REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : structures

Thème

Renforcement des structures en béton armé dégradés par augmentation des charges et facteurs environnementaux

---

Présenté par

YOUCEFI BOUBAKER
ALI NASRET

Proposé et Dirigé par
Dr: ZEMIR Ismail

Promotion Juin 2021



DÉDICACES

Alhamd lilah

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 sœurs et frères

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

A mes Amis :

A toute la promotion de génie civil 2021.

A tous mes professeurs qui m'ont accompagné tout au long de mes études.

BOUBAKER





DÉDICACES

Alhamd lilah

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 sœurs et frères

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

A mes Amis :

A toute la promotion de génie civil 2021.

A tous mes professeurs qui m'ont accompagné

tout au long de mes études.

ALI






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*** *pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée.*

Nos sincères remerciements vont à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de ***Médéa et El oued*** *, et à tous les enseignants qui ont participé à Notre formation.*

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.

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

ملخص

نتيجة لتغيير الاستخدام ، يزيد تركيب التجهيزات من الأحمال الدائمة ، ومرور أحمال تشغيل أكثر شدة ... قد يرى الهيكل الحالي أن قدرته على التحمل تصبح غير كافية. يمكن أن تتفاقم هذه الظاهرة بسبب الخلل الهيكلي الناتج عن عيوب مختلفة يمكن أن تؤثر على الخرسانة أو التسليح. غالبًا ما يتعلق الخلل في قدرة التحمل بكل من التعزيزات الخرسانية المسلحة و قطع الخرسانة. في مثل هذه الحالة ، إذا لم يتم اعتماد حل الهدم وإعادة الإعمار بعد الدراسة ، فيمكن النظر في زيادة كل من قطع التسليح و قطع الخرسانة. في حالة تداخل العيوب التي تؤثر على المواد ، يجب استبدال الأجزاء الخرسانية التالفة كجزء من التعزيز.

الكلمات المفتاحية : الهياكل الخرسانية المسلحة ، الخلل ، العيوب ، التعزيز

RESUME

Par suite d'un changement d'affectation, de la mise en place d'équipements augmentant les charges permanentes, de passage de charges d'exploitation plus agressives… une structure existante peut voir sa capacité portante devenir insuffisante. Ce phénomène peut être aggravé par des désordres structuraux dus aux diverses pathologies qui peuvent affecter le béton ou les armatures. Le défaut de capacité portante concerne, très souvent, à la fois les armatures de béton armé et la section de béton. Dans un tel cas, si la solution de démolition-reconstruction après étude n'a pas à être retenue, il peut être envisagé d'augmenter à la fois la section des armatures et celle du béton. Si se superposent des pathologies affectant les matériaux, les armatures touchées et les parties de béton endommagées sont à remplacer dans le cadre du renforcement.

Mots clés : Structures en béton armé, Désordres, Pathologies, Renforcement

ABSTRACT

As a result of a change of use, the installation of equipment increasing the permanent loads, the passage of more aggressive operating loads ... an existing structure may see its bearing capacity become insufficient. This phenomenon can be aggravated by structural disorders due to various pathologies which can affect the concrete or the reinforcements. The defect in bearing capacity very often concerns both the reinforced concrete reinforcements and the concrete section. In such a case, if the demolition-reconstruction solution after study is not to be adopted, it may be considered to increase both the section of the reinforcement and that of the concrete. If pathologies affecting the materials overlap, the affected reinforcements and damaged concrete parts must be replaced as part of the reinforcement.

Keywords: Reinforced concrete structures, Disorders, Pathologies, Reinforcement

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Résume

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste de notations

Introduction générale…….…….1

CHAPITREI : Diagnostic des ouvrages en béton armé

I.1 Introduction: …….3

I.2 Diagnostic des dégradations ouvrage en béton arme…… 3

I.2.1 Définition ……..3

I.2.1.1 Diagnostic d'un ouvrage ……4

I.2.1.2 Réalisation d'un diagnostic ……4

I.2.1.3 Rapport d'un diagnostic ……4

I.2.1.4 Les principales étapes d'un diagnostic……5

I.2.1.5 Diagnostic visuel ……7

I.2.1.6 Diagnostic par prélèvement……9

I.2.2 Types investigations ……12

I.2.2.1 Investigations non-destructives……12

I.2.2.2 Investigations destructives……...17

I.3 La norme européenne EN 1504 définit les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton : ……..19

I.3.1 Les normes des essais de durabilité des structures: ……20

I.3.2 Les normes de produit de réparation des structures: ……...21

I.3.2.1 La réparation par mortiers……... 24

I.3.2.2 Les mortiers de réparation: …….…….25

I.4 Matériaux de réparation…….…..27

I.4.1 Mortiers de ciments additionnés de résine en émulsion.……27

I.4.2 Mortiers à base de liants époxydique ……..27

I.4.3 Bétons Conventionnels……27

I.5 Conclusion……..28

CHAPITRE II : Pathologies du béton armé : Causes et Conséquences

II.1 Introduction:…….. 29

II.2.Facteurs et causes des dégradations ……..29

II.2.1. Les causes climatiques de dégradation ……29

II.2.2. Les causes physiques de dégradation……30

II.2.3 les causes charges de dégradations…….31

II.2 .4 Les autres pathologies de dégradation des bétons……32

II.2.4.1 Actions environnementales ou facteurs liés à l'environnement du béton…… 32

II.2.4.2. Mauvais positionnement des armatures……...32

II.2.4.3. Mauvaise qualité des bétons employés……32

II.2.4.4 . Vibration trop importante……32

II.2.4.5. Absence de cure du béton……32

II.2.4.6. Cycle humidité / sécheresse…….33

II.3 Description des pathologies du béton armé……33

II.3.1 La carbonatation…….33

II.3.1.1 Les conséquences de la carbonatation……...36

II.3.1.2 La mesure de la carbonatation...……37

II.3.3 Corrosion armatures……...38

II.4 La corrosion de l'acier dans le béton……..39

II.4.1 Les types de corrosion: …… 39

II.4.1.1 La corrosion uniforme……..39

II.4.1.2 La corrosion galvanique ou corrosion bimétallique…….39

II.4.1.3 La corrosion caverneuse ……..40

II.4.1.4 La corrosion par piqûres……...40

II.4.1.5 La corrosion sous contrainte……40

II.4.1.6 processus de corrosion…….40

II.4.1.7 corrosion d'acier ……..41

II.4.1.8 Application de diagramme potentiel-PH ……..42

II.4.2 Principales causes de corrosion……..43

II.4.3 Rôle du béton……..43

II.4.4 Etat de l'acier dans le béton……44

II.4.5 Dépassivation des armatures ……..45

II.4.5.1 Dépassivation par carbonatation du béton……46
II.4.5.2 Dépassivation par l'attaque des chlorures……48
II.4.6 Amorçage et propagation de la corrosion……..49
II.4.6.1 Corrosion généralisée……51
II.4.6.2 Corrosion localisée par piqûres……52
II.5 Conclusion ……53

CHAPITRE III: Réparation et renforcement des ouvrages en béton armé

III.1 Introduction.....54
III.2 Méthode de réparation :.....54
III.2.1 Réparation des ouvrages en béton armé :.....54
III.2.2.1 Réparation des surfaces :.....55
III.2.2 Le renforcement.....57
III.2.2.1 Le ragréage :.....58
III.2.2.2 Le béton projeté :.....63
III.2.2.3 Principes de réparations :.....66
III.2.2.3.1 Procédure opératoire :.....66
III.3 Préparation d'une opération de réparation ou renforcement.....67
III.3.1 Étude de l'état de la construction à réparer ou à renforcer.....67
III.3.1.1 Réparer ou renforcer Murs en béton armé.....67
III.4 Matériaux.....69
III.4.1 Le béton.....69
III.4.1.1 composition :.....69
III.4.2 L'acier :.....70
III.4.2.1 Les composants essentiels de l'acier :.....70
III.4.2.2 Les formes d'acier et de leur surface :.....71
III.4.3 Adjuvants :.....71
III.4.4 Résines:.....72
III.4.5 Martiens et coulis de résine :.....72
III.5 Causses des désordres:.....73
III.5.1 Poteaux :.....73
III.5.2 Les poutres :.....74
III.5.3 Portiques en béton armé avec remplissages en maçonnerie :.....75
III.5.4 Voiles en béton armé :.....75

III.5.4.1 Voiles pleins :.....76
III.5.5 Planchers :.....76
III.6 Techniques de renforcement:.....77
III.6.1 Techniques de renforcement de la structure :.....77
III.6.1.1 Renforcement par Ajout de murs de contreventement Voiles béton :.....77
III.6.1.2 Renforcement par des murs de remplissage :.....78
III.6.1.3 Renforcement par des murs en ailes :.....79
III.6.1.4 Renforcement par des palées triangulées :.....79
III.6.2 Techniques de renforcement des éléments :.....79
III.6.2.1 Renforcement des poteaux :.....79
III.6.2.2 Renforcement des poutres :.....82
III.6.2.3 Renforcement des planchers :.....84
III.6.2.4 Renforcement des murs en maçonnerie :.....85
III.6.2.5 Renforcement des fondations :.....85
III.6.2.5.1 Renforcement par l'introduction de nouvelles fondations.....86
III.6.3 Caractéristiques des produits de renforcement :.....87
III.6.4 Principales techniques de renforcement.....88
III.7 Conclusion :.....98

Conclusion générale.....99
Références bibliographiques

LISTE DESTABLEAUX

Tableau I.1: Résultats d'essais d'auscultation sonique des bétons-(CEBTP) …….....15

Tableau I.2: Modes opératoires d'essais performantes. [11] ……...…….....20

Tableau I.3: Méthodes d'essais relatives aux caractéristiques de durabilité, dans le projet de norme belge NBN B15 [11] ……...…….....21

Tableau I.4: Les principales normes relatives aux produits de réparation [12]……..22

Tableau I.5 : Parties de la norme EN 1504 [13]…….....……...…….23

Tableau I.6 : Principes et méthodes relatifs à la corrosion des armatures …….....24

Tableau I.7 : Classification des mortiers par Emersons et Morgan **[13]**…….....26

Tableau I.8: Produits d'injection-avantages et inconvénients. [13]….……...……..…26

LISTEDESFIGURES

Fig. I.1 : Prélèvement d'acier ……..10

Fig I.2 : Prélèvement sur le chantier ……11

Fig I.3 :Quartage……...11

Fig. I.4: jauge Ginger cebtp - Fissuromètre digital [3]…….13

Fig. I.5: Test Choc-Echo avec appareil Olson's NDE 360 [3]……..14

Fig. I.6: Scléromètre à béton W-M-250 de James [3]……..16

Fig. I.7: détection par fenêtres et résultats [3]……..17

Fig I.8: Graphique enrobage-carbonatation.[3]……19

Fig.II.1: Rupture en diagonale……..31

Fig .II.2: Fissure critique diagonale…….32

Fig.II.3:Exempled'échantillon carbonaté(7x7x28cm) [12…… .34

Fig.II.4:Éclatement du béton dû à la carbonatation…….34

Fig.II.5: Corrosion par carbonatation un départ de poteau……35

Fig.II.6: En se corrodant des armatures……35

Fig.II.7: Corrosion importante en sous faced'une poutre pont Port de Mostaganem…….35

Fig.II.8: Oxydation générale du chevêtre Pont Passiti (Oran)…….35

Fig.II.9 : Schéma de principe de la formation de la carbonatation. [12]…….36

Fig.II.10:Laprogressiondelacarbonatation [12]……37

Fig.II.11: Mise en évidence de la carbonatation de la matrice cimentaire des échantillons de béton des poutres de la structure porteuse[12]……..37

Fig.II.12: Fissures à mi travée……..39

Fig.II.13: Fissure due à la corrosion des armatures. ……39

Fig.II.14:les typesdecorrosion……40

Fig.II.15 : Diagramme de stabilité du fer dans l'eau [15]……43

Fig.II.16: l'état passive d'acier……46

Fig.II.17: dépassivation d'acier……46

Fig.II.18 : Période d'initiation et de propagation de la corrosion dans les structures de béton armé (Modèle de Tuutti - tiré de Bertolini et col, 2004……49

Fig.II.19 : Schéma de principe de la formation de la carbonatation. (selon LRPC Bordeaux) [18]……51

Fig.II.20 : Représentation de la corrosion par piqûres de l'acier dans le béton (tiré de Bertolini et coll, 2004)…….52

Fig.III.1:DégagementdesarmaturesselonlanormeNFP95.101……..55

Fig.III.2:remplacementdesarmateurs……57

Fig.III.3:assemblaged'armaturesparmanchonnage……..57

Fig.III.4:renforcementavecajoutd'armaturesdepoutre…….58

Fig.III.5: Renforcementavec ajoutd'armaturesde précontraint…….58

Fig.III.6:Enlèvementdu béton polluéet dela rouille……...59

Fig.III.7:Enlèvementtouterouille…….59

Fig.III.8: Enlèvementdubétondégradé……..59

Fig. III. 9:lesétapes depréparationde surface…….60

Fig. III.10 :Enlèvementdubétondégradéetdétouragedes armatures……60

Fig. III .11:Miseenplaced'unpassivantsinécessaire …….61

Fig.III.12 :ragréage ma nullede mortier……..62

Fig.III.13 :coulagede béton…….63

Fig.III.14:projectionpar voie sèche……..64

Fig.III.15:projectionparvoiemouillée……...64

Fig.III.16:lancedemachine debéton projeté…….65

Fig. III.17 : béton projeté sur chanti…….66

Fig.III.18:réparationparprojectiondebéton……...66

Fig. III.19 : dégradation due aux charges appliquées……..67

Fig.III.20: dégradation facteursenvironnementaux…… 67

Fig.III.21 : Rupture au droit de la surface de reprise de bétonnages, insuffisance d'armatures transversales, béton de mauvaise qualité……..74

Fig.III.22 : Destruction de l'extrémité du poteau du fait de l'absence d'armatures transversales…….74

Fig.III.23 : Fissures à mi travée……..75

Fig.III.24 : Fissure due à la corrosion des armatures……..75

Fig.III.25 : Écrasement de l'angle comprimé……..75

Fig.III.26 : Fissurations en X aux niveaux de la maçonnerie……..75

Fig.III.27 : Fissure critiquediagonale...……...77

Fig.III.28 : Fissure très importante au niveau du plancher……..77

Fig.III.29: Ajout d'un mur de contreventement ……..78

Fig.III.30:Miseenplacedutreillis……...79

Fig.III.31: le scellement……...79

Fig.III.32 : Renforcement de poteaux au moyen de profiles métallique……..80

Fig.III.33 :gainage des cotes au moyen d'un manchon de colonne ……81

Fig.III.34 : méthode Préparation des surfaces……..81

Fig.III.35 :Renforcement des poteaux en acier……81

Fig.III.36 :Renforcement des poutres en acier…….82

Fig.III.37 :La précontrainte extérieure d'ancrage des câbles……...83

Fig.III.38 :Restitution de la capacité portante vis à vis des charges verticales……83

Fig.III.39 :Procédé au remplacement des aciers rompus et du béton ;utiliser l'injection des résines ……...84

Fig.III.40 : Renforcement deplancher de profiles métallique…….85

Fig.III.41 :Renforcement de plancher par béton arme…….85

Fig.III.42 : Renforcement de fondations existantes……86

Fig.III.43: renforcé par des murs en béton armé……..87

Fig. III.44: Renforcement par l'introduction de nouvelles fondations…….87

Fig.III.45: Renforcement au moyen de béton projeté……...89

Fig. III.46 : Différente étape de renforcement des poteaux ou moyend'une enveloppe en béton arme (chemisage). [30]……91

Fig. III 47: Organigramme du processus de chemisage en béton arme [30] ……..92

Fig. III 48 : Différents étapes de renforcement d'un poteau par gainage métallique [30]…...94

Fig. III.49: un trace rectiligne d'une précontrainte……..96

Fig. III.50 : trace polygonale d'une précontrainte……96

Fig.III.51 : confinements d'un poteau au moyen de PRFC……..97

Fig.III.52 : Renforcement de poteau : dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion et dans le sens Radial (confinement) vis-à-vis la compression. [31]……97

LISTE DES NOTATIONS

CO_2 : Dioxyde de carbone

PH : Potentiel hydrogène

Fe : ferreux

H : L'hydroxyde

O_2 : l'oxygène

Ca : Calcium

Fe (OH) 2 : L'hydroxydeferreux

$x(t)$: la profondeur de carbonatation

t : temps

D:coefficient de diffusion (diffusivité de la carbonatation)

K : coefficient lié au matériau

$c\ (x,t)$: concentration des ions chlore à la profondeur **x** et au temps **t**.

c_0: concentration initiale en ions chlorure.

c_s: concentration à la surface en ions chlorure.

D_{app} : coefficient de diffusion apparent des ions chlorure

Cl^- : chlorures

BRE Building Research Establishment

CP : ciment prompt

DPU : la durée pratique d'utilisation

LHM : liants hydrauliques modifiés

BP : béton projeté

Mn : le manganèse

Cr : Le chrome

Ni : Le nickel

Mo : molybdène

D : Diamètre

PRFC : Polymères renforcés en fibres de carbone

Introduction générale

Introduction générale

Le béton armé est un matériau de construction populaire car il est très solide, facile à travailler, adaptable, polyvalent, durable et abordable, et est couramment utilisé pour la construction de bâtiments, dans la construction de la circulation routière, les structures préfabriquées, les structures flottantes, les tunnels hydroélectriques, canaux d'irrigation, drains et toutes autres structures imaginables.

La durabilité du béton est un fait reconnu prouvé par la durabilité des structures exposées aux conditions climatiques et environnementales les plus diverses. Le métier habituel résiste au fil des années aux multiples agressions physiques et chimiques auxquelles ils sont exposés. Cependant, il arrive que des erreurs de conception ou de mise en œuvre ou des causes occasionnelles soient à l'origine de perturbations, de sorte que le concept de durabilité est indissociable du concept de qualité.

Dans le cas des constructions en béton armé, la durabilité de la structure dépend principalement de la résistance des armatures à la corrosion. La grande majorité des structures et des bâtiments sont en béton armé. L'une des principales causes de la pathologie du béton est l'érosion des armatures qui est en partie liée à des problèmes environnementaux, chimiques ou physiques. Cela représente plus de 80% de la détérioration. Nous comprenons l'importance d'étudier ce type de maladie et d'évaluer au plus tôt l'état des armatures avec une technique non destructive pour suivre son évolution et la traiter au plus vite.

Dans ces cas, il est nécessaire de procéder aux méthodes et techniques, de renforcement ou de réparation, après avoir examiné les analyses et la méthodologie de bons diagnostics techniques et pratiques.

Ces travaux de réhabilitation ou de rénovation des structures, ont essentiellement pour but de remédier à des désordres survenus au cours du temps et causés soit par des agressions physico-chimiques, soit par un phénomène de fatigue sous des chargements cycliques ou suite à des sollicitations accidentelles.

Le mécanisme le plus courant qui contribue au développement de la corrosion est la pénétration de chlorure et la carbonatation du béton cela provoque la corrosion qui dégrade l'interface acier / béton, réduisant ainsi l'adhérence entre les deux matériaux.

C'est phénomènes entraînent chaque année la perte d'importantes sommes d'argent sur la réparation des structures et les techniques de renforcement structurel qui ont été

endommagées par ce phénomène, sans parler des conséquences que des travaux répétés de construction et de réparation peuvent avoir sur l'environnement et les coûts d'entretien, de recherche et d'études liés à la durabilité du béton .

Le fait de ne pas assumer la responsabilité de ce problème nous a incité à proposer ce thème sous le titre **«Renforcement des structures en béton armé dégradées en raison de l'augmentation des charges et des facteurs environnementaux».** Dans le même contexte, nous visons à atteindre les objectifs suivants: - Expliquer les mécanismes d'érosion des armatures de béton. Présentation des techniques d'investigation pour détecter la corrosion des armatures et évaluer son étendue: - Présenter et expliquer les méthodes de réparation des structures corrodées. Proposer une approche pour réhabiliter efficacement les structures érodées

Donner des mesures préventives pour prévenir ou retarder le plus longtemps possible l'érosion des armatures, et comme le disent ingénieurs et grand public: «prévention, puis prévention» et le dicton dit «mieux vaut prévenir que mille remèdes»: la durabilité contre la corrosion s'avère nécessaire.

Pour cela, nos travaux de recherche menés lors de la préparation de cette thèse ont été présentés en trois chapitres principaux:

- Premier chapitre : Consiste le Diagnostic des ouvrages en béton armé
- Deuxième chapitre : Consiste la Pathologies du béton armé : Causes et Conséquences
- Troisième chapitre : Consiste la Réparation et renforcement des ouvrages en béton armé

CHAPITRE I

Diagnostic des dégradations des ouvrages en béton armé

I.1 Introduction:

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 centaine 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.

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.

I.2 Diagnostic des dégradations des ouvrages en béton armé

I.2.1 Définition: Le diagnostic d'un ouvrage de génie civil consisté à :

- déterminer le niveau de sécurité de l'ouvrage, relevé ses point de faiblesse, ses défaut et ses dysfonctionnements.
- Définir judicieusement les travaux qui permettent de remédier aux insuffisances constatées.

I.2.1.1 Diagnostic d'un ouvrage

Le diagnostic d'un ouvrage permet avant tout de déterminer l'état de santé, les éventuelles pathologies présentes ainsi que leur ampleur. Cependant le diagnostic peut avoir deux finalités. Soit il est mené afin de déterminer exactement quels sont les désordres présents en vue de leur traitement, soit il est effectué afin de connaitre l'évolution des désordres dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme [1].

I.2.1.2 Réalisation d'un diagnostic

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de se prononcer son état de santé et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi que leur ampleur. Généralement lorsque l'on effectue un diagnostic, c'est quand un client découvert quelque chose qui n'allait pas dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de désordres [1].

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités. Dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces troubles, de voir s'il y à une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, auquel cas il est important de prévoir des réparations. L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat.

I.2.1.3 Rapport d'un diagnostic

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, mais doit être compréhensible par un non initié [1].

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,
- 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.

I.2.1.4 Les principales étapes d'un diagnostic

Le diagnostic d'une structure se compose de différentes étapes clés décrites ci-dessous.

I.2.1.4.1 Une visite préliminaire

Elle 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.

Suite à cette visite, l'ingénieur chargé d'affaire peut déjà se faire une idée de l'origine des dégradations observées et peut ainsi proposer un programme d'investigations à réaliser, son coût ainsi que sa durée. La détermination des surfaces inspectées plus en détails et les techniques d'auscultation utilisées tiendront compte de l'accès, de l'environnement ainsi que des contraintes d'exploitation de la structure.

I.2.1.4.2 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'historique de la structure
- Les plans de coffrage et de ferraillage
- Les rapports d'éventuelles études antérieures
- L'orientation de la structure

I.2.1.4.3 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.

I.2.1.4.4 Inspection détaillée

Une 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 tels que :

- la présence d'anciens revêtements ou de produits d'imprégnation,
- l'apparence de la surface du béton, présence de stalactites, d'efflorescences, de traces de Rouille,
- la présence de fissures (avec leurs ouvertures et leurs orientations, réseau),
- les détériorations de la peau du béton (épaufrures, feuilletage, éclatements…),
- la détection des zones sonnant le creux,
- les zones où le béton et les armatures ont été désorganisés (cas d'un incendie…),
- la présence d'armatures (passives ou actives) apparentes, corrodées ou non,
- le relevé des déformations de la structure,
- la détection des traces d'humidité,

Généralement il faut aussi relever la géométrie de la structure, espacement des éléments porteur, épaisseur de dalle, géométrie d'un plancher hourdis par exemple. Dans de nombreux cas les Structures diagnostiquées sont anciennes, de ce fait on ne dispose plus des plans.

Suite à l'inspection visuelle on choisit des zones représentatives des désordres observés sur lesquelles on va effectuer des mesures. Celles-ci peuvent être de type non destructif par exemple la détection de l'enrobage des armatures par un procédé électromagnétique. Elles peuvent également consister en des prélèvements de carottes et d'échantillons en vu d'analyses en laboratoire.

Les investigations destructives seront limitées au maximum pour ne pas endommager la structure

I.2.1.4.5 Essais 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.

I.2.1.4.6 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.

I.2.1.4.7 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 biens 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 [2].

I.2.1.5 Diagnostic visuel

Le diagnostic visuel consiste à aller sur site et d'analyser chaque élément de la structure en détail. Ainsi, cela permet dans un premier temps de connaitre les caractéristiques géométriques de chaque élément et aussi les matériaux constitutifs. Cela permet d'évaluer le comportement global de l'ouvrage, de connaitre les éléments porteurs ainsi que l'acheminement des charges dans la structure. Dans un second temps, il est nécessaire de

répertorier les différentes pathologies différentes présentent sur la structure. Les principaux désordres rencontrés pour les structures en béton armé sont les suivants :

1. Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur
2. Les fractures, avec leur ouverture, décalage ou rejet
3. La présence de coulures de calcite
4. Les zones d'altération superficielles et profondes
5. Les zones humides
6. Les zones de mousses ou de végétation
7. Les zones de faïençage
8. Les éclats de béton en formation ou profonds
9. Les aciers apparents
10. Les zones de ségrégation

Il est nécessaire de répertorier tous ces éléments sur des plans, soit existant soit à créer, et de créer un dossier photographique des principaux désordres afin de pouvoir les visualiser au mieux. Dans tous les cas le diagnostic visuel doit permettre de :

- Qualifier les désordres, car chaque type à une origine et des conséquences particulières.

Déterminer les caractéristiques d'une pathologie permet de savoir quelle sorte de traitement quelle sera nécessaire afin de stopper le phénomène.

- Quantifier les désordres, car selon son ampleur, des méthodes de réparation plus ou moins lourdes seront à envisager.
- Localiser les désordres afin de pouvoir déterminer son origine et ainsi agir à la source du problème. S'il est seulement prévu de réparer l'élément sans s'attaquer à ce qui engendre la pathologie, la réparation risque de ne pas être pérenne et l'on verra rapidement apparaitre de nouvelles pathologies similaires [2].

Les outils indispensables pour mener à bien une inspection visuelle sont les suivants

- Un appareil photo
- Un mètre
- Un distance mètre
- Un pied à coulisse

- Un Fissuromètre (réglette en plastique transparente munie de traits de largeurs calibrées que l'on place successivement sur la fissure à observer pour estimer sa largeur)
- Le nécessaire pour prendre des notes

I.2.1.6 Diagnostic par prélèvement

I.2.1.6.1 Méthodes de prélèvements

Des prélèvements sont effectués, si nécessaire, dans des zones représentatives des états de dégradation, par carottage ou forage. Une procédure AFREM donne des indications sur ce point.

Le forage est utilisé, par exemple, pour estimer la pénétration des chlorures. Dans ce cas, il concerne des profondeurs successives, de l'ordre du centimètre.

I.2.1.6.2 Prélèvement sur site

Le prélèvement constitue une phase délicate du diagnostic du béton. Le nombre et le type d'échantillons sont choisis en fonction des données fournies par l'inspection du site et par le type d'analyse à effectuer en laboratoire.

Les échantillons ne sont pas strictement représentatifs des zones les plus saines, ni des zones les plus dégradé. Les échantillons sont choisis, par un inspecteur expérimenté, pour la représentativité des phénomènes de dégradation.

I.2.1.6.3 Prélèvement d'acier

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcule d'une structure est interprété et demandé. Dans ce cas, il est important de connaitre les aciers présents dans un ouvrage. Ainsi, en prélevant des aciers, cela permet de déterminer leur type, que ce soit des aciers Haute Adhérence, lisse, TOR, etc. mais aussi leurs caractéristiques mécaniques telle que la limite d'élasticité de l'armature.

Tous ces éléments sont nécessaires afin de pouvoir déterminer quelles sont les charges pouvant s'appliquer sur l'élément et s'il est nécessaire de prévoir de renforcer la structure soit avec des tissus de fibre de carbone ou par ajout d'armatures afin de pouvoir répondre aux besoins du client ou des utilisateurs.

Le prélèvement d'aciers (Fig. I.1) 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 **[1].**



Fig. I.1 : Prélèvement d'acier

I.2.1.6.4 Echantillonnage

Le prélèvement d'échantillon se fait le plus souvent par carottage.

Suivant la nature et le type d'analyse la profondeur et le diamètre des carottes sont adaptés.

Dans la plupart des cas, le carottage se fera dans les espaces (si possible) dépourvus d'armature renseigné par le balayage pachométrique.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

a) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux

nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai. Le matériau n'étant pas homogène, le nombre de prélèvements doit être aussi grand que possible (Fig. I.2)

b) Au laboratoire, prélèvement par partage de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ

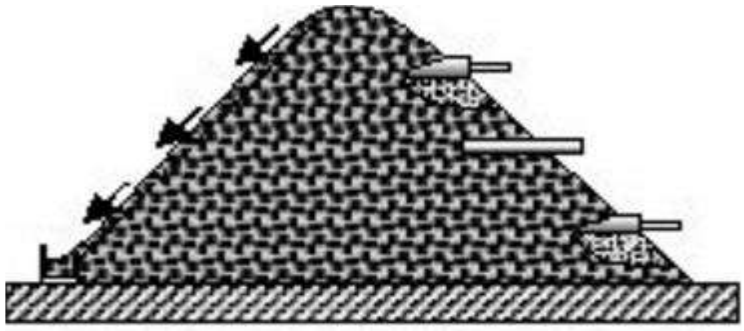


Fig. I.2 : Prélèvement sur le chantier

I.2.1.6.5 Quartage:

Consiste à séparer l'échantillon en 4 parties (Fig. I.3). L'échantillon étalé est partagé en 4 quarts sensiblement égaux. On élimine 2 fractions opposées et on réunit les 2 autres fractions. Si la quantité est encore trop importante, le quartage se poursuit selon le même processus jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

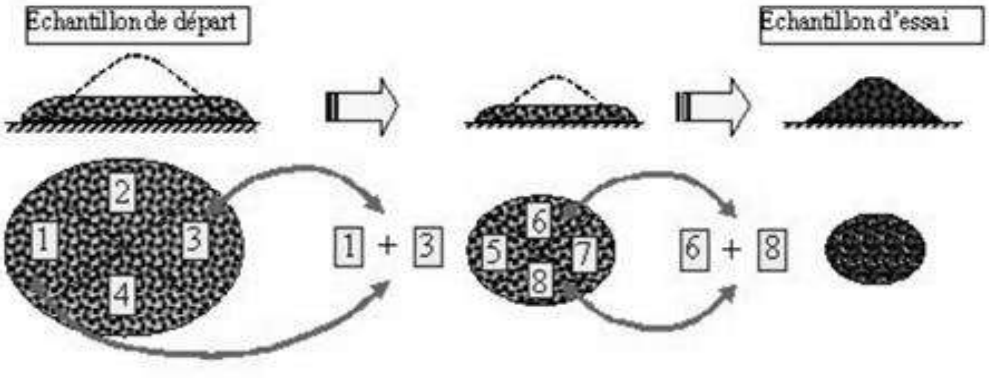


Fig. I.3 : Quartage

I.2.1.6.6 Objectif de l'échantillonnage

• Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci doivent permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de matériaux dans lequel on a fait le prélèvement.

• Par conséquent il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble [1].

I.2.2Types des investigations

Deux catégories d'investigations se présentent : les méthodes non destructives et les méthodes destructives.

I.2.2.1 Investigations non-destructives

Ces méthodes permettent d'analyser la structure sans porter atteinte à son intégrité. Ceci est à privilégier dans différentes structures, tels que les monuments ou bâtiments historiques, où il est difficile de pouvoir prendre des échantillons de la structure pour la caractériser. Ces méthodes sont également en faveur dans le cas où la structure est atteinte et affaibli, l'échantillonnage de ce type de structure pourrait l'affaiblir davantage [3].

I.2.2.1.1 Relevé visuel

Toute enquête approfondie commence par un examen visuel des conditions. Les principaux indices de problèmes à distinguer sont :

- Fissuration et craquelures.
- Détresse de surface : Effritement, désagrégation, surface alvéolaire, écaillage
- Fuite d'eau : Humidité de la surface, infiltration ou fuite à travers les joints et les fissures.
- Corrosion de l'acier: Taches de rouille, câbles de post-tension exposés, aciers exposés.
- Autres indices: Cloquage des membranes et revêtements, accumulation d'eau, décoloration.

Ce relevé permettra de :

- Qualifier les désordres, car chaque type à une origine et des conséquences particulières.
- Déterminer les caractéristiques d'une pathologie et savoir quelle sorte de traitement sera nécessaire afin d'arrêter le phénomène.
- Quantifier les désordres, car selon son ampleur, des méthodes de réparation plus ou moins lourdes seront à envisager.
- Localiser les désordres afin de pouvoir déterminer son origine et ainsi agir à la source du problème.

Quelques outils à utiliser pour une enquête visuelle :

- Mètre
- Distance mètre
- Pied à coulisse
- Fissuromètre



Fig.I.4: jauge Ginger cebtp - Fissuromètre digital [3]

I.2.2.1.2 Sondage par marteau:

Marteler le béton offre une méthode précise et moins cher pour identifier les zones de délamination. En frappant des zones de béton délaminé, le son passe de "ping" plein à un son "puck" creux. Les limites des délaminations peuvent alors être facilement déterminées.

Des méthodes de sondage plus productives sont disponibles lorsque vous travaillez avec de grands espaces. Traîner une chaîne réalise le même résultat que le sondage par marteau.

Cependant, ces méthodes ne donnent qu'une idée générale des zones de délamination. Par conséquent, ils doivent être utilisés seulement pour l'évaluation générale, pas pour la mise en page détaillées nécessaires à la reconstruction.

I.2.2.1.3 Méthode échos-chocs

Les développements récents en technologie d'instruments et ordinateur peuvent fournir une méthode fiable pour localiser les vides, les fissures et autres défauts sous la

surface du béton.

La technique impact-écho est basée sur l'utilisation des ondes de compression générées par choc qui se déplacent à travers la structure et sont réfléchis par les défauts internes et les limites externes vers un récepteur (transducteur). Les signaux reçus sont convertis en un spectre de fréquence et sont affichés sur un écran d'ordinateur. Un logiciel est utilisé pour analyser ces signaux, et fournir une prédiction de la probabilité et de la profondeur des défauts.

En effet, compte tenu de la vitesse de l'onde et la période d'arrivée (ou fréquence), les profondeurs de défauts internes ou des limites externes sont calculées. Le système fonctionne rapidement, en environ deux secondes pour traiter chaque lecture.



Fig. I.5: Test Choc-Echo avec appareil Olson's NDE 360[3]

I.2.2.1.4 Méthode de l'auscultation sonique

L'auscultation sonique consiste à mesurer le temps de diffusion d'une impulsion ultrasonore entre un émetteur et un récepteur. L'appareil contenant des matériaux piézoélectriques, transforme l'énergie électrique émise en énergie mécanique ultrasonore, puis il mesure la durée nécessaire à l'onde pour atteindre le récepteur qui la reconvertit en signal électrique.

Connaissant la distance entre l'émetteur et le récepteur, la vitesse de l'impulsion peut

être déterminée. En général, plus le béton est dense et fort, plus la vitesse de l'impulsion est importante.

Ce procédé permet de vérifier l'homogénéité du béton, de détecter les fissures et les vides dans le béton, de contrôler la qualité du béton en comparant les résultats à un béton similaire, de détecter l'état de détérioration du béton, de détecter la profondeur d'une fissure de surface, et de déterminer la résistance à la compression du béton.

Pour tester le béton, le contact entre le béton et l'émetteur et le récepteur est réalisé avec un agent de couplage tel qu'une gelée de pétrole.

Le tableau suivant donne les résultats d'essais obtenus par le CEBTP sur l'auscultation sonique des bétons :

Tableau I.1: Résultats d'essais d'auscultation sonique des bétons-(CEBTP)

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

Un autre usage important de cette technique est l'évaluation non destructive des fissures qui sont été remplis avec de l'époxy. Les lectures prises le long de la fissure réparée sont comparées à celles de la section non fissurée. Une fissure bien réparée affiche une vitesse de transit égal à celui de la section non fissuré. De plus, selon l'ASTM, Il existe une corrélation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression du béton, généralement ± 20%.

I.2.2.1.5 Le scléromètre

L'essai sclérométrique (Fig. I.6) se base sur la proportionnalité entre la dureté et la contrainte de compression du béton. Pour mesurer la dureté du béton, un piston à ressort frappe la surface de la structure, provoquant un rebond du mécanisme, et entrainant un index glissant sur une règle. Plus le rebond est important, plus le matériau est dur.

Selon l'ASTM, Il convient de réaliser dix essais sur l'élément, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice sclérométrique Is de l'élément testé est la médiane des 10 mesures effectuées, par report sur un abaque considéré. À savoir, les résultats peuvent être affectés par différents paramètres, tels que la résistance à la compression estimée de l'élément, l'inclinaison du scléromètre ou l'homogénéité du béton.



Fig. I.6: Scléromètre à béton W-M-250 de James [3].

I.2.2.1.6 Le relevé du ferraillage

Le relevé du ferraillage peut se faire à l'aide d'un pachomètre de type Ferro scan. Cet appareil est un système de détection portable pour un examen d'armatures non destructif.

Il permet de déterminer le positon exact des barres d'armatures, de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature.

L'appareil émet un flux magnétique, le pachomètre détecte la diffusion de ce champ et la variation électromagnétique qui est causée par la présence des armatures.

Le diamètre des armatures est déterminé par le fait que plus le diamètre d'une armature augmente, plus le signal reçu par l'appareil sera important. Alors que, plus l'épaisseur d'enrobage sera importante, plus le signal s'affaiblit. Pour cela, la profondeur de mesure du pachomètre est limitée (généralement de l'ordre de 10 à 15 centimètres selon le type de bétons et le type d'armatures) [3].

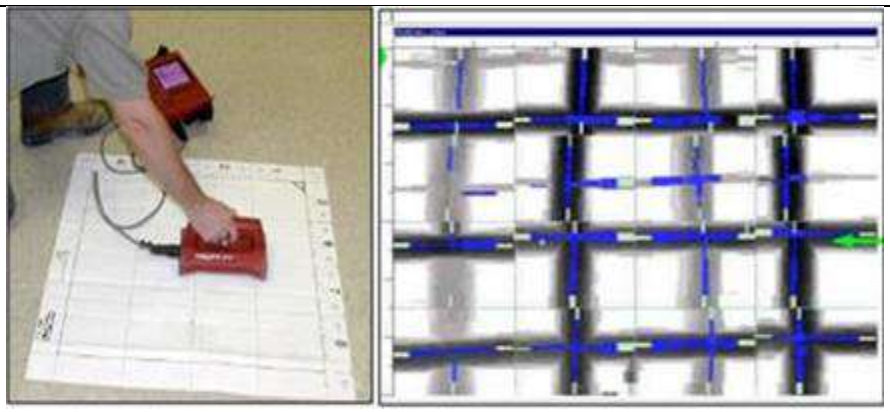


Fig. I.7: détection par fenêtres et résultats [3].

I.2.2.2 Investigations destructives

On a recours aux investigations destructives pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaitre ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, ou bien pour avoir accès à des éléments internes ou sous-jacents à la structure. Cela permet aussi de connaître leur état altéré en profondeur et l'ampleur des pathologies.

I.2.2.2.1 Le Potentiel de corrosion

Lorsque l'acier se corrode dans le béton, il existe une différence de potentiel entre la zone de demi-pile anode et la zone de demi-pile cathode dans l'acier. Cette différence peut être détectée en plaçant la demi-pile de sulfate de cuivre et de cuivre sur la surface du béton et mesurer les différences de potentiel entre l'acier d'armature et une éponge mouillée sur la surface du béton.

La cellule de référence relie la surface du béton à un voltmètre à haute impédance, qui est également connecté électriquement à la nappe de renforcement en acier. Le voltmètre lit alors la différence de potentiel à l'emplacement d'essai.

Selon la norme ASTM C876-91 le potentiel mesuré indique une probabilité de corrosion. En utilisant une électrode Cu/CuSO4 on a:

- Si E > -200mV (probabilité de corrosion inférieure à10%)
- Si -350 < E <-200 mV (corrosion possible environ50%)
- Si E < -350mV (corrosion très probable, supérieur à 50% peut atteindre 90%)

Cependant, différents paramètres peuvent affectent les résultats obtenus:

- L'hygrométrie de surface, peut diminuer la mesure de 100mV.

- Les milieux agressifs comme la présence de chlorures, augmente la conductivité, on mesure des potentiels plus négatifs.
- La carbonatation mesure des potentiels plus positifs

Ces méthodes ne peuvent pas détecter la corrosion des tendons de post-tension, ils ne peuvent non plus détecter la corrosion quand l'acier d'armature est discontinu du voltmètre.

Cependant, les mesures de demi-cellule sont souvent utiles car ils sont faciles à réaliser, et les résultats peuvent être livrés rapidement à des coûts relativement faibles [3].

I.2.2.2.2 Test au contenu de chlorure

L'évaluation de la teneur en ions chlorure est effectué en prélevant un échantillon de béton de la structure, soit par tirage au béton pulvérisé à l'aide d'un marteau rotatif à percussion (de préférence électrique), ou en prenant des carottes et en pulvérisant ensuite le béton dans le laboratoire. Le matériau pulvérisé est collecté et stocké dans un récipient propre, le trou est nettoyé sous vide, les échantillons pulvérisés sont analysées en utilisant un procédé chimique

La séparation des chlorures, existant dès la coulée, des chlorures qui ont pénétrer dans la structure, peut être faite en comparant la teneur en chlorure à différents niveaux dans le membre suspect. Les chlorures existants dès la coulée auront généralement des teneurs en chlorures similaires à travers le membre, tandis que les chlorures qui sont entrés dans le béton après la coulée auront des concentrations plus élevées à la surface et plus faibles à l'intérieur de l'élément [3].

I.2.2.2.3 Test à la carbonatation

Pour déterminer la profondeur de la carbonatation, une surface de béton frais doit être exposée. Cela peut être fait par carottage de la surface et diviser la carotte avec un marteau et un burin. La position de la limite de carbonatation est mesurée par pulvérisation de la surface du béton avec un indicateur à base acide qui change de couleur à un pH d'environ 10, ce qui indique la limite entre la partie carbonaté et la zone non carbonatée. L'indicateur le plus couramment utilisé à cette fin est une solution de phénolphtaléine, qui colore le béton d'un rouge intense (rose) à des valeurs de pH supérieur à 10 et incolore à des valeurs de pH inférieur à 10 [3].

Il sera intéressant de comparer les mesures de profondeur de carbonatation avec

l'enrobage donné par un pachomètre. Après plusieurs mesures, on peut obtenir une telle courbe:

Le pourcentage des armatures non protégées est l'abscisse du point d'intersection de la courbe d'enrobage avec celle de carbonatation

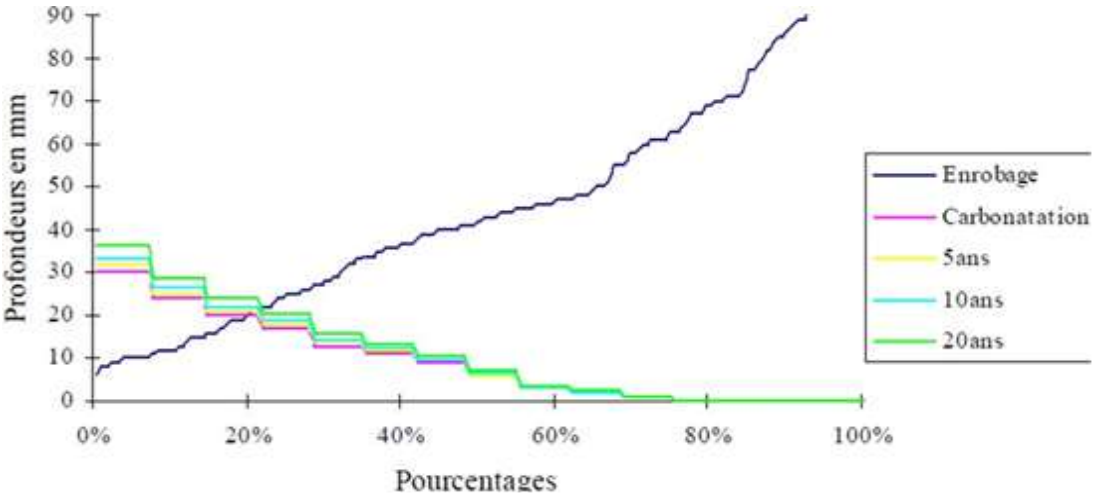


Fig I.8: Graphique enrobage-carbonatation [3].

I.3 La norme européenne EN 1504 définit les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. :

L'un des problèmes les plus délicats que rencontre le domaine de la construction est la réparation et le renforcement des ouvrages endommagés.

Vu la rareté des organismes d'études et de contrôle ou les entreprises de réalisation ainsi que les documents de référence utiles. Un document intitulé "Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages endommag2s" est mis à la disposition de tous les ingénieurs, techniciens et opérateurs déjà appliqués qui vise en premier lieu les travaux de reprise des bâtiments endommagés par un séisme mais il peut aussi servir de guide pour les autres types d'ouvrages dont l'endommagement provient d'autres origines.

Il est important de noter également qu'il est prévu d'éditer les autres documents complémentaires qui s'intitulent :

- Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement.
- Méthodes de diagnostic rapide des bâtiments soumis au risque sismique.

- Méthodes d'évaluation de la résistance des bâtiments soumis au risque sismique.
- Le règlement parasismique algérien (RPA) version 2003.
- Le règlement d'urbanisme en cas de modification de l'aspect extérieur ou d'extension.
- La sécurité des personnes en cas d'incendie et de panique [4]

I.3.1 Les normes des essais de durabilité des structures :

Des normes étrangères françaises ou autres fournissent déjà des procédures d'essais performantes, le tableau suivant rassemble, par types d'exposition,(Tableau I.2et I.3) les modes opératoires disponibles.

Tableau I.2 : Modes opératoires d'essais performantes [4]

	Essai de gel sur béton durci, Gel dans l'air – Dégel dans l'eau	NF P 18-425 (1994)
	Détermination au microscope des vides d'air et des paramètres du réseau de vides d'air dans le béton durci, Partie 2 – méthode modifiée de comptage par point	ASTM C 457-98 (1998)
Sulfates	Produits de calage et/ou scellement à base de liants hydrauliques, Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates	NF P 18-837 (1993)
	Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution	ASTM C 1012 - 95a (2000)
	Standard test method for potential expansion of Portland-cement mortars exposed to sulfates	ASTM C 452 - 02 (2002)
Lixiviation	Essai de lixiviation à pH constant	Projet de norme expérimentale (2007)

Tableau I.3: Méthodes d'essais relatives aux caractéristiques de durabilité, dans le projet de norme belge NBN B15 [5]

Type de dégradation	Essai performantiel	Référence	$V_{dég}$	C
Carbonatation	Essai de carbonatation accéléré.	Adapté de prEN 13295	Profondeur de carbonatation	1,2
Gel/dégel	Cycles de gel/dégel et caractérisation par des essais de fendage ou mesures de vitesses du son.	NBN B 05-203	Diminution de résistance ou de vitesse du son	1,2
Sels de déneigement	Cycles de gel/dégel avec solution de NaCl.	NTN PROBETON 018 ou prENV 12390-9.	Perte de masse	1,2
Pénétration des chlorures	Détermination du coefficient de diffusion des chlorures à l'état non stationnaire par mesure du profil de pénétration.	NT Build 443 (1995)	Coefficient de diffusion des chlorures à l'état non stationnaire	1,4
Eau de mer	Variations dimensionnelles dans une solution d'eau de mer reconstituée.	NF P18-837	Allongement	1,2
Sulfates	Variations dimensionnelles dans une solution à haute teneur en sulfates.	NF P18-837	Allongement	1,2
Acides ou autres produits chimiques	Cycles d'immersion/séchage, solution acide régulée en pH	cf. NBN B 15	Perte de masse	1,2

I.3.2 Les normes de produit de réparation des structures :

Normes françaises de mise en œuvre des ouvrages NF DTU, normes européennes sur les produits de construction, normes de conception des ouvrages (Euro codes)… : les normes dans le secteur de la construction font partie des règles de l'art depuis des décennies. Elles constituent des éléments de référence incontournables pour les acteurs de l'acte de construire en tant que gages de qualité et de sécurité, d'aide à la mise en œuvre des réglementations, ou d'appui en termes d'assurance [6].

Les principales normes relatives aux produits de réparation sont les suivantes:

Tableau1.4: Les principales normes relatives aux produits de réparation [6]

Ouvrages d'art, Normes sur les techniques de réparations			Année
NF P 95-101	Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés		1990
Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique			
N° de normes	Titre	Nature du liant	Année
NF P 18-800	Définitions, classification, conditionnement, marquage, conditions de réception	H – R	1989
NF P 18-802	Contrôle sur chantier	H – R	1992
Produits ou systèmes de produits destinés aux réparations de surface du béton durci			
NF P 18-840	Caractères normalisés garantis- Normes d'essais garantis – Normes		1993
NF P 18-852	Essais d'adhérence sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-853	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-854	Essai de tenue aux chocs répétés sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-855	Essai de perméabilité aux liquides avec surfaces sciées	H – R	1992
NF P 18-856	Essai de tenue aux rayonnements U.V.	R	1993
NF P 18-857	Essai de tenue aux chocs sur surfaces sciées après cycles	H – R	1993
NF P 18-858	Essai d'adhérence sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-859	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-860	Essai de tenue aux chocs répétés sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-861	Essai après cycles de gel-dégel, de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface rugueuse	H	1993
NF P 18-862	Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvette à surface rugueuse	H	1993

H : produits hydrauliques
R : résines de synthèse

La norme européenne EN1504 définit les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Elle se compose de dix parties et de 65 méthodes d'essai. Les dix parties sont présentées dans ce tableau

Tableau1.5 : Parties de la norme EN 1504 [7]

EN 1504-1	Termes et définitions de la norme
EN 1504-2	Caractéristiques des produits/systèmes de protection de surface pour béton
EN 1504-3	Caractéristiques de réparation structurale et non structurale
EN 1504-4	Caractéristiques de collage
EN 1504-5	Caractéristiques d'injection
EN 1504-6	Caractéristiques d'ancrage des barres d'acier d'armatures
EN 1504-7	Caractéristiques de protection contre la corrosion des armatures
EN 1504-8	Maîtrise de la qualité et l'évaluation de la conformité des sociétés de fabrication
EN 1504-9	Principes généraux régissant l'utilisation des produits/systèmes de protection et de réparation des structures en béton
EN 1504-10	Informations concernant l'application sur site des méthodes et systèmes de contrôle de la qualité des travaux

La partie 9de la norme définit deux grandes familles de dégradation, la dégradation des bétons et la corrosion des armatures. Elle établit aussi 11 principes de réparation incluant la réparation des défauts du béton pour les six premiers principes et jusqu'à la corrosion des armatures pour les quatre derniers principes. On présente dans le tableau I.5 les principes de solution pour la corrosion des armatures. Ces principes peuvent êtres répertoriés en deux familles, les méthodes électrochimiques et les méthodes non électrochimiques. L'application des méthodes nécessite au préalable une bonne connaissance du mécanisme de corrosion, un bon diagnostic et une bonne maîtrise de la technique. Les méthodes non électrochimiques sont connues pour être des méthodes classiques de réparation, assez simple à appliquer et moins coûteuses, contraire mentaux méthodes électrochimiques.[7]

Tableau 1.6: Principes et méthodes relatifs à la corrosion des armatures

Principe	*Définition*	*Méthodes fondées sur le principe*
Principe 7	Préservation ou restauration de la passivité de l'armature	- Augmentation de la couverture de l'armature avec mortier ou béton hydraulique supplémentaire. - Remplacement du béton contaminé ou carbonaté. - Ré alcalinisation électrochimique du béton carbonaté - Ré alcalinisation du béton carbonaté par diffusion. - Extraction électrochimique du chlorure
Principe 8	Augmentation de la résistivité électrique du béton	- Limitation de la teneur en humidité par des traitements de surface, des revêtements ou par recouvrement.
Principes 9 10 et 11	Contrôle et protection cathodique	- Limitation de la teneur en oxygène (au niveau de la cathode) par saturation ou revêtement de la surface - Application d'un potentiel électrique - Badigeonnage de l'armature avec des revêtements contenant des pigments actifs - Badigeonnage de l'armature avec des revêtements de protection - Application d'inhibiteurs sur le béton

I.3.2.1 La réparation par mortiers

La réparation par mortier est l'une des méthodes les plus utilisées pour des structures affectées par la corrosion. C'est une méthode de reconstitution de l'enrobage dégradé et pollué par les chlorures. Elle est utilisée pour restaurer la passivation des armatures touchées par la corrosion, d'un point de vue électrochimique, une réparation par mortier est conçue pour supprimer la réaction anodique qui existait avant la réparation et l'empêcher de se reproduire.

Elle peut être utilisée pour réparer les désordres dus à la corrosion à divers stades de leur évolution (depuis l'amorçage de la corrosion jusqu'à la corrosion des armatures).

Cette technique passe par trois phases de réparation qui sont la préparation du support, la protection des armatures et la mise en œuvre du mortier de réparation. Avant de procéder à un ragréage, il est nécessaire de préparer les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, pour qu'il y ait une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise.

Les techniques les plus courantes sont l'hydro démolition et le décapage au marteau pneumatique. Lors de cette phase le béton dégradé ou pollué est retiré sur toute la surface, les armatures sont débarrassées de toute trace de corrosion manuellement (décapage et brossage) ou mécaniquement (sablage hydro sablage, etc.) et, en dernier lieu, les surfaces du béton sont nettoyées par soufflage ou aspiration afin d'éliminer toutes traces de poussières polluées.

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont entièrement dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion tel que les oxydes de zinc ou les époxydes zinc. Les armatures très corrodées doivent être remplacées.

Ce remplacement se fait par scellement ou soudure afin de restituer la section initiale en tenant compte des longueurs d'ancrage, de recouvrement et des armatures de couture.

Dans le cas de soudures, celles-ci devront être effectuées selon les normes en vigueur après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée. L'enrobage des armatures est reconstitué de façon à retrouver la géométrie de la structure.

Une couche complémentaire de protection peut être appliquée sur le mortier pour avoir une forte imperméabilisation. Pour améliorer l'adhérence entre l'ancien béton et le nouveau béton, une couche d'accrochage peut être mise en œuvre. Trois méthodes peuvent être utilisés pour l'application du mortier : à la main, en mortier projeté ou en mortier coulé (coffrage).

I.3.2.2 Les mortiers de réparation :

La norme EN 1504 définit deux catégories de mortiers de réparation : mortier de réparation structurale et non structurale. Pour les mortiers non structuraux, ils sont appliqués sur une surface de béton pour restituer l'aspect géométrique ou esthétique de la structure. Pour les mortiers structuraux, ils sont appliqués à une structure en béton pour remplacer le béton défectueux et pour restituer à la structure son intégrité et sa durabilité. Les mortiers de réparation peuvent être classés en deux familles selon leurs compositions, à savoir des mortiers à base de liant hydraulique et mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères. Ces derniers peuvent modifier et améliorer les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité du matériau [7]. Des exemples de ces mortiers sont présentés dans ce tableau

Tableau1.7 : Classification des mortiers par Emerson set Morgan [7]

Mortiers classiques	*Mortiers modifié par des polymères*	*Mortiers à base de résine*
-Mortiers à base ciment portland ordinaire *-Mortiers à base de ciment alumineux*	*-Mortiers à base de ciment modifié par un polymère styrène butadiène* *-Mortier à base de ciment modifié par un polymère vinyle acétate*	*-Mortier d'époxy* *-Mortier acrylique* *-Mortier polyester*

Tableau 1.8: Produits d'injection-avantages et inconvénients. [7]

Produits	**Advantages**	**Inconvenient**
▪ **Coulis de ciment**	- Faible coût. - Possibilité de mise en œuvre par des moyens simples.	- Retrait. - Ségrégation ressuage - Utilisation délicate dans les fissures fines.
▪ **Silicates**	- Long températures d'injectabilité. - Viscosité réglable par addition d'eau. - Injection defissure ≥0.2mm	- Retrait en milieu asséché. - Emploi délicat. - Injection de vides important déconseillée.
▪ **Résines époxydiques**	- Excellente adhérence. - Propriétés mécanique élevées. - Bon comportment en présence d'humidité. - Bon comportment aux agent's agressifs.	- Emploi délicat. - Coût élevé.
▪ **Résines polyester**	- Propriétés mécaniques élevées. - Faible viscosité. - Injection des fissures ≥ 0.2mm.	- Produit inflammable. - Retrait. - Faible résistance à l'alcali du béton. - Emploi délicat.
▪ **Résines** ▪ **Polyurethanes**	- Blocage provisoire de venues - d'eau par formation de mousse. - Foible viscosité.	- Léger retrait. - Sensibilité à l'eau. - Emploi délicat.

▪ **Résines acryliques**	- Faible viscosité réglable. - Sous forme de gel : - Gonflement en présence d'eau. - Résistances chimiques élevées. - Résistances mécaniques - Élevées.	- Sous forme de gel: - Nécessité pour éviter le retrait d'une présence d'eau permanente. - Adhérence faible. - Coût relativement élevé

I.4 Matériaux de réparation

I.4.1 Mortiers de ciments additionnés de résine en émulsion

Ils remplissent parfaitement les exigences citées et conviennent dans la plupart des cas. Les résines miscibles mélangées à l'eau de gâchage des mortiers les rendent plus plastiques et maniables, augmentent les résistances à la traction et l'allongement avant rupture, favorisent l'adhérence. Les mortiers à base de ciment ont aussi l'avantage de recréer une protection alcaline des aciers et d'en assurer la passivation. Les meilleurs produits de réparation sont les « mortiers prêts à l'emploi » en deux composants : l'un étant la résine en émulsion, l'autre le ciment et la charge spéciale. Ces mortiers sont parfaitement dosés, calibrés, sont donc étanches à l'eau mais imperméables à la vapeur. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont garanties. Ils peuvent contenir des fibres synthétiques courtes, les rendant thixotropes, ce qui, dans beaucoup d'utilisations supprime les coffrages. [8]

I.4.2 Mortiers à base de liants époxydique

Ils sont utilisés lorsque la réparation exige des résistances mécaniques élevées, une bonne résistance chimique ou une remise en service rapide (Un tel mortier atteint 90% de ses résistances mécaniques finales en 24 heures à 20°C) et dotés d'excellentes propriétés d'adhérence. On peut les utiliser pour faire adhérer du béton à des surfaces, ou pour ressouder des portions d'une section de béton en service fissurées ou détachées. Une fois durci, le composé ne se ramollit pas, ne coule pas et ne suint pas – du moins dans les conditions d'emploi ordinaires.

I.4.3 Bétons Conventionnels

Les réparations profondes en béton conventionnel sont généralement utilisées lorsque la surface à réparer est plus grande que 1000 cm2 et la profondeur dépasse 150 mm ou lorsque la

profondeur de la réparation dépasse de 25 mm le niveau inférieur des aciers d'armature [Hamlaoui S, 2012]. [8]

I.5 Conclusion

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que les 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 inconvenances. 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 simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux d'assurance adaptée, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

CHAPITRE II

Pathologies du béton armé:

Causes et Conséquences

II.1 Introduction :

Lorsque nous constatons une dégradation sur un ouvrage en service, il est difficile de dire si celle-ci est apparue pendant la construction, peu après, ou longtemps après. Or, à l'analyse, il apparaît le plus souvent qu'une dégradation n'a pas une cause unique et qu'elle est favorisée par un grand nombre de paramètres, relatifs tout autant à la nature du matériau qu'à la conception de l'ouvrage ou à la technologie de son exécution.

II.2.Facteurs et causes des dégradations

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

II.2.1. Les causes climatiques de dégradation

Concerne surtout le béton frais au cours de son durcissement et le béton durci. Ainsi, la durabilité et les propriétés du béton peuvent être grandement affectées par :

- la température ambiante, les cycles thermiques et l'écart de température
- l'hygrométrie ambiante (humide ou sèche), la pluviométrie, la vitesse du vent et les cycles humidité/sécheresse ou humidité/vent
- les cycles du gel/dégel, surtout si le gel est sévère

Les agents atmosphériques chimiques : CO2, eau de pluie, embruns marins. Ces données climatiques et atmosphériques doivent être considérées lors de l'élaboration et de la mise en œuvre du béton, au risque d'avoir des dégradations préjudiciables pour la durabilité du béton, dont quelques exemples:

- des variations dimensionnelles et retraits excessifs, qui peuvent engendrer des fissurations pénalisantes pour la durabilité du béton, surtout si elles sont précoces, causés par de grands écarts de température, par une ambiance sèche ou par le vent, par des cycles de température, des cycles d'humidité relative…

- la fissuration interne du béton durci, causée par le gel sévère due au l'utilisation de sels de déverglaçage (écaillage du béton, corrosion de l'acier des armatures).
- dessiccation et arrêt d'hydratation du béton frais en surface (c'est-à-dire de la peau du béton), couche très importante dans la protection de l'acier des armatures et du cœur du béton des agressions externes. Cette dessiccation peut être causée par un environnement sec, par la vitesse du vent, par une élévation de température…
- accélération de certains processus chimiques de dégradation, causée par un taux d'humidité relative élevé et/ou par une élévation de la température [9].

II.2.2. Les causes physiques de dégradation

Les ouvrages en béton peuvent se trouver dans des milieux, industriels ou naturels, agressifs pour le béton et/ou l'acier des armatures, dont on peut citer les plus courants :

- l'environnement marin (eau de mer ou embruns marins sur une bande littorale). L'eau de mer contient des éléments chimiques (sulfates, chlorures, magnésium, …), L'attaque de ces éléments se fait d'abord en surface puis pénètre au cœur du matériau, qui peuvent dégrader le béton mais surtout causer un gonflement du matériau puis une fissuration, et la corrosion des aciers par l'action des chlorures, ou par la carbonatation du béton.
- les milieux sulfatiques : eaux superficielles ou souterraines, sols et terrains chargés, eau de mer, milieux industriels…, Les sulfates ont la possibilité de dégrader le béton (ils peuvent provoquer la fissuration du béton)
- milieux contenant des chlorures : milieux marins ou industriels, Les chlorures ont surtout la particularité de causer la corrosion de l'acier des armatures, en dépassivant leur couche superficielle protectrice, par baisse du pH du béton.
- milieux acides, eaux pures et douces, ont une action d'érosion et de dissolution des constituants du béton, surtout la portlandite, et causent ainsi la réduction de la compacité du béton, la chute de sa résistance mécanique…, avec comme conséquence la mise en péril de la santé des armatures.
- actions biologiques (micro-organismes, algues, bactéries) [9]. Les attaques bactériologiques par exemple se produisent dans des bâtiments situés dans des climats particuliers, ou dans les structures en contact avec des eaux usées (canalisations d'assainissement et stations

d'épuration). Lors des longs séjours des eaux usées, l'activité bactérienne entraînera la formation des éléments chimiques, causant la corrosion des armatures, et attaquant la portlandite pour former du gypse (secondaire), qui réagit à son tour avec les aluminates du ciment, pour former de l'ettringite secondaire, occasionnant une expansion dans le béton durci [9].

- attaque du béton par des agents chimiques et organiques dans des milieux industriels (huiles, graisses, pétrole, solvants, eaux résiduaires, gaz…).

II.2.3 les causes charges de dégradations

Cela est dû à un changement de type de structure ou d'installations et à une augmentation des charges sur ce qui est en place dans la structure ou le bâtiment. Exemple: Nous changeons un hall ou un bâtiment résidentiel en usine ou augmentons les charges sur celui-ci sans prendre et tenant compte de l'étude technique du bâtiment, Fig .2.9 Rupture en diagonale.

Dans ce cas, de la corrosion ou des fissures se produisent dans les armatures et dans la structure, et c'est en (poteaux et poutres ,planchers , murs …) et c'est l'une des causes des dommages qui en résultent



Fig. II.1: Rupture en diagonale.



Fig. II.2: Fissure critique diagonale.

II.2.4 Les autres pathologies de dégradation des bétons

Nous avons vu que les bétons se dégradaient à cause des milieux dans lesquels ils sont placés car ils y subissent des agressions physiques et chimiques. Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

II.2.4.1 Actions environnementales et facteurs liés à l'environnement du béton

Les facteurs et causes des désordres et dégradations du béton (béton et/ou acier des armatures) et des ouvrages en béton sont très divers, et peuvent être liés à l'environnement de l'ouvrage. C'est l'environnement dans lequel va se trouver le béton frais ou le béton durci tout au long de sa durée de vie. La notion d'environnement englobe l'ambiance climatique et atmosphérique, ou le milieu extérieur particulièrement agressif dans lequel va se trouver l'ouvrage [9].

II.2.4.2. Mauvais positionnement des armatures

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface [11].

II.2.4.3. Mauvaise qualité des bétons employés

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

II.2.4.4. Vibration trop importante

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

II.2.4.5. Absence de cure du béton

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface.

II.2.4.6. Cycle humidité / sécheresse

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrasion des aciers [10].

II.3 Description des pathologies du béton armé

II.3.1. La carbonatation

La carbonatation du béton, vulgairement appelé « la maladie du béton », entraîne des censées garantir cette résistance, n'adhèrent plus au béton lorsqu'elles sont corrodées. La stabilité du film passif est étroitement liée à la valeur du pH au voisinage de l'acier. Or, lorsque le pH devient inférieur à 12 environ, le film disparaît. Par conséquent, tous les mécanismes en mesure de provoquer une diminution du pH dans le béton, peuvent donc contribuer à amorcer ou accélérer la corrosion des aciers d'armature. Dans la majorité des cas, c'est le phénomène de carbonatation qui est principalement responsable de l'abaissement du pH dans le béton créant le problème de résistance en traction sur les structures en béton armé.

La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2), présent dans l'air à un taux moyen de **0,03 %** en volume (taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural) et certains constituants du béton tel que le ciment. La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes.

La vitesse de carbonatation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la perméabilité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant. La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité comprise entre **40% et 80%, 60%** étant considéré comme la valeur la plus critique. Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO_2, alors que dans les environnements très humides, le béton étant saturé, la diffusion de CO_2 est considérablement ralentie. De très fortes teneurs, dans un béton, en cendres volantes **(>30%)** et en laitiers **(>50%)** peuvent accélérer significativement sa vitesse de carbonatation. La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) de ce matériau (Fig.2.11).



Fig. II.3: Exemple d'échantillon carbonaté (7x7x28cm)[12]

Lorsque la zone de carbonatation atteint les armatures en acier, la corrosion du métal peut commencer en produisant notamment des espèces plus volumineuses que les matériaux initialement présents.

Ceci explique l'éclatement du béton autour des armatures corrodées (Fig.2.12).



Fig. II.4 : Éclatement du béton dû à la carbonatation

Les exemples des figures (**II.4**), (**II.5**), et (**II.6**) montrent dès les différentes dégradations d'éléments structuraux d'origines diverses. En se corrodant, les aciers sur Béton augmentent de volume (en bas) comparé à une armature saine (en haut).

Le schéma de la figure (**II.9**) illustre le principe de la formation de la carbonatation.



Fig. II.5: Corrosion par carbonatation



Fig. II.6: En se corrodant des armatures



Fig. II.7: Corrosion importante en sous face**.** chevêtre d'une poutre pont Port de Mostaganem.



Fig. II.8: Oxydation générale du Pont Passiti (Oran)

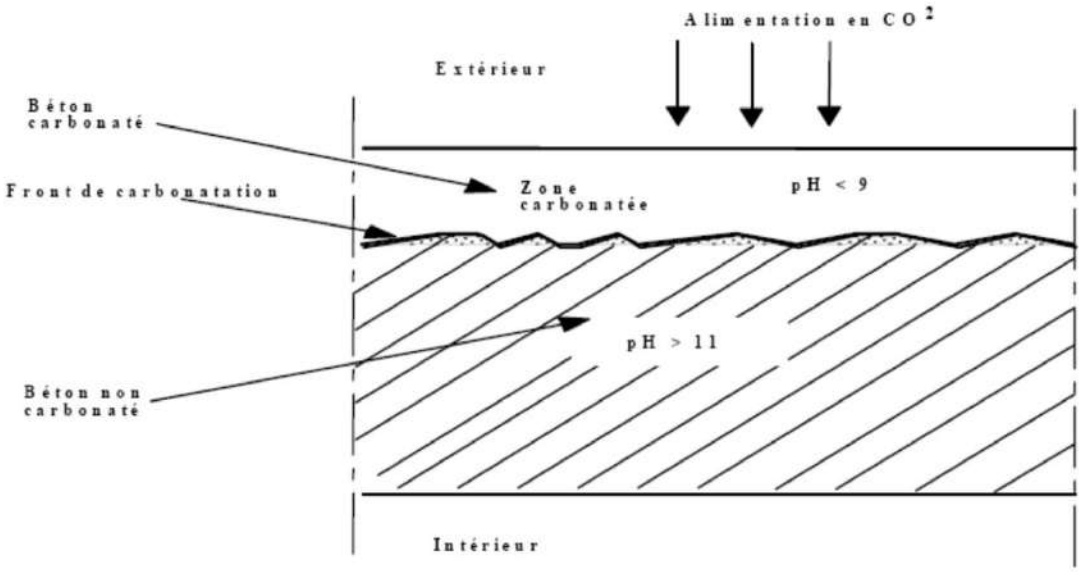


Fig. II.9*:* Schéma de principe de la formation de la carbonatation. [12]

II.3.1.1 Les conséquences de la carbonatation

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain.

Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusion elle limitant les phénomènes de transfert [12].

II.3.1.2 La mesure de la carbonatation

La technique la plus simple à mettre en œuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons correspond au test à la phénolphtaléine réalisé sur des fractures fraiches de béton. La phénolphtaléine est un indicateur de pH coloré dont le virage se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée (pH < 9) qui reste incolore, de la zone non carbonatée (pH > 9 et allant jusqu' à 13) colorée en violet. Cet essai doit être effectué à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs en tenant compte des conditions locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages. Fond front

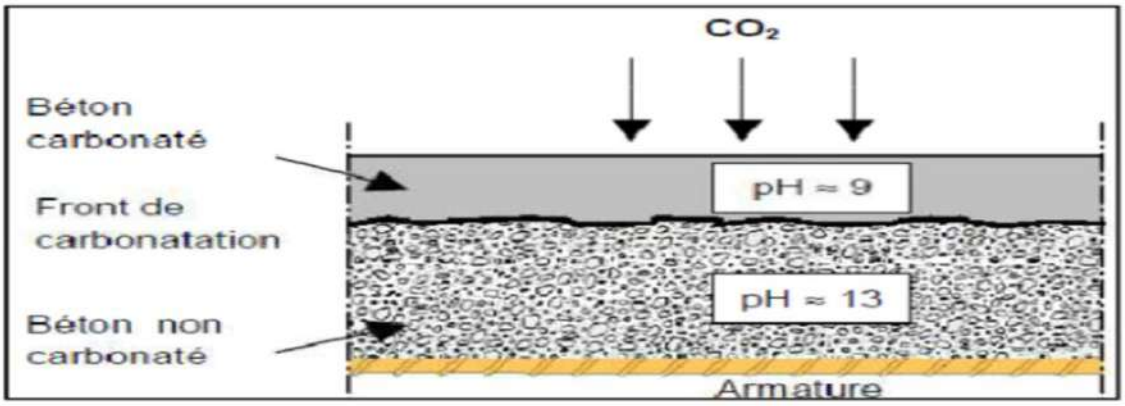


Fig. II.10: La progression de la carbonatation [12]

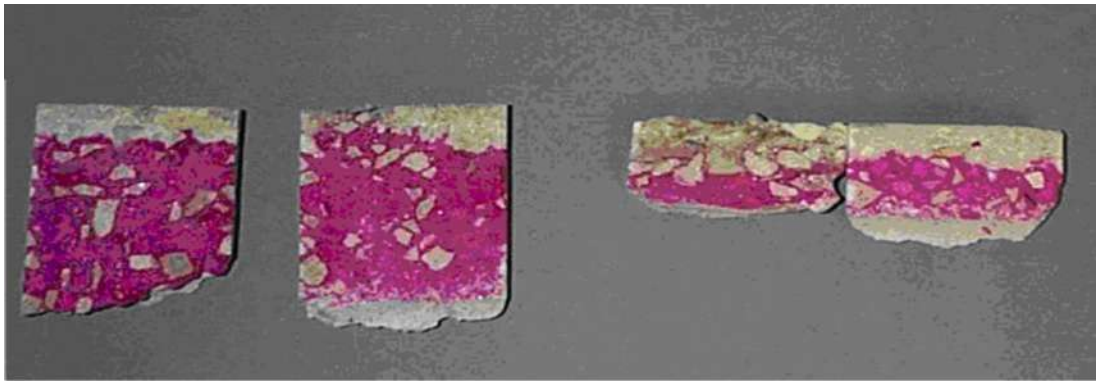


Fig. II.11: Mise en évidence de la carbonatation de la matrice cimentaire des échantillons de béton des poutres de la structure porteuse [12]

1: zone carbonatée (incolore) **2**:zone non carbonatée (coloration rose)

II.3.3 Corrosion armatures

La corrosion regroupe l'ensemble des phénomènes chimiques et électrochimiques constituant la détérioration de matériaux, en général métalliques, sous l'action du milieu environnant.

Il est bien connu que l'acier se dissout en présence d'eau et de nombreuses solutions aqueuses non oxydantes. Cette corrosion est très vive dans les solutions acides et diminue d'intensité au fur et à mesure que le ph de la solution augmente, et devient pratiquement nulle aux ph voisins de 9 à 13. Pour des ph très élevés, supérieurs à environ 13, les solutions peuvent à nouveau être corrodantes. Une armature dans un béton est protégée par celui-ci tant que le phreste à une valeur comprise entre 9 et 13 dans le cas contraire, comme pour un béton carbonaté, la dissolution de l'acier est susceptible de fissurer ou de faire éclater le béton

La corrosion regroupe l'ensemble des phénomènes chimiques et électrochimiques constituant la détérioration de matériaux, en général métalliques, sous l'action du milieu environnant.

Il est bien connu que l'acier se dissout en présence d'eau et de nombreuses solutions aqueuses non oxydantes. cette corrosion est très vive dans les solutions acides et diminue d'intensité au fur et à mesure que le ph de la solution augmente, et devient pratiquement nulle aux ph voisins de 9 à 13. Pour des ph très élevés, supérieurs à environ 13, les solutions peuvent à nouveau être corrodantes. Une armature dans un béton est protégée par celui-ci tant que le phreste à une valeur comprise entre 9 et 13. dans le cas contraire, comme pour un béton carbonaté, la dissolution de l'acier est susceptible de fissurer ou de faire éclater le béton d'enrobage si l'épaisseur ou la qualité de ce dernier n'est pas suffisante. On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, figures (II.12, II. 13), lorsque le ph du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées. Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO_2 atmosphérique. L'autre facteur étant les chlorures, le dépassivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil (ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment). La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraine à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature.[12]



Fig. II.12: Fissures à mi travée.



Fig. II.13: Fissure due à la corrosion des armatures.

II.4 La corrosion de l'acier dans le béton

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

II.4.1 Les types de corrosion :

Il existe plusieurs types de corrosions :

II.4.1.1 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.

II.4.1.2 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.

II.4.1.3 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.

II.4.1.4 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.

II.4.1.5 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.

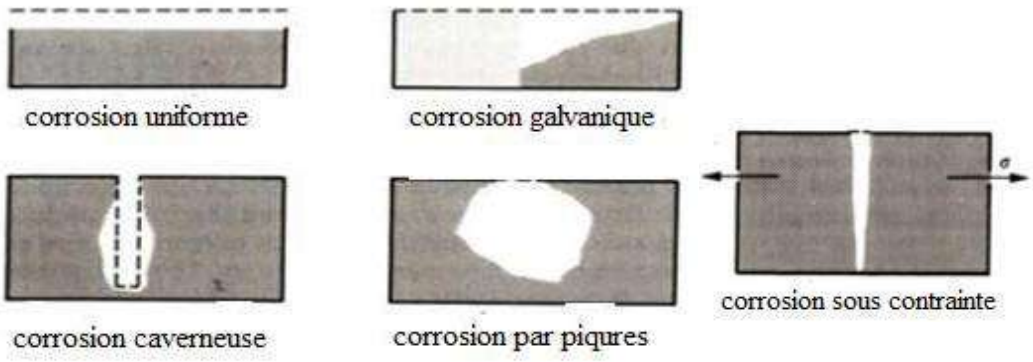


Fig. II.14 : les types de corrosion

II.4.1.6 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. [13]

II.4.1.7 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 :

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

$2H^+ + ½\ O_2 + 2\ e^- \rightarrow H_2O$… (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. [14]

II.4.1.8 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 250C.

Dans le cas du fer, il apparaît trois domaines distincts **(**Fig. **II.14**) [15]

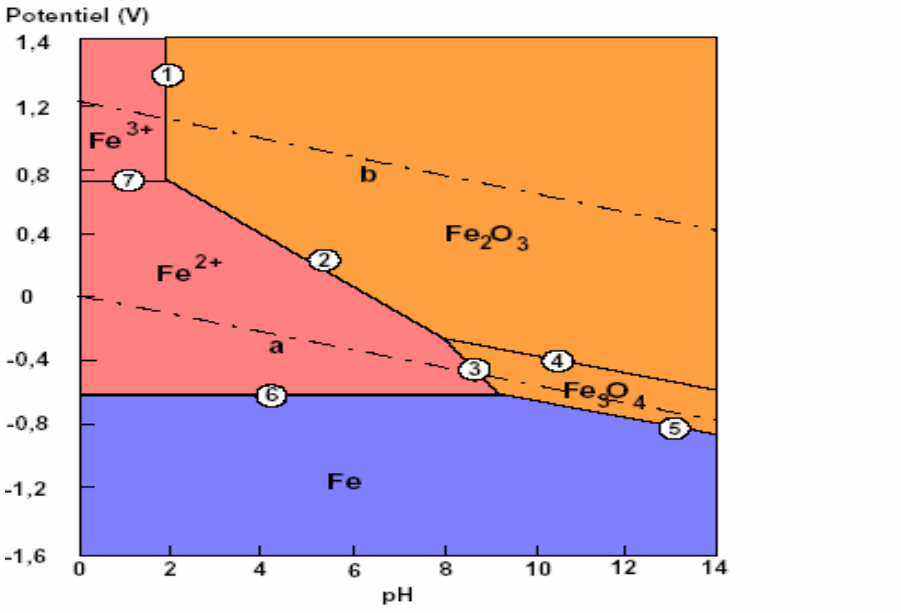


Fig. II.15 : Diagramme de stabilité du fer dans l'eau [15]

II.4.2 Principales causes de corrosion

La corrosion de l'acier dans le béton ne peut se produire que lorsque certaines conditions physico- chimiques 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...).[16]

II.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.[17]

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.

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**(**Fig.2.25). [18]

II.4.4 Etat de l'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.[18]

II.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. [16]

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.2.25).

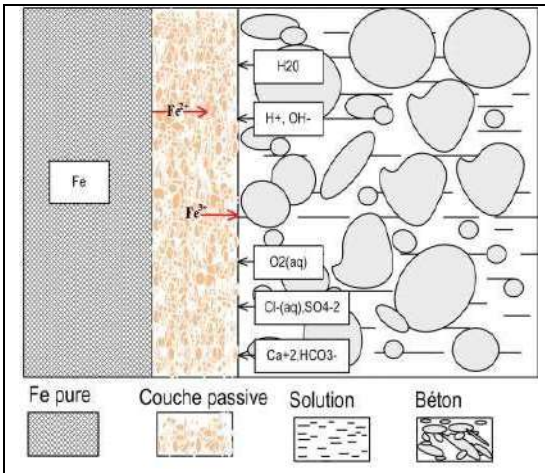


Fig. II.16: l'état passif d'acier

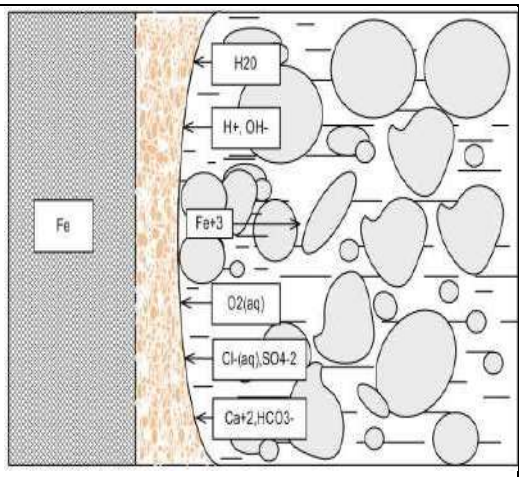


Fig. II.17: dépassivation d'acier

II.4.5.1 Dépassivation par carbonatation du béton

Le métal à l'état actif subit une attaque uniforme et régulière au pourtour de sa surface. C'est le cas des armatures dans le béton carbonaté qui subissent une dissolution uniforme de la surface métallique après dépassivation de l'armature. Cela résulte de la pénétration du gaz carbonique jusqu'à l'armature. La combinaison de la portlandite contenue dans le ciment et de l'acide carbonique de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, qui en abaissant le pH élevé de la solution interstitielle (pH = 12,7), va détruire la couche passive environnant l'armature.

On dit que les aciers sont dépassivés.

Le CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton d'enrobage et réagit avec les hydrates du ciment, en particulier la portlandite $Ca(OH)_2$, pour former en présence d'eau, de la calcite $CaCO_3$ suivant la réaction (1.15) : $Ca(OH)_2 + CO_{2(g)} \Rightarrow CaCO_3 + H_2O$

Cette réaction entraîne la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons aboutissant à une diminution du pH qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. Le taux de carbonatation dépend principalement de l'humidité relative, de la concentration en CO2, des différentes pressions partielles de CO2 et de la température de l'environnement où le béton est placé (Neville, 2001). L'ordre de grandeur de la profondeur de pénétration du CO2 est de 20 à25mm en 50 ans pour un béton de porosité moyenne exposé sous

les climats de France (Vervisch, 2009). Il a été démontré qu'à partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton, il n'y a plus d'échange gazeux dû aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment (Girard, 1998). Le pH reste stable autour de 11 et la corrosion ne se manifeste pas. De même, les bétons immergés ne carbonatent pas compte tenu de l'absence d'échanges gazeux (Valls, 2002).

La progression du CO2 dépend de la perméabilité de ce dernier. L'état hydrique du béton influe sur sa perméabilité. Lors de la réalisation d'ouvrage en béton, un seuil de perméabilité du béton est fixé de manière à limiter la pénétration d'agents agressifs comme le CO2. Ce seuil dépend de l'exposition de l'ouvrage (état hydrique) (Balayssac, 1998).

On peut mesurer la profondeur de carbonatation, c'est-à-dire de pénétration du CO2, dans le béton grâce à un essai destructif sur un prélèvement en pulvérisant un indicateur coloré, la phénolphtaléine. On peut ainsi suivre l'évolution de la profondeur de carbonatation x(t) en fonction du temps (t) grâce à des lois empiriques de la forme (Loi de Fick):

$$x(t) = k * \sqrt{D * t} \quad (1.16)$$

avec D:coefficient de diffusion (diffusivité de la carbonatation), k : coefficient lié au matériau.

Le CO_2 présent dans l'atmosphère se diffuse dans les pores du béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification conduit à la dissolution des hydrates et notamment de la portlandite, abaissant ainsi le pH de la solution à une valeur inférieure à 9, en réduisant la passivation des aciers et permettant l'amorçage de la corrosion des armatures.

La réaction bilan de carbonatation de la portlandite (I.15) indique que l'eau est libérée dans le réseau poreux (Thiery et al., 2003).

Les produits de corrosion formés provoquent des décollements aux interfaces acier-béton.

Pour un matériau cimentaire à porosité constante, la carbonatation devrait engendrer une expansion volumique du matériau carbonaté de 11% en raison du rapport des volumes molaires de la portlandite et de la calcite (Huet, 2005). Il a été démontré que le matériau se restaure en eau dans la zone réactionnelle en raison de la réduction de porosité couplée à la quantité d'eau

relarguée, ayant pour effet de ralentir la pénétration du dioxyde de carbone et donc de ralentir l'avancement du front de carbonatation (Bary, 2004).

Il a été démontré que la période et les conditions initiales de cure ont une influence sur le temps et la profondeur de carbonatation du béton (Cengiz, 2002). La longueur initiale de cure humide augmente le degré d'hydratation du ciment et réduit la porosité et la perméabilité du béton (Neville, 2001), en limitant la diffusion de CO2 dans l'échantillon. Il est nécessaire pour augmenter la résistance d'un béton d'augmenter le degré d'hydratation du ciment. Mais ce n'est pas le but de cet essai. Mais une période minimale de cure est tout de même nécessaire à l'hydratation des grains deciment. Plus le temps initial de cure humide est long, plus le temps de carbonatation est long pour atteindre la même profondeur de béton carbonaté.

II.4.5.2 Dépassivation par l'attaque des chlorures

Elle se traduit sous forme de piqûre plus ou moins circulaire après rupture localisée du film passif. Seule une faible surface externe est affectée, on dit qu'elle est localisée. L'attaque se prolongeant en profondeur dans l'acier, la perte de section rapide entraîne une chute de la capacité portante de la structure. Les ions chlorure, véhiculés par l'eau, pénètrent dans la solution interstitielle du béton jusqu'à l'armature. Ils pénètrent dans le béton par diffusion à travers la porosité ou le long d'une fissure. Les ions chlorure associés aux hydroxyles présents dans la solution provoquent la destruction de la couche de passivation de l'armature et abaissent le pH de la solution. La corrosion peut alors commencer.

La seconde loi de Fick régit la diffusion des ions chlorure au travers de la solution interstitielle contenue dans les pores du béton :

Forme de l'équation :(1.7)

$$c(x,t) = c_0 + (c_s - c_0)\,erfc\left(\frac{x}{\sqrt{2D_{app}t}}\right)$$

c(x,t) : concentration des ions chlore à la profondeur x et au temps t.

c_0 : concentration initiale en ions chlorure.

c_s: concentration à la surface en ions chlorure.

$$erfc(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}\int^{x} \exp(-t^2)dt}$$

D_{app} : coefficient de diffusion apparent des ions chlorure.(1.18)

II.4.6 Amorçage et propagation de la corrosion

Selon le modèle de Tuutti, la durée de vie des structures de béton armé peut être séparée en deux phases distinctes telles que montré à la Figure II.26. La première phase est l'initiation de la corrosion dans laquelle l'armature est passive, mais le processus de dé passivation, c.-à-d. carbonatation ou pénétration des ions chlorure dans le béton, prend place. La seconde phase est la propagation de la corrosion qui débute lorsque l'acier est dé passivé et qui se termine lorsqu'un état limite est atteint au-delà duquel les conséquences de la corrosion ne peuvent plus être tolérées (Bertolini et all., 2004)

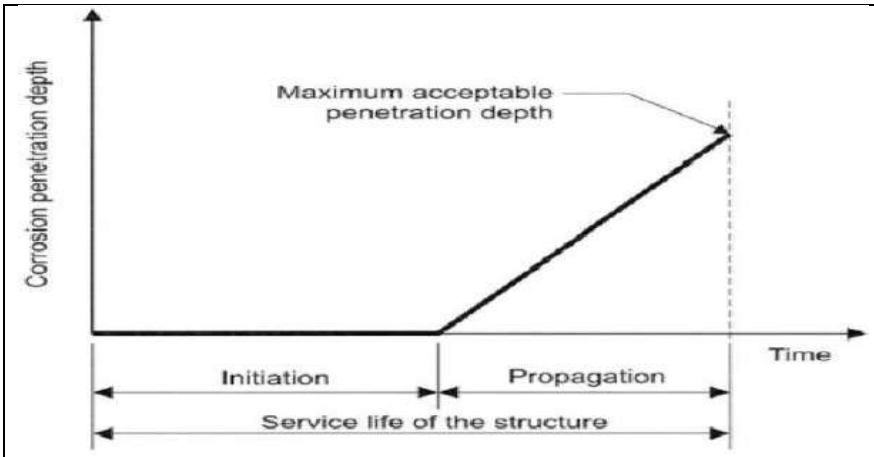


Fig. II.18 : Période d'initiation et de propagation de la corrosion dans les structures de béton armé (Modèle de Tuutti - tiré de Bertolini et all, 2004

Le temps d'initiation et la cinétique de propagation de la corrosion dépendent de plusieurs facteurs tels que : les caractéristiques du mélange de béton, les propriétés des barres d'armature ainsi que l'état de surface des barres d'armature (Bertolini et coll., 2004). Selon Bertolini et coll. (2004), la qualité du mélange de béton dépend pour beaucoup du rapport (E/C), de la minéralogie du ciment et de la présence ou non d'ajouts cimentaires.

Tel que démontré par Meyer (1968), Midgley et Il liston (1984) et Zhang et coll (2005), plus le rapport E/C est élevé, plus la perméabilité du mélange de béton est grande. Un mélange ayant une forte perméabilité (faible qualité) est normalement plus poreux et laisse passer plus facilement les agents agressifs. En outre, pour un même type de barre d'armature, plus la

perméabilité du béton est grande, plus l'initiation et la propagation de la corrosion risque d'être rapide (Bertolini et coll., 2004).

Par ailleurs, la sélection du liant peut avoir une influence significative sur la capacité du béton à réduire la pénétration des ions agressifs comme les ions chlorures. des travaux antérieurs ont clairement démontré que le choix du type de ciment (et notamment de sa minéralogie) pouvait considérablement affecter la durée de vie des ouvrages exposés à des ions chlorure (Hussain et coll., 1996 et Zhang et coll., 2005). Selon ces études, une réduction de la teneur en C3A aurait comme conséquence d'augmenter de manière considérable la pénétration des ions chlorure et par le fait même de réduire la période requise pour initier la corrosion des armatures.

Depuis plusieurs années, les producteurs de barres d'armature concentrent leurs efforts afin de produire des barres plus résistantes à la corrosion en comparaison avec les barres conventionnelles en acier noir. Les barres en acier noir sont les barres les plus répandues sur le marché. Elles sont appelées acier noir à cause de la couche d'oxyde noir qui se forme à la surface de l'acier lors du laminage à chaud. Cette mince couche d'oxyde se nomme la calamine. Les produits alternatifs sont les barres enrobées d'époxy, les barres galvanisées, les barres en acier inoxydable et les barres du type MMFX. La description détaillée de ces types de barres existe dans la norme ACI 222.3R pour plus de détail (Lapointe, 2009).

Un autre facteur pouvant à la fois faire varier la résistance à la corrosion et l'adhérence au béton est le type de préparation de surface des barres. la préparation de surface sert à enlever toute trace de saletés, de graisses ou de sels, de produits de corrosion et de calamine. Selon Ghali (2005), la calamine forme un revêtement protecteur à la surface de l'acier et, normalement, ne devrait pas être enlevée afin d'assurer un minimum de protection pour des aciers exposés à la corrosion atmosphérique. la préparation de surface est une pratique courante dans le cas des aciers de charpente. par contre, pour le béton armé, sur chantier, la préparation de surface est une étape souvent négligée. Une telle préparation permettrait de garantir une surface propre. Néanmoins, pour des aciers de charpente, la préparation de surface est habituellement effectuée en deux étapes. la première étape consiste à dégraisser l'acier et la deuxième étape a pour but d'éliminer les taches de rouille et, quelques fois, la calamine. dans le cas où la calamine serait enlevée, il est préférable de protéger la surface par une peinture ou par grenaillage (**Shot-peening**). Cette dernière technique est présentée plus bas. La deuxième étape peut être faite par

brossage métallique ou bien par projection d'abrasifs (jet de sable). Le nettoyage au jet de sable permet d'enlever complètement la couche de calamine. Selon Salah-Rousset et coll (1996), malgré la perte de la calamine, la projection du sable sur la surface de l'acier agit comme du martèlement. Le jet de sable ressemble beaucoup au grenaillage de

précontrainte appelé « Shot-peening » qui est une technique moderne d'écrouissage superficiel de pièces métalliques. Cette technique met une mince couche en compression à la surface de l'acier.

Cette mince couche très dense offre une protection supérieure à la corrosion et à la fatigue et un meilleur coefficient de frottement. [18][19]

II.4.6.1 Corrosion généralisée

Dans le cas de la corrosion de l'armature par carbonatation du béton, on considère que l'amorçage de la corrosion commence dès que le front de carbonatation atteint les armatures à t_0, correspondant au commencement du processus de dépassivation. Pour accélérer ou retarder l'amorçage, il faut intervenir sur l'épaisseur du béton d'enrobage. En comparant les profondeurs de pénétration des agents agressifs et l'épaisseur du béton d'enrobage, on peut estimer si la corrosion est amorcée.

Dès lors que l'amorçage de la corrosion a eu lieu, si les conditions environnementales ne sont pas modifiées, la propagation ne peut pas être interrompue.

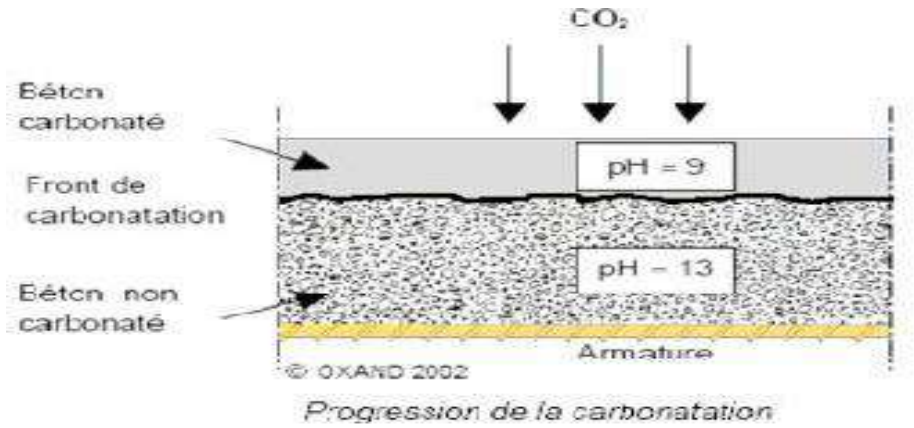


Fig. II.19: Schéma de principe de la formation de la carbonatation (selon LRPC Bordeaux [18]

II.4.6.2 Corrosion localisée par piqûres

Les ions chlorures Cl^- pénètrent dans le béton et provoquent, à partir d'une certaine concentration dans la solution des pores, au niveau des armatures, la destruction locale du film de passivation et l'initiation d'une corrosion localisée. Les ions chlorures s'introduisent dans la couche passive en remplaçant l'oxygène et en augmentant à la fois sa solubilité, sa perméabilité et sa conductivité ionique. Ils sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier laissant subsister quelques imperfections dans la couche passive qui facilite l'incorporation des ions chlore. La dégradation de la couche passive est un phénomène local conduisant à une corrosion par piqûre. des études menées par le Building Research Establishment ont établi des teneurs en chlorures critiques ou valeur limite. La valeur limite de la teneur en chlorures de 0,4% par masse de ciment est utilisée pour la prédiction de vie des bétons (BRE, 1997). On considère que la quantité de chlorures libres nécessaires pour détruire la couche de passivation dépend de la quantité de portlandite présente. Toutefois il s'avère que le dépassement des seuils critiques définis ne constitue pas toujours une condition suffisante pour amorcer la corrosion. La qualité de l'interface entre l'armature et le béton peut également être déterminante (Castel, 2000). [18][19]

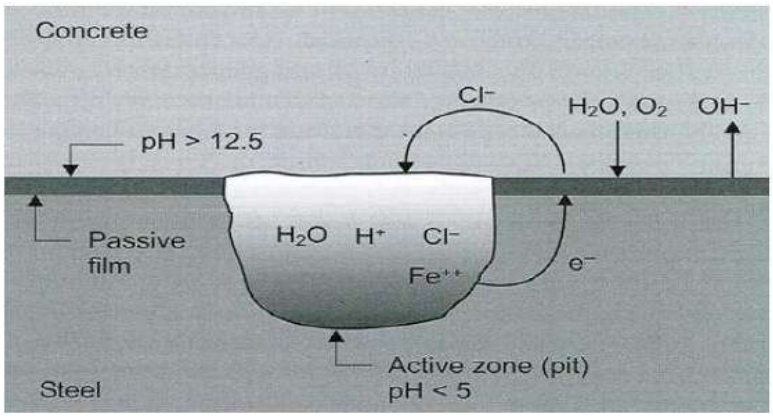


Fig. II.20 : Représentation de la corrosion par piqûres de l'acier dans le béton (tiré de Bertolini et coll, 2004)

II. 5 Conclusion

La durabilité d'un ouvrage est liée à une qualité de construction sans faille. C'est une chaîne qui part du concepteur qui doit connaître les limites du matériau, passe par le calculateur qui doit connaître les règles de dimensionnement et s'intéresser à l'élaboration de plans allant au détail de toutes les opérations de fabrication et de réalisation. Touche ensuite tous les corps de métiers : coffreur, ferrailleur, bétonnier, personnel de chantier qui doivent chacun en prendre soin jusqu'à la réception par l'utilisateur qui doit l'entretenir par des opérations de maintenance.

Si l'un des maillons de la chaîne est défaillant, la chaîne est alors défaillante. Ainsi, l'imperfection de plusieurs maillons a ici un effet cumulatif. Les sinistres enregistrés montrent qu'ils sont la conséquence de la synergie de plusieurs défaillances (au moins deux) d'origines indépendantes. La robustesse et l'adaptabilité du béton armé pardonne généralement une à deux défaillances ; il ne cède finalement que sous la gravité ou l'abondance des mauvaises actions que lui font subir ses constructeur. De là, nous nous tournons pour étudier ou aller à la réparation ou renforcement des ouvrages en béton armé

CHAPITRE III

Réparation et renforcement des ouvrages en béton armé

III.1 Introduction

Le présent travail a pour objet d'exposer les principaux procédés de réparation et de renforcement en indiquant pour chaque cas particulier ce qu'il convient de faire et ce qu'il faut éviter de faire. S'il s'agit de réparation, il suppose fondamentalement que les causes des désordres ont été trouvées et expliquées. Cette opération est du ressort du maitre d'ouvrage, du maitre d' œuvre ou de leurs conseillers .

Il conviendra à ce niveau de distinguer les fissures et désordres non préjudiciables de ceux qui sont dangereux donc inacceptables pour la durabilité de l'ouvrage.

Afin de bien comprendre le "comment" et le "pourquoi" des différentes solutions techniques de réparation et de renforcement il est utile de rappeler les causes des désordres que l'on peut rencontrer.

- Causes naturelles résultant de l'ambiance et de l'environnement (température, humidité, vent, agressivité du milieu etc.).
- Structurelles résultant d'une anomalie d'utilisation ou de fonctionnement mécanique de l'ouvrage (effet d'encastrement، de continuité، de fluage et retrait avec redistribution des moments.
- Causes accidentelles (feu, choc, séisme, explosion...).

La plupart des techniques de réparation s'appliquent également aux travaux de renforcement résultant d'un changement de destination ou de conditions d'utilisation, comme de la nécessité d'augmenter la capacité résistante de l'ouvrage vis-à-vis des sollicitations accident- telles que le séisme.

III.2 Méthode de réparation :

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, …)

III.2.1 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.2.2.1 Réparation des surfaces :

III.2.2.1.1 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 la figure suivante selon AFNOR :

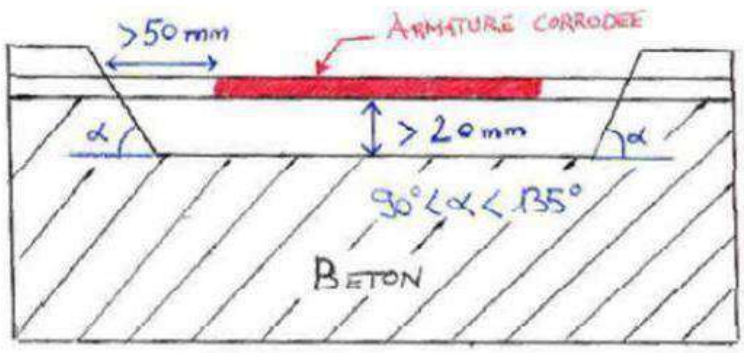


Fig.III.1 : Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101

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 [20].

➢ **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…). [20]

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,……)

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

• Capacité portante de la structure ;

• Exigences du Maître d'Ouvrage (maintien du gabarit par exemple).[20]

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

1- 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).

2- 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.

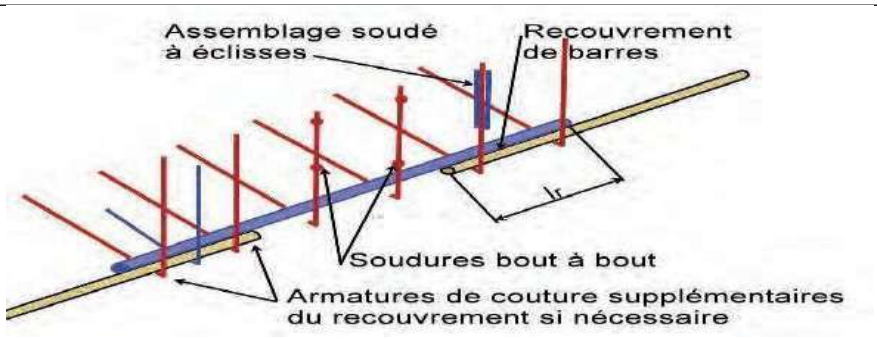


Fig.III.2: Remplacement des armateurs



Fig.III.3 : Assemblage d'armatures par

III.2.2 Le renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations. Un renforcement peut être associé à une réparation.

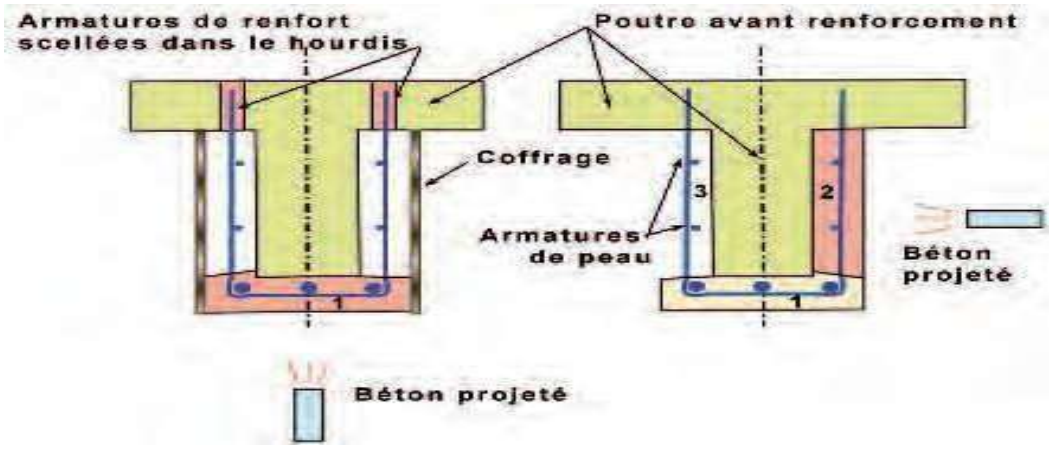


Fig. III .4 : Renforcement avec ajout d'armatures de poutre

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.



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

III.2.2.1 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. [21]

- **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) [21]
- Bords de la zone dégagée francs et taillés, (angle compris entre 90 et 135), pourassurer une bonne liaison mécanique entre le matériau d'origine et celui d'apport

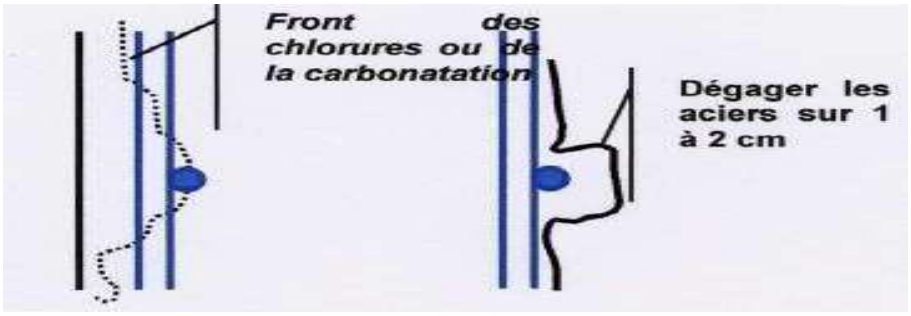


Fig. III.6 : Enlèvement du béton pollué et de la rouille

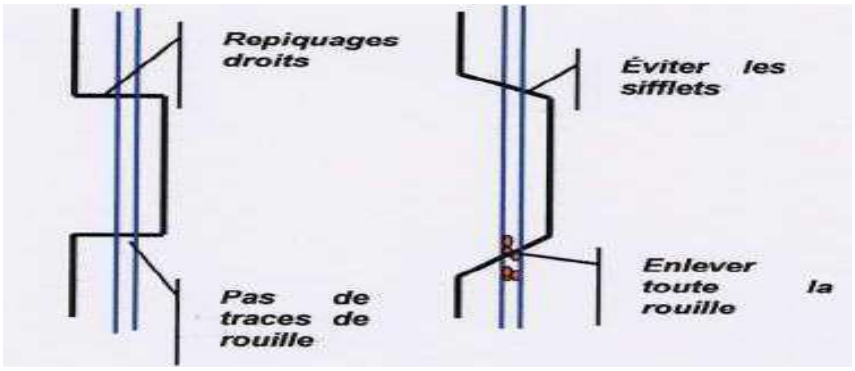


Fig.III.7 : Enlèvement toute rouille

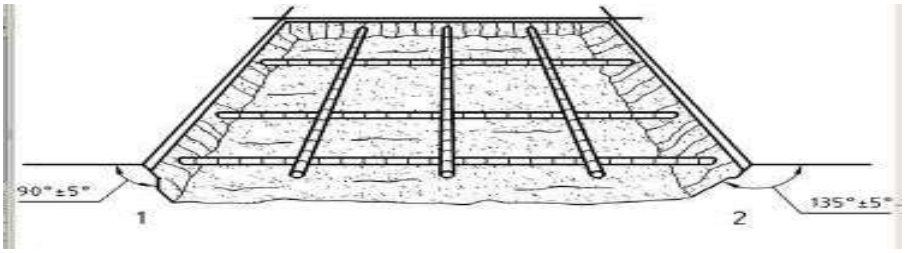


Fig.III.8 : Enlèvement du béton dégradé

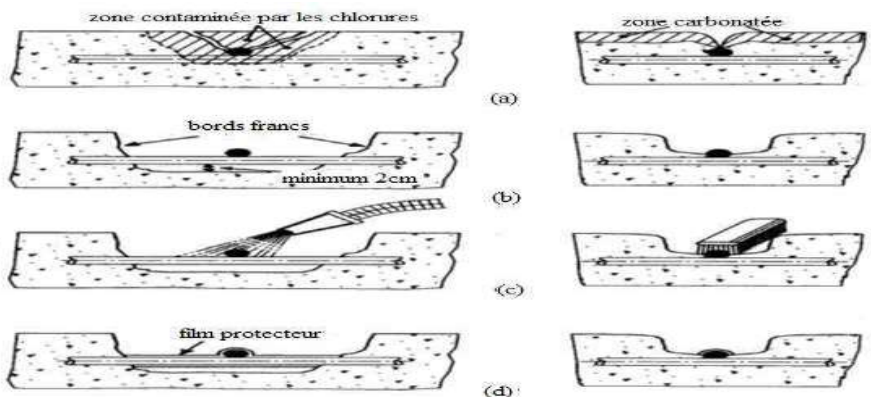


Fig. III. 9 : les étapes de préparation de surface

- **Les techniques conseillées :**
  - Hydro démolition (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



Fig. III.10 : Enlèvement du béton dégradé et détourage des armatures

- **Nettoyage de la surface :**

- Lavage à l'eau sous pression, Brossage, aspiration, soufflage…
- Selon compatibilité avec le produit de réparation [21]

- **Protection des aciers :**

- Décapage des aciers
- Revêtement anticorrosion (passivant), sans déborder sur le béton, si mortier oubéton 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)



Fig. III .11 : 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, iePCC) : Deux formes :

- Mono composant : composant sous forme de poudre et ajout d'eau sur chantier.
- 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). [21]

- **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



Fig. III.12 : 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
- éviter l'emprisonnement d'air… [21]

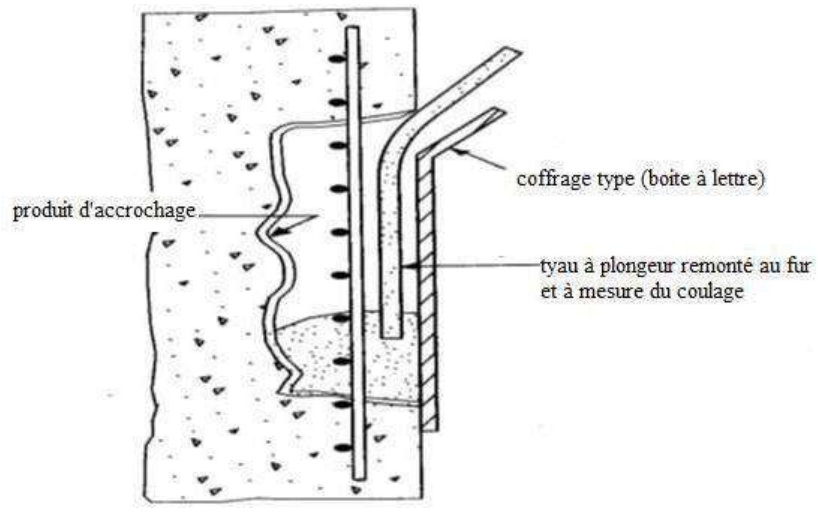


Fig. III.13 : coulage de béton

III.2.2.2 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). [22]

- **Projection par voie sèche :**

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de priseet

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)

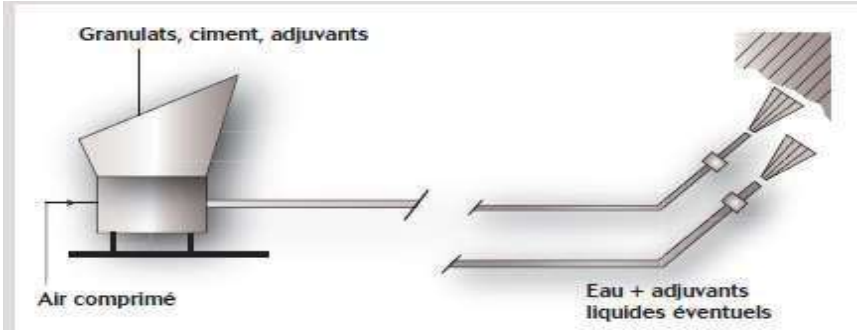


Fig.III.14 : Projection par voie sèche

- **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

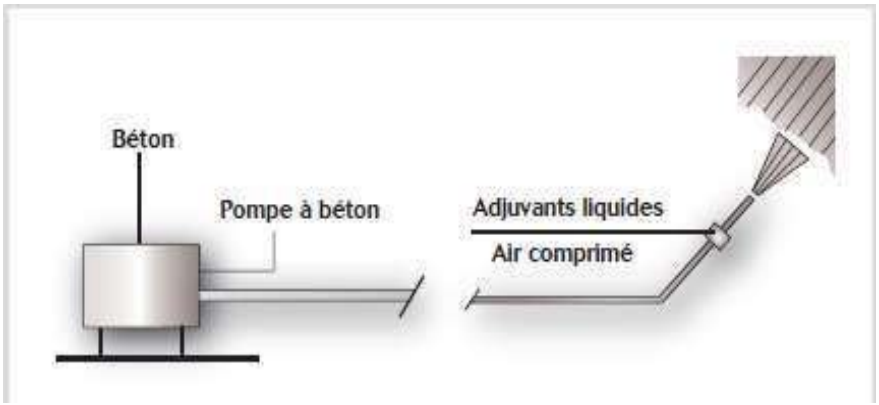


Fig. III.15 : Projection par voie mouillée

- **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. [22]

➢ **Avantages et domaines d'emploi :**

– **Avantages du BP voie sèche :**

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

– **Domaines d'emploi du BP voie sèche :**

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

➢ **Limites d'emploi :**

– **Limites d'emploi et inconvénients du BP voie sèche :**

- Capacité de production limitée
- Dégagement de poussières
- nécessité d'une bonne qualité du support

– **Matériels utilisés :**

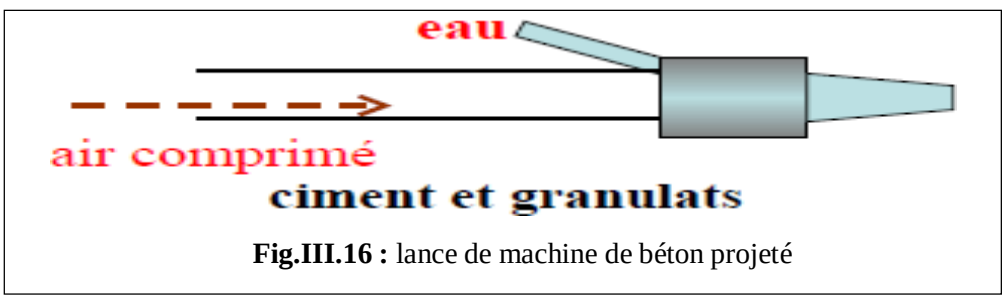


Fig.III.16 : lance de machine de béton projeté



Fig. III.17 : Béton projeté sur chantier

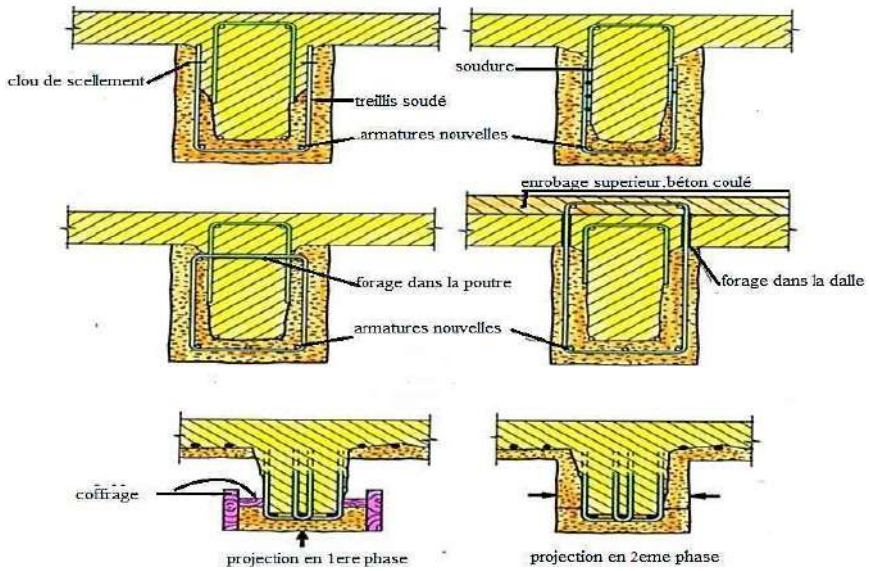


Fig.III.18 : Réparation par projection de béton

III.2.2.3 Principes de réparations :

III.2.2.3.1 Procédure opératoire :

L'opération de bétonnage respecte la chronologie suivante :

- Préparation du support
- 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)
- Couche de finition éventuelle (toujours distincte de la couche structurelle
- Protection par cure (si nécessaire**)** [22]

III.3 Préparation d'une opération de réparation ou renforcement.

La démarche générale à suivre dans tous les cas comporte les actions suivanles:

- Etude de l'était de la coe.
- Définition des objectifs à atteindre
- Choix des moyens et méthodes à utiliser.
- Elude détaillée de l'opération.

III.3.1 Étude de l'état de la construction à réparer ou à renforcer

III.3.1.1 Réparer ou renforcer Murs en béton armé.

Les murs en béton armé, à cause de leur grande rigidité et leur grande résistance aux efforts tranchants, résistent très bien aux forces sismiques induites dans le bâtiment. Donc, un mur endommagé ou mal dimensionné peut être réparé et / ou rigidifié suivant qu'on veut améliorer la capacité résistante de la structure aux efforts sismiques, surcharges et facteurs environnementaux fig. (III.19 20).

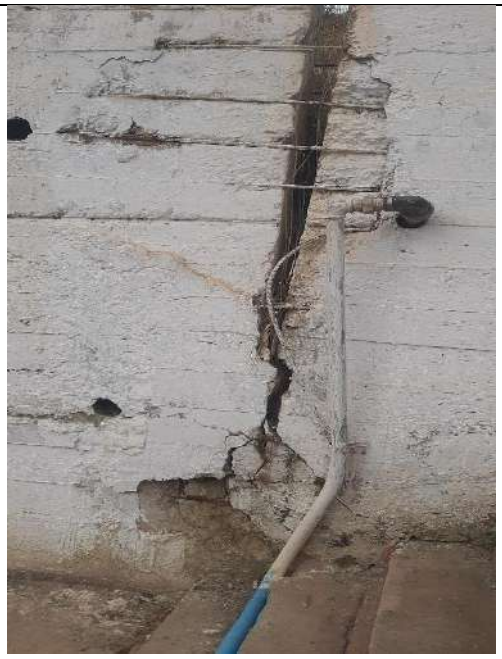


Fig.III.19 : Dégradation due auxcharges appliquées



Fig.III.20 : Dégradation due facteurs environnementaux

1. Injection

L'injection des fissures avec de la résine époxy est devenue la technique la plus utilisée pour la réparation des murs pendant cette dernière décade. Si le béton n'est ni disloqué ni écrasé, la résine époxy peut restituer au mur ses résistances initiales à la flexion et à l'effort tranchant.

Cependant le mur réparé n'aura jamais la rigidité initiale. Ceci est dû au fait que les fissures très petites ne peuvent être remplies de résine.

- **Préparation des fissures.**

On ignore souvent l'état interne des fissures. Pour cela il est absolu nient nécessaire de procéder à leur nettoyage, avant toute injection, à l'air comprimé ou å l'eau sous pression. S'il y a des traces de graisses ou d'huile, on peut utiliser des détergents å la condition d'effectuer par la suite une neutralisation

- **Travaux d'injection.**

Les injecteurs sont de deux types :

- Les injecteurs plats
- Les injecteurs "forés"

L'injection se fait toujours du bas vers le haut

2. Gainage.

L'augmentation First State l'épaisseur du mur le gainant avec du béton armé peut être réalisée si Sturmabteilung résistance ester Time insuffisante, Il existe anodiseurs sorts de gainages pour augmenter la résistance d'un mur.

Le béton projeté est la technique la plus utilisée pour gainer un mur.

Si les deux contraintes de flexion et de cisaillement doivent être augmentées, il faut renforcer dans métal cas, en plus de l'âme du mur, ses deux extrémités.

Les deux solutions de renforcement, gainage métropoles une face ou sur deux faces, sont possibles.

L'activité par les firsts Statue faces poet world organisation meilleur comportement, cependant elle coûte et chère et exige l'accession aux deux parties du mur.

La gaine du doit être conforme aux critères suivants : mur Les caractéristiques mécaniques des nouveaux matériaux ne doivent pas être inférieures à celles des matériaux existants,

L'épaisseur de la gaine doit être au moins égale à 5 cm dans la partie courante et 10 cm aux extrémités.

Les sections d'acier vertical et horizontal ne doivent pas être inférieures à 0.0025 fois la section de béton du mur.

La section d'acier vertical concentrée aux extrémités ne doit pas être inférieure à 0.0025 fois la section First State béton ajoutée.

Le diamètre des aciers transversaux des potelets d'extrémités ne doit pas être inférieur à right 8 mm.

- L'espacement de ces cadres ne doit pas être supérieur à l'épaisseur du mur 15cm.
- Le nouveau béton doit adhérer à l'ancien béton rendant la surface du mur existant rugueuse et en réalisant des trous tous les 60 cm dans chaque direction.

III.4 Matériaux

III.4.1 Le béton

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

III.4.1.1 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% à 15% par volume - Eau 14% to 21% par volume
2. Agrégats 60% à 80% - Gros granulats - Granulats fins
3. Adjuvants chimiques

3.1 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 ».

3.2 Eau de gâchage

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

- 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 matériaudurci.
- Elle peut être un facteur de dégradation si elle contient des ions agressifs.

3.3 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

3.4 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. [23]

III.4.2 L'acier :

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 nonallié. [23]

III.4.2.1 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**.** [23]

III.4.2.2 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 circulairesans aucune gravure.
- **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.

III.4.3 Adjuvants :

Ils jouent un rôle plus important dans la réparation que dans la mise en œuvre classique du béton. Ceci provient du fait que la section du béton ajoutée, généralement mince, est soumiseà des conditions très sévères. Les adjuvants les plus fréquemment utilisés dans les travaux de réparation sont :

1- Entraineurs d'air : il est fait appel à l'utilisation des entraineurs d'air quand le nouveau béton doit être soumis à l'altération atmosphérique (gel et dégel). En général, les mortiers sont les plus concernés par les entraineurs d'air.

2 - Retardateurs de prise et densifiant :

Par temps chaud, il est bon de retarder la prise de béton afin de réduire la fissuration dueà la ségrégation des éléments en suspension ce qui permet de différer les finitions et de mieux refermer les fissures en surface.

Ce type d'adjuvant accroit la maniabilité du béton et réduit le retrait du béton. L'emploi deces adjuvants doit être accompagné d'une cure d'hydrata- tion .

3 - Accélérateurs de prise : Ils augmentent la vitesse de prise et de durcissement du béton mais il convient de ne lesutiliser qu'en cas de nécessité absolue parce qu'ils augmentent le retrait du béton**.**

4 - Imperméabilisants :

Ils sont recommandés pour les revêtements destinés à éviter la corrosion des armatures ea supprimant le contact avec le milieu agressif.

5 - Autres adjuvants et ciments spéciaux :

l'emploi des mortiers expansés et de ciments spéciaux sont courants dans les travaux de

réparation.

III.4.4 Résines:

Les résines synthétiques sont des corps à haut poids moléculaire formés par l'assemblage répétitif d'un ou plusieurs motifs chimiques et elles se présentent sous différentes formes: liquide‹ plastique‹ solide.

Pour les travaux de réparation et de renforcement du présent document il est recommandé l'utilisation des résines époxydiques, sous forme liquide, qui sont constituées par le mélange d'une base époxydique et d'un durcisseur, emballés séparément si le produit n'est pas prédosé. Les résines époxydiques sont caractérisées par :

- la stabilité au stockage.
- l'excellente adhérence au béton.
- un retrait faible (évitant ainsi les fissures dûes au retrait).
- un pouvoir mouillant supérieur à celui de l'eau qui leur permet de se propager par capillarité.
- une pression d'injection faible de **0.05 à 0.3 Kg** / cm ? (évitant ainsi l'effet de vérin).

Bien que les compositions des mélanges souvent utilisées dans la réparation sont nombreuse, dans ce qui suit on retrouvera certaines compositions courantes. Il est à signaler qu'en général, il faut se référer aux compositions des fournisseurs ou le cas échéant à une étude de composition (laboratoire). [23]

III.4.5 Martiens et coulis de résine :

Pour les réparations ou recharges de faible volume ou surface, utilise en général des charges de granulométrie continue tandis que pour les applications de grandes surfaces ou importantes, on choisit des agrégats calcaires. Les mortiers à charges calcaires présentent un coefficient de dilatation voisin de celui du béton. La granulométrie des charges joue un rôle essentiel, surtout pour l'obtention des mortiers étanches.

On distingue deux types de granulométries :

- les granulométries continues. Exemple, le sable SP (voir courbe) dont la granulométrie est continue entre **0.05** et **1.2mm**, avec une proportion des vides de **25%.**
- les granulométries discontinues obtenues par mélange de deux trois catégories de granulats de grosseurs moyennes différentes.

Pour obtenir ce résultat, le rapport entre les diamètres moyens doit être théoriquement de **6: D < 6d** et pratiquement de **10**, pour tenir compte de la plage granulométrique de chaque catégorie d'agré- gat.

Exemple de granulométrie discontinue :

- **1/3** de sable **SP 0-1.2 mm**. Diamètre moyen **0.6 mm**
- **2/3** de gravillons **3-8 mm**. Diamètre moyen **6.5mm**

- Rapport D/d = **10.8**, avec proportion des vides de **10 à 12 %.**

Pour obtenir un mortier de résine étanche, les taux des charges ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes :

III.5 Causses des désordres:

La présence de fissures sur une structure en béton armé témoigne généralement d'un endommagement de cet élément, les causes peuvent être de différentes natures :

- Causes naturelles résultants de l'ambiance et de l'environnement (température, humidité, vent, agressivité du milieu ... etc.).
- Causes structurelles résultants d'une anomalie d'utilisation ou de fonctionnement mécanique de l'ouvrage (effet d'encastrement, de continuité, de fluage et retrait avec redistribution des moments...).
- Causes accidentelles (feu, choc, séisme, explosion ...etc.).
- Vieillissement normal de l'usage, à l'usure...etc.[24].

III.5.1 Poteaux :

- Fissure horizontales au niveau de l'arrêt de bétonnage pour mauvaise reprise du bétonnage.
- Fissures en "X" avec dislocation du béton de l'enrobage due aux contraintes de cisaillements développées par l'effort tranchant.
- Dislocation totale du béton dans les zones d'extrémité due à l'insuffisance des armatures transversales et formation de rotules plastiques.
- Zone de ségrégation mise en évidence par un écrasement local du bâtiment sous l'effort de la compression.
- Cisaillement des poteaux.
- Endommagement des poteaux courts d'origines structurales sous l'effet de l'importance de l'effort tranchant et de l'insuffisance des armatures transversales (cas des poteaux des vides sanitaires) [25] [24].



Fig.III.21 : Rupture au droit de la surface de reprise de bétonnages, insuffisance d'armatures transversales, béton de mauvaise qualité.



Fig.III.22 : Destruction de l'extrémité du poteau du fait de l'absence d'armatures transversales

III.5.2 Les poutres :

Les dégâts pouvant atteindre les poutres sont :

- Fissures verticales dues au moment de flexion et aux efforts normaux de traction.
- Fissures verticales dues au glissement des armatures et la destruction de l'adhérence sous l'effet des contraintes de traction.
- Rotules plastiques dans les zones nodales : écrasement et éclatement du béton avec ou sans flambement des armatures longitudinales sous l'effet de l'alternance de l'effort normal et de moment de flexion.
- Fissures verticales dues aux contraintes de traction provenant de l'interaction avec remplissages (maçonnerie)[25][26].



Fig.III.23 : Fissures à mi travée.



Fig.III.24 : Fissure due à la corrosion des armatures

III.5.3 Portiques en béton armé avec remplissages en maçonnerie :

Ce type de structure est très utilisé dans le cas des maisons individuelles et des bâtiments à hauteur limité. Les dégâts constatés dans ce type de structure après un séisme sont :

- Fissures inclinées avec ou sans destruction de la maçonnerie.
- Fissures inclinées avec ou sans fissuration du linteau.
- Ecrasement du mur (mauvaise qualité de la maçonnerie sous les poutres)
- Rupture totale du mur.
- Fissures horizontales dans le trumeau.
- Rupture totale du mur [26][25].



Fig.III.25 : Écrasement de l'angle comprimé.



Fig.III.26 : Fissurations en X aux niveaux de la maçonnerie.

III.5.4 Voiles en béton armé :

Les voiles sont un système de contreventement destinés à reprendre les efforts verticaux dus aux charges permanentes et surcharges d'exploitations, effort horizontal engendré par l'action du vent ou du séisme.

Les constructions en voile en béton armé conviennent bien aux zones sismiques, elles se sont bien comportées. Par rapport à d'autres systèmes constructifs tels que les portiques, les structures à voiles en béton armé présentent, particulièrement en zone sismique, plusieurs avantages :

- Leur présence limite les déformations latérales,
- Leur rigidité permet de protéger les éléments non-structuraux et quelques poteaux existants,

- Leur présence permet de s'affranchir du difficile problème posé par la réalisation du ferraillage des nœuds des portiques.

III.5.4.1 Voiles pleins :

Les désordres qui affectent les voiles pleins sont :

- Fissures inclinées dues à l'action de l'effort tranchant.
- Fissures horizontales au niveau des extrémités inférieures et supérieures dues à l'action du moment de flexion et son alternance.
- Fissures superficielles verticales dans l'enrobage.
- Ecrasement du béton au niveau de la zone de reprise de bétonnage à cause de la mauvaise reprise.
- Ecrasement du béton au niveau de la zone de ségrégation. [26][27].



Fig.III.27 : Fissure critique diagonale.

III.5.5 Planchers :

Les désordres qu'on peut relever sur les planchers sont les suivants :

- Fissures inclinées ou parallèles par rapport au contour d'appuis dues aux efforts tranchants et aux moments de flexion qui sollicitent le plancher dans son plan.
- Fissures parallèles aux poutrelles préfabriquées dans le cas des planchers à corps creux[24].



Fig.III.28 : Fissure très importante au niveau du plancher

III.6 Techniques de renforcement:

III.6.1 Techniques de renforcement de la structure :

Le renforcement d'une structure consiste à rajouter des éléments additionnels pour augmenter sa résistance. Les éléments introduits peuvent être incorporés dans la structure ou collés aux anciens. Parmi ces éléments, nous distinguons :

- Des voiles en béton armé
- Des murs de remplissage en béton armé ou en maçonnerie
- Des voiles en ailerons
- Des palées triangulées

Ces éléments modifient le comportement dynamique des structures et entraînent une nouvelle répartition des efforts. Une vérification de la structure au séisme est nécessaire pour sa sécurité et sa stabilité

- Le choix des éléments dépend des points suivants :
- Eviter la concentration des efforts dans les sections de faible résistance.
- Donner une configuration symétrique à la nouvelle structure.
- Réaliser soigneusement les liaisons entre la structure existante et les éléments ajoutés [27]

III.6.1 Renforcement par Ajout de murs de contreventement Voiles béton :

Il s'agit d'ajouter des voiles en béton armé à tout bâtiment insuffisamment contreventé. Cette technique fonctionne par la reprise des efforts horizontaux, l'augmentation de la raideur d'ensemble du bâtiment et la diminution de l'effet de torsion. Cependant les défauts de cette

méthode sont de modifier les espaces intérieurs; de reporter les charges sur les zones plus faibles et de risquer de créer des irrégularités en élévation. C'est de plus une intervention lourde dans un bâtiment.

Les effets de surcharge, notamment sur les fondations, doivent être pris en compte. Les liaisons avec la structure existante doivent être très soignées. Il faut sceller des barres de liaison, régulièrement espacées, dans la structure existante et les lier au ferraillage du nouveau voile pour assurer une transmission des efforts, en traitant au mortier sans retrait les interfaces entre nouvelle et ancienne structure [28].

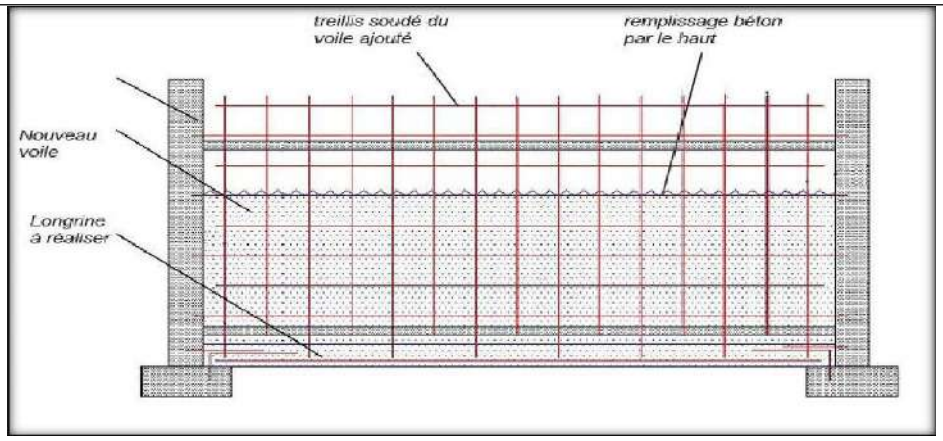


Fig.III.29: Ajout d'un mur de contreventement

III.6.1.1 Renforcement par des murs de remplissage :

Cette solution est utilisée dans le cas des structures en poteaux-poutres (à portiques). Cette technique fonctionne par la reprise des efforts horizontaux, l'augmentation de la raideur d'ensemble du bâtiment et la diminution de l'effet de torsion. C'est une intervention lourde dans le bâtiment qui doit être prise en compte notamment par ses effets sur les fondations. Le remplissage par voile en béton armé peut être éventuellement appliqué aussi au bouchage d'ouvertures afin de donner une fonction de contreventement à un mur, de façade par exemple.

Ca méthode et de sceller les armatures de continuité et les barres de liaison. Mettre en place le ferraillage du voile (treillis soudé). Coffrer en laissant suffisamment de place pour couler le béton. Couler le béton et vibrer par l'extérieur. Veiller à assurer la meilleure liaison possible entre la poutre et le voile [28].

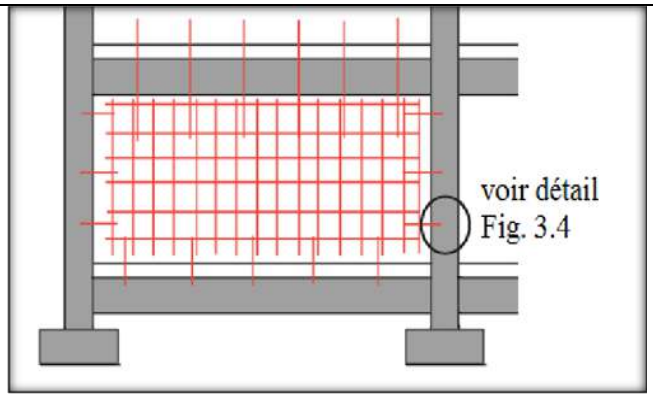


Fig.III.30: Mise en place du treillis.

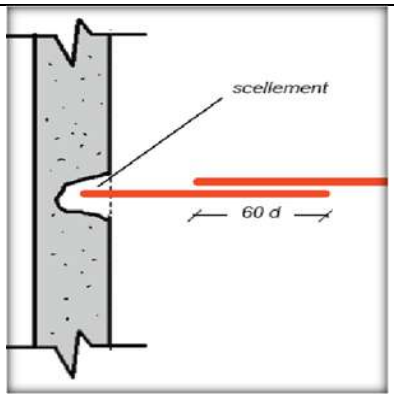


Fig.III.31*:* le scellement

III.6.1.3 Renforcement par des murs en ailes :

Lorsqu'on veut augmenter la résistance latérale d'un poteau vis à vis des efforts sismiques ou lorsque les conditions d'exploitation ne permettent pas la réalisation d'un mur de renforcement complet, on peut se contenter de la réalisation d 'éléments de voiles ou ailes de part et d'autres des poteaux tout en assurant une liaison correcte entre les deux. Les nouveaux éléments doivent aussi être ancrés dans l'infrastructure [29].

III.6.1.4 Renforcement par des palées triangulées :

Ils sont introduits dans les portiques de façade présentant de grandes ouvertures.

Ces éléments sont en béton armé ou en acier et doivent être convenablement liés à la structure existante [29]

III.6.2 Techniques de renforcement des éléments :

III.6.2.1 Renforcement des poteaux :

Les techniques les plus utilisées pour la réparation et/ou le renforcement des poteaux, nous citons :

1. **Injection:**

Cette méthode est utilisée dans le cas où les seuls désordres apparents sur les poteaux sont des fissures. Les injecteurs sont disposés sur le tracé des fissures autour des poteaux. Le réglage du débit, la pression d'injection et l'espacement des injecteurs dépend de l'importance des ouvertures [25].

2. **Gainage:** Le gainage du béton peut s'effectuer par deux méthodes :

- **Gainage métallique**

Il se traduit par la réalisation d'un coffrage métallique au tour du poteau à l'aide de fers plats et de cornières. Cette méthode est généralement utilisée dans le cas d'écrasement localisé et elle peut être associée à une injection. Le poteau est ensuite recouvert par un enduit de ciment.



Fig.III.32 : Renforcement de poteaux au moyen de profiles métallique

- **Gainage en béton armé (chemisage)**

Le poteau est enfermé dans une gaine de béton. Le gainage se fait sur une partie des parements ou sur la périphérie du poteau. Le dernier cas est conseillé si l'espace tout autour du poteau est suffisant. La mise en place du béton peut être réalisée par coulage ou par projection. La préparation du support (béton et acier) constitue une opération primordiale pour obtenir une bonne réparation. Le béton détérioré et les aciers corrodés doivent être enlevés.

Le béton est mis en place par vibration, le diamètre des granulats est fonction de l'espace disponible [25].

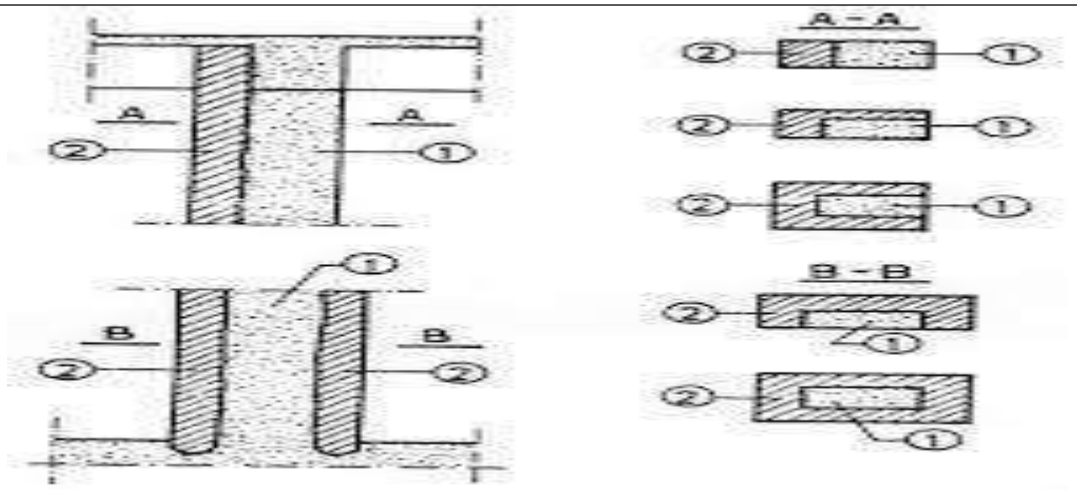


Fig.III.33 : Gainage des cotes au moyen d'un manchon de colonne

3. Préparation des surfaces

La surface de l'ancien béton qui doit adhérer å la partie nouvelle doit être rendue rugueuse par piquage. Il faut enlever tout béton endommagé et ensuite procéder au nettoyage à grand jet d'eau pour éliminer toutes les poussières.

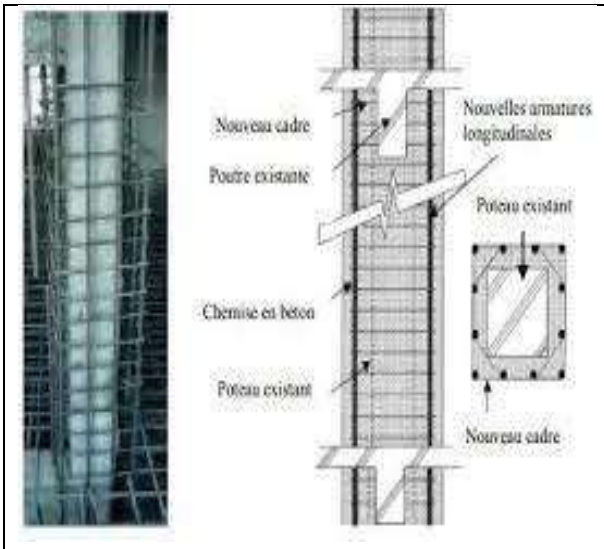


Fig.III.34 : Méthode Préparation des surfaces



Fig.III.35 : Renforcement des poteaux enacier

4. Bétonnage.

Le béton peut ētre mis en place par déversement par trèmie ou tout autre procédé approuvé. 'Vu l'espace réduit de la gaine, la granulométrie du béton doit être étudiée pour permettre un passage facile entre les armatures.

L'utilisation de la technique de gainage impose la vibration du béton.

Quelques cas de gainages qu'on pourrait rencontrer sont illustrés

III.6.2.2 Renforcement des poutres :

Les techniques les plus utilisées dans le renforcement des poutres sont :

1) Gainage :

Le gainage peut être réalisé uniquement sur la retombée de la poutre comme il peut envelopper toutela poutre.

Les nouveaux matériaux doivent avoir une résistance supérieure ou égale à celle des matériaux existants. Les aciers longitudinaux seront ancrés dans les poteaux tout en respectant les critères de dimensionnement et d'espacement [25].

2) Gainage en béton armé.

Dans le cas des poutres, la gaine peut être réalisée sur une, trois ou quatre faces (Fig III.35) Le béton armé de la gaine doit être conforme aux critères suivants :

- Les résistances des nouveaux matériaux ne doivent pas être inférieures à celles des anciens matériaux de la poutre.
- L'épaisseur de la gaine ne doit pas être inférieure à 4 cm dans le cas de béton projeté et 8 cm dans le cas de béton coulé.
- Les aciers de la gaine doivent être anerés dans le poteau.
- Dans les zones nodales don't la longueur est égale à 4 fois la hauteur de la section de la poutre, l'espacement des aciers transver-saux ne doit pas dépasser le quart de la hauteur de la section.



Fig. III.36 : Renforcement des poutres en acier

3) La précontrainte extérieure :

Elle est utilisée dans le cas d'apparition de désordres local ou dans le cas d'une forte sollicitation localisée d'ancrage des câbles est réalisé soit directement sur la structure ou l'aide des bossages d'ancrages.

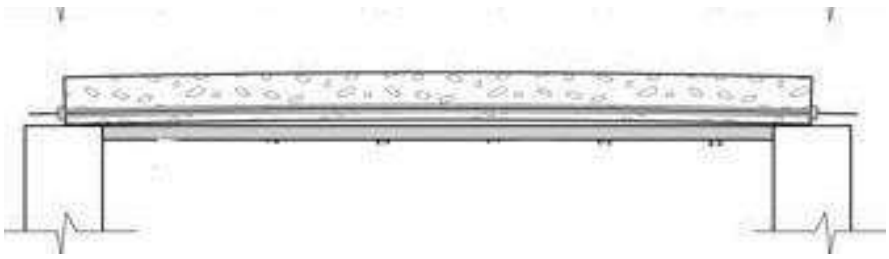


Fig. III.37 : La précontrainte extérieure d'ancrage des câbles

3) Restitution de la capacité portante vis à vis des charges verticales :

L'utilisation de tiges métalliques et de cadres extérieurs permet de restituer à une poutre sa résistance à l'effort tranchant. Les cadres peuvent être verticaux ou inclinés [23].

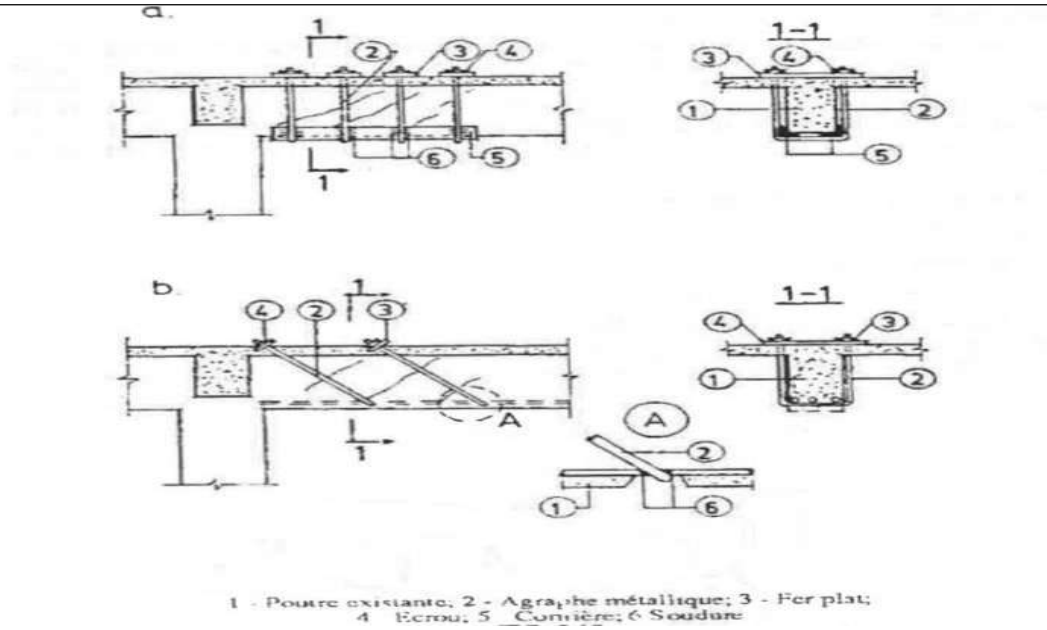


Fig.III.38 : Restitution de la capacité portante vis à vis des charges verticales

III.6.2.3 Renforcement des planchers :

Les planchers sont conçus d'abord pour reprendre les charges verticales. Cependant ils jouent un rôle très important dans la structure comme éléments de contreventement. Pour cela, ils doivent avoir la résistance et la rigidité nécessaires. Les dommages que subit un plancher sont en général localisés au niveau des ouvertures où il y a des concentrations d'efforts sismiques. La réparation intervient après les dommages subis tandis que le renforcement est réalisé quand le plancher s'avère mal dimensionné ou pour augmenter sa rigidité dans les zones où il y a passage de nouveaux murs.

Pour les réparations locales, on peut utiliser l'injection des résines époxy ou les coulis de ciment pour colmater les fissures.

Il peut être aussi proce béton écrasé dans les zones endommagées (Fig.III.38).

- La dégradation affectant les planchers est localisée au niveau des ouvertures.
- Les solutions préconisées sont fonction de l'importance des dégâts relevés.

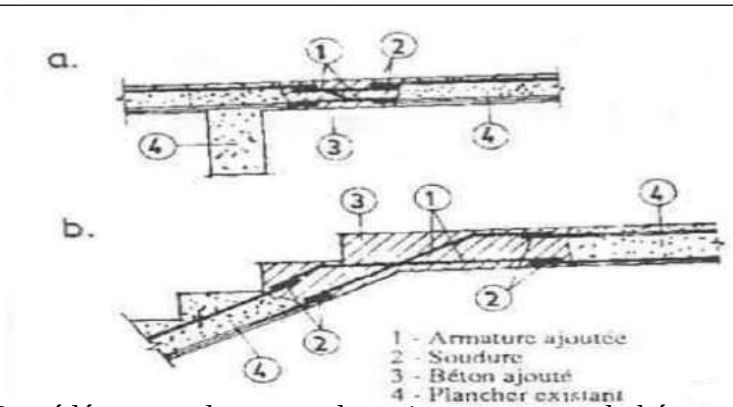


Fig. III.39 : Procédé au remplacement des aciers rompus et du béton ;utiliser l'injectiondes résines

1. **Injection** :

L'injection est conseillée dans le cas où le plancher est simplement fissuré (utilisation des résines époxydes).

2. **Gainage** :

Le gainage se fait sur toute la surface du plancher (au-dessous par projection ou au-dessus par coulage), Le support doit être préparé convenablement et les aciers nouveaux sont liés à la structure existante en respectant les conditions de dimensionnement et

d'espacement [25].



Fig.III.40 : Renforcement de plancher de profiles métallique



Fig.III.41 : Renforcement de plancher par béton arme

III.6.2.4 Renforcement des murs en maçonnerie :

Les murs en Maçonnerie peuvent être fissurés, disloqués ou entièrement endommagés. Parmi les méthodes de réparation, nous citons :

- Injection et restitution des éléments dégradés
- Réparation des intersections de murs : par des briques ou des moellons de liaison,par introduction de fers plats pour la couture des fissures
- Gainage
- Précontrainte extérieure [23].

III.6.2.4 Renforcement des fondations :

La réparation et/ou le renforcement des fondations est une opération très délicate ettrès coûteuse vu ses conditions d'exécution dans le sol.

- Renforcement des semelles par augmentation de la surface de contact avec le solen réalisant une ceinture rigide encadrant la semelle isolée.

Renforcement par l'introduction de nouvelles fondations suite à l'insertion de nouveaux éléments dans la superstructure (voile ou élément similaire.

Il faudra veiller soigneusement à la réalisation des liaisons entre les fondations existantes et les nouvelles [23].



Fig.III.42 : Renforcement de fondations existantes

III.6.2.5.1 Renforcement par l'introduction de nouvelles fondations.

L'introduction de nouvelles fondations est nécessaire dans le cas où l'ouvrage est renforcé par des murs en béton armé ou par des éléments similaires (Fig.III.43 et.III.44). Une attention particulière doit être portée sur l'incorporation de la semelle existante dans la nouvelle structure de fondation et sur le comportement de l'ensemble. L'ancrage des aciers principaux

du mur dans la fondation est très important. Il peut être réalisé comme indiqué sur. [23]

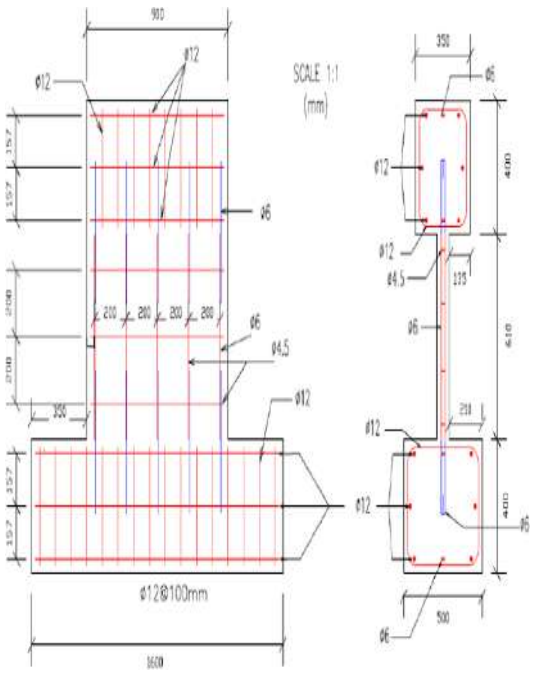


Fig. III.43: Renforcé par des murs enbéton armé



Fig. III.44: Renforcement par l'introduction de nouvelles fondations

III.6.3 Caractéristiques des produits de renforcement :

Les produits de renforcement utilisés doivent posséder vis-à-vis d'un béton dégradé les qualités suivantes :

a) Présenter une compatibilité avec le support béton à savoir :

- Un retrait limité pour des liants hydrauliques employés, ce phénomène qui apparaît dèsla prise et au durcissement final, et de manière à éviter L'apparition de fissures ou un décollement de l'interface.
- une adhérence au béton support et une résistance au moins égale à la Résistance du béton renforcé.
- une adhérence aux armatures métalliques initiales ou rajoutées.
- des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaire ou Supérieures à celles du béton de support

b) présenter une durabilité par rapport aux conditions environnementales :

- les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures à prendre en compte pour l'environnement sont :

- ✓ les chlorures
- ✓ les sulfates
- ✓ le gaz carbonique

- comme tout béton réalisé selon les règles de l'art, les produits de renforcement doiventprésenter une bonne tenue vis-à-vis des agents agressifs :
- La résistance à la carbonatation, c'est-à-dire à la pénétration du gaz carbonique contenu dans l'air qui, lorsqu'il entrera en contact avec les armatures, provoquera leur corrosion. Cette caractéristique est étroitement liée, outre à l'aspect formulation du produit de renforcement, à la qualité de sa mise en œuvre, et à la mise en place.
- La résistance aux cycles de gel et dégel, est indispensable, ainsi pour de tels produits de renforcement à base de liant hydraulique, une exigence d'un entraîneur d'air s'avère nécessaire [30]

III.6.4 Principales techniques de renforcement

- Renforcement par application de matériaux composites (fibre carbone, verre...) ou par chemisage en béton armé
- Renforcement par remplissage des portiques
- Renforcement par chemisage d'un mur existant à l'aide de treillis soudé et béton projeté, ou bien par application de tissus en fibre de carbone qui se raccordent au travers des planchers par l'intermédiaire de mèches de liaison. La liaison avec les fondations se fait avec des mèches d'ancrage
- Renforcement par engravures d'armatures dans un mur [30]

1- Projection du béton :

Cette technique est largement répandue, tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisantes, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défaillantes, et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'aciers. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide.

Le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des Ouvrages car cette voie permet de recueillir un béton très compact.

Cette projection est effectuée à grande vitesse de lancement, assurant ainsi :

- Une pénétration en grande profondeur dans les pores du support à renforcer.

- Une bonne adhérence de l'interface

Si les dégradations sont profondes, on procède au préalable à un repiquage ou une démolition des surfaces de béton, sinon on fait appel au procédé de sablage pour le cas des dégradations superficielles. La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égale à celles des matériaux d'origine des ouvrages. Dans la mesure du possible, la lance de projection doit être tenue perpendiculairement à la surface à traiter, et à une distance moyenne de 1.2m ,en faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier, et obtenir ainsi une couche compacte.

La projection verticale vers le bas n'est pas recommandée, ainsi qu'un talochage n'est pas souhaité. [30]



Fig.III.45: Renforcement au moyen de béton projeté

2- Description des deux méthodes :

- **Projection par voie sèche :**

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse (eau- fines -ciment) que pour les gros granulats. Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaississement, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne :

- un serrage énergique dû à la grande vitesse de projection.
- une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contactde la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toutefois les normes préconisent un dosage pas moins de 280 kg/m3 de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPA

- **Projection par voie mouillée :**

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application. Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton projeté par vois sèche,

il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm .

- **Avantages des deux méthodes :**

a) Par voie sèche **:**

- possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm)
- Un dosage relativement faible en ciment.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.

b) Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.

- **Inconvénients des deux méthodes :**

a) Par voie sèche :

- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.
- Production de poussières.

b) Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.
- Nécessité d'accélérateurs de prise

3 - Chemisage des sections de béton

Le procédé classique dont l'efficacité a été largement vérifié par l'expérience, consiste chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en œuvre d'une épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton, auto compactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle.

La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy, s'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage.

Lorsqu'il n'est pas possible de faire un chemisage complet des éléments pour le cas des façades, il faut recourir à d'autre procédés : renforcement par plaques métalliques ou bien l'épaississement de l'élément en béton sur deux faces opposées Les éléments de renfort doivent êtres ancrés dans le béton primitif : soit par boulonnage pour le cas des platines métalliques, soit par ancrage pour le cas de béton additif.

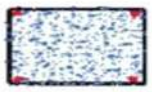
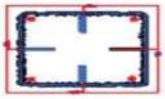
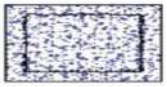
 1- nettoyage et sablagedu support initial de béton du poteau	 2- Ancrage et scellement dechevilles pour fixation d'armatures additionnelles.	 3-scellement d'armatures d'ancrage sur le plancher en amont du poteau
 4-scellemnt d'armatures d'ancrage sous le plancheren aval du poteau.	 5-étalage d'une couche de résine sur la surface de béton primitif.	 6-coulage de l'enveloppe en béton riche et fluide.

Fig. III.46 : Différente étape de renforcement des poteaux ou moyen d'une enveloppe en béton arme (chemisage). [30]

❖ **Les inconvénients de chemisage :**

Les inconvénients de renforcement par un béton additionnel sont résumés comme suit :A noter que le renforcement d'un élément par l'augmentation de sa section de béton (chemisage), influe directement sur la masse de la structure, comparativement aux autres moyens de renforcements, qui se caractérisent par leur légèreté relative

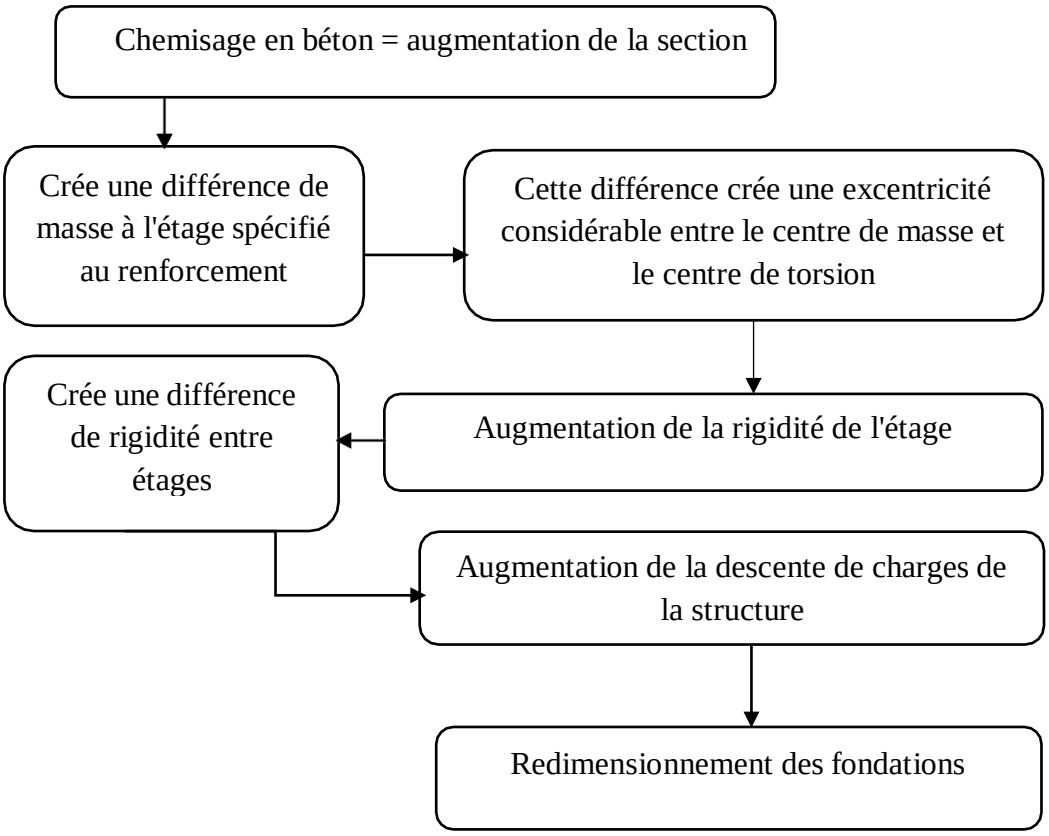


Fig. III. 47: Organigramme du processus de chemisage en béton arme [30]

4 - Renforcement par gainage métallique :

Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux ; l'union de la platine à la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage. Du point de vue transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage.

- **Les matériaux utilisés :**

-La colle : c'est une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence sur acier ainsi que sur le béton. Le film résiduel de la colle doit être de faible épaisseur et d'une rigidité suffisante pour transmettre intégralement par adhérence les efforts à la tôle. Cette rigidité étant réduite par une augmentation de température, des précautions spéciales doit être prises dans le cas des structures soumises à des températures élevées.

La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais elle doit transmettre les efforts.

-La tôle : les tôles d'aciers sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support.

Si des sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de superposer des tôles plutôt que d'augmenter l'épaisseur .dans le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé (exemple : ressorts à lames des camions).

5 - La mise en œuvre des plats collés :

Les plats destinés à être collés doivent être traités par sablage pour donner à la surface une rugosité supérieure. Après l'étape qui suit le sablage, les plats doivent être revêtus d'un produit de protection, soit un type de vérins, soit un primaire époxy de même nature que la colle, capable d'assurer la protection temporaire de la tôle et son adhérence ultérieur à la structure (compatibilité avec les colles envisagées).

Le sablage est une opération difficile à réaliser puisqu'il est conditionné par les facteurs atmosphériques.

Les tôles doivent être transportées avec soin de façon à ne pas entraîner de défauts de planéité, de rayure ou de choc. La préparation du support exige les deux actions d'éliminer les parties dégradées et de rendre le support plan.

La reprise de la planéité du support nécessite un ragréage au mortier de résine ; les produits de ragréage doivent être compatibles avec les produits d'encollage.

D'une façon générale les surfaces à ragrées ne doivent pas représenter plus de 20% de la surface à encoller.

Les plats doivent être protégés en fin des travaux contre la corrosion avec une peinture de type époxy compatible avec le primaire de protection provisoire.

Dans le cas où la structure doit satisfaire à des exigences de stabilité au feu, une protection des plats doit être prévue pour éviter que le film de colle ne dépasse une température jugé critique. Cette protection peut être réalisée par l'utilisation de produit isolant. Il est à noter que le renfort avec les platines en acier présente des inconvénients tels :

- le découpage des platines se fait généralement en atelier.
- les longueurs sont limitées.
- le transport n’est pas toujours aisé.
- l’étaiement des éléments structuraux est parfois nécessaire.
- la durabilité vis-à-vis de la corrosion et la fatigue pose problème. [30]

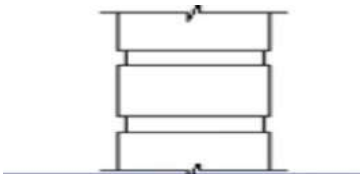
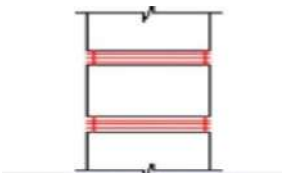
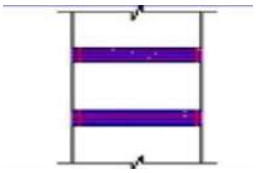
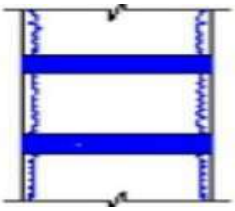
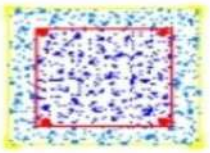
 1- Création de rainures autourdu poteau	 2-Installation de bandes métallique	 3- Enrobage des bandes avec un mortier
 4- Repiquage de l'enrobage du béton jusqu'à l'apparition des armatures	 5- Installation gainage métallique	 6-remplissage du vide avec un béton maigre et plastique.

Fig. III 48 : Différents étapes de renforcement d'un poteau par gainage métallique [30]

6 - Le renforcement au moyen de profilés métalliques :

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire.

Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes.

L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de cheville ou tiges ancrées.

L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place.

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage.

Il recommandé d'envisagé des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles.

7 - Le scellement d'armatures pour béton armé :

Les scellements d'armatures dans le béton armé sont habituellement utilisés pour résoudre les problèmes d'oublis d'armatures en attente, l'extension d'un ouvrage ou bien dans

le but d'assurer la continuité d'éléments préfabriqués. Les scellements sont réalisés à l'aide de mortier à base de liants hydrauliques ou de résines dont les constituants du mélange sont pré-dosés. Dans ce dernier cas, le scellement peut être réalisé à volume prédéterminé (scellement chimique obtenu par broyage d'une ampoule prêt à l'emploi), ou à volume à la demande comme les scellements chimiques réalisés par mélange d'une résine et durcisseur par l'intermédiaire d'une buse et d'un pistolet ou bien à partir d'un kit.

Il est important de signaler qu'il existe une certification concernant les produits spéciaux pour construction en béton, dont les produits de scellement et de calage, et a pour but de garantir l'aptitude à l'emploi du produit de scellement dont notamment ses performances minimales, ayant reçu un avis favorable d'un contrôleur technique. [30]

8 - Renforcement par une précontrainte additionnelle :

Il peut être envisagé d'appliquer à des ouvrages existants des efforts de précontrainte en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Cette technique présente l'avantage d'éviter les efforts concentrés importants sur la structure, elle est bien adaptée aux structures minces et peut ferraillées. Le câble additionnel étant le plus souvent situés à l'extérieur du béton, il peut y avoir un risque d'instabilité d'ensemble : le flambement. On prévient ce risque en prévoyant aussi des fixations transversales qui s'opposent à une mise en vibration de ces derniers. La conception et le calculdoivent être en conformité avec les règlements en vigueur.

L'étude doit porter sur l'influence de l'effet des efforts appliqués localement sur des structures ou éléments structurels non conçus à l'origine pour les recevoir.

Les tracées des armatures de précontrainte additionnelle peuvent être rectilignes ou polygonaux : Le tracé rectiligne simple et facile à mettre en œuvre, améliore peu la résistance au cisaillement (fig.III.49).

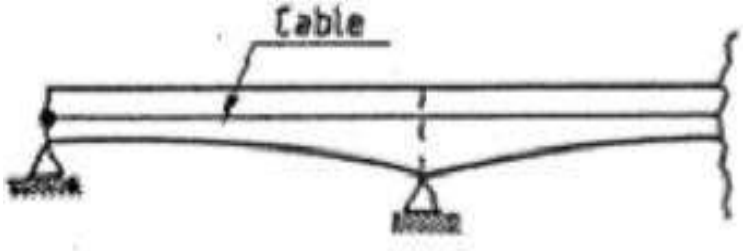


Fig. III 49 : un trace rectiligne d'une précontrainte.

Le tracé polygonal est plus efficace que le tracé précédent, mais il exige la construction de déviateurs qui ont l'inconvénient d'augmenter les pertes par frottement lors de la mise en tension des câbles (fig.III.50).

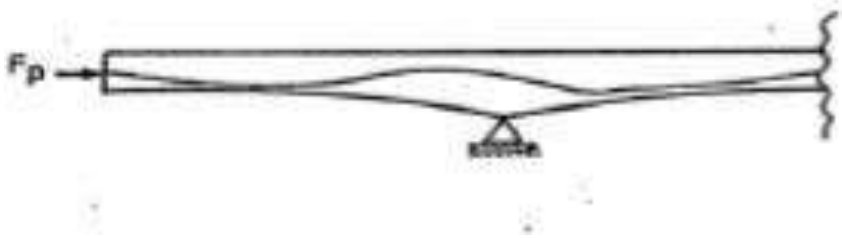


Fig. III 50 : trace polygonale d'une précontrainte

Les efforts complémentaires appliqués à la structure sont introduits en deux points, aux extrémités de l'armature (cas de tracé rectiligne), et de même pour le deuxième tracé ils sont introduits aussi en certains points de leur courbure ou se trouvent les déviateurs

Il se peut qu'une précontrainte éventuelle complémentaire soit disposée à l'intérieur du béton dans des gaines prévues à cet effet lors de la conception de l'ouvrage (cas assez rare), soit extérieurement du béton dans l'âme en cas de poutres pleines.

9 Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres) :

Un matériau composite est l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites sont composés de fibres noyées dans une matrice. Fig.III.51

Une fibre est constituée de plusieurs filaments, élémentaires doit le diamètre est de l'ordre de 5µm. La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à rupture les lois de comportement sont de type ''élastique fragile''.

Le comportement mécanique des matériaux composite dépend du type de fibres et de type des matrices, qui doivent être compatibles entre eux.

La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble, et permet d'assurer le collage des fibres entre elles et transférer les efforts extérieurs à celles-ci. De plus la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants Par ailleurs elle protégé les fibres en les isolant de l'humidité de l'oxydation et des agents agressifs Chimiques.

Les avantages du renfort au moyen de matériaux composites offrent :

- une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- une résistance 10 fois plus optimale que les platines.
- un poids de l'ordre de 800gr le mètre carré (épaisseur d'environ 1mm)
- une mise en place et un découpage à la forme désirée
- Non sensibilité à la corrosion et d'autres attaques chimiques
- Meilleure résistance au feu et à la fatigue [30]



Fig.III.51 : confinements d'un poteau au moyen de PRFC

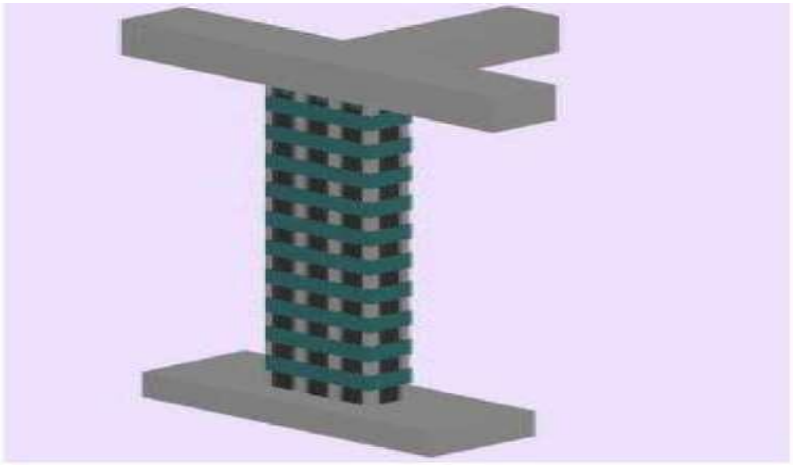


Fig.III 52 : Renforcement de poteau : dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion et dans le sens Radial (confinement) vis-à-vis la compression. [30]

III.7 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 renforcement des superstructures et des infrastructures en béton (armé ou précontraint).

Pour que l'ouvrage réponde à l'évolution des besoins des propriétaires non prévues à l'origine et pour éviter une réapparition rapide de nouvelles pathologies semblables, il impératif de procéder au renforcement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

A travers ce thème, Renforcement des structures en béton armé dégradées par l'augmentation des charges et facteurs environnementaux, une attention particulière de dégradation du béton est donnée aux désordres causés par la corrosion de l'acier, ainsi que les causes de dégradation liées à l'environnement et aux attaques mécaniques, chimiques et physiques du matériau en béton armé.

Le défaut de capacité portante concerne, très souvent, à la fois les armatures de béton armé et la section de béton. Dans un tel cas, si la solution de démolition-reconstruction après étude n'a pas à être retenue, il peut être envisagé d'augmenter à la fois la section des armatures et celle du béton. Dans cette étude, nous sommes principalement intéressés aux causes et aux désordres de la dégradation, ainsi qu'aux techniques et méthodes de renforcement des structures en béton armé.

Chaque procédé ou traitement doit comporter quatre étapes allant de l'évaluation de la structure ; à la compatibilité entre les procédés et les exigences diverses en passant par la nature et causes des éventuelles dégradations, notamment le choix entre les solutions qui est trés important pour éviter l'échec de réparation ou de renforcement.

Les méthodes de réparation et de maintenance telles que la réparation traditionnelle, revêtements d'imprégnations, inhibiteurs de corrosion, béton projetė et plus particulièrement les techniques électrochimiques représentent des moyens efficaces pour protéger l'acier des structures. Plusieurs méthodes de protection des ouvrages en béton armé contre les éclatements et la délamination du béton engendrés par la corrosion des armatures sont préconisées et chaque cas a sa spécifité et une étude particulière.

L'expertise des ouvrages est une discipline qui se base sur une profonde connaissance sur le comportement des matériaux, c'est donc un art qui mérite la même valeur que de celui de construire. Il doit être intégré dans la formation pour reconnaître et éviter les erreurs touchants les structures.

REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES

[1] **BOUILLETTE J.P**.Protection des constructions en acier contre la corrosion, traité Construction1983.

[2] **MEHTA, P.K. ET GERWICK, B.C.,** Concrete structures, properties and materials, Concrete International,1982.

[3] **Grégoire & TCHOUMI Samuel**, Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures -NDZANA A KONGO

[4] **Maizi Ibtissam**, Benjoudi Mouslam, mémoire de master II «réhabilitation de structures en béton armé», université 08 Mai 1945 Guelma, Année 2013.

[5] Documents scientifiques et techniques «Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion», Novembre 2003.

[6] **Abde Rahman Soufi,** « Etude de la durabilité des systèmes béton armé : mortiers de réparation en milieu marin», Université de La Rochelle France Année 2013.

[7] **Hicham belhannachi,** mémoire de master II «réhabilitation de structures en béton armé», université Mentouri Constantine «Durabilité des ouvrages en béton».

[8] Université de Sherbrooke GCI 714 les principe aux matériaux de réparation de surfaces «matériaux de réparation»

[9] **MEHTA,P.K**. Performance of concrete in marine environment, ACISP-65, pp. 1-20,1980

[10] **LACHAUD R., SALOMON M**., Les altérations du béton, Cahier de l'A.F.B. n° 225, octobre 1984.2252, traité Construction 1995.

[11] **LASSOUED R., OUCHENANE K. ET OUCHENANE M**, Influence de l'enrobage de béton sur la corrosion des armatures et effet de la corrosion sur l'adhérence, Colloque National : Pathologie des Constructions, Université Mentouri Constantine-25 et 26Novembre2008..

[12] **BOUILLETTE J.P**.Protection des constructions en acier contre la corrosion. C2505, traité Construction 1983.

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

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

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

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

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

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

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

[20] guide technique du STRRES FABEM7 Réparation et renforcement de structures par des armatures passives additionnelles

[21] guide technique du STRRES FABEM1Reprise des bétons dégradés

[22] guide technique du STRRES FABEM5 Béton projeté

[23] Impression de livres sur presses typographiques – Editions Universitaires, Place Ben Aknoun – Algérie

[24] B. **Kebaili, B. Redjel**. ANALYSE DU SEISME DE BOUMERDES JUIN 2003 ET REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNE. Algeria: SBEIDCO – Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing countries ENSET, October 2009.

[25] **B.Kebaili, B.Redjel**. ANAL YSE DU SEISME DE BOUMERDES JUIN 2003 ETREGLES PARASISMIQUES ALGERIENNE. Algeria : SBEIDCO – Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing countries, October2009

[26] Groupe de travail AFPS-CSTB Roger BERTULI, Philippe BISCH, Mathieu BLAS, Marc BOUCHON .Diagnostic renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme. France: AFPS-CSTB, 2013.

[27] **ZACEK, MILAN**. Vulnérabilité et renforcement .France: Les grands ateliers, Mai 2004.

[28] DAVIDOVICHI, Victor. Conception et réalisation d'hôpitaux en zone sismique. PARIS : DYNAMIQUE CONCEPT, 2007.

[29] Renforcer le bâti existant en zone sismique. l'appui du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable; et des professionnels. article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010, PARIS : Agence Qualité Construction, 2011.

[30] **Azizinamini, A., Corley. W. and Johal, P.L.S.** "Effects of transverse renforcement on seismic performance of columns." ACI Structural J., 89(4), 442-450, 1992