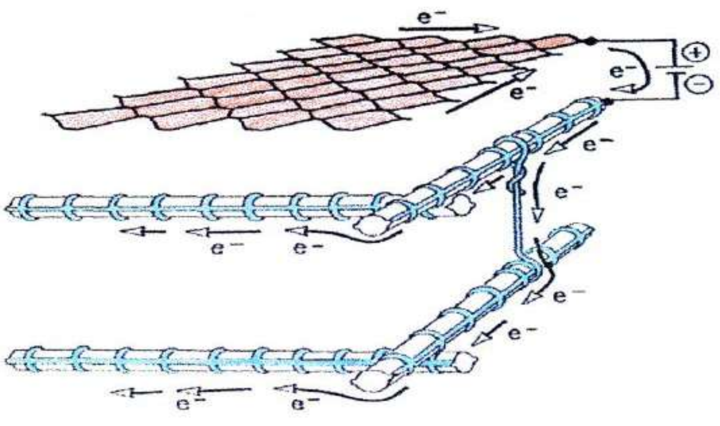


Fig.III.20 : Le principe de la protection cathodique appliquée au béton armé.

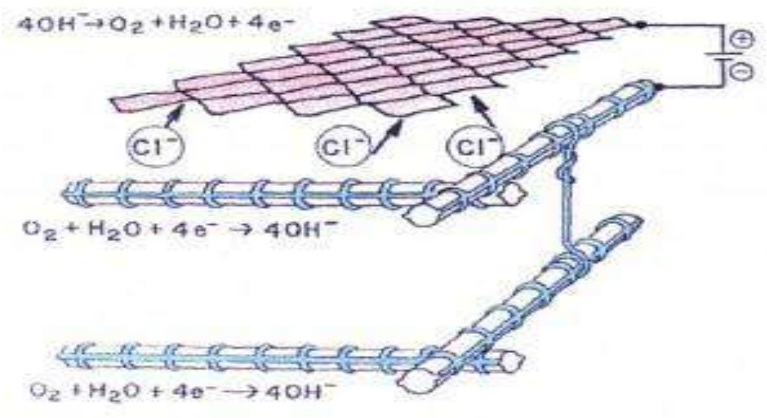


Fig.III.21: une réaction cathodique à toutes les armatures

Les procédés cathodiques produisent une alcalinité sur la surface des armatures. A l'intérieur du béton, le courant est transporté par les ions proportionnellement à leur concentration. Les ions positifs se déplacent dans la même direction que le courant (de l'anode à la cathode), et les ions négatifs dans la direction opposée. Ainsi dans un béton contaminé par des chlorures, la circulation du courant présente une réduction de la teneur en chlorure à la surface des armatures ou une réduction de la pénétration de chlorure dans le béton.

Ces effets sont avantageux dans le sens où ils favorisent une augmentation du rapport OH- / Cl- et favorisent ainsi les phénomènes de passivation. C'est pourquoi cette méthode est particulièrement adaptée lorsque la corrosion est causée par la contamination de chlorure. [30]

III.2.3.2 : Déchloruration :

La déchloruration est une technique de traitement électrochimique qui consiste à extraire les chlorures et produire des ions hydroxydes (OH–) situés dans la zone d'enrobage qui protège les armatures, afin de freiner la propagation de la corrosion.

La totalité des chlorures ne peut pas être extraite, il convient de s'assurer que la teneur résiduelle en chlorure au droit des armatures est inférieure aux valeurs limites admissibles (0,4% du poids du ciment).

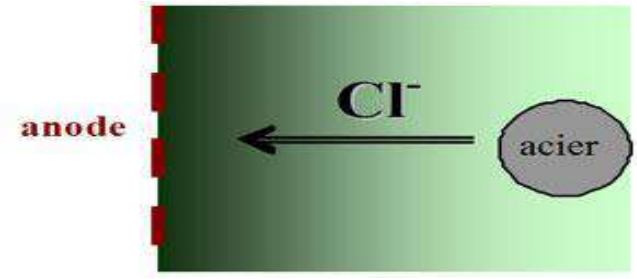


Fig.III.22 : Extraction des chlorures par un traitement électrochimique

Ces traitements peuvent être réalisés :

- À l'aide d'un générateur électrique qui impose un courant continu (tension 40 V) circulant de l'anode vers l'armature. Si nécessaire la déchloruration et la réalcalinisation sont effectuées l'une après l'autre ou simultanément ;
- À l'aide d'une anode active (grille d'acier ou en titane) directement reliée à l'armature. Il y a création d'un courant galvanique. Dans ce cas la réalcalinisation et la déchloruration peuvent être effectués en même temps.

Pour les deux procédés, une couche de pâte imbibée d'une solution électrolyte adaptée est appliquée à la surface de la zone de béton à traiter.

Elle doit être humidifiée régulièrement pour permettre la circulation du courant.

Ces traitements sont temporaires, leur durée d'application est de quelques semaines.

Il convient préalablement d'assurer une continuité électrique entre les armatures. [31]

III.2.3.3 : Ré-alcalinisation :

Ce traitement électrochimique du béton consiste à introduire sous l'effet d'un courant électrique des alcalins (Na+ ou K+) dans la zone d'enrobage des armatures. Il va permettre de redonner une alcalinité élevée au béton qui a été carbonaté et donc stopper la corrosion des armatures. Le traitement est réalisé avec une densité de courant imposé de 0,5 à 1 A/m2 et dure une à deux semaines.

Il induit une électrolyse autour des armatures qui contribue à la création d'OH- et à la remontée du pH à des valeurs supérieures à 10.

Les étapes du traitement :

_ Projection d'une première couche de pâte associée à une solution électrolytique adaptée ;

_ Mise en place d'un treillis anodique métallique (acier ou titane) sur des baguettes isolantes fixées au parement ;

_ Connexion du treillis à l'anode ;

_ Projection d'une deuxième couche de pâte ;

_ Raccordements électriques au générateur de courant continu ;

_ Humidification régulière de la pâte par l'électrolyte ou par l'eau ;

_ Suivi des tensions et courants ;

_ Dépose de l'ensemble de l'installation. [31]

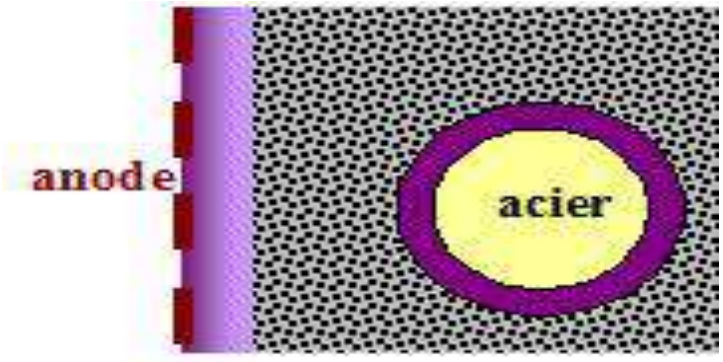
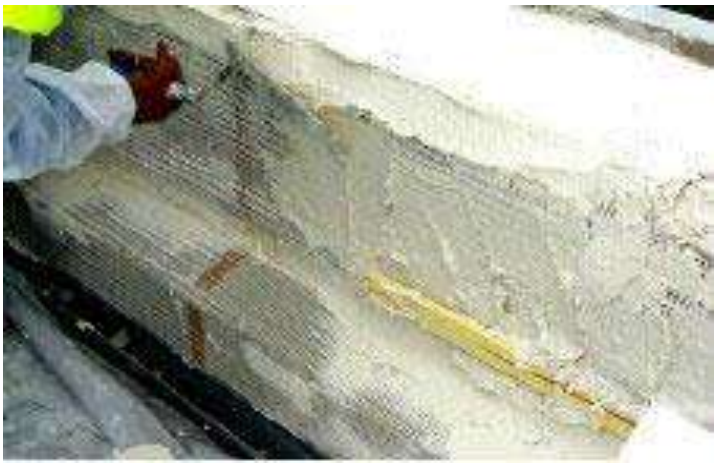


Fig.III.23 : Traitement de ré-alcalinisation de l'enrobage autour d'une armature.

La pâte autour de l'anode est saturée d'un liquide basique qui pénètre dans le béton.



Phot.III.17 : Enrobage d'une anode pour traitement de ré-alcalinisation à l'aide d'anode galvanique.

Conclusion :

Le béton armé est un des matériaux de construction les plus couramment utilisés. Toutefois, en raison de changements dans les spécifications de conception, le vieillissement, les conditions environnantes, etc. - il y a un besoin de procédures pour la réparation et prévention des superstructures et des infrastructures en béton (armé ou précontraint). C'est nécessaire pour que l'ouvrage réponde à l'évolution des besoins des propriétaires et pour éviter une réapparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Donc il est nécessaire de souligner le fait que ce n'est pas simplement protéger l'ouvrage.

Il faut avant tout travailler sur l'origine des desoudres afin d'arrêter le problème à la source.

Chapitre IV

Présentation du cas d'étude pont sur Oued Mechaab RN 26 PK 39+200

Expertise d'ouvrages d'art sur routes nationales

Pont sur oued Mechaab sur RN 26 au PK 039+200 [AFR CONSEILS Alger]



Mission 01 : inspection preliminaire

Fiche signaletique d'ouvrage

Pont sur oued Mechaab RN 26 PK 39+200	
DONNEES ADMINISTRATIVES	Subdivision : AKBOU Localisation : localité de AKBOU Voie portée : RN 26 PK 39+200 Voie franchie : Oued mechaab Type d'ouvrage : Béton armé Données d'archive : Rapport d'expertise élaboré par AFR Conseils Classification RPOA : Groupe03, Zone IIa, site catégorie S3
HISTORIQUE	Année de construction : 1987

DONNEES GEOMETRIQUES	Tracé : droit Biais : 100 grades Nombre de travées : 01 Portée [sens biais] : 23m Ouverture [sens droit] : 20m Longueur de l'ouvrage : 31.40m Largeur de tablier : 10.90 (chaussée : 8m+2trottoires de 1.45m) Surface de tablier : 250.70m²
SUPERSTRUCTURE	Matériau : béton armé Tablier : 7pouters en béton armé +3entretoises dont 2 d'about pour Chaque travée Structure : isostatique (travée indépendante)
INFRASTRUCTURE	Matériau : béton armé Culées massives à mur en retour Fondation : pieux (probablement)
EQUIPEMENTS	Appareils d'appui : pas visible (présence mur cache en parpaing) mais probablement en néoprène fretté. Joints de chaussée : Type couverts Garde-corps : Métalliques Avaloirs : 12

Fiche d'inspection et relevé des désordres

PONT SUR OUED MECHAAB RN 26 PK 39+200		
NATURE DE LA DEGRADATION	LOCALISATION	CAUSES PROBABLES
Ruptures de béton	Eléments de dallettes de trottoir (10 à 12ml des deux trottoirs)	Poinçonnement accidentel par les roues de véhicules
Infiltrations & humidité	Mur de front des deux culées	Défaut d'étanchéité des joints de chaussée (souillures sur chevêtres)
	Intrados hourdis au droit sorties d'avaloirs	Défaut d'étanchéité raccords bouches d'avaloirs dessus hourdis
	Intrados trottoirs amont & aval	Défaut d'étanchéité hourdis et joints dallettes de trottoirs
	face latérale des deux poutres de rive amont & aval	
	Intrados hourdis travée	Défaut d'étanchéité hourdis

Efflorescences	centrale	
	Intrados trottoirs amont & aval	Défaut d'étanchéité hourdis et joints dallettes de trottoirs
	About des poutres	Défaut d'étanchéité des joints de chaussée avec stagnation des eaux sur le chevêtre bloqué par les murs en parpaing
Ségrégations de béton	Base mur frontal de la culée rive gauche	Défaut de vibration du béton
Fissures	Transversal Sous-face de toutes les poutres avec espacement régulier (20cm)	Enrobage insuffisant et gonflement d'acier transversal par corrosion
	Horizontal sur le mur en retour de la culée rive gauche coté aval	Probablement un choc de véhicule sur les garde-corps au niveau du mur en retour.
Eclatement de béton avec dénudement et corrosion d'armatures	Sous-face des deux poutres de rive (sans gravité)	Enrobage insuffisant et gonflement d'acier par corrosion (cause infiltrations).
	Intrados hourdis au droit sorties avaloirs & sous trottoirs amont et aval	Enrobage insuffisant + gonflement des aciers par corrosion (cause infiltrations).
Corrosion	Garde-corps en totalité	Fréquence d'entretien insuffisante
Choc de véhicule	Garde-corps au droit des culées trottoir coté amont	Faible hauteur du trottoir
Affouillement	Fondation culée rive droite (sans gravité)	Enlèvement incontrôlé de TVO

On trouvera pages suivantes quelques illustrations photographiques de ces désordres.



Phot.IV.1 : Vue du trottoir coté amont vers Bejaia

Dallettes de trottoir rompues ou disparues. Les eaux de pluie s'accumulent autour des réseaux et souillent le hourdis.



Phot.IV.2 : culée rive gauche

Absence de joint de chaussée avec affaissement de la chaussée derrière le mur frontal des deux culées (Photo culée rive gauche) : l'affaissement de la chaussée est dû fort probablement à l'absence de dalle de transition.



Phot.IV.3 : Elévation aval

Les souillures d'infiltration sur les joues des poutres de rive sont nettes (conséquence du défaut d'étanchement des dallettes ou de leur disparition).



Phot.IV.4 : la semelle culée rive gauche coté aval

Affouillement (sans gravité) de la semelle culée rive gauche coté aval ; Départ des remblais derrière le mur en retour (début d'affaissement de la chaussée au droit du trottoir coté aval rive droite).



Phot.IV.5 : Culée rive droite

Culée rive droite : infiltrations sur mur de front provenant du défaut d'étanchéité du joint de chaussée. Les parpaings interposés sur chevêtre doivent être enlevés.



Phot.IV.6 : Efflorescence et trace d'humidité au droit des abouts des poutres

Efflorescence et trace d'humidité au droit des abouts des poutres. Cause : mauvaise étanchéité des joints de chaussé + stagnation des eaux sur le chevêtre (présence des murs en parpaing)



Phot.IV.7 : Vue de l'intrados coté trottoir

Vue de l'intrados coté trottoir : infiltrations provenant des trottoirs sous dallettes disparues ou à joints non étanchés.



Phot.IV.8 : Fissures transversales multiples en sous-face avec espacement régulier (20cm) sur les deux poutres de rive coté amont et aval

Fissures transversales multiples en sous-face avec espacement régulier (20cm) sur les deux poutres de rive coté amont et aval. Cause : enrobage insuffisant + corrosion des cadres avec gonflement, conséquence des infiltrations provenant du trottoir, s'écoulant sur la joue de poutre et venant corroder le ferraillage.



Phot.IV.9 : Eclatement du béton sous-face poutres de rive coté amont et aval

Eclatement du béton sous-face poutres de rive coté amont et aval. Les poutres souffrent de défaut d'enrobage.



Phot.IV.10 : intrados de hourdis au droit des sorties d'avaloirs.

Efflorescences + éclatement de béton + dénudement aciers sur intrados de hourdis au droit des sorties d'avaloirs.



Phot.IV.11 : la culée rive gauche coté aval

Départ des remblais sous chaussée au droit de la culée rive gauche coté aval.



Phot.IV.12 : Vue du trottoir coté amont vers Bejaia

Vue du trottoir coté amont vers Bejaia : garde-corps endommagés, affaissement de chaussée au droit de la culée, hauteur insuffisante du trottoir à la suite de rechargement successif de chaussée.

POINTS DE PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS

Le programme d'investigations prévu est le suivant :

Prélèvement de 3 carottes Ø75 et de 3 carottes Ø50 sur béton.

I/ LOCALISATION DES PRELEVEMENTS :

Localisation : les carottages seront effectués sur le hourdis à partir du dessus de dalle entre poutres extrêmes [en évitant de tomber sur une poutre ou une entretoise]. Le schéma de la page suivante indique la localisation. Cette dernière peut être modifiée en fonction des commodités d'intervention.

II/ PROGRAMME :

Sur les 3 carottes Ø75 :

- Ecrasement : mesure de la résistance à la compression simple.
- Ultrasons : mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques.

Sur 2 carottes Ø50 :

- Carbonatation : mesure de l'épaisseur carbonatée au droit du parement d'intrados (exposé à la carbonatation).

Sur 1 carotte Ø50 :

- Analyse chimique sommaire: mesure du taux de présence des sulfates et des chlorures.

La localisation des prélèvements est donnée sur le schéma ci-après :

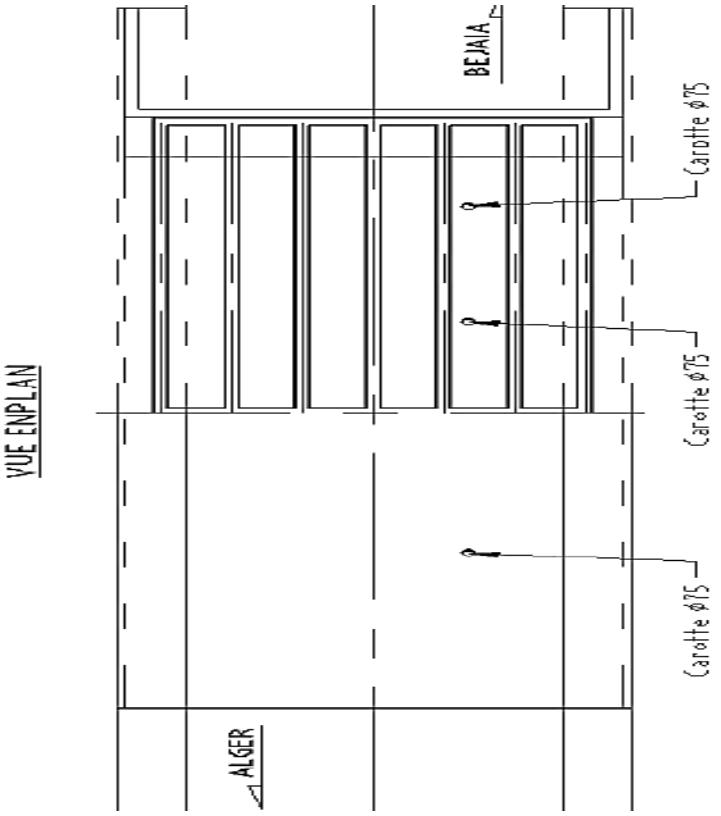


Fig.IV.1 : le schéma de La localisation des prélèvements

AVIS SUR L'ETAT APPARENT DE L'OUVRAGE

En superstructure l'ouvrage présente des dégradations au niveau des poutres de rive (en raison de la conception des dallettes de trottoir qui laissent accumuler les eaux de pluie autour des réseaux) et au droit des sorties d'avaloirs.

En infrastructure début d'affouillement en aval de la semelle culée rive gauche (coté bejaia) avec départ des remblais derrière le mur en retour aval de la culée rive gauche (coté bejaia) qui se manifeste par affaissement de la chaussée au droit du trottoir coté aval rive droite.

La réhabilitation de l'ouvrage relève de l'entretien spécialisé. En conséquence aucune mesure conservatoire urgente n'est à prendre dans l'attente des conclusions définitives de l'expertise en cours.

Mission 2 : Auscultation et Diagnostic

PROGRAMME D'AUSCULTATION

L'ensemble des investigations et essais ont été confiés au laboratoire BETHA CONTROL.

I/ PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS DE BETON :

Le programme d'investigations a porté sur des tests sur le béton du hourdis de la dalle. Les prélèvements par carottage ont consisté en:

- 3 carottes Ø75
- 3 carottes Ø50

Ces carottages indiquent :

Epaisseur d'enrobé : 10 cm Epaisseur grave sous enrobé : 10 cm

Epaisseur dalle > 20 cm [la carotteuse n'ayant pu traverser la dalle]

La localisation des prélèvements est donnée sur le schéma ci-après :

II/ ESSAIS SUR CAROTTES :

Sur les 3 carottes Ø75 :

- Ecrasement : mesure de la résistance à la compression simple.
- Ultrasons : mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques.

Sur 2 carottes Ø50 :

- Carbonatation : mesure de l'épaisseur carbonatée au droit du parement d'intrados (exposé à la carbonatation).

Sur 1 carotte Ø50 :

- Analyse chimique sommaire: mesure du taux de présence des sulfates et des chlorures.

RESULTATS

I/ RESULTATS DES MESURES DES VITESSES ULTRASONIQUES :

N°	REF CAROTTE	Ø CAROTTE (MM)	DISTANCE (MM)	TEMPS DE PROPAGATION (µS)	VITESSE (M/S)
1	D1	75	150	30.6	4900
2	D2	75	150	29.6	5070
3	D3	75	125	23.5	5110

II/ RESULTATS DES ESSAIS DE COMPRESSION :

N°	REF CAROTTE	Ø (MM)	H (MM)	H/Ø	POIDS (KG)	DENSITE (T/M^3)	CHARGE (KN)	R C (MPA)
1	D1	75	150	2	1.565	2.360	71.425	16.17
2	D2	75	150	2	1.550	2.339	50.620	11.46
3	D3	75	125	1.67	1.320	2.390	5.341	13.21

III/ RESULTATS DES ESSAIS DE CARBONATATION :

N°	REFERENCE CAROTTE	MESURE IMMEDIATE (MM)	MESURE A 24 HEURES (MM)
1	D4	42	46
2	D5	40	42



Phot.IV.13 : Carbonatation sur carotte D4 prise sur mur de culée

Les mesures de carbonatation n'ont pas été effectuées sur la dalle parce que le béton d'intrados n'a pas été atteint par la carotteuse



Phot.IV.14 : Carbonatation de la carotte D5

Carbonatation de la carotte D5 : idem que D4 (forte épaisseur carbonatée).

IV/ ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE :

N°	REFERENCE CAROTTE	SULFATES (%)	CHLORURES (%)	PH
1	D3	0.11	0.155	13.77

INTERPRETATION & DIAGNOSTIC

I/ INTERPRETATION :

Malgré des vitesses ultrasoniques excellentes (autour de 5000 m/s) et des densités de béton témoignant d'une faible porosité, les résultats d'écrasement restent modestes (autour de 130 bars). L'absence de défaillance visible sur le tablier laisse penser que les résultats d'écrasement sont pessimistes (microfissurations provoquées par le carottage).

Les mesures des épaisseurs carbonatées (autour de 4cm) montrent que les aciers sont atteints par la carbonatation et ne sont plus protégés par le béton. Le relevé de dégradation confirme ce fait. D'où la nécessité d'une protection sur béton par une peinture spéciale (voir rapport mission 3).

Les taux de présence de sulfates sont faibles (le béton n'est donc pas sujet aux réactions produisant les sels de Candlot). Il en est de même des chlorures [niveau d'agressivité A0].

II/ DIAGNOSTIC :

L'ensemble des tests pratiqués confirment le prédiagnostic établi (corrosion précoce des aciers favorisée par le faible enrobage et la carbonatation).

La réhabilitation de l'ouvrage relève bien de l'entretien spécialisé.

PROJET DE REHABILITATION

Mission 3 : final d'expertise

I/ Nature des travaux:

On procèdera à :

1/ Travaux de préparation :

- Réalisation d'une déviation de 6m de chaussée à l'aval de l'ouvrage existant :
- Préparation plateforme de pose des buses.
- Fourniture et pose 4 buses Ø1200mm, 8m de longueur.

- Réalisation d'un remblai en tout venant sur les buses (h min = 1,50) bien compacté.
- Réalisation des remblais d'accées.

2/ Travaux sur les culées:

- Enlèvement de tous les parpaings interposés sur les chevêtres avec nettoyage à l'eau de toute la zone d'appui.

Sablage des parements en béton sur :

- Mur frontal et mur garde grève des deux culées.
- Réparation de surface de béton dégradé :
- (sur épaisseur < 5cm) comprenant: brossage énergique des aciers mis à nu, fourniture et application passivant sur aciers dénudés, fabrication et mise en œuvre mortier hydraulique à base d'émulsion de résine, compris primaire d'accrochage [réparation limitées aux zones dégradées mises en évidence après sablage].
- Construction de plots parasismiques sur chevêtres.
- Protection des parements en béton armé :
- Application d'un inhibiteur de corrosion pour protection des armatures contre la corrosion.
- Application d'un système de peinture de protection du béton contre les agressions extérieures.

3/ Travaux sur les remblais d'accès:

- Travaux de déblais derrière culées.
- démolition des trottoirs au droit des culées.
- enlèvement des remblais entre murs en retour, 4m derrière mur de front a une profondeur de 2m.
- Réalisation de corbeau :
- Scellement de bars en acier dans le mur frontal coté remblais.
- Réalisation du corbeau.
- Réalisation dalle de transition :
- préparation fond de fouille.
- Mise en place béton de propreté.
- Mise en place armature et coulage de la dalle en béton.
- Travaux de remblais derrière culées :
- Préparation et mise en place remblais TVO stabilisé en ciment 5%.
- Protection des remblais par mur poids :
- Réalisation d'un mur poids en gradin pour protection des remblais au droit du mur en retour coté aval de la culée rive gauche.

4/ Travaux en intrados de tablier:

- Protection des parements en béton armé :
- Application d'un inhibiteur de corrosion pour protection des armatures contre la corrosion.
- Application d'un système de peinture de protection du béton contre les agressions extérieures.
- Sablage des parements en béton sur :
- Les 4 poutres de rive (joues + talon)
- Les abouts des 7 poutres sur une longueur de 2m (joues + talon)
- L'intrados des 2 trottoirs
- Les 2 corniches
- L'intrados de dalle autour des sorties d'avaloir (1,5 m² par avaloir)
- Injection de fissures à la résine sur:
- Les fissures existantes ou mises à nu par le sablage
- Réparation de surface de béton dégradé :
- (sur épaisseur < 5cm) comprenant: brossage énergique des aciers mis à nu, fourniture et application passivant sur aciers dénudés, fabrication et mise en œuvre mortier hydraulique à base d'émulsion de résine, compris primaire d'accrochage [réparation limitées aux zones dégradées mises en évidence après sablage].
- zones à réparés sont : sous face poutre de rive, abouts des poutres, intrados de l'hourdis au droit des trottoirs

5/ Travaux sur les équipements:

- Rehaussement du trottoir amont :
- Dépose de la bordure existante sur tablier et au droit des culées.
- Pose d'une nouvelle bordure sur un mortier de béton ep=10cm.
- Réalisation d'une longrine en béton armé (10x10cm) scellée dans la corniche. [Voir détails sur plan d'exécution]
- Remplacement des garde-corps :
- Reprise des trottoirs par:
- Suppression des dallettes
- Nettoyage de la zone de passage des réseaux
- Mise en place deux fourreaux en PVC Ø150
- Comblement avec du béton jusqu'au niveau fini du trottoir [voir détails sur plan d'exécution]
- Réfection de l'étanchéité et du revêtement de chaussée:

- Enlèvement du revêtement et de l'étanchéité existants
- Mise en place d'une nouvelle étanchéité avec relevé au droit des bordures de trottoir
- Reprise des avaloirs:
- Ils seront équipés de grilles 200x200 et dotés de tubes d'évacuation prolongés jusqu'au-dessous des sous-faces de poutres [voir détails sur plan d'exécution]
- Remplacement des joints de chaussée:
- Ils seront de type couvert [voir détails sur plan d'exécution]
- Etanchement des joints de trottoirs:
- Cet étanchement sera appliqué au droit des joints de trottoir. Ils seront coiffés de couvre-joints métalliques collés d'un côté du bord.

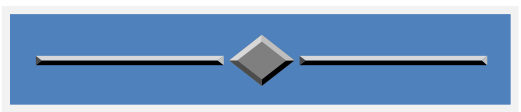
[Voir détails sur plan d'exécution]

II/ QUANTITATIFS DES TRAVAUX:

N°	DESIGNATION DES TRAVAUX	U	Q
1	Réalisation d'une déviation provisoire	F	1
2	Enlèvement de parpaings et nettoyage chevêtre de culée	F	2
3	Dépose bordure de trottoir (coté amont) sur tablier	ML	23
4	Déblais derrière culées	M^3	160
5	Reconstruction de remblai par du TVO stabilisé au ciment (5%) derrière culées	M^3	150
6	Sablage de parement en béton	M^2	530
7	Injection de fissure à la résine	ML	310
8	Réparation de surface de béton dégradé (sur épaisseur < 5cm) comprenant : brossage énergique des aciers mis à nu, fourniture et application passivant sur aciers dénudés, fabrication et mise en œuvre mortier hydraulique à base d'émulsion de résine, compris primaire d'accrochage	M^2	235
9	Forage sur béton trou ϕ18mm profondeur 100mm	U	198
10	Fourniture et mise en œuvre mortier de scellement	L	5.05
11	Béton dosé à 200kg de ciment CPA/M^3pour mur poids et béton de propreté sous dalle de transition	M^3	60
12	Béton RN25 pour béton non armé (comblement de trottoirs)	M^3	10
13	Béton RN27 pour béton armé (corbeau, dalles de transition et longrine)	M^3	25
14	Béton RN35 pour béton armé (plots parasismiques)	L	92

15	Acier Fe40A pour béton armé	KG	3700
16	Fourniture et pose complexe d'étanchéité	M²	185
17	Fourniture et pose joint de chaussée couvert	ML	16
18	Fourniture et pose joint en polyuréthane (section < 4 cm²)	ML	6
19	Couche de roulement en béton bitumineux (épaisseur : 8 cm)	T	45
20	Fourniture et pose d'avaloir ϕ100 grille 200 compris foration	U	6
21	Fourniture et pose garde-corps compris antirouille et peinture en 2 couches	ML	62
22	Fourniture et pose de fourreau en PVC ϕ150	ML	125
23	fourniture et Pose bordure de trottoir (trottoir amont sur tablier et sur les deux culées)	ML	40
24	Fourniture et mise en œuvre d'inhibiteur de corrosion sur béton	M²	1000
25	Fourniture et mise en œuvre d'un système de peinture de protection des bétons et d'aspect	M²	1000

Conclusion Générale



L'objectif de ce travail de recherche consistait à étudier le diagnostic de l'effet de la corrosion des armatures sur la durabilité des ouvrages en béton armé, en consultant des ouvrages de bâtiment et en génie civil, nous avons remarqué que avec le temps une bonne partie de ces ouvrages sont endommagés principalement par la corrosion des armatures.

A cet effet nous avons effectué une étude centrée sur la corrosion de l'acier due à la carbonatation par le dioxyde de carbone (CO2) de l'atmosphère et la présence d'ions chlore (Cl-) dans le béton, les techniques électrochimiques et les méthodes destructives et non destructives utilisées pour détecter et suivre l'évolution de l'état de corrosion des aciers dans le béton et qui sont discutées dans ce mémoire sont les suivantes : Mesures relatives aux corrosions d'armatures dans le béton (Mesure du potentiel de corrosion, Estimation de vitesse de corrosion) , Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement (Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers, Mesure de la profondeur de carbonatation, mesure de la résistivité du béton pour estimer le risque de corrosion), Inspection visuelle (marteau et carottage).

L'étude a montré que la corrosion de l'acier est la cause majeure de dégradation des ouvrages en béton armé et précontraint, surtout lorsque ces ouvrages sont exposés à un milieu marin ou aux sels de déverglaçage.

Elle a prouvé aussi que les méthodes de réparation et de maintenance telles que la réparation traditionnelle, revêtements d'imprégnations, inhibiteurs de corrosion, béton projeté et plus particulièrement les techniques électrochimiques représentent des moyens efficaces pour protéger l'acier des structures .Il est connu que la protection cathodique améliore la stabilité thermodynamique de l'acier dans le béton, même en présence des ions chlore.

De plus des mesures préventives sont proposées ici et qui a pour but d'empêcher ou retarder la corrosion des armatures telles qu'armatures résistantes à la corrosion (en acier inoxydable / acier microcomposite), Revêtement des armatures, la prévention cathodique. A la fin nous avons terminé notre travail par un exemple d'expertise qui présente une démarche à suivre pour réhabiliter efficacement un ouvrage dont les armatures sont corrodées.

Et après cette travaille nous souhaitons aux suivants étudier faire un autre travaille sur même domaine la pathologie pour enrichie le domaine de construction en Algérie, et surtout faire sur autres structure pour faire un composions autre eux

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[1] CHANVILLARD G., «Le matériau béton: Connaissances générales», Les cours de l'ENTPE, édition ALEAS, Octobre, 1999.

[2] Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, Documents techniques et scientifiques AFGC/Ce fracor 2003

[3] COCHARD (C.) et TACHÉ (G.), « La dégradation du béton armé liée à la corrosion des armatures le long du littoral breton ». Matériaux et Construction, no 10-11 (1993).

[4] GUERRIN (A.) et LAVAUR (R.C.). « Traité de béton armé. Tome I : Généralités. Propriétés générales ». Mécanique expérimentale du béton armé. 356 p., 16 éd., 1973, Dunod.

[5] TACHE G. & VIE D., «Diagnostic des ouvrages en béton armé, facteurs de vieillissement des ouvrages», Centre expérimental du bâtiment et des travaux publics. CEBTP, annales du bâtiment et des travaux publics, Février, 1998.

[6] G. Daufin, J. Talbot. Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. PRE-MIERE PARTIE. GENERALITES SUR LA CORROSION DES METAUX ET ALLIAGES. Le Lait, INRA Editions, 1971, 51 (507), pp.375-398. <hal-00928553>

[7] E. Bardal; corrosion and protection; Springer (2004) 5.

[8] M.Pourbais; Atlas d'équilibre électrochimique à 25 0c; Gauthiers-Villars; Paris. (1963). 312-313.

[9]MAMILLAN (M.), « Restauration des bâtiments en béton armé C 2350 ». Traité Construction (1994).

[10] [Garboczi, 1998] GARBOCZI, BENTZ, 1998- Multiscale analytical/ numerical theory of the diffusivity of concrete pp. 77-88

[11][Powers, 1947] POWERS T.C., BROWNYARD T.L.; « Studies of the physical properties of hardened cement paste. American Concrete Institut Journal; 1947; vol.43; Parties 1 à 9.

[12][Tuutti, 1982] TUUTTI K.; « Corrosion of Steel in Concrete"; Swedish Cement and Concrete Research Institute; S-100 44; Stockholm (1982).

[13]WIERIG X., Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure, Rilem Seminar on the durability of concrete structures under normal outdoor exposure, Hanovre, 1984

[14]NBN EN 14630:2007 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton, Méthodes d'essais – Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode, phénolphtaléine, Bruxelles : NBN, 2007

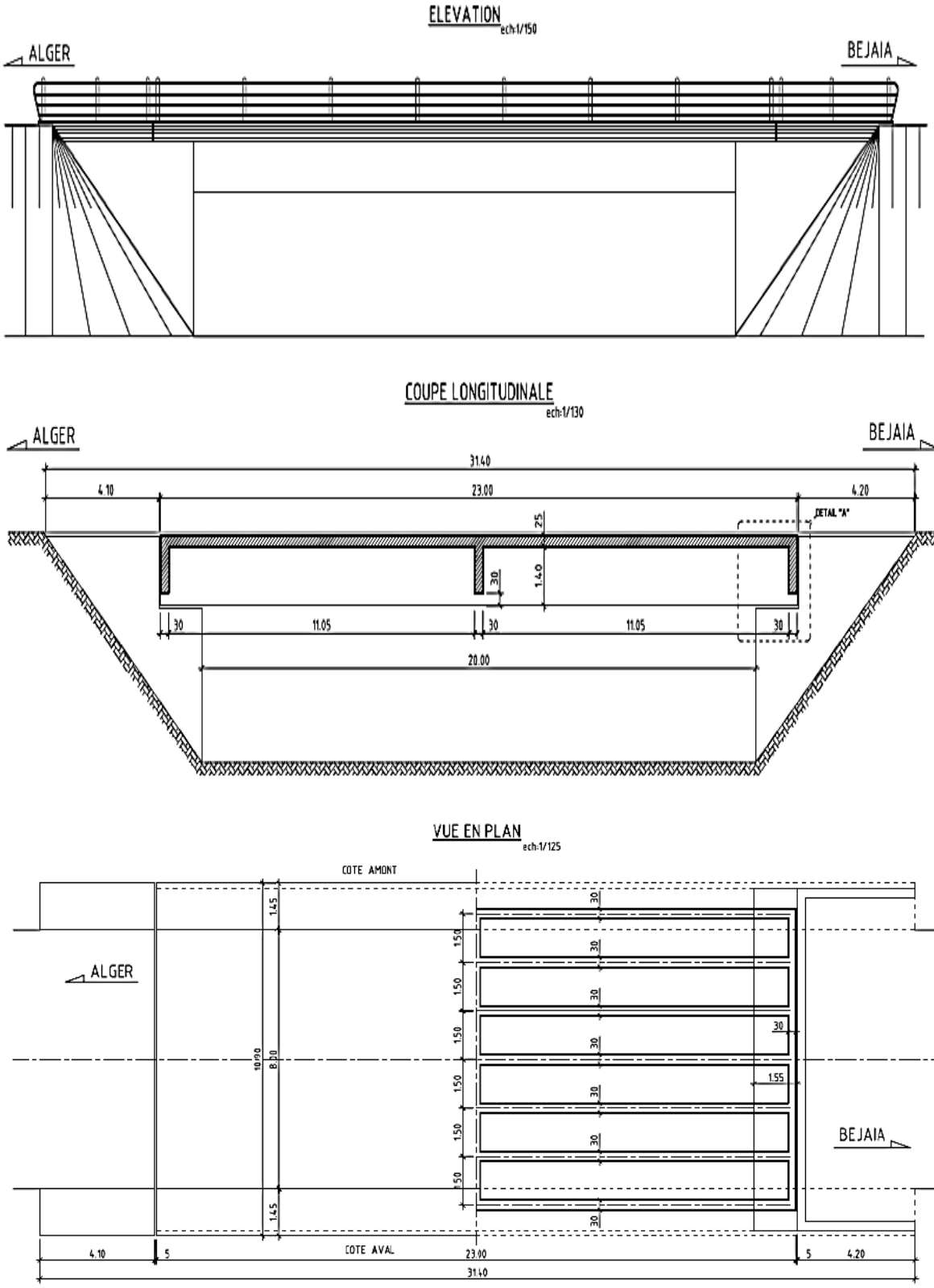
[15]: La protection cathodique ; guide pratique par : commission exploitation, chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel ; TECHNIP (1986).

[16]: G. Trabanelli, V. Carassiti; Corrosion Science and Technology: Plenum Press, New York (1970).
[17]: S. Bradford; Corrosion and Protection; Van Nostrand Reinhold, New York (1992).
[18]: C. Fiaud, C. Lemaitre et N. Pébère ; Corrosion et anticorrosion : Lavoisier, Paris (2002).
[19]: Y.Houst ; carbonatation du béton et corrosion des armatures; chronique des matériaux de construction.15, (1984). 569-574.
[20]: L. Dhouibi, E. Triki, M. Salta et P. Rodrigues; Studies on corrosion inhibition of Steel reinforcement by phosphate and nitrite; Materials' and Structures / Materiaux et Constructions, (2003). 530-540.
[21]Mémoire Online - Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures - NDZANA AKONGO GrÃ©goire & TCHOUMI Samuel
[22]FicheD1-1-Guide_Auscultation_ MÉTHODES D'AUSCULTATION DU MATÉRIAU EN PLACE BÉTON ARMÉ (DURABILITÉ) Ouvrage Art-Les collections de l'Ifsttar Octobre 2015
[23]FicheA1-1-Guide_Auscultation_ MÉTHODES D'AUSCULTATION SUR PRÉLÈVEMENTS BÉTON Ouvrage Art Les collections de l'Ifsttar Octobre 2015
[24] guide technique du STRRES FABEM7 Réparation et renforcement de structures par des armatures passives additionnelles
[25] guide technique du STRRES FABEM1 Reprise des bétons dégradés
[26] guide technique du STRRES FABEM5 Béton projeté
[27] Guide technique LCPC Décembre 2002 Protection des bétons par application de produits à la surface du parement :
* Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton (1977, révisé 1996) (réparation de surface, collage d'éléments, traitement des fissures, calage et scellement)
[28] Guide technique LCPC Décembre 2002 Protection des bétons par application de produits à la surface du parement : (inhibiteurs de corrosion, produits d'imprégnation, lasures, peintures, revêtements)
[29]][Lacombe, 1990] LACOMBE P., BAROUX B., BERANGER G. : Les aciers inoxydables ; 2èmeédition ; Les Ulis : Les éditions de physique ; 1990.
[30]Pedeferri, P. (1965). Cathodic protection and cathodic prevention, Construction and Building Materials, 10,391–402.
[31]Guide technique du STRRES FABEM4 Protection des bétons
Bureau AFR (Conseilles Bureau d'étude spécialisé) Chiraga coopérative El Kods Alger

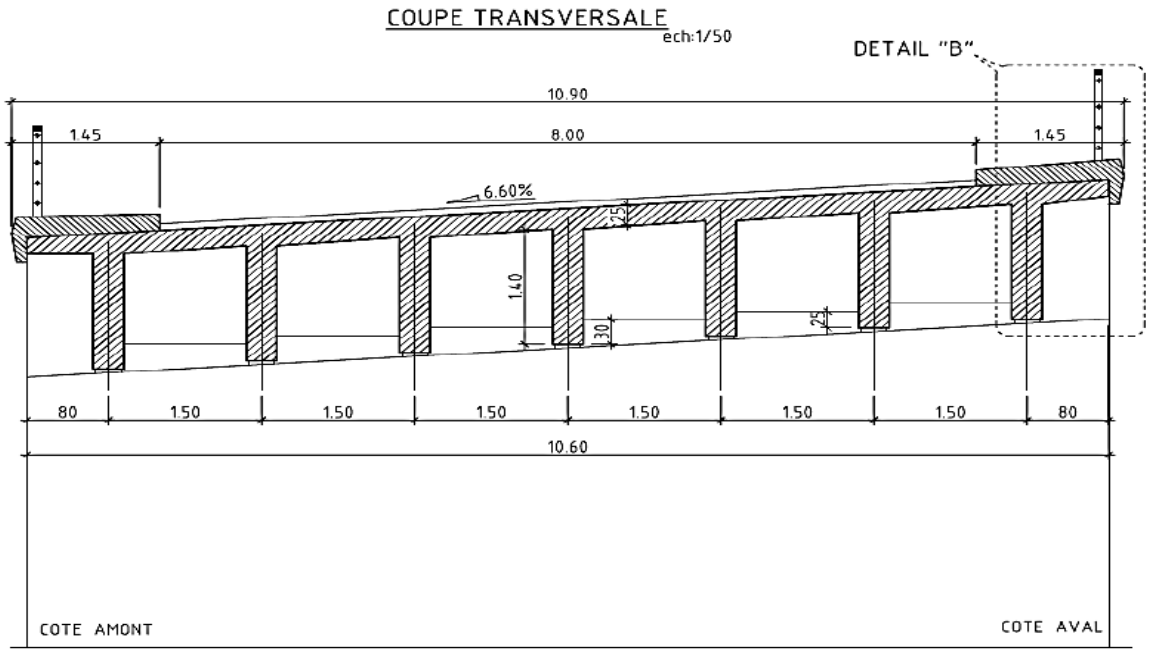
Annexes

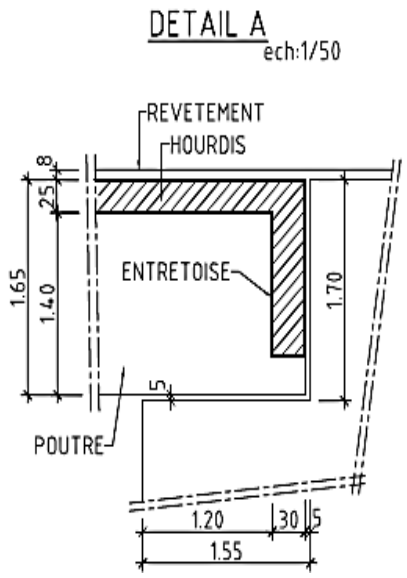
ANNEXE N° 1

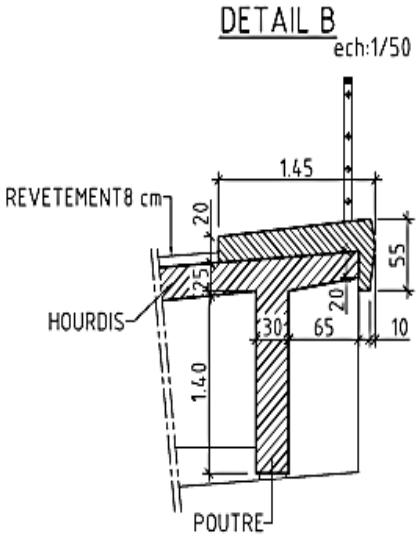
Schémas De L'ouvrage



Annexes


COUPE TRANSVERSALE
ech:1/50
DETAIL "B"
10.90
1.45
8.00
1.45
6.60%
25
140
30
25
80
1.50
1.50
1.50
1.50
1.50
1.50
80
10.60
COTE AMONT
COTE AVAL

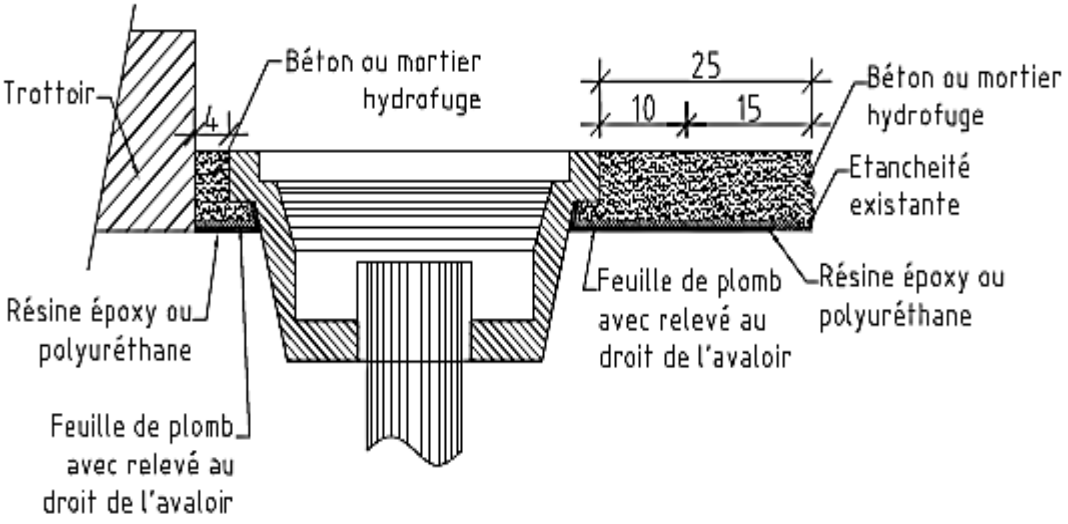

DETAIL A
ech:1/50
REVETEMENT
HOURDIS
8
25
1.65
1.40
ENTRETOISE
1.70
5
POUTRE
1.20
30
5
1.55


DETAIL B
ech:1/50
1.45
REVETEMENT8 cm
20
55
25
HOURDIS
20
30
65
10
140
POUTRE

ANNEXE N° 2

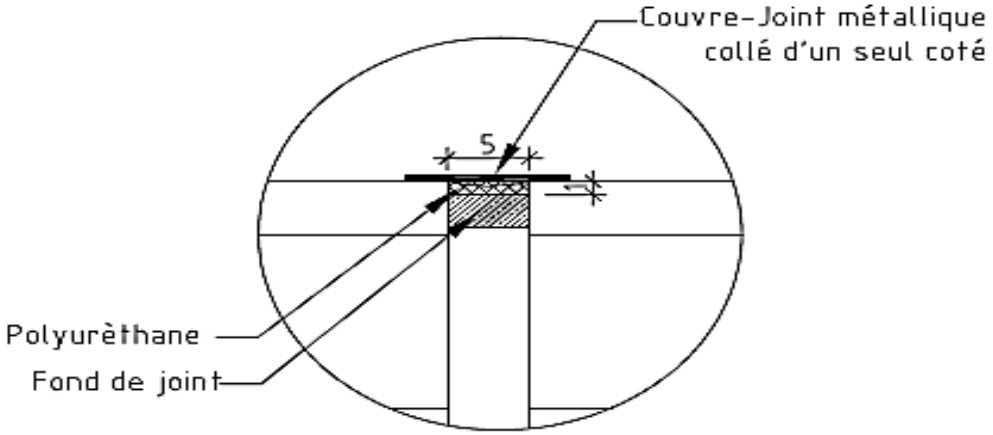
Détails De Réparation

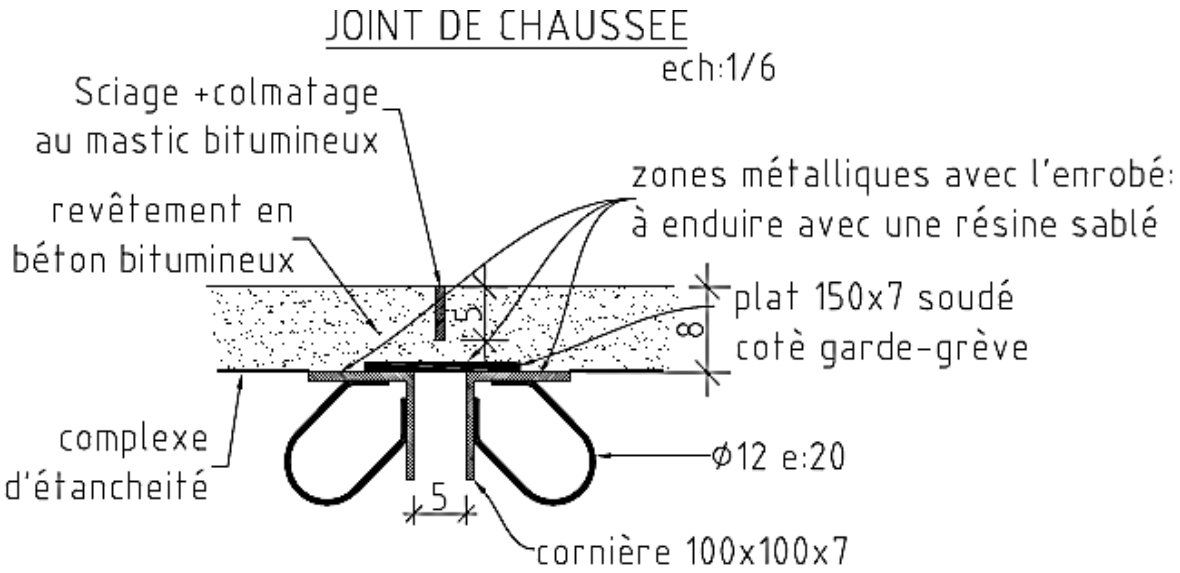
DETAIL AVALOIR

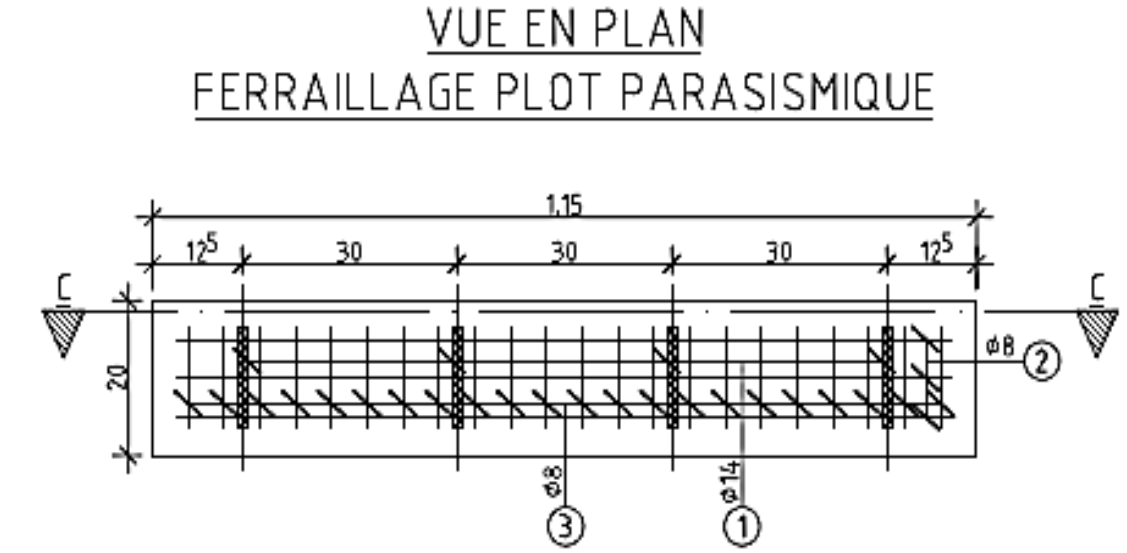


DETAIL JOINT DE TROTTOIR

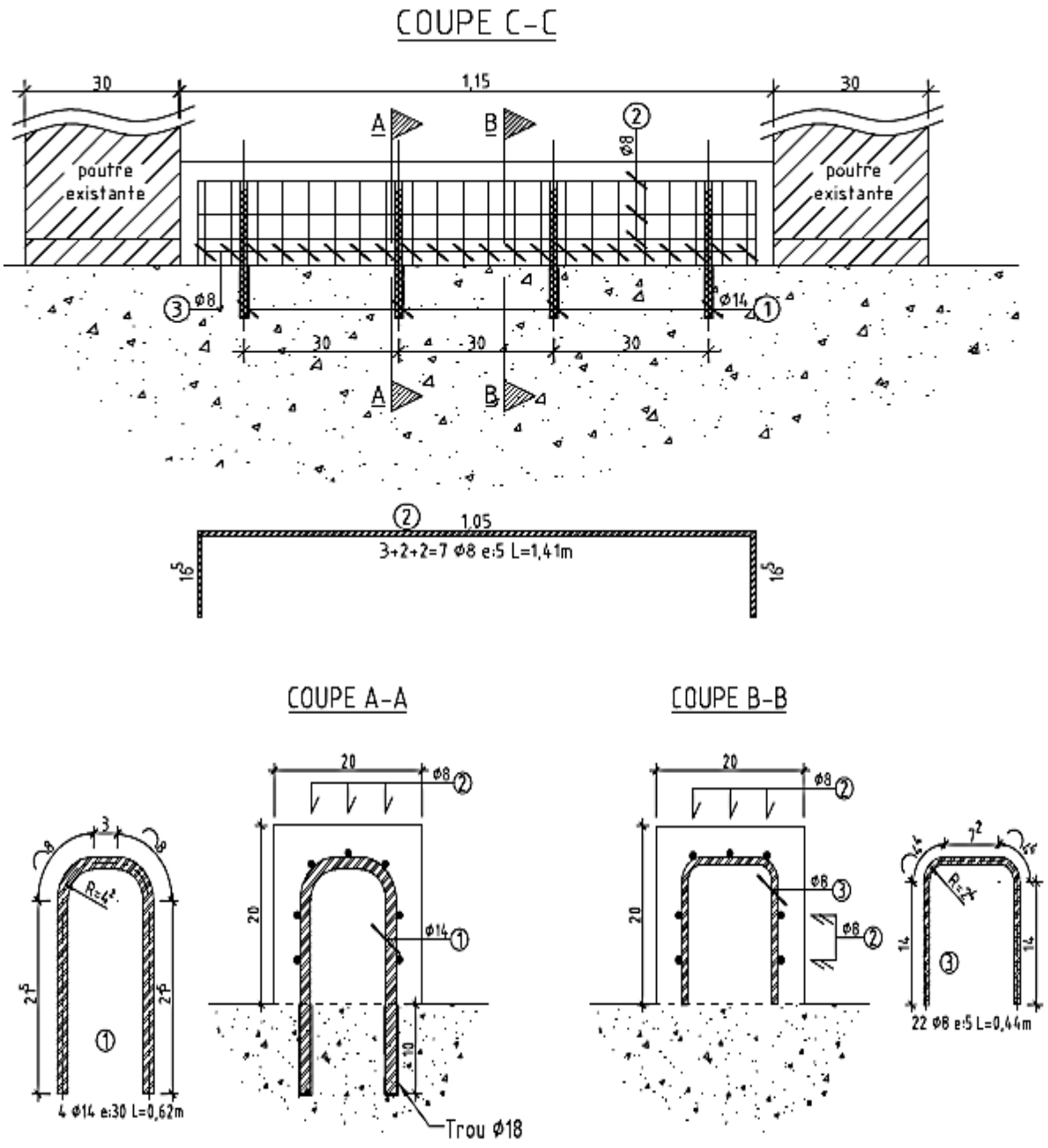
ech:1/5




JOINT DE CHAUSSEE
ech:1/6
Sciage +colmatage
au mastic bitumineux
revêtement en
béton bitumineux
zones métalliques avec l'enrobé:
à enduire avec une résine sablé
plat 150x7 soudé
cotè garde-grève
complexe
d'étancheité
ϕ12 e:20
cornière 100x100x7
5
8

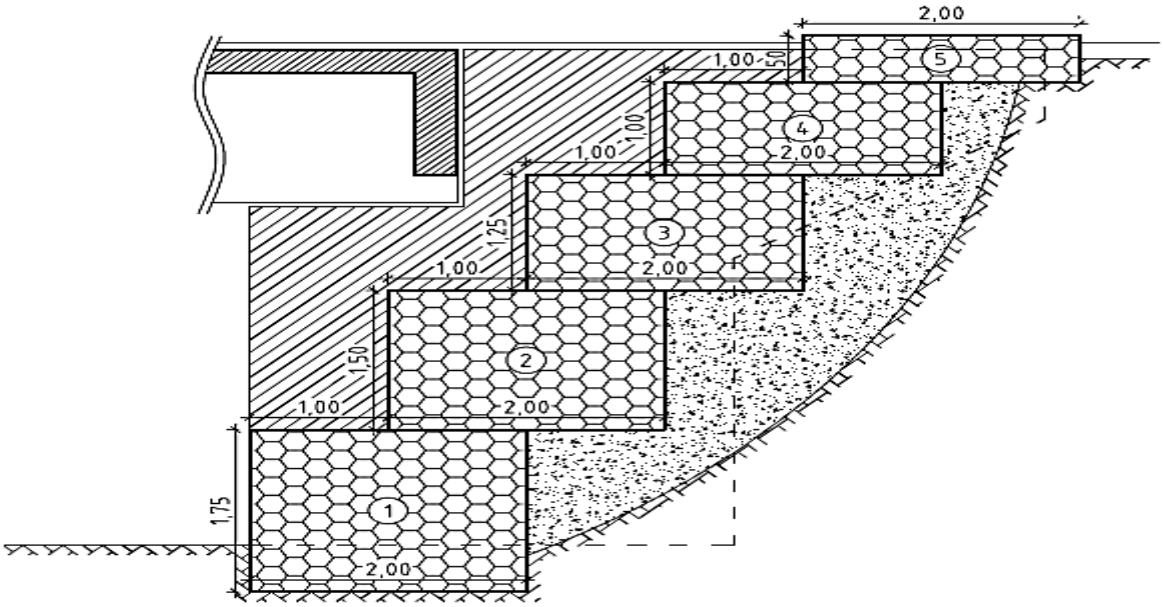

VUE EN PLAN
FERRAILLAGE PLOT PARASISMIQUE
1.15
12.5
30
30
30
12.5
20
ϕ8
ϕ8
ϕ14
2
3
1

Annexes


COUPE C-C
30
1,15
30
poutre existante
poutre existante
A
B
②
Ø8
③ Ø8
Ø14 ①
30
30
30
A
B
② 1,05
3+2+2=7 Ø8 e:5 L=1,41m
15
15
COUPE A-A
COUPE B-B
20
Ø8 ②
20
Ø14 ①
Ø8 ③
Ø6 ②
Trou Ø18
4 Ø14 e:30 L=0,62m
22 Ø8 e:5 L=0,44m

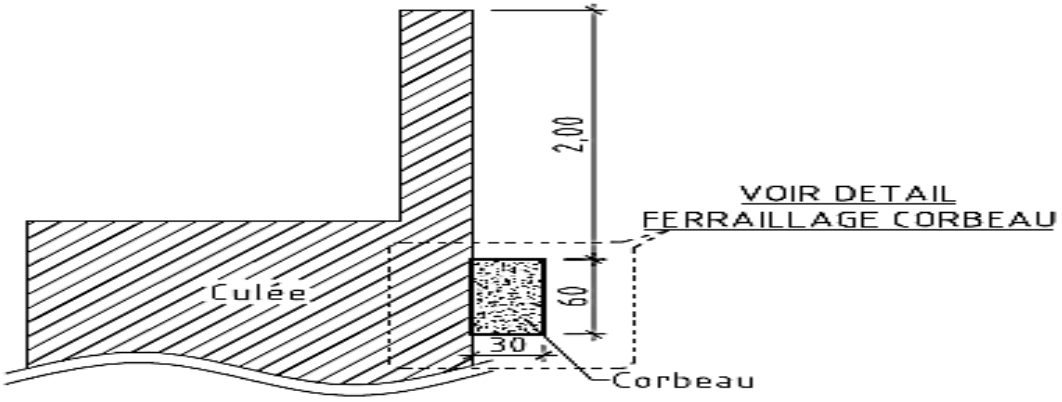
COUPE LONGITUDINALE GRADIN

ech:1/50



IMPLANTATION CORBEAU

ech:1/40



FERRAILLAGE CORBEAU

ech:1/15

