REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil
Spécialité : Matériaux en Génie civil

SOLUTIONS TECHNIQUES POUR LA REPARATION ET LE RENFORCEMENT DES CONSTRUCTIONS EN BETON

Présenté par

SAHARI OUBAIDA

DJENANE KHEIREDDINE

Proposé et Dirigé par

Mr.ZEMIR ISMAIL

Promotion 2020


بسم الله الرحمن الرحيم



Remerciements

D’abord, nous remercions vivement notre Bon DIEU pour L’achèvement de ce mémoire

Nos Vifs remerciements s’adressent à :

Mr : ZEMIR Ismail, notre promoteur qui nous a orientés

Et dirigé ce travail avec toutes ses Compétences

Et ses précieux conseils.

A Melle : HERIHRI Widad et DJENANE Zahia Mr : GUENDOUZ Mohamed et

Boussour Ali et ouldkhaoua younes et Dahmani islam

qui nous a suivies pendant toutenotre travail.

Enfin, à tous ceux qui ont assisté à participer de près ou loin

À l’aboutissement de ce mémoire, trouve ici l'expression.

De toute notre considération.

Dédicace 

Aujourd'hui et plus que jamais, je tiens à dédier ce modeste travail à ceux qui sont chers à mon cœur

Ma ***mère*** *que j'aime beaucoup, la chandelle qui éclaire ma vie, la source de tendresse et d'amour, qui sacrifie jour après jour pour le bonheur de ses enfants... Maman, je te dois tout ce que je suis …*

Mon ange gardien, mon cher ***PAPA***

Qui a toujours été là pour moi, à tous ses sacrifices et sa large compréhension et confiance en moi… que Dieu me le garde en vie.

A mon cher ***frère et mes chères sœurs et leurs enfants respectifs, à ma fiancé***

A toute la famille ***« DJENANE et SELLIDJ »***

Je dédie ce travail à mes à tous mes amis d'enfance, de scolarité et mes collègues de l'Université de Médéa .

A tous ceux qui m'aiment, me respectent, ceux qui ont toujours prié pour moi…

A TOUS CEUX QUI M'ONT SOUTENU ET CRU EN MOI

Kheireddine…

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

-Mon père.

-Ma mère.

-Mes frères et sœurs.

-Mes proches

-Toute la famille (SAHARI et zaidi).

-Mes collèges (mahfoudh et zoheir,walid,slimane,fares) et à tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin durant toutes mes années universitaires.

-Pour finir, je dédie ce mémoire à tous ceux qui m'aiment et à tous mes amis que j'ai connus pendant ma période d'étude

OUBAIDA

ملخص المشروع

تصمد الخرسانة في مواجهة الطقس ومرور الوقت. لكن الهياكل الخرسانيةقد تتطلب عمليات الإصلاح أو التعزيز لزيادةمدة الاستخدام أو تقديم ميزات جديدة. العديد من الحلول التقنيةمتوفرة ومتقنة ، لقد أثبتت فعاليتها وتلبيةجميع المشاكل المحتملة التي تواجه المواد أو الهياكل. هونصح باختيار الحل التقني الملائم لعلم الأمراض المراد علاجه بعدالتشخيص الكامل والدقيق للاضطرابات وأسبابها وتطورها.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة ، التشخيص ، علم الأمراض ، الإصلاح ، التعزيز

Résumé du projet

Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour prolonger leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités. De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

MOTS CLES: Béton, diagnostic, pathologie, réparation, renforcement.

Project summary

Concrete stands up to the weather and the passage of time. But concrete structures may require repair or reinforcement operations to increase their duration of use or offer new features. Many technical solutions are available and mastered, they have proven their effectiveness and meet all the potential problems encountered with materials or structures. He it is advisable to choose the technical solution adapted to the pathology to be treated, after a complete and precise diagnosis of disorders, their causes and their evolution.

KEY WORDS: Concrete, diagnosis, pathology, repair, reinforcement

TABLE DE MATIERES

Résumé……..….I

Table de matiéres……..II

Liste des figureet

tableaux……IXINTRODUCTIO

N GENERALE……...…….XIV

Chapitre I : Pathologies des structures en béton armè

problématique XVI

INTRODUCTION 1

I.1. GENERALITES SUR LE BETON 1

I.1.1 . Historique 1

I.1.2. Le béton 1

I.1.3. L'acier 4

I.1.4 Définition du béton armé : 5

I.1.5. Description des pathologies du béton armé 6

I.1.5.1. Les pathologies du béton 6

I.1.5.2. Les causes physiques de dégradation des bétons 7

I.1.5.2 Les causes chimiques de dégradation 7

I.1.5.3. Les causes mécaniques de dégradation des bétons : 11

I.1.5.4 Les autres causes de dégradation des bétons 12

I .1.6.1 types et causes des désordres du béton armé 14

I.1.6.1.1. Les poutres 14

I.1.6.1.2. Les poteaux 14

I.1.6.1.3. Les Plancher 15

I.1.6.1.4. Eléments Façade 16

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

Conclusions : 16

INTRODUCTION 17

II.1. C'est quoi un diagnostic ? 17

II.2. Le processus de diagnostic d'un ouvrage 17
II.3. les principales étapes d'un diagnostic 18
II.3.1. Visite préliminaire 18
II.3.2. Collecte des documents 19
II.3.3. Préparation de l'intervention 19
II.3.4. Inspection détaillée 19
II.3.4.1. Préparation de l'inspection 19
II.3.4.2. Inspection 20
II.3.5. Essais en laboratoire 20
II.3.6. Traitement des résultats 20
II.3.7. Commentaires et avis de réparation 20
II.4. Choix des investigations 21
II.4.1. Type de mission à réaliser : 21
II.4.3. Type de structure : 21
II.4.4. Etat de l'ouvrage 21
II.4.5. Environnement de l'ouvrage 21
II.5. Les types d'investigation 22
II.5.1. Investigations non destructives 22
II.5.1.1. Le relevé visuel 22
II.5.1.2. Méthode de l'auscultation sonique 23
II.5.1.3. Le scléromètre 24
II.5.1.4. Le relevé du ferraillage 25
II.5.1.5. Méthode échos-chocs 25
II.5.2. Investigations destructives 26
II.5.2.1. Le Potentiel de corrosion 27
II.5.2.2. Test à la carbonatation 28
II.5.2.3. Carottage d'éléments en béton armé 29

II.5.2.4. Prélèvements d'aciers 30

II.6. Rapport de diagnostic 31

Chapitre III : Durabilité et réparation des ouvrages en béton

Conclusion 31

III.1. Durabilité de la réparation 33

III.1.1. Définition d'une réparation durable 33

III.2. Origines et conséquences des désordres : 33

III.2.1. Notions de la durabilité : 33

III.2.2. Facteurs affectant la durabilité du béton 34

III.2.1.1 Facteurs reliés à la conception de l'ouvrage 35

III.2.1.2. Facteurs reliés à la mise en œuvre de l'ouvrage 35

III.2.1.3. Facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton 36

III.2.1.4. Facteurs reliés à l'entretien de la structure 36

III.3. Mécanisme de dégradation du béton 36

III.3.1. Les différents agents agressifs 36

III.3.2. Mode d'action des agents agressifs 37

III.4. Les altération des aciers 38

III.4.1. La carbonatation 38

III.4.1.1. Les mécanismes de la carbonatation 38

III.4.1.2. Conséquences de la carbonatation 39

III.4.1.3. Les causes de la carbonatation 41

III.4.1.4. Paramètres influent sur la cinétique de carbonatation 42

III.4.2. La corrosion 43

III.4.2.1. Aspect physico-chimique de la corrosion 44

III.4.2.3. Formes de la corrosion 45

III.4.2.4. Facteurs influençant la corrosion des armatures 45

III.4.2.6.Enrobage 46

III.4.2.7. Température 46
III.4.2.8. Teneur en chlorure 46
III.4.2.9. Oxygène 46
III.4.2.10.Agents agressifs autres que les chlorures 47
III.4.2.11. Réactions de corrosion des aciers dans le béton 47
III.4.2.12. Les causes de la corrosion 50
III.4.2.13. Les conséquences de la corrosion 50
III.5. Les altération des bétons 51
III.5.1. Fissure 51
III.5.2. Lézardes 52
III.5.3. Retrait 53
III.5.4. Faïençage 55
III.5.5. Epaufrure 56
III.5.6. Lichen 56
III.5.7. Le ressuage 56
III.5.7.1. Type de ressuage 57
III.5.7.2. Les raisons du ressuage des bétons 58
III.5.7.3. Dispositif de mesure du ressuage 58
III.6.1. Réparation 58
III.6.1.2 le ragréage 58
III.6.2 Réparation des structures en maçonnerie et en pierre 60
III.6.3 Réparation des fissures des structures en béton et en pierre 62

Chapitre IV: Réparation et Renforcement des ouvrages

-INTRODUCTION 64
IV.1. Définitions 64
IV.1.1. La réparation 64
IV.1.2. Le renforcement 64

IV.2. Préparation d'une opération de réparation ou de renforcement 64
IV.3. Matériaux de renforcement et de réparation 66
IV.3.1. Les matériaux de réparation 66
IV.3.2. Les matériaux composite 66
IV.3.2.2. Caractéristiques générales 68
IV.3.2.3. Les Matériaux De Renfort 69
IV.3.3. DIFFERENTS TYPES DE FIBRES UTILISEES 70
IV.3.3.1. Les fibres 70
IV.3.3.2. Les fibres métalliques 70
IV.3.3.3. Les fibres minérales 71
IV.3.3.3.2. Les fibres de carbone 72
IV.3.3.4. Les fibres organiques 73
IV.3.3.4.1. Les fibres d'Aramide 73
IV.4. Types et techniques de réparation /ou de renforcement 74
IV.4.1. Introduction 74
IV.4.2. Méthodes de renfort 74
IV.4.3. Protection des ouvrages en béton armé 75
IV.4.3.1. Reconstitution de l'enrobage 75
IV.4.3.1.1. Principes et définitions 75
IV.4.3.1.2. Elimination des zonesdégradées 76
IV.4.3.1.4. Protection des armatures 78
IV.4.3.1.5. Réfection des bétons 79
IV.4.4. Imprégnation 79
IV.4.4.1. Principes et définitions 79
IV.4.4.2. Classification des produitshydrofuges 80
IV.4.4.3. Procédure de choix etd'application 80
IV.4.4.4. Diagnostic 80

IV.4.4.5. Choix du produit et essai préliminaires 80
IV.4.4.6. Procédured'application 81
IV.4.5. Renforcements et réparation par Matériaux de composite 81
IV.4.5.1. Mise en œuvre par enroulement filamentaire 81
IV.4.5.2. Mise en œuvre par stratification directe de tissus sec 82
IV.4.5.3. Le collage de plaques composites 83
IV.4.5.4. Renforcement des poteaux 84
IV.4.5.5. Renforcement des poutres 85
IV.4.5.6. Renforcement des dalles 85
IV.4.5.7. Renforcement des murs 86
IV.4.5.8. Avantages des matériaux composites 86
IV.4.6. Béton projeté 87
IV.4.6.2. La projection par voie humide ou mouillée 88
IV.4.6.3. La projection par voie sèche 88
IV.4.6.5. Domaines d'application du béton projeté 89
IV.4.6.6. Avantages et inconvénients du béton projeté 90
IV.4.7.1. Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle 91
IV.4.7.2. Les différents tracés de la précontrainte additionnelle 92
IV.4.8. Tôles d'acier collées 93
IV.4.8.1. Avantages et inconvénients des tôles collées: 95
Conclusion 95

Chapitre V : Etude de cas

V.1. OBJET DU RAPPORT : 97
V.2. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE : 97
V.3.CONSTATATION DES DESORDRES : 98
V.4 INTERPRETATION DES DESORDRES 103
V.5- Les solutions proposées 103

V.5.1. Poteaux. 103

V.5.2. les murs en maçonnerie 104

V.5.2.1-Pour les fissures verticales 104

V.5.2.2-Pour les fissures inclinées 106

V.5.3-Cas Eclatement 107

V.5.4.Cas de dégradation : Epaufrures. Désagrégation 108

V.6.RECOMMANDATIONS TECHNIQUES 110

V.7 CONCLUSION 111

Conclusion générale 113

Bibliographie……..114

Liste des tableaux

TableauII-1. Résultats d'essais d'auscultation sonique des bétons-(CEBTP)……..……27

Tableau IV-1. Exemples de matériaux composites……...…71

Tableau IV -2. Caractéristiques des fibres de renfort……...…73

Tableau IV-3. Avantages et inconvénients du béton projeté par voie sèche……...…94

Tableau IV- 4. Avantages et inconvénients du béton projeté par voie mouillée……..……95

Tableau IV -5.Avantages et inconvénients des tôles collées……..……99

Liste des figure

Figure –I-1 . Composition du Béton 1

Figure –I- 2. préparation du béton 2

Figure –I- 2. préparation du béton ……3

Figure I- 4 . L'armature du Béton 4

Figure I-5 . Le Béton armé 6

Figure I-6 . Organigramme des différentes de détérioration du béton 6

Figure I-7. réactions alcalis-granulats 8

FigureI-8. Pathologie des pieux due à l'attaque sulfatique (eaux agressives) 9

Figure I-9. attaques sulfatiques 10

FigureI-10. lixivtion du béton 10

Figure I-11. Agression du béton par activité des chlorures..... 10

Figure I-12 . Attaques acides..... 11

FigureI-13. Délamination du béton 11

Figure I-14 . Les épaufrures 13

Figure I-15 . Ségrégation des éléments de béton 13

Figure I-16 . Fissures probables affectant la poutre 14

Figure I-17 . Fissures probables affectant les poteaux. 15

Figure I-18 . Fissures probables affectant les plancher. 15

Figure I-19. Fissures probables affectant les Murs 16

Figure II- 1 . Schéma du choix d'investigation 21

Figure II- 2 . Schéma des investigations non destructives 22

Figure II-3 . L'auscultation sonique des bétons 24

Figure II .4 . Scléromètre 25

Figure II-5 . détection par fenêtres et résultats 25

Figure II-6. Test Choc-Echo avec appareil Olson's NDE 360 26

Figure II-7 . Schéma des investigations destructives 27

Figure II-8 . Mesure du potentiel de corrosion 28

Figure II-9 . graphique enrobage-carbonatation 28

Figure II-10 . Carbonatation sur carotte 29

Figure II-11 . Carottage 30

Figure II-12 . Prélèvement d'aciers 31

Figure III- 1 . phénomène de la carbonatation. 38

Figure III- 2 . schéma de la carbonatation 41

Figure III- 3 . Les phase de carbonatation 42

Figure III- 4 . Progression du front de carbonatation. 43

Figure III-5 . corrosion bar les temps. 45

Figure III- 6 . les états de corrosion. 49

Figure III- 7 . corrosion de l'armature 49

Figure III- 8 . Processus de corrosion. 50

Figure III.9 . Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé. 51

Figure III-10 . Fissure de béton 52

Figure III- 11 . lézardes 53

Figure III-12 . phénomène de faïençage 55

Figure III- 13 . Epaufrure dans construction. 56

Figure III- 14 . Lichen sur la structure. 56

Figure III- 15 : ressuage de béton..... 57

Figure III- 16: Dégagement des armatures..... 59

Figure III- 17: Application manuelle de mortiers 60

Figure III- 18: Réfection d'un mur mal harpé [16]..... 61

Figure III- 19 : Principe d'un tirant 61

Figure III-20: Elargissement et calfeutrement des fissures. 62

Figure IV- 1 : les différents types de composites. 67

Figure IV-2: Les principaux matériaux de renfort 69

Figure IV-3 : Quelques formes de fibres d'acier..... 70

Figure IV-4: Fibres de verres 71

Figure IV-5: Fibres de carbones..... 72

Figure IV- 6: Fibres d'Aramide hachées et en files 73

Figure IV-7: Reconstitution de l'enrobage 75

Figure IV-8: piquer les parties éclatées..... 76

Figure IV -9: Nettoyage des surfaces..... 77

Figure IV- 10 : Adjonction d'armatures complémentaires 77

Figure IV-11 : Protection des armatures 78

Figure IV-12: Action d'un produit hydrofuge 80

Figure IV-13 : Les principes de l'enroulement 82

Figure IV-14: Mise En Œuvre Par Stratification Directe..... 83

Figure IV-15 : Procède Par Collage De Plaques (SIKA, 1996). 84

Figure IV- 16 : Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites. [19]..... 84

Figure IV- 17: poutres en BA renforcées par matériaux composites..... 85

Figure IV- 18 : tablier de pont en BA renforcé par matériaux composites..... 85

Figure IV- 19 : Mur en BA renforcé par matériaux composites 86

Figure IV-20 : béton projeté..... 87

Figure IV-21 : projection par voie humide..... 88

Figure IV-22 : projection par voie sèche..... 89

Figure IV-23: Les techniques de projection. (a) : par voie sèche, (b) : par voie humide …….89

Figure IV- 24 : précontrainte additionnelle..... 92

Figure IV- 25 :le tracé rectiligne..... 92

Figure IV- 26 : Traces Rectiligne..... 92

Figure IV- 27: le tracé polygonal..... 93

Figure IV- 28: plaques d'acier collées..... 93

Figure IV-29 : Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite..... 94

Figure V-1 :Bloc principal..... 97

Figure V-2 :Vue d'ensemble des locaux extérieurs pour personnel et maintenance. 97

Figure V-3:Traces d'infiltration au droit de la verrière au niveau de la cuisine du bloc central accompagnées de corrosion des cornières supportant les carreaux de verres…….....…99

Figure V-4 : Perte d'enrobage constatée en sous face du palier de repos en béton armé de l'escalier extérieur coté piscine mettant en évidence des armatures corrodée..... 99

Figure V-5 :Perte d'enrobage constatée au droit du linteau en béton armé de la piscine extérieure mettant en évidence des armatures corrodées..... 100

Figure V-6 :Par ailleurs, nous avons constaté d'importantes dégradations affectant principalement plusieurs éléments porteurs notamment les poteaux, les voiles, les poutres et les dalles pleines..... 100

Figure V-7 : Eclatement d'enrobage des poteaux mettant en évidence la corrosion très avancée des armatures longitudinales et transversales..... 100

Figure V-8-: Fissuration du dallage sur le contour du bassin en béton armé…….101

Figure V-9 : Fissuration du mur en brique creuse surmontant la structure extérieure de la piscine. Ce mur a été rajouté et réalisé sans raidisseurs verticaux et horizontaux pour servir de support aux éléments métalliques porteurs de la couverture de la piscine..... 101

Figure V-10 :Eclatement de béton d'enrobage et fissures verticales le long des armatures longitudinales du poteau extérieur (foyer personnel)..... 101

Figure V-11 :Perte de masse et chute partielle du béton d'enrobage de la sous face de la poutre de l'espace dépôt, mettant à nu des armatures fortement corrodés..... 102

Figure V-12 : Fissures constatées au niveau du fond de la piscine dues probablement à un affaissement..... 102

Figure V-13 : Dégradation du revêtement mural en pierre taillée, bleue revenant à la partie surélevée du voile périphérique du bassin……..……102

Figure V-14- : Chemisage en béton armé de poteau..... 104

Figure V-15: Réparation de fissure verticale à l'aide des cavaliers. 105

Figure V-16-: Gainage du mur fissuré (vue deface). 106

Figure V-17-: Gainage du mur fissuré sur les deux faces ……..……106

Figure V-18:Gainage du mur fissuré sur une face……106

Figure-V19- : Réparation de fissure inclinée par la réalisation des potelets en béton armé .. 107

Figure V-20-Eclatement..... 107

Figure V-21- Epaufrures. Désagrégation 108

Figure V-22- : réparation Epaufrures. Désagrégation ……..110

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est aujourd'hui le matériel le plus utilisé dans le monde, il s'agit de l'élément primordiale pour la construction des logements, écoles, hôpitaux et autres infrastructures.

Aujourd'hui, de nombreux ouvrages exposés aux diverses agressions ou sollicitations car lebéton durci comme tous les autres matériaux connaît de multiples altérations, qui diminuentleurs caractéristiques dans le temps. D'une façon générale, on peut classer les dégradationsselon leurs origines où on a des causes d'ordre chimiques (carbonatation, corrosion…),d'ordre physique (cycle gel - dégel, action du retrait …) et d'ordre mécanique (Surcharge,séisme, explosion, incendie…). Par ailleurs, on peut retrouver d'autres défauts tels que ceux de conception, decalcul…etc. En effet, la structure en béton armé n'est pas seulement menacée par les charges quilui sont appliquées, mais aussi par l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit.En effet, la dégradation des propriétés desmatériaux qui les constituent, l'influence des intempéries et du climat, l'augmentation continue descharges de service, la conception inappropriée, les erreurs commises lors de la construction ou mêmeune combinaison de ces facteurs accélèrent le vieillissement des structures.

Ces structures étant « plus sensibles », il est indispensable de les protéger efficacement et d'en assurer uneinspection et un entretien régulier.

Dans cenotre travail, nous allons étudiéles différentes pathologies de béton, leurs causes etla façon dont elles sont détectées. En effet, en cas de pathologie detectée, le diagnostic de la source de problème est un élément clé afin de préconiser la réhabilitation adéquate, si cette dernière ne correspond

pas réellement à ce qui est nécessaire, l'ouvrage sera toujours soumis aux mêmes attaques.

Les différents moyens d'investigation qui permettent de diagnostiquer une pathologie consiste aux méthodes destructives (pour les structures pouvant être localement dégradées) et lesméthodes non destructives (pour les ouvrages nécessitant d'être préservés tels que lesbâtiments classés monuments historiques).Une fois les pathologies ainsi que les causes sont diagnostiquées, il est nécessaire de prévoir destravaux de réhabilitation afin de redonner à la structure ses caractéristiques physiques etmécaniques initiales tout en veillant à retarder ou limiter de nouvelles pathologies similaires. Autrement dit, vue le coût élevé des structures de génie civil, il est important de réaliser une conception initiale conforme aux normes de même que réaliser une réparation de qualité, en cas de pathologies/défauts, afin d'augmenter la durée de vie des différents ouvrages.

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, tout en tenant compte des

critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Ainsi, Une réparation durable et efficace du béton repose sur une sélection appropriée des matériaux et de leur utilisation. Ce choix n'est cependant pas la seule étape importante du processus, il faut aussi porter une attention particulière sur la préparation des surfaces, les techniques d'application, le mûrissement de la réparation et le contrôle de la qualité.

AIl convient de vérifier la bonne compatibilité entre les matériaux de réparation et l'élément à réparer en garantissant une bonne adéquation entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du renfort et du substrat. Il est souvent très difficile d'obtenir une compatibilité parfaite, puisque la majorité des matériaux de réparation n'ont pas les mêmes propriétés que le béton endommagé.

Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en l'adjonction de matière dans les zones où les sections sont insuffisamment résistantes ou fortement endommagées. Ce défaut de résistance est la conséquence des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitation, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème du renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradations (problème de la réparation).

En outre, il est intéressant de différentier entre la réparation et le fenforcement : La réparation fait référence à la récupération ou à la restitution des caractéristiques de portance originales de la structure (rigidité, résistance) tandis que le renforcement consiste à améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Ainsi, il existe de nombreuses procédures de renforcement ou de réparation des structures , les plus courantes sont :

1- Incorporation de profils en acier : il s'agit de construire une structure parallèle à celle déjà existante qui supporte les charges. Ce type de structure demande beaucoup d'espace, il est seulement viable pour de grands renforcements.

2- Collage d'éléments préfabriqués : cette méthode nécessite des ouvrages spéciaux associés. Addition d'armatures en acier sans augmentation de la section en béton : cette technique est normalement employée pour le remplacement d'une ancienne armature, en cas de corrosion.

3- Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier. Le béton peut être coulé ou projeté.

4- Adjonction de platines en acier. L'acier collé au béton augmente la section structurelle résistante. On l'utilise dans les poutres, dalles, murs, piliers.

5- Adjonction de lamelles, bandes ou tissus de matériaux composites. Le concept est le même que dans le cas précédent, à la différence que l'élément résistant incorporé est fait de matériaux composites (habituellement, de résine époxy et de fibres de carbone, verre ou d'aramide).
6- Amélioration des structures par précontrainte extérieure.

problématique

L'objectif de notre travail est d'étudier de façon générale les différents facteurs (conceptions, pathologies, diagnostic et réhabilitation) relatifs aux béton afin d'assurer une infrastructure de qualité. Ceci est devenu un besoin urgent à l'heur actuel, d'une part à cause des fraudes qui existent sur le marché du Génie Civil et qui sont relatives aux matériaux utilisés dans la construction et/ou dans la réparation des ouvrages, mais aussi à cause de la recrudescence des catastrophes naturelles (tremblement de terre, inondation, changement climatique …etc) d'où la nécessité de réaliser des ouvrages de plus en plus résistants. Pour bien illustrer cette thématique, nous présentons ce travail en qutres parties:

- Pathologies desstructures en béton armé
- Méthodologie de diagnostic d'un ouvrage en béton armé
- Durabilité et réparation des ouvrages en béton
- Réparation et renforcement des ouvrages

  Et on finalise notre recherche par une étude de cas de diagnostic et réparation d'un complexe therapotique (thalassothérapie).

INTRODUCTION

Les ouvrages en béton armé constituent le matériau composite le plus couramment employé. Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons . La détermination précise des causes d'une détérioration quelconque du béton est un sujet complexe. Ceci s'explique par le manque de connaissance et la complexité des phénomènes qui affectent ce matériau, à leur évolution dans le temps, ainsi qu'à leur concomitance**. [1]**

I.1. GENERALITES SUR LE BETON

I.1.1 . Historique

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde et le 2^{e} produit le plus utilisé par l'homme (après l'eau…), Les constructions en maçonnerie utilisent des mortiers à base de chauxdepuis l'Antiquité.

- Au début du 19e siècle se développent les chaux hydrauliques ; le Ciment Portland Artificiel est breveté en 1824.
- Les premières constructions en béton datent de 1830. À partir de 1850, on commence à utiliser le ciment armé, puis le béton armé.
- En 1929, Eugène Freyssinet met au point le béton précontraint.
- Depuis la fin des années 1980, on a développé des formulations nouvellescomme les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).

I.1.2. Le béton

Le béton est un matériau obtenu après malaxage de liants, d'eau, de granulats(sable, gravier, caillou...) et éventuellement d'adjuvants dans des proportions bien déterminées et en fonction des caractéristiques voulues. L'ensemble doit êtrehomogène et la pâte résultant des réactions entre le ciment et l'eau est l'élément actif du béton.

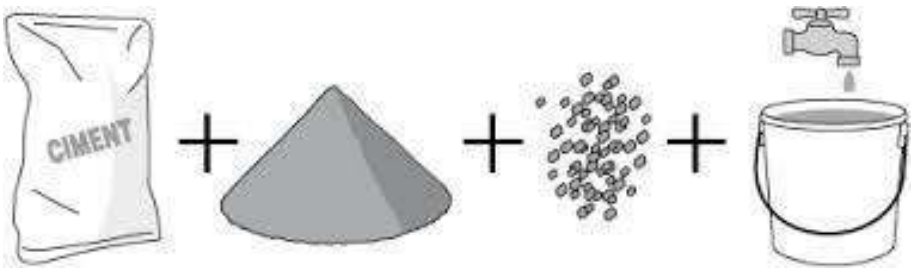


Figure –I-1 . Composition du Béton **[3]**



Figure –I- 2.préparation du béton **[3]**

- **Le liant** peut être « hydraulique », car il fait prise par hydratation, il est nommé ciment, on obtient dans le cas où le liant est un ciment un béton ciment, ou béton tout court. Le liant peut être aussi « hydrocarboné » nommé aussi bitume, ce qui nous conduit à la fabrication d'un béton bitumineux.
- Parmi la grande variété de ciments, un des plus couramment utilisé est le ciment Portland composé de clinker, de gypse (5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker, obtenu par broyage d'une roche artificielle produite par calcination vers 1450°c d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80%-20%, est composé de :
  - Silicate tricalcique : 3Ca0. Si 02 ou C3S (60-65%)
  - Silicate dicalcique : 2Ca0.Si 02 ou C2S (20-25%)
  - Aluminate tricalcique : 3Ca0.Al203 ou C3A (5-10%)
  - Ferro-aluminate tétracalcique: 4Ca0.Al203.Al203, Fe203 ou C4AF (5-10%).
- L'eau est, avec le ciment, l'ingrédient le plus important du béton. Elle remplit à lafois une fonction physique conférant au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique contribuant au développement de la réaction 'hydratation du ciment et par la suite à la résistance mécanique du béton.
- La réaction chimique qui permet au béton (de ciment) de faire prise est assez lente : à peine 75% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La vitesse de durcissement du béton peut cependant être affectée par la nature du ciment utilisé et par la température lors de son durcissement. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale). Le délai de 28 jours a été choisi afin de pourvoir contrôler la résistance (4 semaines après avoir coulé le béton).

- Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés [CaC03, MgC03, CaMg (CO3)2] ou siliceuses (Si02) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, le squelette du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique.
- On appelle adjuvants les substances mélangées physiquement aux polymères, destinées à modifier ou améliorer leur comportement rhéologique en machine de transformation, ou bien les propriétés d'usage des matériaux finis (propriétés physiques, stabilité à l'environnement). **[2]**

Calcaire CaCO2

Argile SiO2, Al2O2

+

Cuisson à 1450°C

Trempe

Clinker

Gypse CaSO4 ; 2H2C

Ajouts éventuels

+

Dosage broyage

Ciment

+

Eau+ granulats

+

Adjuvants

Béton

Calcaire CaCO2

Argile SiO2, Al2O2

+

Cuisson à 1450°C

Trempe

Clinker

Gypse CaSO4 ; 2H2C

Ajouts éventuels

+

Dosage broyage

Ciment

+

Eau+ granulats

+

Adjuvants

Béton

Figure I-3 : Schéma indiquant la fabrication du ciment et la constitution du béton **[2].**

I.1.3. L'acier

Le béton résiste bien à la compression mais possède une faible résistance à la traction. C'est pourquoi, pour lui conférer une bonne résistance à la traction, on dispose dans la partie tendue des armatures. Les armatures pour béton armé sont généralement des assemblages de barres en acier à caractéristiques de forme, de résistance et de section bien déterminées. On distingue :

- Les ronds lisses ou ronds à béton ;
- Les aciers, haute d'adhérence, qui possèdent des nervures tout le long de la barre, améliorant l'adhérence béton-acier ;
- Les aciers crénelés ;
- Les treillis soudés.



Figure I- 4 .L'armature du Béton**[3]**

- Les minerais de base de l'acier sont des oxydes dont :
  - L'oxyde magnétique ou magnétite : Fe304
  - L'oxyde ferrique anhydre : Fe203
  - L'oxyde ferrique hydrate : 2Fe203, 3H20
- Les principales étapes conduisant à l'obtention de l'acier sont :

a. Elaboration de la fonte à partir des oxydes. En brûlant les oxydes en présence des carbures, on obtient :

b.L'élimination des oxydes

c. La fonte qui contient entre 2 et 5% de carbone

d. La scorie qui est le résidu du haut fourneau.

La fonte est ensuite affinée pour obtenir soit du fer pur (élimination totale du carbone) soit de l'acier (fer ± 1% de carbone)

La fonte qui sort du haut fourneau contient moins de 94% de fer, 2 à 5% de carbone et le restesous forme d'autres éléments tels que : silicium, manganèse, phosphore, soufre.

L'adhérence entre l'acier et le béton est nécessaire. Celle-ci est fonction de la forme des armatures, de leur surface, de la rugosité de l'acier et de la résistance du béton. La qualité d'armatures et leur disposition, dictées par la répartition des contraintes, résultent de calculs qui font appel aux lois de comportement des matériaux. Les spécifications concernant les barres sont détaillées dans les normes AFNOR NF A35015 et NF A35016. Vis-à-vis de la corrosion, l'acier inoxydable est bien plus résistant qu'un acier ordinaire mais son coût très élevé fait que, l'acier ordinaire, capable de durer assez longtemps pour satisfaire une durée de service déterminée, est utilisé dans la plupart des constructions en béton armé (BA) **[3]**

I.1.4 Définition du béton armé :

Le béton armé est un matériau composite, constitué de béton et d'acier. Le béton et l'acier sont associés en fonction de leurs qualités et de leurs coûts respectifs. Le béton résiste bien à la compression et mal a la traction. Il est moulable et permet la réalisation de formes complexes. Facile à mettre en œuvre et peu coûteux, le béton résiste assez bien au feu et aux intempéries. Il nécessite peu d'entretien. L'acier, très coûteux, résiste bien à la traction et à la compression. Le béton armé permet de réaliser des constructions monolithiques qui résistent bien aux effets dynamiques et en particulier aux séismes. Le béton armé est parfois trop lourd pour être choisi parmi les matériaux de construction. **[3]**

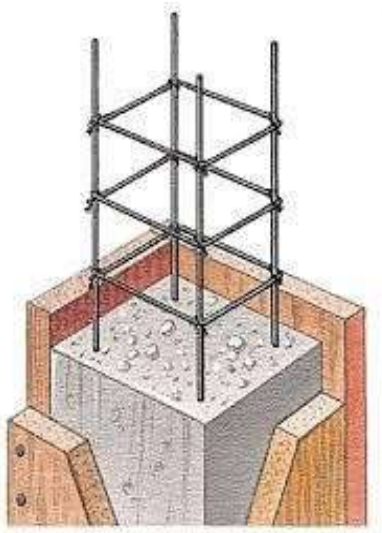


Figure I-5 . Le Béton armé **[3]**

I.1.5. Description des pathologies du béton armé :

I.1.5.1. Les pathologies du béton

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons.**[2]**

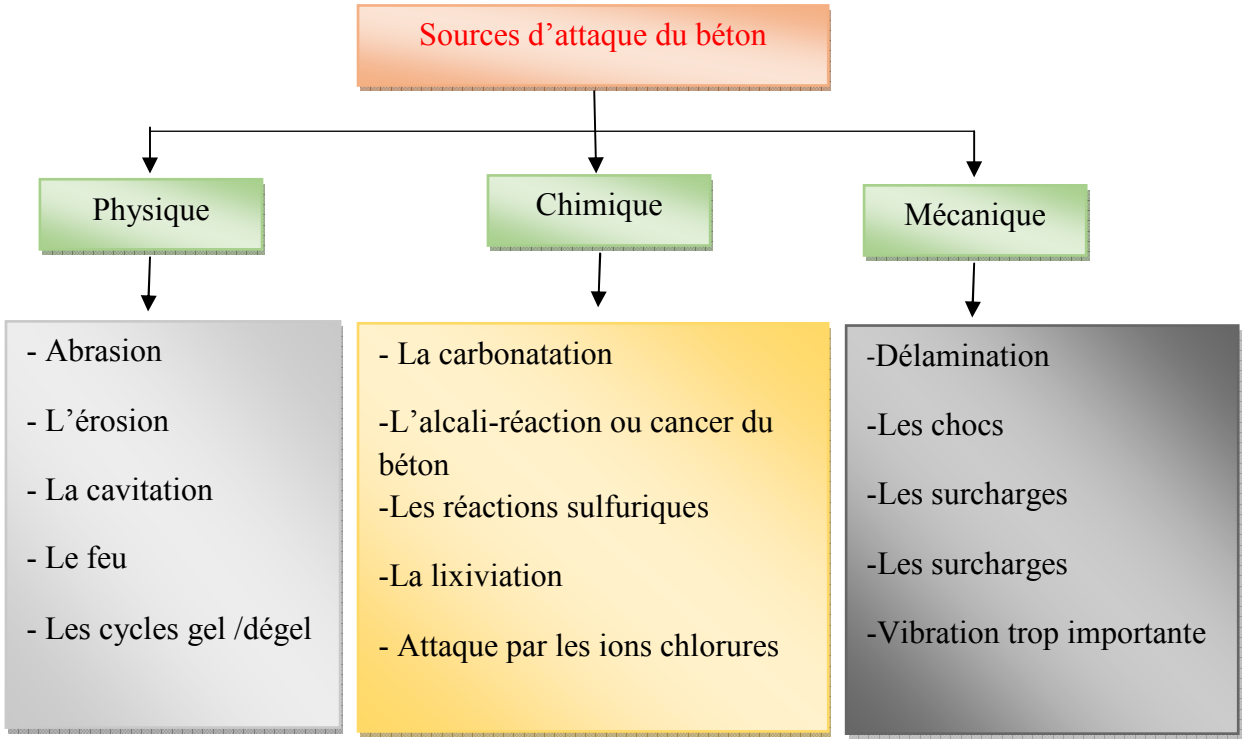


Figure I-6 . Organigramme des différentes de détérioration du béton

I.1.5.2. Les causes physiques de dégradation des bétons

A.Abrasion

C'est l'usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif, ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc. **[1]**

B.L'érosion

C'est la perte de matière, résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement (usure de la matrice cémenteuse par les particules solides contenues dans l'eau). **[1]**

C.La cavitation

C'est l'sure d'une structure hydraulique, caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur, qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau (effet dynamique de l'eau). **[1]**

D.Le feu

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton **[1]**

E.Les cycles gel/ dégel

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides **[1]**

I.1.5.2 Les causes chimiques de dégradation

A. Réactions Alcalis-Granulat (RAG)

La réaction alcalis-granulats (RAG) résulte d'une interaction entre les alcalis du béton (provenant du ciment, des additions, des adjuvants, …) et des granulats potentiellement réactifs (c'est-à-dire sensibles aux alcalis) qui contiennent de la silice réactive (acide silicique) se présentant sous forme d'opale, de calcédoine, de cristobalite, de tridymite et de quartz cryptocristallin. C'est la raison pour laquelle on parle également de réaction alcalis-silice.

La RAG entraîne la formation de produits expansifs et notamment d'un gel d'alcalis-silicecapable d'attirer l'eau et donc de gonfler. Il en résulte des contraintes de traction internes au béton qui conduisent à une fissuration de ce dernier et, parfois, à la rupture des armatures. Pour qu'une réaction alcalis-granulats se produise, les conditions suivantes doivent être réunies:

1- Présence de granulats potentiellement réactifs.

La réaction se produit seulement si la teneur en réactifs se situe à l'intérieur d'un domaine critique (pessimum) dont les limites dépendent de la composition minéralogique des constituants

2- Humidification permanente ou régulière de la structure teneur élevée du béton en alcalis.

Dans un béton non armé, la RAG se manifeste par un faciès de fissuration plutôt aléatoire. Dans un béton armé ou précontraint, les armatures empêchent la libre dilatation du béton dans le sens des barres d'acier, de sorte que le tracé des fissures épouse celui des armatures sous-jacentes.

En l'absence d'examen complémentaire, le risque est grand d'attribuer la dégradation, à tort, à un phénomène de corrosion. Dans certains cas, le béton prend une teinte ocre et l'on constate la disparition de lichens et de mousses présents au préalable le long des fissures. **[5]**



FigureI-7.réactions alcalis-granulats **[5]**

B. Attaques Sulfuriques

Les sulfates en provenance de l'environnement (terres, milieu aqueux) peuvent réagir avec le béton pour former de l'ettringite (sel de Candlot). Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante et peut se produire aussi bien durant la phase plastique du durcissement (ettringite primaire) qu'après le durcissement (ettringite secondaire).

Seule l'ettringite secondaire est préjudiciable au béton, les contraintes internes causées par l'expansion entraînant la fissuration et la ruine de la structure. Toutefois, même en l'absence de source extérieure de sulfates, un échauffement excessif du béton en cours de durcissement peut également donner lieu à la formation d'ettringite, notamment lors d'un traitement thermique (destiné à accélérer le développement de la résistance du béton) ou lors du dégagement de la chaleur d'hydratation dans le béton de masse. C'est la raison pour laquelle la température maximale est généralement limitée à quelque 65 °C durant la phase de durcissement.

En décalcifiant les composés primaires de la prise présents dans le ciment durci (C-SH), les sulfates peuvent aussi altérer la résistance mécanique du béton et donc affecter la stabilité de l'ouvrage. **[5]**



FigureI-8. Pathologie des pieux due à l'attaque sulfatique (eaux agressives) **[1]**



Figure I-9.attaquessulfatiques**[5]**

C.La lixiviation (dissolution ponctuelle de la matrice cémenteuse)

La plupart des ouvrages peuvent être affectés par des eaux de ruissellement sous l'effet de la pluie, de l'eau de mer, des eaux souterraines et de la neige. Le béton comprend outre les granulats, la pâte de ciment qui est fortement basique avec un pH autour de 12,5 de par sa solution interstitielle. La pâte de ciment est composée de 15 à 20% de portlandite, de silicates de calcium hydratés, d'aluminates et de sulfoaluminates de calcium hydratés.

Les eaux de ruissellement sont en général moins basiques ce qui entraîne un déséquilibre entre le milieu extérieur et le béton. Cela produit des sels insolubles ou solubles (ce qui est plus préjudiciable) puisque la dissolution est associée à un lessivage de la chaux très soluble dans l'eau. Ce phénomène, appelé lixiviation, s'accroît si le béton contient beaucoup de chaux comme le ciment Portland pur. Il entraîne des dégradations et une fragilisation du matériau en augmentant la porosité interne et en diminuant les propriétés mécaniques du béton. **[1]**



FigureI-10.lixivtion du béton **[1]**

D.Attaque par les ions chlorures

Dans les bétons, les chlorures proviennent pour l'essentiel du milieu extérieur, mais il est important de limiter les sources internes chlorures. Pour l'acier, le processus de corrosion généralement admis et débute par la dissolution du métal et la formation des ions ferreux. **[1]**



Figure I-11. Agression du béton par activité des chlorures **[1]**

E. Attaques Acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures. **[5]**



Figure I-12 . Attaques acides **[5]**

I.1.5.3.Les causes mécaniques de dégradation des bétons :

A.Délamination

- L'air et l'eau entrappés sous le mortier de surface provoquent une délamination de la surface de la dalle de béton variant de quelques centimètres à quelques mètres carrés.

- L'épaisseur de délamination de la dalle peut varier de 3 à 5 mm. Elle est apparente lorsque le béton est durci et que la surface se détériore sous l'action de la circulation. Elle aboutit à la chute de plaques de béton et la création de trous dans le tablier de pont.**[15]**



FigureI-13. Délamination du béton **[15]**

B. Les chocs

Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage,des outils **[2]**

C. Les surcharges

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné desfissurations et des éclatements du béton. **[2]**

E. Vibration trop importante Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et parconséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartisentraînent alors des fissurations et des élancements du béton.

I.1.5.4 Les autres causes 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.**[1]**

A. Désordres sur ragréage

Lors du décoffrage, il arrive que des défauts apparaissent (ségrégation, enrobage insuffisant). Dans ce cas on met souvent en place un ragréage. Des comportements différentiels entre ce dernier et le béton sont possibles, ce qui induit l'apparition de fissures. Il y a alors pénétration d'humidité, corrosion des armatures et décollements.**[1]**

B. Reprises de bétonnage

Les reprises de bétonnage médiocres (non traitées ou avec ségrégation) font l'objet dedésordres induits par une qualité amoindrie du béton. Il peut alors y avoir corrosion des armatures et décollements de béton.**[1]**

C. 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.**[1]**

D. 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.**[1]**

E. Vibration trop importante

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent unemauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors desfissurations et des élancements du béton.**[1]**

F. Ségrégation du béton ou « nid de cailloux »

La ségrégation est due à une vibration insuffisante du béton lors du coulage de l'élément qui engendre des caractéristiques physiques et mécaniques amoindries (grande porosité, cohésion et résistance plus faible…).**[1]**

G. 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.**[1]**

I. 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.**[1]**

J. Les épaufrures

Défaut de surface généré par les ondes de choc ou les intempéries, elles correspondent à un éclatement du béton avec chute de fragment, laissant souvent les armatures apparentes elles sont généralement la suite logique d'un écaillage.**[15]**



Figure I-14 . Les épaufrures**[15]**

K. La ségrégation

Phénomène de séparation des constituants d'un béton frais, qui peut être provoqué par un malaxage insuffisant ou par une vibration excessive. **[15]**



Figure I-15 . Ségrégation des éléments de béton**[15]**

L. Efflorescence

L'efflorescence est le résultat de l'hydrolyse des composants da la pâte de ciment dans le béton. L'efflorescence est indiquée par la présence des dépôts blancs sur le béton, le plus

souvent sur le dessous des ponts et viaducs et indique que l'eau utilisée dans le processus de mélange de béton a été contaminée.**[15]**

I .1.6.1 types et causes des désordres du béton armé

I.1.6.1.1. Les poutres

Poutre avec charge de la structure: les causes de la fissuration sont (Calcul, Ferraillage, Corrosion, Mauvais Béton.), comme il est montré (Figure **I-16**) **[4]**

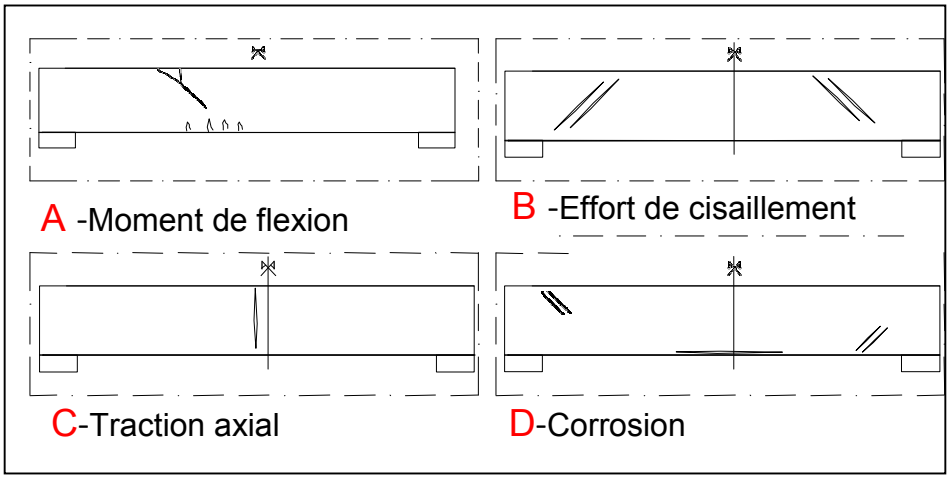


Figure I-16 . Fissures probables affectant la poutre **[4]**

A : Fissures dues au moment de flexion.

B : Fissures dues à l'Effort de cisaillement.

C : Fissures dues à l'Effort de traction axial.

D : Fissures dues à la Corrosion.

I.1.6.1.2. Les poteaux

Les causes de la fissuration dans les poteaux sont (Calcul, Ferraillage, Corrosion, Mauvais Béton.) **[4]**

A : Fissures dues à la Corrosion.

B : Fissures dues à la contrainte de traction.

C : Fissures dues à des charges trop élevé (surcharge).

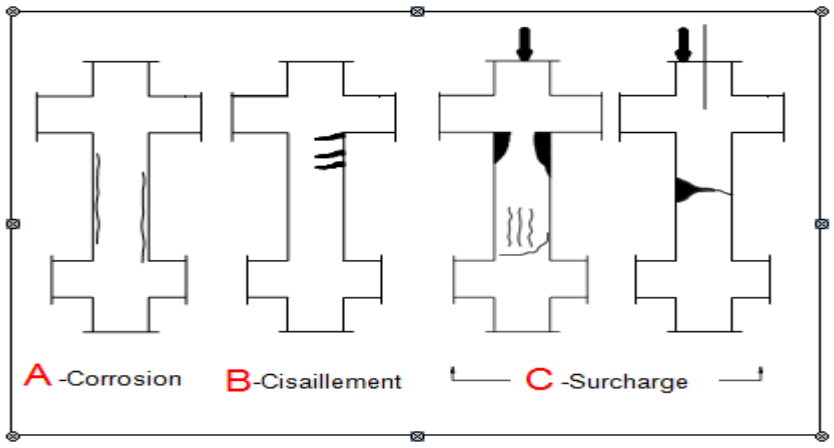


Figure I-17. Fissures probables affectant les poteaux. **[4]**

I.1.6.1.3. Les Plancher

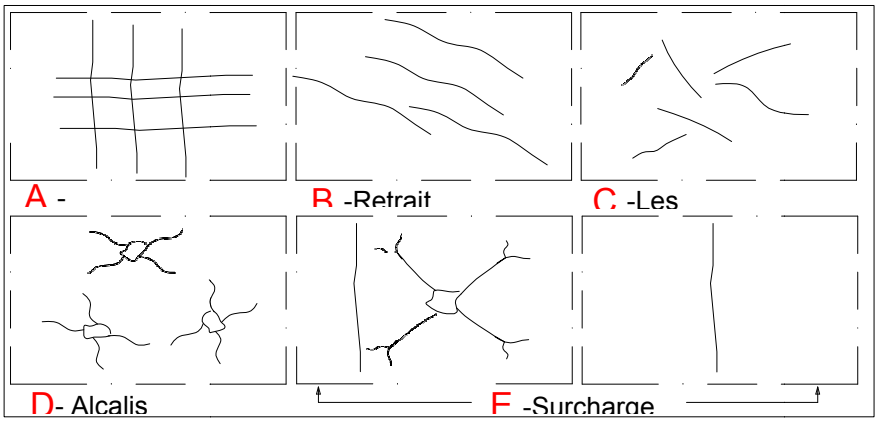


Figure I-18. Fissures probables affectant les plancher. **[4]**

A : Fissures dues à la Corrosion.

B : Fissures dues au retrait plastique.

C : Fissures dues aux sulfates.

D : Fissures dues à l'alcalin.

E : Fissures dues à la surcharge

I.1.6.1.4. Eléments Façade

- Mur et Enduit

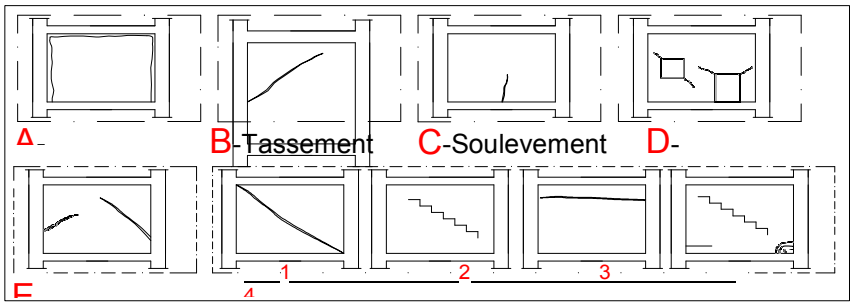


Figure I-19. Fissures probables affectant les Murs **[4]**

A : Fissures dues au retrait.

B : Fissures dues au tassement différentiel.

C : Fissures dues au soulèvement de sol.

D : Fissures dues à la variation de contrainte dans les ouvertures.

E : Fissures dues à la surcharge.

F : Fissures dues à l'action de flexion et de cisaillement.

1.2.3.4 : La résistance de la paroi est faible pour résister aux contraintes de cisaillement.

4: La résistance de la paroi est faible pour résister aux contraintes de flexion et traction.

Conclusions

Les données traitées dans ce chapitre nous mènent à conclure que les constructions en béton armé souffrent de plusieurs phénomènes des dégradations plus ou moins prononcés. Ces dernières sont liés aux techniques et conditions de mise en œuvre le non-respect des propriétés du béton sur chantier (enrobage insuffisant, mauvais choix des constituants…) mais aussi aux conditions de milieu extérieur. En l'occurrence, ces contraintes exigent de bien entretenir le béton avant et lors de la conception des ouvrages. Le bon entretient du béton inclus aussi le suivi et le diagnostic détaillé de l'état de santé des ouvrages, ou autrement dit, le bon diagnostic des . Donc L'étude de ces pathologies et la mise en place des solutions/traitement adéquats.

INTRODUCTION

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 un diagnostic est effectué quand un client a découvre un défaut dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de désordres.

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités : Dans un premier temps, il permet de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps (à court, moyen ou long terme) afin d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet des différents troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, de prévoir des réparations si nécessaire. L'autre finalité d'un diagnostic consiste à répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat.

II.1. C'est quoi un diagnostic ?

Le diagnostic est un ensemble de techniques élaborées dont l'objectif est d'évaluer l'état de matériau dans une structure donnée, tout en évaluant la stabilité globale et partielle de cette structure. L'objectif est d'analyser, déterminer les causes affectant cette conception, et envisager à la fin une intervention et réparation adéquate **[12]**

II.2. Le processus de diagnostic d'un ouvrage

Pour répondre à la demande du client, il est nécessaire de comprendre le plus précisément possible ses besoins et les caractéristiques de l'ouvrage à diagnostiquer. Pour cela, on effectue une visite sur site ou, à défaut de pouvoir s'y rendre, l'analyse de photos et de plans agrémentés de toutes les observations du client. Cette phase est primordiale pour préparer au mieux le futur diagnostic. Il s'agit de :

- Connaître le type d'ouvrage sur lequel on va réaliser le diagnostic et l'environnement dans lequel il se trouve ;
- Relever les principales dimensions de l'ouvrage et ses matériaux constitutifs ;
- Noter les principaux types de désordres et estimer leur quantité.

Lorsque l'ensemble de ces données sont recueillies, un document contractuel permettant de matérialiser l'offre de l'entreprise au client est rédigé : **[7]**

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de 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.

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 a 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. **[5]**

II.3. les principales étapes d'un diagnostic

Le diagnostic d'une structure se compose de différentes étapes clés décrites ci-dessous **:[9]**

II.3.1.Visite préliminaire

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

- La collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage : historique, documents, rapports, implantation, orientation, date de construction, plans de coffrage et de ferraillage, environnement (nature chimique, vents dominants), matériaux (ciment, agrégats, dosage), etc.
- Un examen succinct de l'intégralité de la structure, et le relevé de tous les symptômes avec prise de photographies.

Il est nécessaire de voir de près les
surfaces dégradées et d'utiliser les moyens d'accès les plus adaptés. Quelques tests simples (profondeur de carbonatation, présence dechlorures, Alcali-réaction) , pourront êtreenvisagés à cette étape afin de déterminer le niveau de dégradation et d'orienter le programme d'analyse futur.

Lors d'une visite préliminaire, l'ingénieur doit se poser les questions suivantes :

- ✓ Pourquoi les armatures se sont-elles corrodées ?
- ✓ Quelle est l'incidence de la corrosion sur la sécurité de la structure ?
- ✓ Les armatures se corrodent-elles également aux zones ne présentant pas de dégâts visibles ?
- ✓ Quelle stratégie de réparation adopter et selon quelle urgence ?

Après cette visite, l'ingénieur doit être capable :

- ✓ D'émettre un pré-diagnostic sur les causes probables des désordres ;
- ✓ D'effectuer la mise au point du programme des investigations. Ce dernier tiendra compte de toutes les suggestions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc. ;
- ✓ D'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garantie est nécessaire ;
- ✓ De faire évaluer les mesures de sauvegarde (limitation du trafic, mise sous surveillance renforcée.)
- ✓ Il doit également estimer le coût probable et la durée des investigations si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage. **[3]**

II.3.2. Collecte des documents

Un maximum d'informations concernant la structure doit 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 **[3]**

II.3.3. 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 veutmettre en évidence **[3].**

II.3.4. Inspection détaillée

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

II.3.4.1. Préparation de l'inspection

Il s'agit tout d'abord de vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire, de rechercher des documents de synthèse déjà établis, tels que les précédents rapports d'expertise, etc. Les moyens d'accès seront recensés et définis au préalable, et toutes les dispositions prises (sécurité, accès, nettoyage, etc.). **[3]**

II.3.4.2. Inspection

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

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

Ce relevé sera effectué en se référant à un guide de défauts. **[3]**

II.3.5. Essais en laboratoire

Si des échantillons ont été prélevés dans les zones représentatives des états de dégradation, ceux-ci sont envoyés en laboratoire pour réaliser une 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. **[9]**

II.3.6. 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 effectuer un linéaire pour chaque type de désordres en vue d'une éventuelle réparation. **[9]**

II.3.7. 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. **[9]**

II.4. Choix des investigations

Le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres. Ces derniers sont récapitulés dans le schéma suivant : **[7]**



FigureII- 1. Schéma du choix d'investigation

Le choix des investigations dépend de cinq critères :

II.4.1. Type de mission à réaliser

Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations, diagnostic structure pour un calcul de résistance ou encore évaluation des risques vis-à-vis des biens et des personnes. **[7]**

II.4.2. Nature des matériaux

Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre. **[7]**

II.4.3. Type de structure

Géométrie et taille de l'ouvrage. **[7]**

II.4.4. Etat de l'ouvrage

Les investigations dépendent des désordres qui affectent l'ouvrage. On aura par exemple recours à un matériel particulier en présence de fissures ou d'armatures corrodées dans le béton. **[7]**

II.4.5. Environnement de l'ouvrage

L'étude porte également sur l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage, car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques.

De plus, les accès limités voire impossibles sur une partie de la structure peuvent être

une contrainte quant à la réalisation d'une investigations. En l'occurrence, on et nécessite l'utilisation des moyens spécifiques telle que des nacelles, échafaudages…etc. **[7]**

II.5. Les types d'investigation

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories (méthodesnon destructives et méthodes destructives). Elle . sont décrites comme suit :. **[7]**

II.5.1. 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.**[11]**

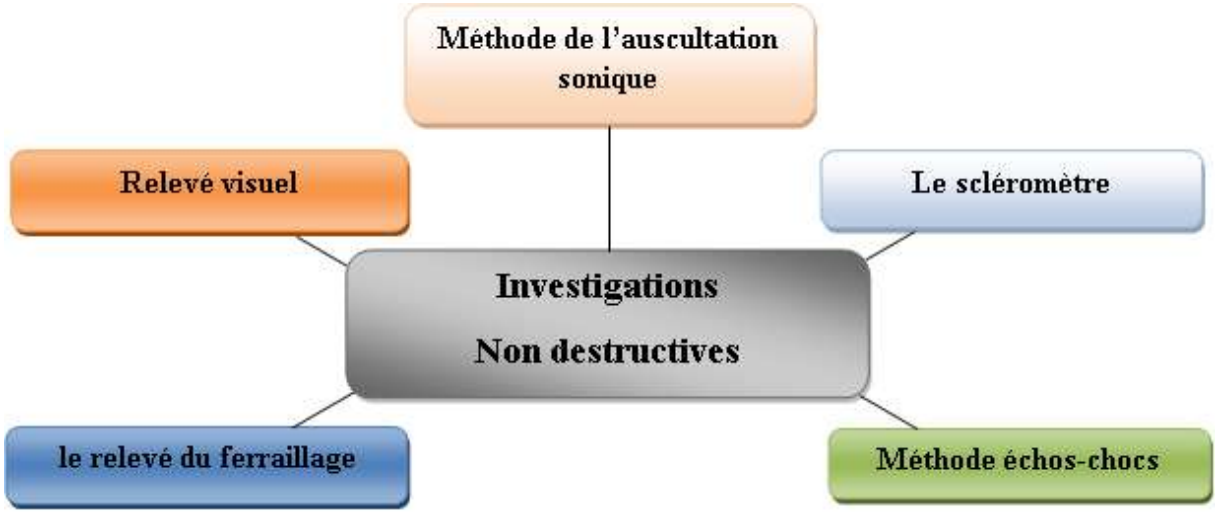


Figure II-2. Schéma des investigations non destructives

II.5.1.1. Le 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.
- Mouvements : Déflexion, soulèvement, affaissement.
- Corrosion de l'acier : Taches de rouille, câbles de post-tension exposés, aciers exposés.
- Autres indices: Cloquagedes membranes et revêtements, accumulation d'eau, décoloration.

Ce relevé permettra de :

•Qualifier les désordres, car chaque type a 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.**[11]**

II.5.1.2. 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, 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,
- Détecter les fissures et les vides dans le béton,
- Contrôler la qualité du béton en comparant les résultats à un béton similaire,
- Détecter l'état de détérioration du béton,
- Détecter la profondeur d'une fissure de surface,
- 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 des essais obtenus par le CEBTP sur l'auscultation sonique des bétons :**[11]**

TableauII-1 .Résultats d'essais d'auscultation sonique des bétons-(CEBTP) **[11]**

Vitesse de propagation du son	Qualité estimée 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 ont été rempli 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 fissurée. De plus, selon l'ASTM, Il existe une corrélation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression du béton, généralement ± 20%.**[11]**



FigureII-3 .L'auscultation sonique des bétons **[7]**

II.5.1.3. Le scléromètre

L'essai scléromètrique se base sur la proportionnalité entre la dureté et la contraint 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 scléromètrique 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 **[11]**

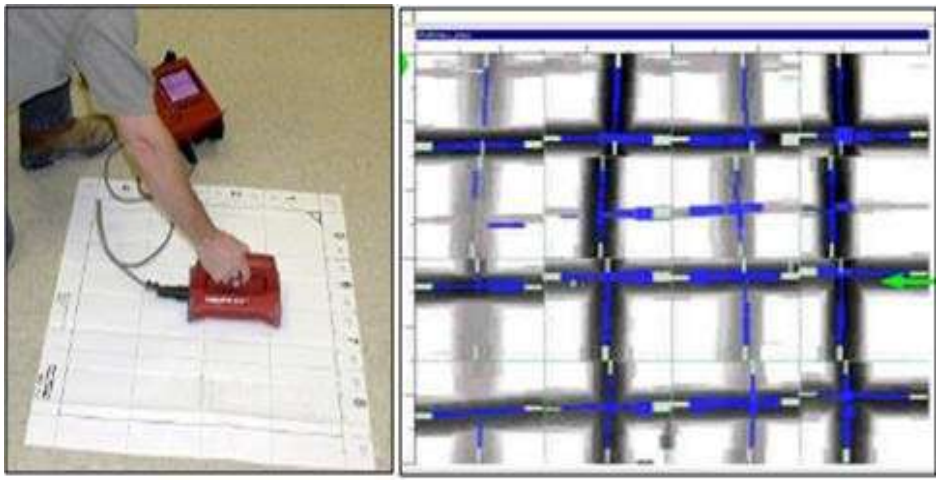


Figure II .4. Scléromètre **[7]**

II.5.1.4.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). **[11]**



FigureII-5.détection par fenêtres et résultats **[11]**

II.5.1.5. 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 compressiongénérées 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.

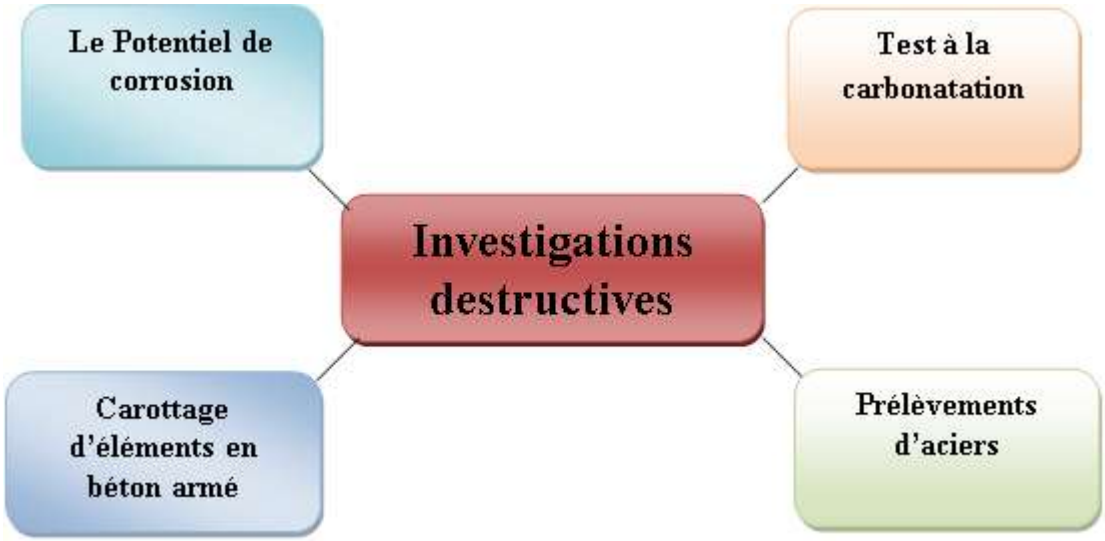
En effet, compte tenu de la vitesse de l'onde et la période d'arrivée (ou fréquence), les profondeurs de défauts internes ou des limites externes sont calculées. Le système fonctionne rapidement, en environ deux secondes pour traiter chaque lecture **[11]**



FigureII-6. Test Choc-Echo avec appareil Olson's NDE 360 **[11]**

II.5.2. Investigations destructives

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendreplusieurs formes. Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pourconnaitre ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, soit c'est pour avoir accès à des éléments interne ou sous-jacent à la structure. Cela permet aussi de connaitre leurétat d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies.**[12]**



FigureII-7 . Schéma des investigations destructives

II.5.2.1. 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 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 > - 200 mV (probabilité de corrosion inférieure à 10%)
- Si -350 < E < -200 mV (corrosion possible environ 50%)
- Si E < - 350 mV (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 100 mV.
- 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. **[8]**



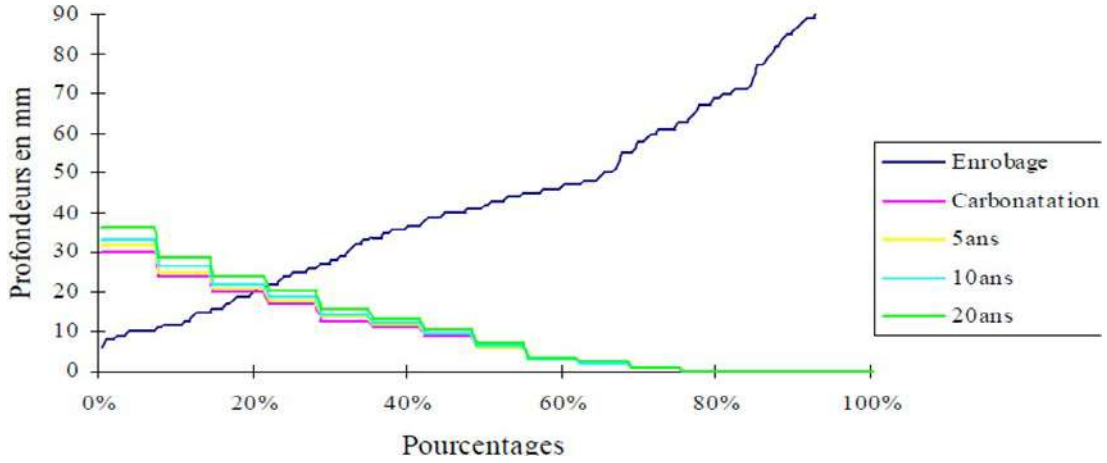
FigureII-8 . Mesure du potentiel de corrosion **[7]**

II.5.2.2. Test à la carbonatation

Le dioxyde de carbone atmosphérique qui pénètre à travers la porosité du béton, depuis la surface du parement, réagit avec les constituants alcalins contenus dans le béton. Au fur et à mesure de sa pénétration, ce processus conduit à une réduction de la valeur du pH d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. Ceci a pour effet de diminuer voire supprimer l'effet de passivation de l'acier qui lui assurait une protection naturelle contre la corrosion.

Le degré d'avancement de la carbonatation (profondeur de carbonatation) de la matrice cimentaire est directement lié aux caractéristiques intrinsèques des matériaux (porosité, âge,…) ainsi qu'aux conditions environnementales (humidité, température,…)

Une des méthodes d'essai existante consiste à pulvériser un colorant sensible au pH (solution de phénolphtaléine) sur une coupe fraiche de béton. La partie non colorée indiquant la zone carbonatée (pH < 9).**[7]**



FigureII-9 .graphique enrobage-carbonatation **[10]**

L'intersection de la courbe d'enrobage (courbe bleu foncé) avec celle decarbonatation (courbe rose) donne le pourcentage des armatures qui ne sont plus protégées.

Il est aussi possible de faire des prévisions sur les évolutions pour les années à venir (courbes jaune, bleu clair et verte). En effet, l'évolution de la carbonatation suit une évolution en fonction du temps du type aVt, avec « a » un facteur propre à chaque béton. En connaissant l'âge du bâtiment ainsi que laprofondeur de carbonatation à l'instant t, il est facile de déterminer le facteur « a » **[3]**



FigureII-10 . Carbonatation sur carotte **[10]**

II.5.2.3. Carottage d'éléments en béton armé

Le recours au carottage du béton armé peut avoir plusieurs objectifs :

- Tout d'abord dans un dallage afin de permettre la réalisation d'essais géotechniques sur lesol en place tel que des pénétromètres dynamiques ou des tarières. Ceci pour caractériser lesol sous la structure dans le cadre d'une rénovation ou d'une restructuration de l'ouvrage.
- Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques chimiques et mécaniques d'un élément en béton de la structure, en effectuant des essais de compressions sur les carottes prélevées, mais aussi des analyses chimiques et microscopiques afin de déterminer les différents constituants et leur quantité. Cela permet de déterminer quel type de ciment a été utilisé ainsi que le rapport E/C.
- Déterminer les caractéristiques des couches constituantes de l'élément (épaisseur du revêtement, de la chape, du béton,)

La norme NF EN 13791 de septembre 2007 indique deux méthodes pour « l'évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton.

La méthode à utiliser varie selon le nombre d'éléments carottés dans la structure concernée, mais dans tous les cas, elle permet d'estimer la classe de résistance du béton.

Cette méthode nécessite le recours à une carotteuse et il peut être nécessaire de déterminer préalablement le ferraillage de l'élément afin d'éviter d'avoir des aciers dans la carotte. Ceci pour deux raisons : d'une part, cela fragilise plus la structure si les aciers prélevés ont un rôle important, d'autre part les résistances à la compression obtenue, sur une

carotte dans laquelle il y a présence d'acier, sont faussées. Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure.**[10]**



FigureII-11 . Carottage **[10]**

II.5.2.4. Prélèvements d'aciers

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcule d'une structure est 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 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.**[3]**



FigureII-12 . Prélèvement d'aciers **[3]**

II.6. Rapport de diagnostic

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, mais doit être compréhensible même par un profane, un non initié.Il comprend :

- L'identification de la structure, le nom du demandeur ;
- L'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) chargé de l'étude, la date ;
- Une brève description de la structure ;
- Le rappel des objectifs de l'étude ;
- La liste des documents consultés ;
- Les résultats de l'inspection détaillée ;
- Les résultats des essais in- situ et de laboratoire ;
- Une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable et leur incidence sur la sécurité ;
- Des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude ;
- Une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer ;
- Des recommandations relatives aux méthodes de réparation les plus adaptées.**[3]**

Conclusion

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser.
C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies desquelles souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Par ailleurs, il consiste à l'étape primordiale qui permet de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces

problèmes. Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement alentours. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de protection adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables. **[5]**

III.1. Introuction

Durant la conception et la construction d'un ouvrage de génie civil, un des points du cahier des charges est la durée d'utilisation de cet ouvrage. La durabilité des ouvrages en béton armé, qui peut être définie comme étant leur capacité d'assurer la tenue en service prévue, est une caractéristique très importante, car c'est la garantie d'une sécurité et d'une durée de services accrus de ces ouvrages. Cette durabilité assure également une économie considérable sur le long terme, car de tels ouvrages nécessiteront peu ou pas de réparations, économisant ainsi les coûts de réparation, qui peuvent être très élevés, et peuvent même dépasser les coûts initiaux de construction. **[11]**

III.1.1. Définition d'une réparation durable

Le principal objectif de toute opération de réparation durable est de prolonger la vie de la structure réparée.Cecipourrait être expliqué par le terme de durabilité de la réparation, notion qui se traduit essentiellement par une fissuration minimisée ou évitée, et également par l'obtention d'une adhérence au support, qui soit suffisante et qui ne se détériore pas dans le temps.

Les deux notions : fissuration évitée, et adhérence au support, nous conduisent plus précisément vers le phénomène de la compatibilité, car nous constatons de nombreux cas de réparations déficientes sont dues à l'incompatibilité du matériau de réparation avec l'ancien béton. A cet effet, il est essentiel de développer des outils de caractérisation simples et accessibles, pour implanter la notion de la compatibilité dans la pratique des réparations. **[13]**

III.2. Origines et conséquences des désordres

Les principaux désordres rencontrés sur les ouvrages de génie civil peuvent être attribués au vieillissement de la structure soumise à de nombreuses contraintes environnementales, à des causes accidentelles (chocs, surcharges, incendies…) ou à des erreurs de conception, construction ou réparation

Dans ce paragraphe, nous détaillerons plus particulièrement les phénomènes qui peuvent être à l'origine d'une des pathologies les plus couramment observées. Plus loin des causes de dégradation du béton, il est nécessaire de parler de la durabilité et les facteurs qui l'affectent. **[13]**

III.2.1. Notions de la durabilité

La durabilité des ouvrages en béton est une nouvelle exigence des maîtres d'ouvrages de 21ème siècle. Les performances du béton armé et son coût économique, ont fait de lui le matériau de construction le plus utilisé à notre époque. Bien que l'on ait très

longtemps cru que les ouvrages réalisés en béton étaient indestructibles, l'influence des détériorations sur les structures en béton a mis en évidence les problèmes de vieillissement et engendré des inquiétudes de plus en plus vives parmi les clients auxquels sont destinés ces ouvrages.

Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état, alors qu'il existe aussi d'autres cas où une mauvaise durabilité a engendre la ruine totale ou partielle des ouvrages.

Le choix des formules de béton et la conception des ouvrages doivent désormais prendre en compte la durée de vie escomptée pour l'ouvrage, qui peut être très variable suivant le type de structure à construire ,l'environnement considéré et naturellement le type de sollicitations que devra subir l'ouvrage. Cependant, la durabilité des structures en béton armé ou précontraint est difficile à quantifier et donc à prévoir

D'après **Jacques Barron**, la durabilité diffère selon l'ingénieur et le maître de l'ouvrage. Ce dernier n'accepte que la durabilité objective : c'est à dire que l'ouvrage doit avoir une durée de vie indéterminée, alors que l'ingénieur vise ce qu'on appelle la durabilité performance, comme un objectif de qualité qui s'analyse en performance spécifique mesurables du comportement du béton.

P.C.Kregier définit la durabilité des matériaux en général comme la perte de performance en fonction du temps. D'autres définissent la durabilité du béton comme la capacité du matériau à conserver un comportement et une performance suffisamment satisfaisante dans les limites de la sécurité, lorsqu'il est soumis aux conditions réelles de service et pendant une durée prévue

M.Sonebi voit que le terme de la durabilité se réfère à la capacité du matériau de résister aux conditions d'utilisation sans subir de dommages signifiants durant la vie (de service) de l'ouvrage. La détérioration du béton est souvent initialisée par un processus chimique, malgré les facteurs physiques et mécaniques qui peuvent causer des détériorations propres combinées ou non à un milieu chimiquement agressif

III.2.2. Facteurs affectant la durabilité du béton

Une étude publiée dans la revue « ANNALES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS » en septembre 2000 par **Bernard. Fargeot** sur les facteursd'influence sur le vieillissement des ouvrages d'art met en évidence la prépondérance de trois facteurs principaux qui sont :

- ✓ Le facteur mise en œuvre

- ✓ Le facteur défauts ou erreurs de conception
- ✓ Le facteur défaut d'entretien.

M.Sonebi regroupe les facteurs qui sont l'origine de dégradations en trois grandes familles :

- ✓ Les facteurs climatiques et environnementaux ; le type d'exposition face aux agents potentiellement agressifs
- ✓ Les facteurs reliés à la conception et à la mise en œuvre de l'ouvrage
- ✓ Les facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton.

Mehta et Gerwick (1982), reporté **par M.Sonebi**, regroupent les principales causes physique de détériorations du béton en deux grandes catégories:

- ✓ Dégradation de surface
- ✓ Fissuration interne.

On peut généralement regrouper les facteurs affectant la durabilité en quatre grandes familles :

- ✓ Les facteurs reliés à la conception de l'ouvrage
- ✓ Les facteurs reliés à la mise en œuvre de l'ouvrage
- ✓ Les facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton
- ✓ Les facteurs reliés à l'entretien de la structure. **[13]**

III.2.1.1 Facteurs reliés à la conception de l'ouvrage

De nombreux critères de conception peuvent exercer une grande influence sur la durabilité de béton. Ainsi une structure mal conçue peut avoir une durabilité déficiente malgré l'utilisation d'un béton de bonne qualité.

Parmi les principaux critères de conception qui contrôlent la durabilité d'une structure, on cite :

- Les aspects reliés au système de drainage et d'évacuation des eaux
- Le calcul des armatures et le choix de leur épaisseur de recouvrement
- Les choix des enduits protecteurs ou des imperméabilisants
- Le choix d'une géométrie particulière de la structure qui permet de diminuer le stress environnemental. **[13]**

III.2.1.2. Facteurs reliés à la mise en œuvre de l'ouvrage

Le béton est un des rares matériaux de construction où les composants sont rassemblés au site, ou près du site de construction, pour ensuite être dosés, malaxés et mis en place dans les coffrages pour obtenir un produit fini. Il existe un très grand nombre de

variables qui contrôlent ce type de production. Les principaux défauts d'exécution rencontrés sont : **[7]**

1) mauvaise exécution des coffrages
2) mauvaise disposition des armatures
3) mauvaise formulation du béton
4) mauvaise condition de transport du béton frais
5) mauvaise mise en œuvre du béton
6) mauvaise technique de mûrissement du béton
7) mauvaise étanchéité.

III.2.1.3. Facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton

Pour fabriquer un ouvrage durable, il faut utiliser un matériau durable, car les propriétés de ce dernier ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage. Ainsi, le choix du type de ciment en fonction de :

- ✓ Types d'ouvrages,
- ✓ Type de mise en oeuvre,
- ✓ L'environnement,
- ✓ L'eau de gâchage, tant du point de vue quantité ou qualité,
- ✓ Le rapport E/C,
- ✓ Le choix des granulats et leurs qualités,
- ✓ Le choix des ajouts minéraux et leurs quantités ;

Le choix de tous ces paramètres utilisés dans la confection du béton est indisponsable pour assurer sa qualité et sa durabilité. **[13]**

III.2.1.4. Facteurs reliés à l'entretien de la structure

Des programmes d'entretien ou de protection sont généralement nécessaires pour éviter ou retarder certains types de dégradations des structures, ou au moins contribuer à prolonger très significativement leur vie utile. Parmi les méthodes d'entretien on peut citer :

- ✓ Nettoyage régulier des joints de dilatation Remplacement des membranes d'étanchéité
- ✓ Nettoyage des conduits de drainage
- ✓ Nettoyage des joints de dilatation. **[13]**

III.3. Mécanisme de dégradation du béton

III.3.1. Les différents agents agressifs

La plus parts des altérations observées sur le béton sont d'ordre chimique ou physique,on peut classer les agents chimiques agressifs en quatre catégories :

a.Les gaz :sont d'origine naturelle, ou par production de pollutions atmosphériques etde fermentation, soient : des dioxydes de carbone, de souffre, d'azote, l'hydrogènesulfuré, les vapeurs chlorées ou l'ammoniac.

b.Les liquides organiques ou inorganiques: sont influés par leurs effets purementphysiques, qui agissent par leurs caractères acides ou basiques, et par les ions agressifsqu'ils peuvent contenir.

c. **Les solides:** qui sont des sols agressifs ou de déchets d'origines diverses.

d. Les milieux biologiques : sont des attaques chimiques sous l'effet des bactériesaérobies ou anaérobies.

III.3.2. Mode d'action des agents agressifs

a. Mode d'action des gaz : Le transfert de gaz dans le béton se fait par diffusion, ildépend du pourcentage de l'humidité relative à l'intérieure des pores du béton. Pourcela la quantité de gaz transférée dans le béton saturé, est plus petite ou négligeable,
au contraire, elle devient assez importante avec la réduction d'humidité.
Les gaz ne sont pas agressifs mais du fait de leurs solubilités, ils peuvent former avecl'eau des solutions agressives.

b. Mode d'action des liquides : ils peuvent se transférer dans le béton soient par unmouvement sous gradient hydraulique ou par capillarité, soit par diffusion ionique oumoléculaire.

c. **Mode d'action des solides :** généralement les solides ne se transfèrent pasdirectement vers le béton, mais par leurs dissolutions dans l'eau.

d. Mode d'action des agents biologiques : Les réactions biologiques peuvent conduire à la production des acides ou des gaz surtout l'hydrogène sulfuré (H2S), ils entrentdans le béton par diffusion.

Les agressions chimiques entrainent presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment. Alors que l'attaque des silicates et des aluminates de chaux hydratés,produits de réaction soient solubles ou insolubles, ne sont pas négligeables. Si les produitssont solubles, il en résulte l'augmentation de la porosité ou la perméabilité dans la matricecimentaire hydraté. Mais dans le cas des produits insolubles, les nouveaux cristaux ne sontpas ou sont très faiblement expansifs, les pores du béton seront comblés soit la diminution dela perméabilité du béton, dans le cas où les nouveaux produits sont expansifs, ils induits desdégradations sur la résistance mécanique.

III.4.Les altération des aciers

III.4.1. La carbonatation

La carbonatation du béton est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau.

Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % du CO2 émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment.

Les ingénieurs ont, au cours du XXe siècle, appris à maîtriser certaines conséquences problématiques du phénomène de carbonatation. À la fin de vie de l'ouvrage, la carbonatation peut, cette fois, être exploitée pour fixer du CO2 dans la pâte de ciment durcie d'un béton de démolition.

Des résultats récents montrent qu'il est alors possible de recapter jusqu'à 50 à 60 % de CO2supplémentaire. Par ailleurs, cette carbonatation est particulièrement favorable à une amélioration de la qualité du granulat recyclé issu du béton de démolition, facilitant ainsi sa réutilisation.**[5]**

III.4.1.1. Les mécanismes de la carbonatation

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04 % de CO2 Cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération.

Dans les zones fortement industrialisées, dans les parkings et aux abords des grands axes routiers, la quantité de CO2 atmosphérique peut être multipliée par un facteur trois ou quatre pour atteindre 0,1 %. **[5]**

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$



Figure III- 1 .phénomène de la carbonatation. **[5]**

III.4.1.2. Conséquences de la carbonatation

Notons que les ciments contiennent également des oxydes d'alcalins (Na2O et K2O) qui se retrouvent sous forme de bases alcalines dans la solution interstitielle (NaOH etKOH). Ces espèces alcalines permettent de maintenir une basicité au-delà de la valeurimposée par la portlandite (c'est-à-dire au-delà de 12,4 à 20 °C). Néanmoins, leurcarbonatation est très rapide puisque les alcalins sont quasiment uniquement présents sousforme aqueuse et sont donc facilement lixiviés (on dit aussi lessivés) en présence de pluie.

Au cours du processus de carbonatation, l'élément principal de transformation est lecarbonate de calcium (CaCO3) dont il existe plusieurs variétés polymorphiques : calcite,vatérite et aragonite. La calcite est la variété la plus stable et correspond à la forme ducalcaire qui a servi à obtenir le clinker après cuisson du cru dans le four de la cimenterie.

Du point de vue des structures en béton armé ou précontraint, la carbonatation est unphénomène délétère qui progresse de l'extérieur (parement) vers l'intérieur, à travers lazone d'enrobage des armatures, selon un processus physico-chimique qui associe ladiffusion du CO2 à travers la porosité et les réactions chimiques de fixation du CO2 dans leshydrates. La neutralisation de l'alcalinité du milieu qui en découle devient problématiquelorsqu'elle atteint le premier lit des armatures. En effet, si le pH diminue trop, la couche depassivation des aciers constituée d'oxydes et d'hydroxydes ferreux devient instable. Ils'ensuit une corrosion rapide, dite généralisée, sur toute la surface de l'armature. Lesproduits de corrosion, qui sont expansifs, endommagent le parement (fissuration,épaufrures, etc.), forment des coulées de rouilles inesthétiques et conduisent à la réductionde la section d'acier des armatures. La valeur de pH seuil en dessous de laquelle lacarbonatation peut conduire à une corrosion marquée des armatures fait encore débat dansla littérature. Situé entre 9 et 11, ce seuil dépend de la nature du ciment et surtout de l'étathydrique du béton ; il faut notamment suffisamment d'eau liquide pour faciliter leséchanges ioniques au niveau des micro piles qui apparaissent sur la surface de l'acier, sanspour autant bloquer la diffusion de l'oxygène corrosif en phase gazeuse.

Il est possible de réaliser un diagnostic de l'état de carbonatation du béton en prélevantdepuis un parement une carotte qui est fendue en deux et sur laquelle un indicateur colorimétrique de pH (phénolphtaléine) est pulvérisé. La partie carbonatée apparaît incolore et le noyau non carbonaté, c'est-à-dire très basique, se colore en rose (la zone de virage est voisine de pH = 9).

Toutefois il est stipulé dans la réglementation européenne REACH que la

phénolphtaléine a un caractère cancérigène. Son utilisation doit être limitée ou sévèrement contrôlée.C'est pourquoi la communauté scientifique se penche sur l'utilisation d'un nouvel indicateur coloré de pH.

La méthode colorimétrique ne renseigne pas sur la forme véritable du front decarbonatation comme cela est illustré où les armatures apparaissent protégées, car étantsituées à l'aval du front détecté par projection de phénol -phtaléine, alors qu'en réalité leniveau de carbonatation y serait suffisant pour initier la corrosion. Pour gagner enprécision, il existe des méthodes plus coûteuses telles l'analyse thermogravimétrique (réalisée sur une succession de fines tranches de matériau prélevées par sciagePrélevant depuis un parement une carotte qui est fendue en deux et sur laquelle un indicateurcolorimétrique de pH (phénolphtaléine) est pulvérisé. La partie carbonatée apparaîtincolore et le noyau non carbonaté, c'est-à-dire très basique, se colore en rose (la zone devirage est voisine de pH =9).

Toutefois il est stipulé dans la réglementation européenne REACH que la phénolphtaléine a un caractère cancérigène. Son utilisation doit être limitée ou sévèrement contrôlée.

C'est pourquoi la communauté scientifique se penche sur l'utilisation d'un nouvel indicateur coloré de pH.

La méthode colorimétrique ne renseigne pas sur la forme véritable du front decarbonatation comme cela est illustré où les armatures apparaissent protégées, car étantsituées à l'aval du front détecté par projection de phénol -phtaléine, alors qu'en réalité leniveau de carbonatation y serait suffisant pour initier la corrosion. Pour gagner enprécision, il existe des méthodes plus coûteuses telles l'analyse thermogravimétrique(réalisée sur une succession de fines tranches de matériau prélevées par sciage depuis lasurface) et la gamma-densimétrie (méthode non destructive). L'utilisation de plusieursindicateurs colorés présentant des zones de virage de pH différentes pourrait également êtreune solution àcondition que les contrastes de coloration entre les zones saine et carbonatéesoient suffisamment marqués.

L'humidité de l'air est un facteur très important puisque la carbonatation est lente, voire absente, dans une atmosphère saturée d'eau (la diffusion du CO_2 en phase gazeuse est alors quasiment impossible si la porosité du béton est saturée) et dans une atmosphère trop sèche (la dissolution du CO_2 en phase aqueuse n'a pas lieu car elle est cinétiquement très limitée). Ce comportement conduit à une carbonatation optimale pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 %.

En revanche, notons que la corrosion sera quant à elle optimale pour une humidité relative avoisinant 90 %-95 %.

Du point de vue normatif, le risque de carbonatation est pris en compte pour formulerun béton (E/C, dosage en ciment et teneur en additions minérales) au travers de la normeNF EN 206-1. Il est intéressant de noter que la classe d'exposition la plus préjudiciable vis-à-vis de la carbonatation (XC4) correspond à un climat avec alternance de phases sèches ethumides. Cette situation n'est certes pas la plus favorable du seul point de vue de lacarbonatation ; en revanche, eu égard au risque de corrosion, elle maximise la cinétique.Notons également l'existence de normes (Eurocode 2) permettant le dimensionnement del'épaisseur d'enrobage en fonction de la classe de résistance du béton et de l'agressivité de

l'environnement vis-à-vis de l'attaque du CO2.

Le schéma de la carbonatation peut être représenté de la manière suivante **[5]**

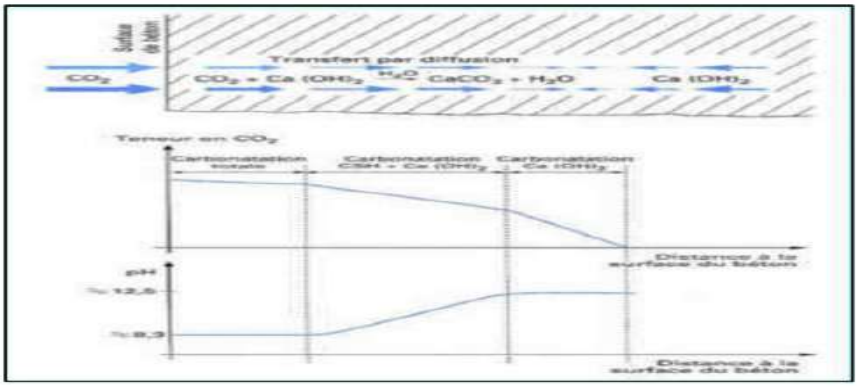


Figure III- 2 .schéma de la carbonatation. **[5]**

III.4.1.3. Les causes de la carbonatation

Le CO2 présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation desmatrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou dumortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenuedans la pâte de ciment (avec une prédominance de H2CO3, HCO3- ou CO32- suivant lagamme de pH.

Ce phénomène a pour conséquence d'abaisser le pH du milieu et de conduire à la dissolution des hydrates du ciment. L'hydroxyde de calcium (Ca(OH)2) est notamment affecté. Plus communément appelé portlandite, cet hydrate joue un rôle fondamental dans le maintien d'un pH élevé protégeant les armatures du béton armé ou prévenant la formation de micro-organismes.

Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plussuffisamment accessible pour réguler le pH par effet tampon, le milieu

s'acidifie,permettant ainsi la corrosion des armatures. La carbonatation des silicates de calciumhydratés (C-S-H) est également possible.

La carbonatation des C-S-H, qui contribue de manière non négligeable à la fixation duCO2 dans la matrice cimentaire, est à l'origine d'importantes évolutions de la microstructure. LesC-S-H se carbonatent suivant un mécanisme progressif de décalcification, les ions calcium venant se précipiter dans la porosité avec les ions carbonates sous forme de carbonate de calcium. La décalcification conduit à la formation d'un gel de silice très amorphe (fortement polymérisé) et plus ou moins hydraté. La carbonatation de la portlandite et des C-S-H est inéluctable, même pour des concentrations très faibles en CO2 (0,03 %). La concentration en CO2 venant simplement contrôler la vitesse à laquelle ce phénomène va avoir lieu et la vitesse avec laquelle il pénétrera dans le matériau (on parle alors de cinétique de pénétration). **[5]**

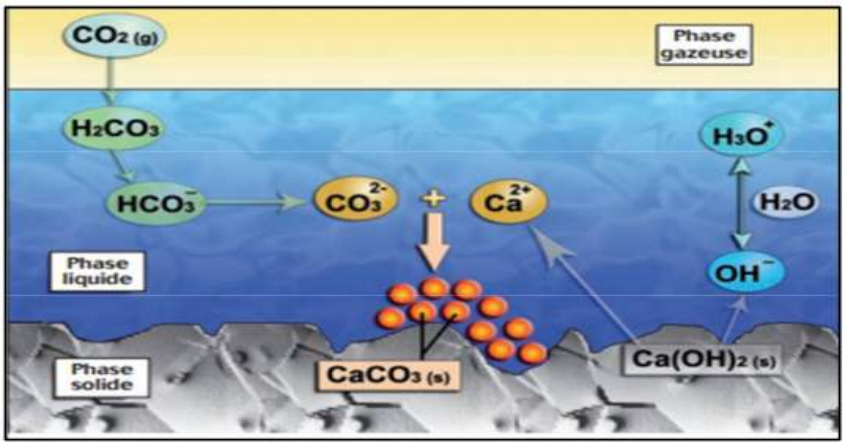


Figure III- 3 . Les phase de carbonatation **[5]**

III.4.1.4. Paramètres influent sur la cinétique de carbonatation

Il existe de nombreux modèles de carbonatation qui traduisent, plus ou moinsdirectement, la résistance physico-chimique du béton contre la pénétration du front decarbonatation. Les paramètres utilisés se rapportent à :

- la porosité du béton qui conditionne la résistance « physique » du matériau à ladiffusion du CO2;
- la teneur en hydrates carbonatables : plus elle est élevée, plus le béton est capable de freiner « chimiquement » la pénétration du front de carbonatation ;
- la microstructure du matériau (taille des pores) dont dépend l'état hydrique du matériau qui conditionnera la cinétique de pénétration du phénomène. C'est alors essentiellement la perméabilité à l'eau liquide du matériau qui sera un indicateur de durabilité pertinent.

Ces modèles aboutissent généralement à une évolution lente en racine carrée du

temps de la profondeur de carbonatation. Pour fixer les idées, avec un béton ordinaire conservé dans un environnement dont l'humidité relative est comprise entre 50 et 70 %, la profondeur de carbonatation est de 5 mm après un an, 10 mm au bout de 4 ans et 25 mm. après 25 ans. Les modèles sont utilisés pour prédire la durée de vie du matériau béton vis-à-vis de l'initiation de la corrosion par carbonatation. Ils ont donc souvent comme défaut de ne pas tenir compte de la cinétique de corrosion et, dès lors, ils conduisent à un surdimensionnement de l'épaisseur d'enrobage et à une formulation souvent trop sécuritaire du béton. Cette approche de la conception du béton est de plus en plus remise en cause dans le contexte actuel de préservation des ressources non renouvelables et de limitation de l'empreinte carbone de la construction en béton.

La carbonatation peut également être à l'origine de désordres au niveau des enduits de façade correspondant généralement à des mortiers à fort dosage en chaux grasse (Ca(OH)2) partiellement carbonatée.

L'acidification du milieu qui découle de l'attaque du CO2 peut être à l'origine du développement de micro-organismes (lichens, mousses, algues, etc.) qui ne croissent pas dans un milieu fortement basique. Ces micro-organismes sont à l'origine de salissures inesthétiques. Il est possible d'enlever temporairement ces traces par un lavage du mur avec de l'eau de Javel diluée ou en utilisant un produit fongicide adapté. **[5]**

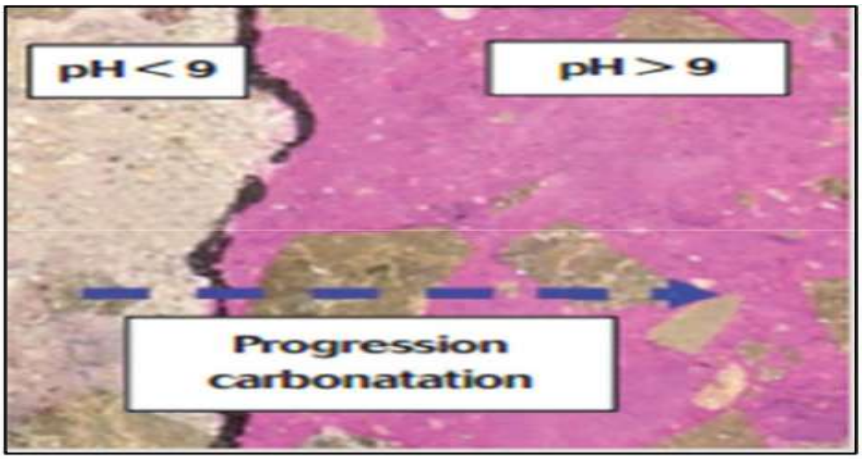


Figure III- 4 . Progression du front de carbonatation. **[5]**

III.4.2. La corrosion

Le terme corrosion vient du latin "corroder" qui signifie ronger, attaquer. La corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interactions physico- chimiques entre le matériau et son environnent entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriété

mécaniques, électriques, optiques, ex thétiques, etc.) EVANS puis WAGNER et TRAUD sont les premiers à avoir défini la corrosion, en présence d'une phase liquide, comme un processus électrochimique. **[3]**

III.4.2.1. Aspect physico-chimique de la corrosion

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour decet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle formeprogressivement de la ferrite de calcium hydraté (4CaO Fe2O313H2O). Mais surtout,cette eau réagit avec l'acier et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de ferFe(OH)2 et de calcium Ca(OH)2 .

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un ph élevé, de l'ordre de 13 qui permet d'assurer la protection de l'acier par passivation. Une telle protection disparaît si la teneur en chlorure dépasse un certain seuil ou si la profondeur de carbonatation dépasse l'enrobage. **[6]**

III.4.2.2.Phases de la corrosion

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes **(FigureIII-5)** :

- Phase d'initiation (ou d'incubation) : c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO2) ou les chlorures (Cl-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton ;

- Phase de propagation : cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser,d'une part, la pénétration des agents agressifs dans le béton et, d'autre part, lesconditions de dépassivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal etla croissance de la rouille. L'observation de la dégradation d'un ouvrage en béton arméintervient souvent au cours de la phase de propagation, lorsque les destructionsdeviennent visibles, c'est-à-dire bien souvent tardivement. Il devient alors très lourd deréparer l'ouvrage et il convient donc de prévoir les effets à long terme de ces agressions

Cette prévision est fondée sur la définition des investigations à effectuer. Elle doit permettre en particulier d'ajuster une formulation adéquate du béton et de définir les paramètres d'exécution de l'ouvrage en fonction de son environnement. **[6]**

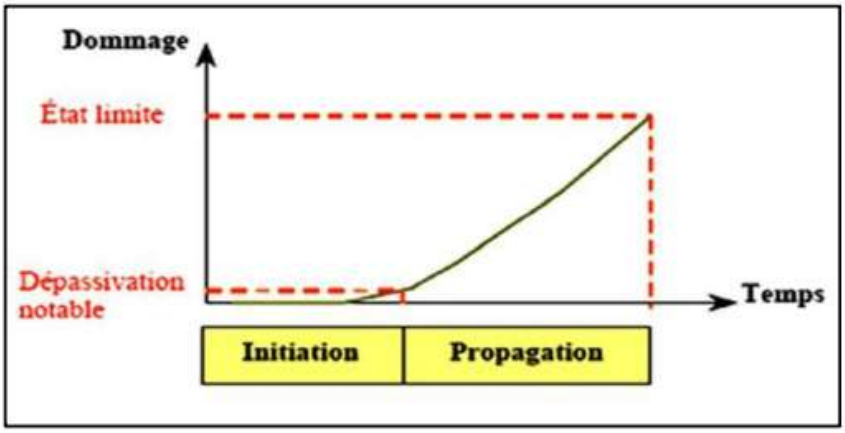


Figure III-5 : corrosion bar les temps. **[6]**

III.4.2.3. Formes de la corrosion

La dissolution (anodique) d'un métal se produit en des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé est de différents types :

- Corrosion généralisée : la corrosion a un aspect à peu près uniforme; ce type a lieu si la zone de réaction cathodique est loin de celle de dissolution, ou si les zones cathodiques et anodiques sont très petites et à peu près régulièrement alternées ;

- Corrosion localisée : ce type de corrosion a lieu si les zones anodiques sont petites et se trouvent à des endroits fixes ; il apparaît alors de petites cuvettes ou piqûres de corrosion. Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective mais ceci ne concerne pas les aciers placés dans le béton ;

- Corrosion sous contrainte : celle-ci est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique. Si cette sollicitation est maintenue dans le temps, il s'agit de corrosion sous contrainte. Dans ce cas, une fissure peut se former, se développer au cours du temps et éventuellement provoquer la rupture du métal tendu. Si la sollicitation oscille, alors il s'agit de corrosion par fatigue. Dans ce cas aussi, des fissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à provoquer la rupture de l'élément sollicité mécaniquement. **[6]**

III.4.2.4. Facteurs influençant la corrosion des armatures

La corrosion dépend de plusieurs facteurs dont certains sont liés au milieu environnant et d'autres aux caractéristiques du béton. Une description des différents facteurscontribuant à la corrosion est présentée par [Raharinaivo et al.,1998]. On présente ci-dessousles facteurs prépondérants. **[6]**

III.4.2.5.Humidité relative

Les réactions de corrosion (dissolution métallique ou passivation) ne se produisentqu'en présence d'une solution qui est ici contenue dans les pores du béton durci. Cettesolution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Parcontre, a cœur (à une profondeur supérieure à 35 mm en général), le béton reste saturéd'eau. Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont puentrerdans le béton et l'altérer. La pénétration des gaz est plus rapide si le béton n'est passaturé de liquide. Ainsi l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou lapassivation desarmatures. Lorsque l'humidité du béton est faible, la pénétration de certains gaz est facilitée; par contre, la corrosion ne se produit qu'en présence de liquide. **[6]**

III.4.2.6.Enrobage

L'enrobage de béton autour des armatures a pour rôle principal d'assurer unetransmission des forces par adhérence entre le béton et l'acier. En outre l'enrobage debétonprotège les aciers de deux façons : par une protection physique, le béton constituantune barrière vis - à - vis des agents agressifs et par une protection chimique, grâce au pHélevé dela solution interstitielle du béton, lequel maintient stable la couche protectriceformée sur lesaciers.

III.4.2.7.Température

Les réactions chimiques sont accélérées avec l'augmentation de la température. Parailleurs, une élévation de température augmente la solubilité des gaz (oxygène, etc.) et dessels dans l'eau.

III.4.2.8.Teneur en chlorure

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soitprovenir du milieu environnant. Lorsque la teneur en chlorure atteint ou dépasse une valeurcritique ou valeur seuil [Glass et al., 1997 ; Brime, 2001 ; Petterson, 1993], on dit qu'il y adépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger lesarmatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes.

III.4.2.9.Oxygène

L'oxygène dissous dans un liquide ou dans une phase aqueuse joue un rôle primordial dans la réaction, dite cathodique, de corrosion des aciers ($O2+2H2O+e- \rightarrow 4OH-$).Ainsi, plus la teneur en oxygène est élevée, plus grande est la vitesse de réaction de dissolution du métal.

Parallèlement, plus la teneur en oxygène est élevée, plus le potentiel mixte du métal se rapproche de la valeur correspondant à la réduction de l'oxygène. En d'autres termes, ce potentiel mixte se déplace vers les valeurs positives. **[6]**

III.4.2.10.Agents agressifs autres que les chlorures

L'eau qui entoure le béton ou qui pénètre par intermittence dans celui-ci (pluie,etc.) peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation des produits de corrosion de l'acier enrobé. C'est ainsi, par exemple, que les sulfates réagissent comme les chlorures,au niveau qualitatif. Une rouille verte peut se former en l'absence d'oxygène. Celle-ci peutensuite se transformer en produits classiques en relâchant des sulfates solubles. Mais, auniveau quantitatif, l'effet des sulfates reste négligeable. En pratique, sauf en cas de pollutiond'origine industrielle, seuls les chlorures et le dioxyde de carbone sont les facteurs de dépassivation des aciers dans le béton. **[6]**

III.4.2.11. Réactions de corrosion des aciers dans le béton

L'exposition des armatures à l'air permet la formation d'une couche naturelle derouille. Vue la porosité élevée de cette rouille, l'eau de gâchage du béton frais pénètre parcapillarité à travers ses ports et des cristaux de ferrite de calcium hydraté peuvent se former (4 CaO FeO3 13H2O).

L'hydratation du ciment produit également l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)2) qui assure un pH élevé à la solution interstitielle. D'une façon générale, les constituants à base d'alcalins du ciment, notamment de calcium et, dans une échelle moins importante de potassium et de sodium, contribuent à la réserve alcaline du béton [Almusallam, 2001].

Dans la zone de contact du béton et de la couche dérouille formée pendant le stockage, l'hydratation du béton est perturbée. Ainsi, entre le béton sain et l'acier, des couches superposées peuvent être identifiées. La première est une couche non influencée par les aciers ; la deuxième, qui est une zone intermédiaire entre le béton sain et la couche la plus proche du métal, assure une transition entre les propriétés mécaniques et la microstructure.

Enfin, la troisième, fortement adhérente à l'acier et étanche, est responsable de la protection de l'acier ou, en d'autres termes, de sa passivation. Tant que le microfilm protecteur dû au ciment sain existe, l'acier dans le béton reste intact.

Les ions chlorures en contact avec le béton pénètrent dans l'ouvrage par l'intermédiaire de l'enrobage. La nature du produit formé à la surface de l'acier est modifiée par les chlorures. Il apparaît une réaction de dissolution (appelée anodique ou d'oxydation) dans laquelle les ions ferreux dissous sont formés (anode). Les électrons libres réagissent à la

surface de la barre d'acier dans la zone dite cathodique. Ces électrons réduisent l'oxygène gazeux dissous dans l'eau, de façon à générer les ions hydroxyles. Les deux réactions élémentaires d'oxydation et de réduction sont simultanées : **[6]**

$$Fe \rightarrow Fe2+ +2^{e}$$

Dans les cas les plus courants, les ions ferreux dissous se combinent avec les ions Hydroxyles de façon à former les hydroxydes : **[6]**

Fe2+ + 2OH- 2Fe(OH)2

Cet hydroxyde (Fe(OH)2) peut continuer à s'oxyder et former de la rouille anhydre (Fe2O3) ou de la rouille hydratée (Fe(OH)3) et du FeOOH, sachant que [Raharinaivo et al.1998] : **[6]**

Fe2O3+H2O 2(FeOOH)

2Fe(OH)3 Fe2O3 + 3 H2O

En l'absence de chlorure, les produits formés à la surface de l'acier protègent celui-ci : c'est la passivation. Une représentation schématique du mécanisme de corrosion induite par les chlorures. **[6]**

Si des ions chlorures arrivent au contact de l'acier et que leur teneur atteint un seuil critique, la couche n'est plus protectrice et la corrosion peut commencer. En conséquence, les ions chlorures pénétrés dans le béton contribuent à l'activation de la surface des armatures de façon à former l'anode, la surface encore passivée fonctionnant comme cathode. Si on ne tient pas compte de la rouille verte, les réactions dans l'anode se déroulent comme suit : **[6]**

$Fe^{2+}+Cl^{-}+2H_2O$ $Fe(OH)_2+2H^{+}+CL^{-}\longrightarrow$

$4Fe(OH)_2+2H_2O+O_2$ $4Fe(OH)_3$ $\longrightarrow$

Les états du béton correspondants à la formation de chacun des produits de corrosion : **[6]**

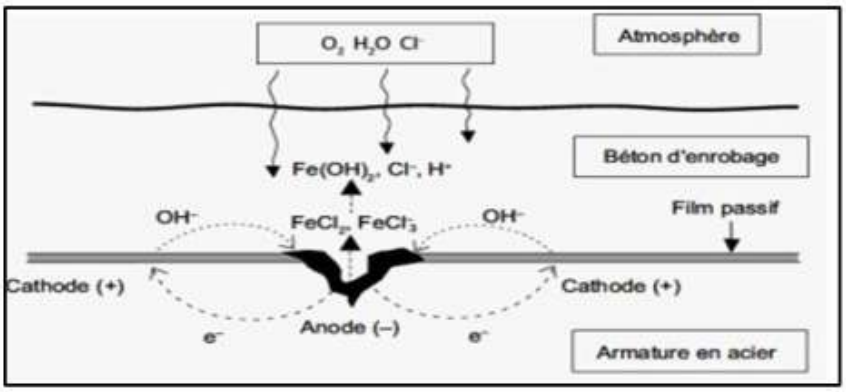


Figure III- 6 : les états de corrosion. **[6]**

Anode= électrode où se produit la réaction d'oxydation (dissolution du métal), où le courant passe du métal vers la solution. **[6]**

Cathode= électrode où se produit la réaction de réduction (déposition à la surface du métal), où le courant passe de la solution vers le métal.

On note aussi que, dans les réactions liées à la corrosion, les ions chlorures ne sont pas présents dans la rouille, même si on les trouve dans les étapes intermédiaires de la réaction. On remarque encore que la porosité de la pâte de ciment est un facteur de grande influence dans la corrosion, puisque le pont entre l'anode et la cathode se fait à partir de la solution interstitielle d'une part et de l'armature, d'autre part. Les principaux paramètres qui ont une influence sur la résistivité électrique du béton sont l'humidité, le système poreux de la pâte de béton durci et la composition ionique de la solution interstitielle. **[6]**

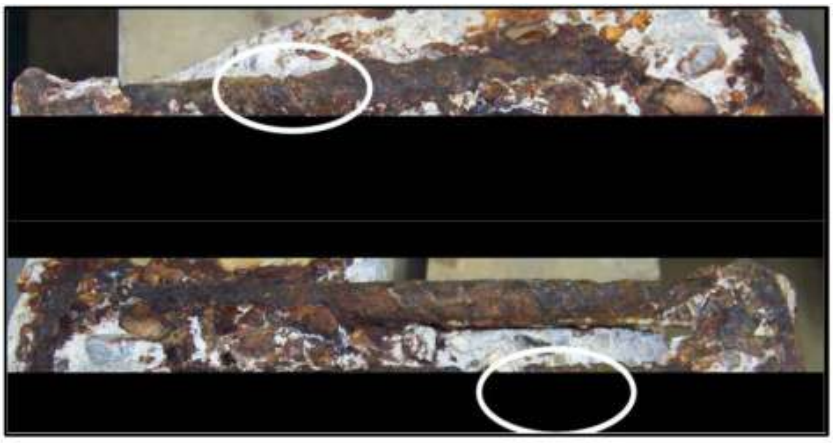


Figure III- 7: corrosion de l'armature. **[6]**

III.4.2.12. Les causes de la corrosion

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, 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 deciment et le CO2 atmosphérique.

L'autre facteur étant les chlorures, la dé passivation s'opère lorsque la teneur enchlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuilcorrespond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment. le schéma suivantdécrit.

Le schéma suivant décrit le principe de corrosion dans le béton armé **[6]**

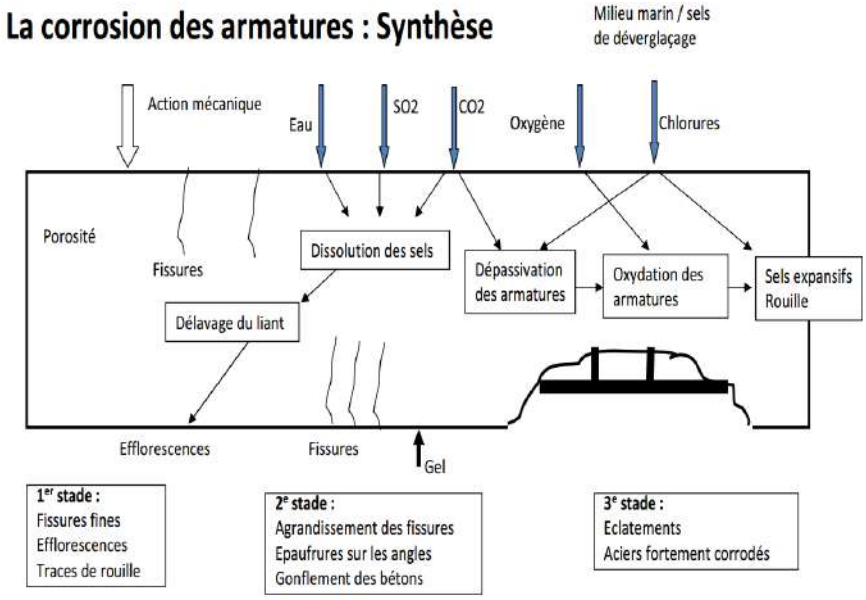


Figure III- 8: Processus de corrosion.

III.4.2.13. Les conséquences de la corrosion

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.

Cela a pour conséquences d'une part l'apparition de différentes pathologies au niveau du parement suite à l'augmentation de volume, mais aussi une perte de capacité portante due à la diminution de la section efficace.

Ces pathologies peuvent être des fissures, des épaufrures, des décollements, ... **[6]**

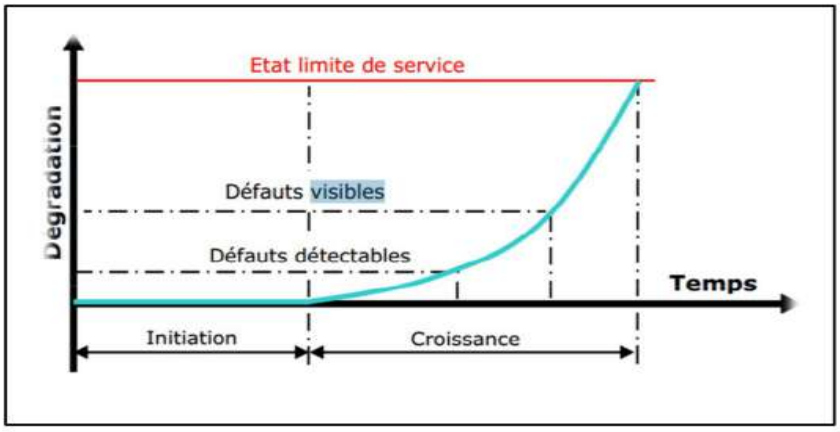


Figure III.9: Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé. **[6]**

III.5.Les altération des bétons

III.5.1. Fissure

- Fente visible affectant la surface d'une maçonnerie, d'un dallage, d'un appareil sanitaire, etc.
- Par convention, la fissure a entre 0.2 et 2mm de largeur ; au-dessous il s'agit d'un faïençage ou d'un simple fil; au-dessus, la fissure est une lézarde.
- Dans leur majorité, les fissures n'ont qu'un inconvénient esthétique : fissure deretrait, ou de mouvement différentiel à la jonction de deux matériaux.

Les fissures sont graves si elles portent atteinte à l'imperméabilité des parois (fissures Pénétrantes laissant passer l'eau de pluie à travers un mur exposé); plus graves encore sont les fissures traduisant un affaissement des fondations, ou des mouvements du sol**.** Est important avant tout de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de la mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation ou sur le béton durci, dû au vieillissement du matériau.

Les causes de la fissuration sont multiples, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories : **[6]**

1. Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant. **[6]**

2. Les causes directes externes, avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité. **[6]**

3. Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures

d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations. **[6]**

4. Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.

Parmi les différents types de fissures, on distingue principalement trois catégories : **[6]**

a. Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton. **[6]**

b. Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2mm. **[6]**

c. Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm.

Il est important lors du processus de réhabilitation d'un ouvrage, de s'intéresser àl'évolution de la largeur d'une fissure. Il est possible de classer les fissures en troiscatégories selon leur évolution :

Ø Les fissures passives ou mortes, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou desollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux alentour à la fissurevarient selon la température, c'est le phénomène de dilatation thermique.

Ø Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps enfonction de la température. **[6]**



Figure III-10: Fissure de béton **[6]**

III.5.2. Lézardes

Les lézardes dans les briques et dans les joints de mortier sont causées par le Iont été obturés sans qu'on laisse le remblayage se fouler convenablement. La glaise sousla fondation a pu sécher et rétrécir ou, peut-être, s'est déplacée sous l'effet d'une inondation.

Le drainage ou l'imperméabilisation font peut-être défaut, ou la fondation a été érigée au-dessus de la ligne de gel. Le sol sous les maisons construites sur une colline se déplace quelquefois vers le bas de la pente. Le pourrissement et le séchage du bois peuvent occasionner des déplacements de terrain et les racines de gros arbres déplacer ou éventrer une fondation. Peu importe la cause, les lézardes causées par affaissement et qui ne sont pas réparées à temps se détériorent rapidement.

Des lézardes continues sur les murs extérieurs indiquent des problèmes d'affaissement : elles sont plus apparentes là où une rallonge a été construite. Elles se forment également dans le haut des portes, aux seuils et aux cadres des fenêtres. Déterminez d'abord si le déplacement et la progression des lézardes sont terminés. Le déplacement dans neuve peut ne jamais plus se reproduire, une fois la maison placée. Vérifiez la lézarde d'un mur extérieur pour savoir si le déplacement est terminé en suivant les deux méthodes que voici : faites un pont sur la lézarde avec un morceau de verre. Collez le verre à l'époxy de chaque côté de la lézarde. Le moindre changement dans le mur ou la fondation brisera le verre. **[6]**

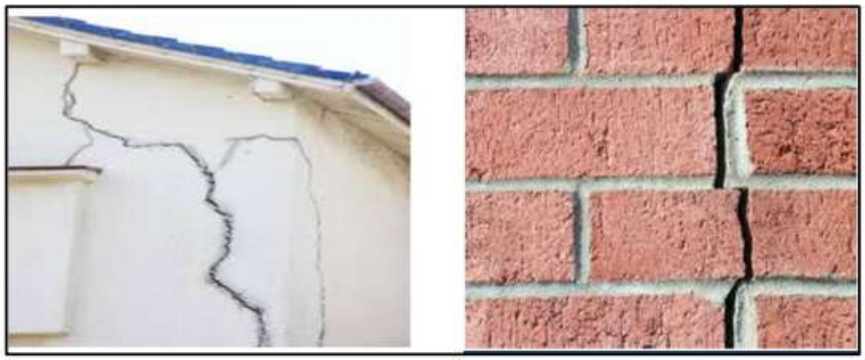


Figure III- 11: lézardes. **[6]**

III.5.3. Retrait

Contraction d'un matériau provoquée par l'élimination de l'eau de gâchage excédentaire(bétons, enduits). Les tensions internes provoquées par les retraits ont poureffet soit deréduire les dimensions extérieures des matériaux, soit de les déformer, soit de provoquerleur rupture : Faïençage des enduits, microfissuration du béton.

Le retrait des bétons et mortiers de ciment commence par un retrait plastique (légèrecontraction par évaporation, dès la mise en place) ; puis intervient le retrait hydraulique,élimination d'eau de gâchage excédentaire, qui se poursuit de façon décroissante pendant
longtemps.

De façon générale, un béton ou un mortier a d'autant plus de retrait que sa concentration en ciment est importante.

La mesure du retrait s'effectue sur des éprouvettes (4x4x16cm), d'une part sur la pâte pure, d'autre part sur le mélange constitué.

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maitrisées par le ferraillage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente. Les fissurations liées au retrait doivent être différencies des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maitrisés par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures.

Quatre types de retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements : retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et le retrait d'auto-dessiccation. **[6]**

a. Le retrait de plastiquées

en relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que des armatures. Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements. **[6]**

b. Le retrait de dessiccation

est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans desconditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est due ˆa ladépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif ˆa l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en Ouvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation. **[6]**

c . Le retrait thermique

est lie au retour à température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques déshydratation du ciment. Ce retour ˆa la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition de phénomènes de fissuration. Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieur à 60 à 80

cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise en œuvre, Jusqu'a quelques semaines, sa durée étant dépendante de la nature des éléments en béton considérés (plus une pièce est massive, et plus la contraction thermique sera lente). **[6]**

d - Le retrait d'auto-dessiccation

est lie à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en Fait d'un phénomène d'auto-dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction. Le Chatelier (le volume des hydrates formes est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial). Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires. **[6]**

III.5.4. Faïençage

Le phénomène de faïençage se manifeste à la surface du béton et affecte son apparence.Il est reconnaissable à la formation sur la dalle de fissures très minces, dont la dimension moyenne varie de 10 mm à 40 mm Ces fissures se présentent en réseaux plus ou moins hexagonaux. Elles se développent rapidement, pouvant atteindre une profondeur de 3 mm, et apparaissent dans les jours suivant la finition du béton. Souvent, le faïençage est seulement visible lorsque la surface est mouillée et commence à sécher. Problème d'ordre esthétique, le faïençage affecte rarement la durabilité de la surface ou la résistance de la dalle de béton. **[5]**



Figure III-12: phénomène de faïençage. **[5]**

III.5.5. Epaufrure

Défaut de surface dû à un choc ou à des intempéries sur le parement ou l'arête d'un élément de béton durci ou d'un bloc de pierre, dans une construction. **[5]**



Figure III- 13: Epaufrure dans construction. **[5]**

III.5.6. Lichen

Lichen est un champignon qui grandit avec les algues et se propage sur la roche, des arbres, béton et autres surfaces solides pour créer une substance de la croûte comme.

Lichen est plus fréquente dans les climats humides et à proximité des plans d'eau, comme les lacs, les rivières, les ruisseaux ou des étangs. Nettoyage lichen hors du béton peut être un défi, mais il est possible de supprimer certains articles de la quincaillerie jumelé avec un nettoyage agressif **[5]**



Figure III- 14: Lichen sur la structure. **[5]**

III.5.7. Le ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Le ressuage est, avec la ségrégation, l'une des deux manifestations de ladégradation de l'homogénéité d'un béton frais. Dans le cas de la ségrégation, les grains présentent aucours du temps un mouvement relatif entre eux. Certains (les plus denses ou les plus volumineux) tombent alors que les autres (les fins ou ceux ayant une masse volumique réduite) remontent vers la surface

Que le ressuage se présente sous sa forme normale ou localisée, une pellicule d'eau claire apparaît à la surface du matériau. Cette pellicule d'eau a, bien entendu, des conséquences sur la qualité du béton, qui peuvent être positives ou négatives selon la caractéristique considérée. Dans une optique d'amélioration constante de la qualité des bétons, la connaissance des causes du ressuage ainsi que de ces effets est primordiale. **[5]**

III.5.7.1. Type de ressuage

Le ressuage peut être divisé sommairement en :

- Ressuage visible dû à la restitution d'eau à la surface de l'élément de construction après le compactage de mortiers ou de bétons.
- Ressuage interne dû à la restitution d'eau sous l'armature ou sous les gros granulats après le compactage de mortiers ou de bétons.

Le ressuage ne doit pas forcément être négatif : la perte d'eau diminue le rapport e/c et le béton devient plus dense du moins dans les parties inférieures. Sur les surfaces de béton inclinées ou verticales, l'élimination de l'eau de ressuage au moyen de lés de coffrage dissipant l'eau fait partie des méthodes ayant fait leurs preuves pour améliorer la qualité du béton superficiel. **[5]**



Figure III- 15 : ressuage de béton. **[5]**

III.5.7.2. Les raisons du ressuage des bétons

Pratiquement, tout béton fraîchement mis en place ressue. Les bétons avec une teneur en eau élevée rapport e/c) sont davantage sujets au ressuage que les bétons dont le rapporte/c est bas. Et plus le pourcentage de fines dans le béton est élevé, plus la tendance au ressuage diminue.

Le ressuage provient de ce que le béton est composé de matériaux dont la densité diffère fortement :

- Granulats avec du domaine de 2,6 à 2,7 kg/dm3
- Ciment 3,0–3,2 kg/dm3
- Eau 1,0 kg/dm3

Pour que le béton puisse être aussi dense que possible, les particules fines du mélangedoivent migrer dans les vides se trouvant entre les particules plus grosses, jusqu'à ce queces vides soient remplis. Ce processus est déclenché par le malaxage, la vibration ou une autre méthode de compactage. **[5]**

III.5.7.3. Dispositif de mesure du ressuage

Le ressuage est mesuré de façon classique par l'observation directe d'unéchantillon.En effet. On peut voir apparaître une ligne de séparation entre l'eau et lapâte dans le haut d'uncontenant transparent. Le ressuage normal est caractérisé par unevitesse de déplacementconstante de la surface du solide. Suivi d'une diminutiongraduelle de la vitesse jusqu'à l'arrêt complet du ressuage. **[5]**

III.6.1. Réparation

La réparation d'un ouvrage est la deuxième étape dans le processus de réhabilitation d'ouvrages en béton armé. C'est l'étape nécessaire pour redonner d'une part les sectionsd'origine de l'acier et du béton, mais aussi pour rétablir les caractéristiques mécaniques desdifférents éléments concernés. C'est-à-dire de redonner la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués. **[14]**

III.6.1.2 le ragréage

Le ragréage est la technique traditionnelle de réparation des bétons. Il permet de reconstituer les sections d'armatures qui ont disparues, de stopper le phénomène de corrosion des aciers par passivation et de protéger les armatures par reconstitution manuelle ou mécanique de l'enrobage à l'aide de mortierde réparation.

La technique de réparation du béton consiste à

- Eliminer les zones de faible cohésion.

- Dégager l'armature corrodée jusqu'à une zone où celle-ci est saine.
- Nettoyer l'armature.
- Remplacer l'armature si la perte de section est trop forte.
- Passiver les armatures corrodées par application de produit.
- Reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide de mortier de réparation.
- Mise en place d'une protection de surface. Il est nécessaire de bien dégager toutes les armatures corrodées et de les passiver sur la totalité de la corrosion sous peine de corrosion rapide des aciers sains et non passivés. **[7]**

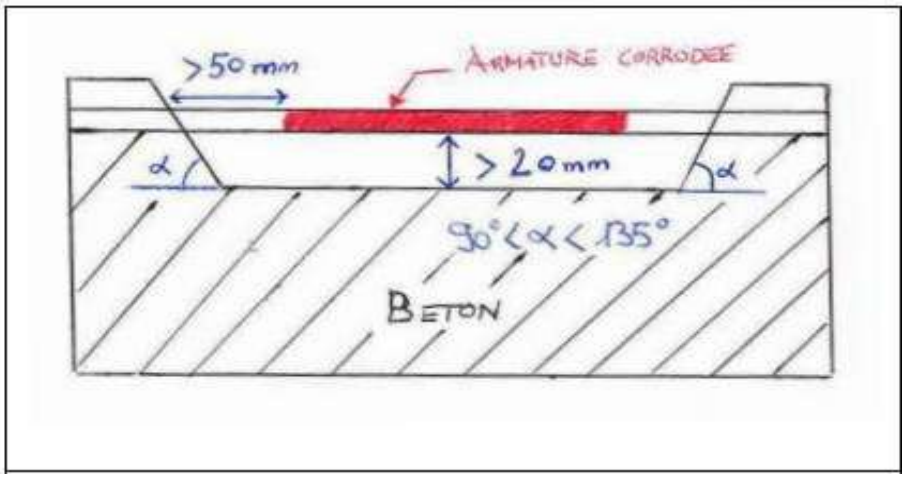


Figure III- 16:Dégagement des armatures [7]

Il sera important de traiter un élément dans son ensemble sous peine que la réparation ne soitpas pérenne.En effet, pour les zones traitées, le pH sera à nouveau élevé protégeant ainsi lesarmatures.Mais dans les zones adjacentes, le pH du béton peut y être beaucoup plus faible. Il peut alors se développer une nouvelle pile de corrosion où l'ancienne anode devient cathode et inversement.

Après réparation, l'ensemble de l'ouvrage restera sensible aux agressions, notammentaux chlorures. Il sera nécessaire de compléter la réparation par un revêtement imperméabilisant qui protégera le béton contre ces chlorures **[7]**

- Ragréage – Application manuelle

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



Figure III- 17: Application manuelle de mortiers **[7]**

III.6.2 Réparation des structures en maçonnerie et en pierre

Ce problème se pose pour les structures en pierre ayant subi des agressions chimiques(pollutions atmosphériques, …) ou mécaniques (usure, chocs accidentels,…). Cesagressions peuvent avoir atteint le mortier de liaison entre les pierres ou les pierres deparement elles-mêmes.

Si le mur construit en moellons n'est pas harpé ou mal harpé et perd de sa stabilité et de son aplomb, il existe deux possibilités de le stabiliser :

- Soit en démontant la partie abîmée et en la remontant correctement en prenant soin de remplacer une partie des pierres trop courtes par les pierres plus longues assurant la liaison entre deux parements **(Figure III. 18)** ;
- Soit à l'aide de courts tirants, le tirant étant composé de deux tiges en acier raccordées entre elles à l'aide de boucles forgées. Ils comportent à l'extrémité des clés ou ancres et des écrous ; le rôle des clés étant d'assurer la meilleure répartition des efforts de traction sur les murs de façade **(Figure III.19).[16]**

Mur dégradé Mur réparé

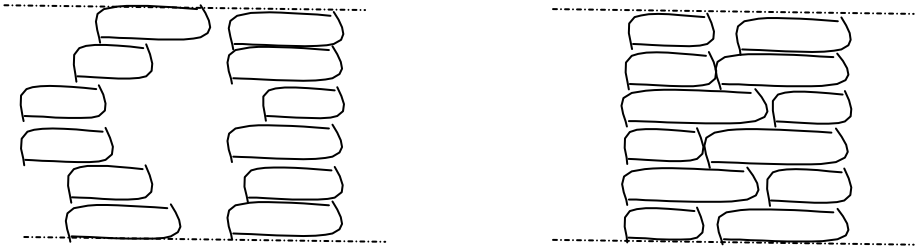
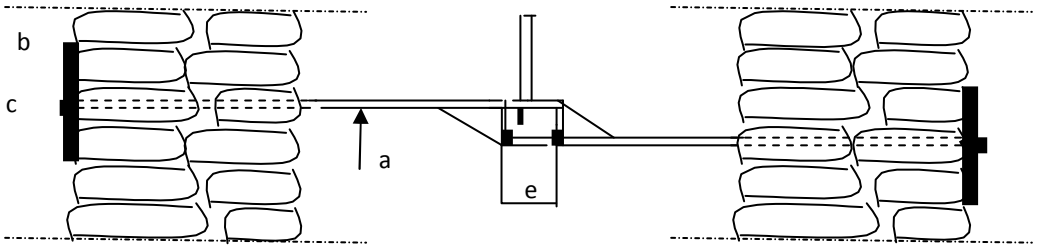


Figure III- 18: Réfection d'un mur mal harpé **[16]**



a) -tige d'acier
b) –ancre
c) – écrou
d) -coins
e) -bagues

Figure III- 19 : Principe d'un tirant. **[16]**

Lorsque la désagrégation du mortier n'est que superficielle, il suffit de rejointoyer la maçonnerie.

Le rejointoiement consiste à dégarnir les joints dégradés sur une profondeur permettant de, retrouver le mortier sain, puis à les regarnir avec du mortier hydraulique**.**Il est également possible de procéder au rejointoiement en utilisant la technique du bétonprojeté. Exécutée dans de bonnes conditions, l'opération permet alors d'atteindre unedurabilitéd'ouvrage supérieure à celle d'un rejointoiement traditionnel.

Béton projeté.

Lorsque l'attaque du mortier est plus profonde et met en péril la cohésion de la maçonnerie, on peut procéder à des injections à base de résines dans la masse de l'ouvragepour boucher les vides entre les pierres. Cette technique est toutefois délicate, car il faut pouvoir contrôler la répartition de la résine à l'intérieur du mur et ne pas entraîner de cloquage.

Pour la réparation des pierres de parement, trois techniques peuvent être envisagées:- Le remplacement des pierres dégradées: L'opération nécessite de trouver des pierres de

substitution. Cette technique est néanmoins préférable, lorsque la partie d'ouvrage à traiter est très dégradée et que la réparation envisagée participe à la consolidation de l'ouvrage

-Le remplacement partiel des pierres abîmées: La technique consiste à retirer, en surface et sur l'épaisseur nécessaire, la partie atteinte de la pierre et à la remplacer par une plaquette de pierre, d'aspect similaire, scellée au mortier.

-Le ragréage: Cette technique consiste à faire disparaître, au moyen d'un mortier imitant la pierre, les blessures superficielles de la maçonnerie **[16]**

III.6.3 Réparation des fissures des structures en béton et en pierre

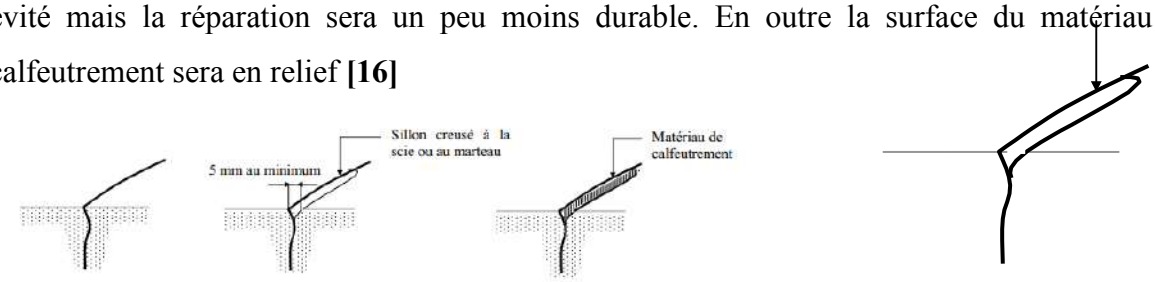
Il existe plusieurs techniques de réparation des fissures qui doivent être choisies selon les caractéristiques de chaque fissure et de leur milieu. Dans certain cas, il peut même arriver que l'utilisation de plusieurs techniques deviennent nécessaires. Ces procédés de réparations sont :

-Pontage et protection localisés

Cette technique consiste à recouvrir en surface des fissures, actives ou non, pour assurer l'étanchéité à la structure. Cette intervention permet, si nécessaire, la pose d'un revêtement de finition **[16].**

-Evidage et calfeutrement

Cette méthode nécessite l'agrandissement de la fissure dans sa partie visible puis le remplissage et calfeutrement avec un matériau approprié **(Figure III. 20**). L'évidage peut être évité mais la réparation sera un peu moins durable. En outre la surface du matériau de calfeutrement sera en relief **[16]**



a. Fissure b.Elargissement c.Calfeutrement

Figure III-20: Elargissement et calfeutrement des fissures. **[16]**

- Injection

Les fissures peuvent être calfeutrées par injection sous pression d'un produit susceptible de créer une liaison mécanique et / ou une étanchéité entre les parties disjointes.

La technique habituelle consiste à forer des trous dans les fissures à intervalles réguliers, à injecter de l'eau ou un solvant pour décaper la partie défectueuse, à laisser sécher

la surface (en utilisant un jet d'air chaud si nécessaire), à obturer les fissures en surface entre les joints d'injection , et à injecter le produit jusqu'à ce qu'elle coule des sections adjacentes à la fissure **[16]**

Les travaux d'injection permettent :

- l'amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques du matériau constitutif de l'ouvrage et du sol à proximité immédiate de l'extrados .
- le rétablissement de la liaison de l'ouvrage avec le terrain .
- l'amélioration de l'étanchéité **[7]**

-INTRODUCTION

Comme nous avons mentionné dans les chapitres précédents, le béton peut se dégrader sous l'action de nombreux facteurs, et vue le coût élevé des structures de génie civil, l'entretient et la réparation de ce matériel sont indispensable afin d'augmenter la durée de vie des différents ouvrages..

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, tout en tenant compte descritères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes desite.

Une réparation efficace du béton repose sur une sélection appropriée des matériaux et de leur utilisation, mais ce choix n'est cependant pas la seule étape importante du processus. Il faut aussi porter une attention particulière sur la préparation des surfaces, les techniques d'application, le mûrissement de la réparation et le contrôle de laqualité.

Ainsi, il convient de vérifier la bonne compatibilité entre le matériau de réparation et l'élément à réparer en garantissant une bonne adéquation entre les propriétés physiques, chimiques etmécaniques

IV.1. Définitions

IV.1.1. La réparation

La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu.La baisse du niveau des services peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des propriétés des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), 'utilisation intensive (effet de la répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (choc, incendies, séisme, etc. …). **[17]**

IV.1.2. Le renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service (augmentation de ductilité, de la résistance etc.…) d'une construction pour en permettre l'utilisation et de lui procurer uneprotection suffisante dans des condition non prévues à l'origine (le séisme par exemple).Un renforcement peut être associé à une réparation. **[17]**

IV.2. Préparation d'une opération de réparation ou de renforcement

Pour savoir si une structure est réparable, il fautc commencer par dresser un étatdétaillé et précis des désordres qui sont apparus, s'efforcer d'en déterminer les causes, estimer

l'intensité des charges que la structure est encore en état de supporter (dans le but de prendre le plus rapidement possible d'éventuelles mesures de protection) et enfin procéder à l'étude des moyens permettant de restituer ses caractéristiques de résistance initiale. Quand la cause de dégradation est déterminée et que l'on a vérifié la résistance de l'ouvrage, il faut décider de :

- Laisser la dégradation se poursuivre ;
- Renforcer la construction ;
- Reprendre des mesures pour conserver l'ouvrage dans son état actuel sans essayer de le renforcer ;
- Reconstruire ou éventuellement d'abandonner l'ouvrage, si la dégradation est exceptionnellement avancée. Cette décision est prise en fonction de facteur de sécurité, d'économie et d'esthétique.

Le choix d'une méthode de réparation n'est pas facile ; il s'agit de choisir le procédé le moinscoûteux qui atteigne efficacement le but poursuivi. Il convient de tenir compte desconsidérations suivantes

1.Le coût n'est pas représenté par la seule mise de fonds initiaux : il faut considérer l'ensemble des frais (la mise de fonds, les frais d'entretien et l'intérêt produit par les sommes non dépensées immédiatement).

2.Le travail doit être fait à temps, sans attendre qu'il y ait urgence : Il faut prendre en considération/estimer le temps necessaire pour qu'une réparation soit bien faite,. Il est à noter également que le coût de la réparation s'accroît à mesure que la dégradation s'aggrave.

3. Si les dégâts sont relativement peu nombreux et isolés, des réparations partielles sont à préconiser. Si les dégâts sont étendus, il faut envisager de reprendre l'ouvrage dans son ensemble.

4. Il faut s'assurer que la réparation empêchera les dégâts de s'étendre, sinon il fautessayerde prendre une marge de sécurité supplémentaire lors de la réparation pour tenir comptede la persistance du phénomène de dégradation ou de l'apparition d'une autre sorte d'altération

5. Si l'ouvrage a été dangereusement affaibli, la réparation doit lui rendre sa résistance initiale et ne pas se borner à empêcher que la dégradation se poursuive.

6. L'esthétique pose-t-elle un problème ? Si tel est le cas, les types de réparation possibles sont en nombre limité, et il peut être nécessaire de cacher la réparation par quelques procédés d'architecture (ce camouflage ne doit pas dissimuler de dégradations profondesou permanentes, ni barrer l'accès à l'ouvrage qu'il cache.

7. Il faut s'assurer que les réparations, pendant leur exécution, ne gêneront pas l'utilisation de l'ouvrage. Dans le cas contraire, il est nécessaire de prendre des mesures pour quel'ouvrage reste en service.

8. Une réparation implique souvent l'accroissement de section d'un élément. Ceci augmente la rigidité de l'élément, modifie la distribution des efforts et des moments résultants des surcharges soulageant certains autres. Ces changements peuvent être importants, il faut s'assurer qu'ils n'endommagent pasd'autres ouvrages ou d'autres parties du même ouvrage.

Après avoir choisi un procédé de réparation convenable et envisagé les conséquences diversesde son exécution, la dernière étape consistera à établir les plans, à rédiger le cahier descharges, et à commencer le travail. **[16]**

IV.3. Matériaux de renforcement et de réparation

IV.3.1. Les matériaux de réparation

IV.3.1.1. Bétons Conventionnels

Les réparations profondes en béton conventionnel sont généralement utilisées lorsquela 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.Il s'agit d'un matériau de réparation très économique.

- Il est préférable d'amener la surface du vieux béton à l'état avant d'appliquer le nouveau béton (pré-saturation de plusieurs heures);
- Un bon mûrissement est essentiel pour assurer une bonne durabilité et pour minimiser la fissuration due au retrait de séchage.
- Le périmètre de la zone à réparer doit être scié sur une profondeur d'au moins 25 mm.
- Les bétons conventionnels peuvent être utilisés avec plusieurs types de techniques de miseen place: utilisation de coffrages conventionnels, projection par voie humide, projection par voie sèche, et pompage.
- Il est important d'utiliser un béton de réparation durable dont les propriétés physicochimiques (module élastique, coefficient de dilatation thermique) sont similaires à celles du béton existant **[18].**

IV.3.2. Les matériaux composite

IV.3.2.1. Introduction

Les matériaux composites peuvent être définis comme assemblage de deux ouplusieurs matériaux dont la combinaison aboutit à la naissance d'un nouveau matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Leurs

principaux avantages en comparaison avec les matériaux de construction traditionnels sont : leurs haute résistance mécanique et chimique, grande rigidité, liberté de forme, légèreté, ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés, Ils offrent unemeilleure isolation thermique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont illustrésdans le tableau (**Figure IV- 1)**

Dans un sens plus restrictif, un matériau composite utilisé dans la réparation desstructures est par définition, toute matière première comportant un renfort et une matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent deliaison.

- Le renfort assure la résistance et la rigidité du matériau,
- La matrice maintient les élémentsde renfort dans leurs dispositions, assure le transfert des charges au renfort et donne au matériau sa forme désirée.

Le renfort peut être sous forme de fibres ou de particules, on ne traitera dans ce travail que ce qui concerne les matériaux à base de fibres.

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice.**[19]**

TableauIV-1: Exemples de matériaux composites **[19]**

Type de composite	Constituants	Domaine
1/Composites m a t r i c e organique	-Résine/fibre cellulosique -Résine /copeaux	-Imprimerie -bâtiment
- papier	-Résine / tissus	-toitures
-carton	-Elastomère	-Automobile
2/composites à matrice Minérale		-Génie civil
-bidon	Ciment /sable /granulats Carbone / fibres	-aviation
-Composite –carbone-		-espace
3/ Composites à matricemétallique	Aluminium /fibres de bore Aluminium /fibres de carbone	-aérospatial

IV.3.2.2. Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phasesdiscontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue a habituellement despropriété mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (**Figure IV -1)**

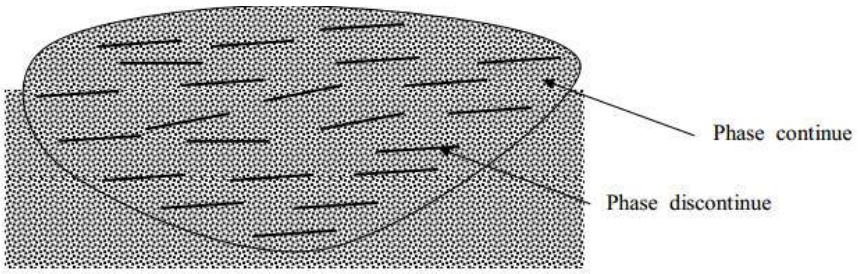


Figure IV- 1 : les différents types de composites.

Les propriétés des matériaux composites résultent de :

– Les propriétés des matériaux constituants.

– Leurs distributions géométriques.

– Leurs interactions.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

– La nature des constituants et leurs propriétés.

– La géométrie du renfort, et sa distribution.

– La nature de l'interface : matrice-renfort.

- La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).
- La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse), la concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés mécaniques du matériau composite.
- Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important, sa distribution uniforme assurera une homogénéité du matériau composite.
- Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans des zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.
- Dans le cas des matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation desfibres détermine l'isotropie du matériau composite.

- Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées.**[19]**

IV.3.2.3. Les Matériaux De Renfort

C'est le renfort qui constitue l'armature ou le squelette et qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il est par définition, de nature filamentaire (fibre minérale ou organique) allant de la particule allongée à la fibre continue, La fibre de renfort apporte donc toujours la tenue mécanique de la structure composite (tandis que la matrice apporte la forme et la tenue chimique) et peut représenter un taux massique de 20 à 80% **[4]**

Tableau IV -2: Caractéristiques des fibres de renfort. **[18]**

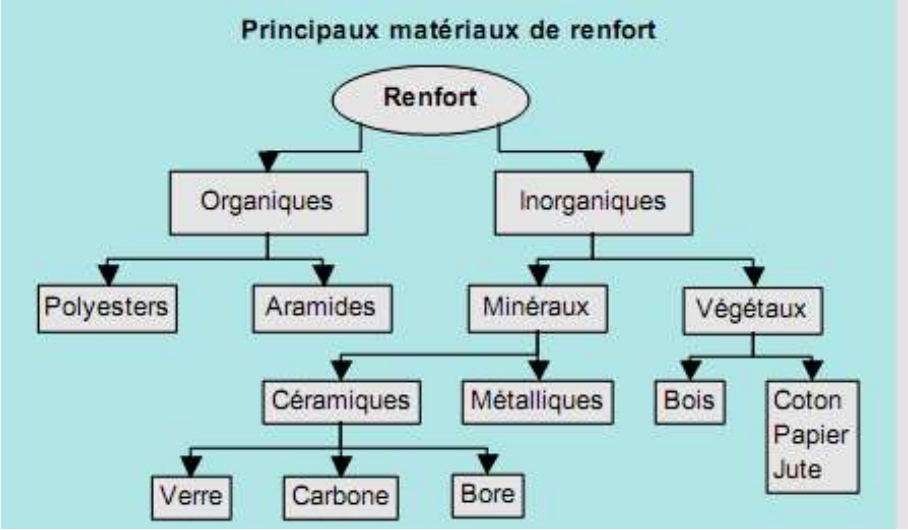
Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masser volumique (kg)	Module d'élasticité longitudinal(N/mm^2)	Module de cisaillement (N/mm^2)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction)	Allongement à la rupture (%)	Coefficient de dilatation Thermique
	D	Mv	E	G	K	G	A	u
Verre E	16	2600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	0.5*10
Verre R	10	2500	86 000		0.2	3 200	4	0.3*10
Carbonne HM	65	1800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	0.08*10
Carbone HR	7	1750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	0.02*10
Kevlar 49	12	1450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	0.2*10

IV.3.3. DIFFERENTS TYPES DE FIBRES UTILISEES

IV.3.3.1. Les fibres

Les fibres constituent le principal élément résistant du FRP. Elles contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et sont constituées de plusieurs filaments élémentaires dont le diamètre varie entre 5 et 25µm. Elles présentent une bonne résistance à la traction en même temps qu'un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture.

Les lois de comportement des fibres sont donc de type "élastique fragile". Selon leur nature chimique, elles peuvent être de carbone (CFRP), de verre (GFRP), d'acier, de graphite, d'aramide (AFRP), de basalte ou l'acétate de polyvinyle. Différente types de fibres (longueur, composition) sont disponible pour chaque nature chimique différente. Les plus connues en génie civil, sont celles de verre, de carbone, d'aramide (Kevlar), et les fibres hybrides (carbone-verre ou autre). **[21]**



FigureIV-2: Les principaux matériaux de renfort **[21]**

IV.3.3.2. Les fibres métalliques

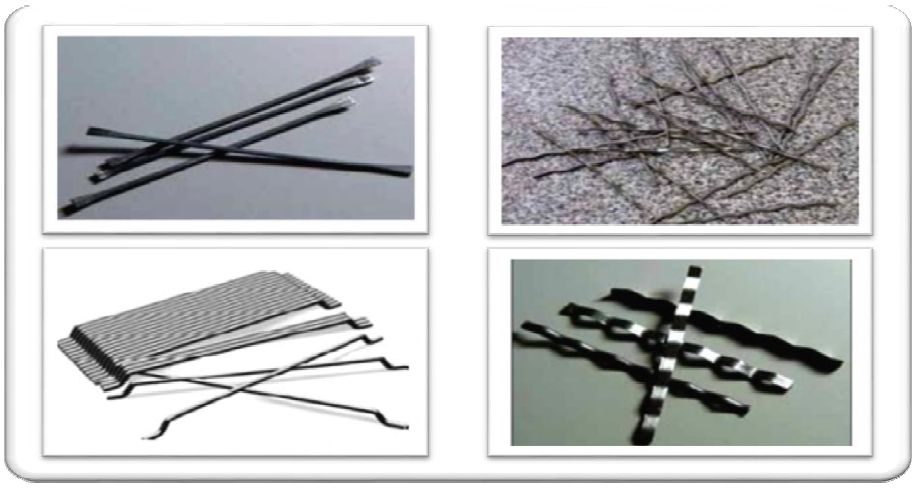
Les fibres métalliques (**Figure.3**) sont largement utilisées et leurs effets sur lespropriétés rhéologiques et à l'état durci aussi bien que sur la durabilité ont fait l'objet denombreuses études **[21]**.

Les fibres d'acier sont sans doute les plus utilisées, elles ont faitl'objet de plusieurs recherches.

Les fibres métalliques (**Figure.3**) sont caractérisées par leurs effets sur lespropriétés rhéologiques et à l'état durci aussi bien que sur la durabilité. Ces derniers de même que les fibres en acier sont largement utilisées et ont fait l'objet denombreuses études **[21]**.

A l'origine, les fibres rectilignes et de section circulaire (d'un type identique à celles servant à armer les pneumatiques) ont évolués vers les fibres d'acier en tôle cisaillée.Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les uns des autres par :

- Leurs diamètres
- Leur section (ronde, carrée, rectangulaire ...)
- Leur longueur et leur mode d'élaboration
- Elles peuvent être rectilignes, ondulées ou présenter des élargissements aux extrémités, soit des coudes ou des crochets pour améliorer l'adhérence.



FigureIV-3 : Quelques formes de fibres d'acier **[25]**

Il n'a été souligné que les fibres d'acier :

- Augmentent considérablement la résistance à la traction du matériau, sa ténacitéou encoresa capacité d'absorption d'énergie
- Elles réduisent en même temps la fissuration malgré le surpoids lié à leur masse volumique élevée

Comme il existe d'autres types de fibres métalliques mais ne sont pas largementutilisées. Citons par exemple ; les fibres d'inox, les fibres de fontes, …etc. **[25]**

IV.3.3.3. Les fibres minérales

IV.3.3.3.1. Les fibres de verre

Les fibres de verre (**Figure IV.4**), par leurs qualités mécaniques et leur coûtmodéré, ont été les premières fibres artificielles utilisées dans les matériaux de construction.Cependant, les applications sont limitées en raison de leur faible résistance chimique auxalcalins.**[25]**

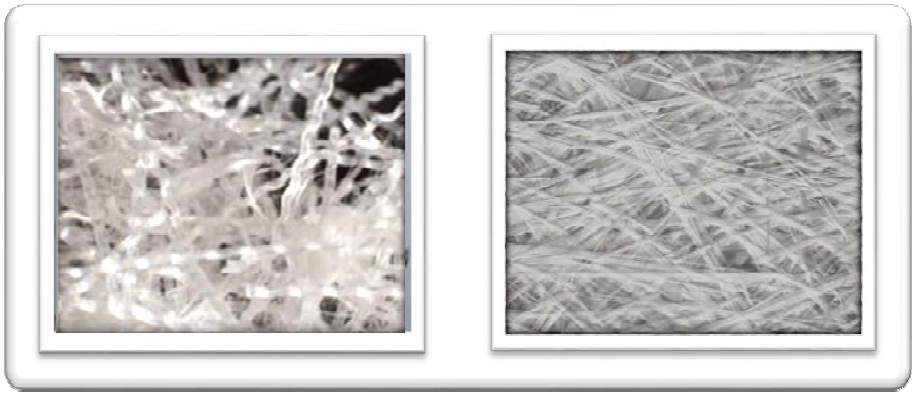


Figure IV-4: Fibres de verres

IV.3.3.3.2. Les fibres de carbone

La plupart des fibres de carbone sont produites par la décomposition thermique du polyacrylonitrile (PAN). Le procédé de fabrication de ce type de fibre consiste à uneoxydation à des températures de l'ordre 200-300°C, à différentes étapes de carbonisation (1000-1500°C et 1500-2000°C) et enfin à une graphitisation (2500-3000°C).**[25]**

Les fibres (Figure IV.5) de carbone sont caractérisées par :

- Haut module d'élasticité et hauterésistance
- Une rigidité spécifique (rapport rigidité/densité) élevée
- Un faible coefficient d'expansion thermique (CET)longitudina
- Une faible sensibilité aux charges defatigue
- Une excellente résistance aux agents chimiques et àl'humidité
- Le module d'élasticité et la résistance des fibres de carbone sont stables lorsque la température augmente.**[25]**

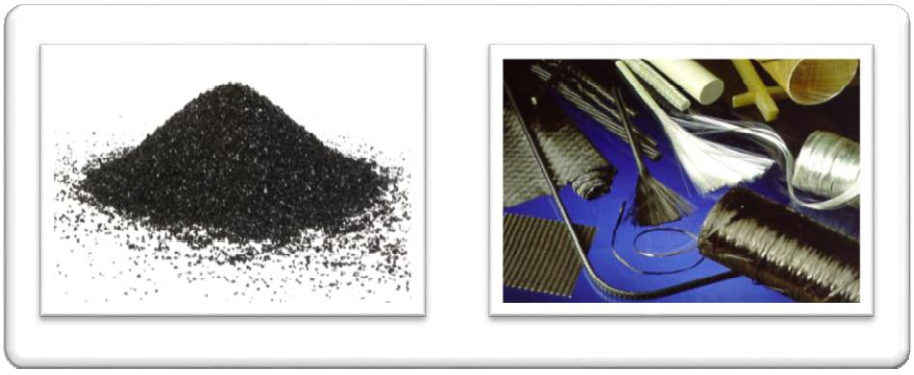


Figure IV-5: Fibres de carbones **[25]**

Cependant, les fibres de carbone ont une faible résistance à l'impact à cause de leur faibledéformabilité et un coût élevé (10 à 30 fois plus que le verre-E).Ce coût élevé provient

du prix élevé des matières premières et de la complexitédu processus de la carbonisation et de la graphitisation.Les fibres de carbone peuvent être classées comme suit :

- Selon le type de précurseur:
  - ✓ Fibres isotropiques "PITCH" caractérisées par un module élastiqueélevé.
  - ✓ Fibres polyacrilonitrile "PAN" caractérisées par une résistance ultime et un coût très élevés. **[25]**
- Selon les propriétés physiques et mécaniques:
  - ✓ Module élastique élevé(HM).
  - ✓ Haute résistance(HR).

IV.3.3.4. Les fibres organiques

IV.3.3.4.1. Les fibres d'Aramide

Aramide est un terme générique pour un groupe de fibres organiques de faible densité et résistances spécifiques (rapport résistance en traction / densité) parmi les plus élevées parmi les fibres de renfort courantes.Les fibres d'aramide (**Figure IV.6**) sont caractérisées par :

- Une haute résistance;
- Une rigidité élevée;
- Une stabilité vis-à-vis des hautestempératures.



Figure IV- 6: Fibres d'Aramide hachées et en files **[25]**

La température d'utilisation typique pour les fibres d'aramide varie entre -200°C et+200°C.Trois types de fibres d'aramide sont commercialement disponibles portant les marques de fabricants telles que :

-Kevlar (Dupont,USA)

-Twaron (Akzo,Pays-Bas

-Technora (Teijin,Japon)

Ces fibres sont résistantes à de nombreux produits chimiques, mais elles peuvent être dégradées par certains acides et alcalins. **[25]**

IV.4. Types et techniques de réparation /ou de renforcement

IV.4.1. Introduction

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic.Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et decritères économiques.On peut être amener donc à procéder :

- ✓ A des remises en étatd'éléments structurels présentant des défauts que l'oncherche à atténuer, pour obtenir un aspect satisfaisant tels que: l'obturation defissures qui sont dues le plus souvent au retrait et aux variations environnementales.
- ✓ Au renforcement ou à la réparation d'éléments insuffisamment résistants, lesréparations sont souvent réalisées dans les zones où les sections sont tropsollicitées et défaillantes, par contre le renforcement des éléments consiste àaméliorer leurs caractéristiques mécanique de manière à ce qu'elles offrent unemeilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.**[22]**

IV.4.2. Méthodes de renfort

Dans le domaine de la construction, il existe de nombreuses procédures de renforcement oude réparation des structures (Vizuete 2000, Foo et al. 2001), les plus courantes sont :

1- Incorporation de profils en acier : il s'agit de construire une structure parallèle à celle déjà existante qui supporte les charges. Ce type de structure demande beaucoup d'espace, il est seulement viable pour de grands renforcements.

2- Collage d'éléments préfabriqués : cette méthode nécessite des ouvrages spéciaux associés.

3- Addition d'armatures en acier sans augmentation de la section en béton : cette technique est normalement employée pour le remplacement d'une ancienne armature, en cas de corrosion.

4- Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier. Le béton peut être coulé ou projeté.

5- Adjonction de platines en acier. L'acier collé au béton augmente la section structurelle résistante. On l'utilise dans les poutres, dalles, murs, piliers.

6- Adjonction de lamelles, bandes ou tissus de matériaux composites. Le concept est le même que dans le cas précédent, à la différence que l'élément résistant incorporé est fait de matériaux composites (habituellement, de résine époxy et de fibres de carbone, verre ou d'aramide).

7- Amélioration des structures par précontrainte extérieure.

8- Amélioration de la structure des bâtiments à l'aide de dispositifs amortisseur.**[23]**

IV.4.3. Protection des ouvrages en béton armé

Après avoir diagnostiqué les différentes pathologies, puis réparer la structure, il peut être utile de prévoir une protection des ouvrages afin de rendre pérennes les réparations et afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables. Il existe un grand nombre de protections possible qui dépend de ce qui est à .protégerdans la structure. Chacune de ces méthodes permet de redonner au béton ses bonnes caractéristiques mécaniques et chimiques mais aussi de le protéger contre des attaques extérieures. en l'occurrence, elle permet la durée de vie de la structure concernée et d'augmenter ses capacités à absorber les attaques de l'environnement extérieur et de la vieillesse.**[3]**

IV.4.3.1.Reconstitution de l'enrobage

De nombreuses méthodes existent pour réparer durablement un parement en béton, arrêter la progression des dégradations et éviter de nouveaux désordres. Leur utilisation suppose une mise en œuvre attentive, un contrôle des résultats et une surveillance adaptée. **[3]**

IV.4.3.1.1. Principes et définitions

L'objectif de la reconstitution du parement est non seulement de restaurer l'apparence du béton mais aussi d'arrêter le processus de corrosion tout en rendant à la structure son intégrité. Il s'agit de réparations à caractère discontinu, ponctuel et superficiel pour lesquelles plusieurs précautions doivent être prises :

- ✓ Si les zones dégradées sont visuellement identifiables (béton décollé, fissures, épaufrures, etc.), l'état des zones adjacentes (avoisinantes) n'est en général connu qu'après un diagnostic généralisé. Ainsi, les surfaces à dégarnir sont en général sous estimées lors de leur première évaluation;
- ✓ Si des zones présentent un risque de corrosion (béton carbonaté ou pollué par les chlorures), celles-ci peuvent se déclarer après un délai de quelques années, à côté dela réparation, par l'apparition d'un couple galvanique entre la surface réparée et la surface adjacente. **[3]**

<u>Une attention particulière devra être apportée aux points suivants :</u>

- L'apport de matériaux en surépaisseur peut modifier la section des éléments de la

structure. Il est donc nécessaire de prendre en compte les charges qui en résultent;

- L'enlèvement du béton dégradé ou pollué risque d'affaiblir ou de déséquilibrer la structure. Un phasage précis doit être mis en œuvre. Le recours à un étaiement peut s'avérer nécessaire;
- Des remplacements d'armatures seront à envisager selon des critères de décision (diamètre résiduel, longueur) décrits plus loin. L'objectif sera de rétablir la section d'origine.

Des étapes essentielles sont à respecter dont la préparation de la surface du support.**[3]**



Figure IV-7: Reconstitution de l'enrobage **[3]**

IV.4.3.1.2.Elimination des zonesdégradées

Avant de réparer les zones dégradées (armatures apparentes, éclatements de béton, traces de rouille, etc.), les revêtements en place doivent être retirés sur toute la surface par un moyen mécanique ou chimique. Les produits de démolition doivent être mis en décharge ou recyclés, en conformité avec les textes réglementaires en vigueur sur la protection de l'environnement.

Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier sain apparaisse (sans trace de rouille) et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P95 95.102 (un dégagement d'un minimum de 2 cm derrière l'armature est conseillé). Lorsque les armatures qui ne sont pas parallèles au parement sont corrodées à leurs extrémités, le béton avoisinant doit être enlevé et ces extrémités doivent être amputées de 2 cm, pour rétablir un enrobage suffisant.**[3]**



Figure IV-8: piquer les parties éclatées **[3]**

La phase d'élimination de la zone sous corrosion constitue l'une des tâches les plus délicates à réaliser. La bonne tenue dans le temps des réfections de parement dépend directement de la qualité d'exécution de ces travaux. Il est donc impératif d'éliminerl'intégralité de cette altération, qu'elle soit foisonnante ou de surface et ceci sur toute la périphérie de l'acier par décapage et brossage soigné ou par des moyens mécaniques (sablage, hydrosablage, etc.) Cette opération doit être plus particulièrement soignée en milieu marin car la rouille y est chargée de chlorures acides. Les surfaces de bétons sont ensuite nettoyées afin de faire disparaître toute poussière ou toute souillure subsistant après élimination des bétons dégradés. Ce nettoyage peut être réalisé par voie humide ou sèche (brossage et soufflage), mais dans le cas du lavage à l'eau, celle-ci doit être éliminée par soufflage ou par aspiration.**[3]**



FigureIV -9: Nettoyage des surfaces **[3]**

IV.4.3.1.3.Remplacement des armatures

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures lesplus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, soudure, ou des systèmes explicite de fixation (cheville, tiges collées, boulonnage), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.[20]

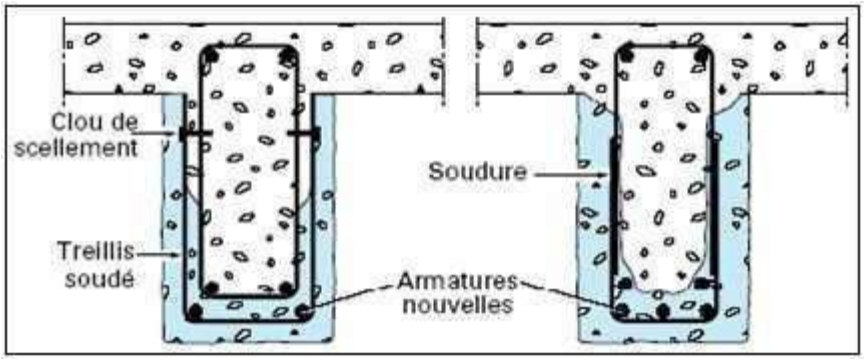


Figure IV- 10 : Adjonction d'armatures complémentaires

IV.4.3.1.4. Protection des armatures

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées, un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pasavoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné. Il est égalementfonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs(électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, carl'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de laréparation. **[20]**



Figure IV-11 : Protection des armatures **[3]**

IV.4.3.1.5.Réfection des bétons

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- De la tenue d'aplomb de l'élément.
- D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer lespropriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que: l'influence du retrait en terme de glissement sur l'interface du bétoninitial et le béton nouveau.

Ce type de réparation demande généralement, pour être efficace , une augmentationnon ,négligeable des dimensions des éléments de structure et l'emploi d'un volume relativement important de matériaux , ce qui n'est plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique .**[20]**

IV.4.4.Imprégnation

IV.4.4.1.Principes et définitions

Traitement du béton destiné à réduire la porosité de surface et à renforcer la surface, les pores et les capillaires étant partiellement ou complètement remplisses, le Traitement forme généralement un film discontinu à la surface du béton. Le plus souvent, les produits appliqués par imprégnation sont des consolidant ou des hydrofuges qui se particularisent par leur fonction principale :

- Un produit consolidant attribue à une zone peu profonde altérée, une cohésion identique à celle du même matériaud'origine.
- Un hydrofuge forme une barrière interne au matériau, vis-à-vis de la pénétration de l'eau liquide, sans trop affecter la perméabilité à la vapeurd'eau.

Un hydrofuge est dit de surface, lorsqu'il est appliqué sur le béton durci. Il n'est ni un imperméabilisant, ni un anti graffiti. Certains produits ont des fonctions secondaires (antisalissure, etc.). Lesconsolidant et les hydrofuges n'ont pas d'action directe sur la protection contre la corrosion des armatures. Mais ils peuvent être utilisés comme traitement complémentaire.

Seuls les hydrofuges de surfaces seront traités ici. Les traitements hydrofuges s'insèrent dans une procédure globale de réparation.**[3]**

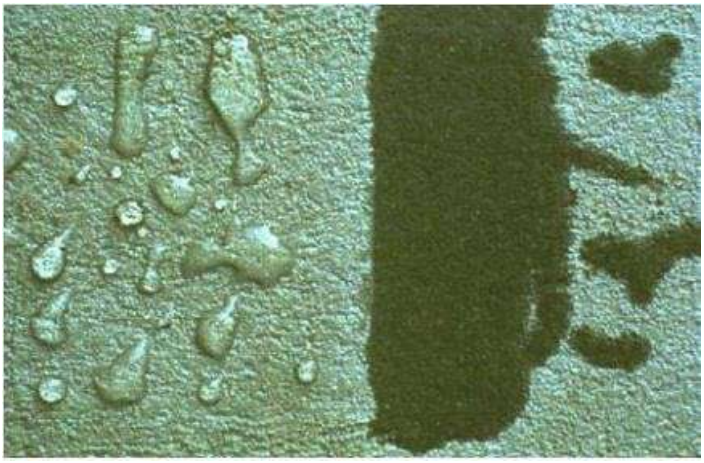


Figure IV-12: Action d'un produit hydrofuge **[3]**

IV.4.4.2.Classification des produitshydrofuges

Les produits hydrofuges peuvent être classés en fonction de la nature chimique de leur constituant de base. Les produits les plus répandus sont les silicones et leurs dérivés. Mais il existe aussi des hydrofuges acryliques, des résines fluorées et d'autre. La classification des hydrofuges tient compte de la taille des molécules. Pour une application donnée, il convient de choisir le produit qui adapté à la porosité du bétontraiter.[3]

IV.4.4.3. Procédure de choix etd'application

Le choix de produit, comme le choix de la procédure d'application ne pourront être réalisés qu'après un diagnostic et des essais préliminaires.[3]

IV.4.4.4. Diagnostic

Avant traitement du béton par un hydrofuge, il est essentiel de définir si cette action est utile et compatible aussi bien avec le matériau à traiter qu'avec son environnement. La première étape du traitement consiste à préciser dans le diagnostic:

- La nature est l'étendue des altérations qui affectent lematériau,
- L'absence de fissure ou de délamination dubéton,
- L'origine desdégradations,
- Les caractéristiques principales du béton à traiter (notamment saporosité),
- Et enfin si aucune ne contre-indication ne s'oppose autraitement.**[3]**

IV.4.4.5. Choix du produit et essai préliminaires

Lechoix d'une famille d'hydrofuges est réalisé après caractérisation préalable du support, et aussi après avoir clairement défini les conditions de la mise en œuvre sur chantier. L'efficacité et la durabilité du traitement hydrofuge sont optimisées, en distinguant un produit

particulièrement adapté au support et à ses propriétés physiques (taille de pores, couleur, etc.), l'optimisation est faite à partir d'essais deconvenance.[3]

IV.4.4.6. Procédured'application

- ✓ Les principales techniques d'application sont le pinceau, le rouleau et le pulvérisateur pour les silicones et le pulvérisateur ou le pistolet "airless"
- ✓ Les conditions climatiques sont particulièrement importantes pour le processus de polymérisation. C'est pourquoi, il convient de respecter les notices techniques afin d'éviter une polymérisation trop rapide par temps trop chaud ou trop lente par temps trop froid et humide
- ✓ Enfin, le support doit être réparé et propre. Mais en plus, les indications de la fiche technique du produit concernant l'humidité du support, doivent être respectées.[3]

IV.4.5. Renforcements et réparation par Matériaux de composite

Toute mise en œuvre de matériaux composites sur une structure endommagée nécessite d'abord un ragréage de la surface à réparer. Celle-ci doit être plane et propre. Dans la plupart des cas, une injection de fissure et un traitement de surface par sablage sont réalisés **[18]**

IV.4.5.1. Mise en œuvre par enroulement filamentaire

La fibre est produite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin. La longueur de fibres continues peut varier de 600 m à 5 km (soit 0,8 g au mètre linéaire). Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes (**Figure 13-a**).

Le principal avantage de ce procédé est l'automatisation complète du système de pose **(figure IV -13- b).**

Son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités des piles et des colonnes et que cette méthode demande en outre du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel. Cette méthode a surtout été développée au Japon, et elle est aujourd'hui utilisée à travers le monde.**[18]**

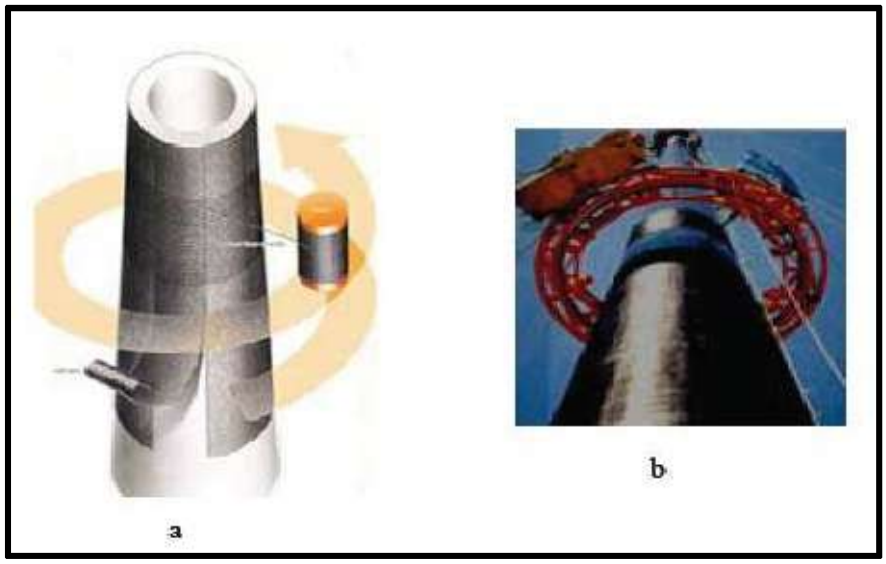


Figure IV-13 : Les principes de l'enroulement **[18]**

a)principe de l'enroulement filamentaire, **b)**enroulementautomatisé

IV.4.5.2. Mise en œuvre par stratification directe de tissus sec

Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après reprofilages, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles par rapport à d'autres méthodes de renforcement. Le principal avantage du renforcement par tissus secs est la manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. Cette technique permet notamment un suivi parfait de la forme du support ainsi que la maîtrise de l'épaisseur du film de résine, en utilisant des polymères qui polymérisent à température ambiante, il est possible de réaliserune stratification directe, en respectant les étapes suivantes (**Figure IV -14)**

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



Figure IV-14: Mise En Œuvre Par Stratification Directe. **[18]**

Ce procédé présente l'avantage d'une mise en œuvre simplifiée, mais le renforcement acquiert toute sa résistance au bout d'une semaine et le contrôle de la qualité de l'applicationdoit être soigné suivant les conditions de mise en œuvre. Ce procédé a trouvé de nombreuses applications en Europe, au Japon et aux Etats-Unis. Les principaux paramètres qui doivent être suivis sont les températures et l'humidité du support. L'ensemble de ces paramètres contribue à la modification des propriétés mécaniques du composite en place.**[18]**

IV.4.5.3. Le collage de plaques composites

Les plaques composites sont des produits finis présentent sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres. La section des bandes les plus courantes est 100 x 1 mm, leur longueur, suivant la demande, varient de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

Cette technique, comme celle du plat collé métallique, permet difficilement de maîtriser les épaisseurs de colle, en raison de la rigidité des aciers et des composites. L'application de ces renforcements sur des surfaces ayant des défauts de planéité ou sur des surfaces courbes ou non développables reste très limitée. Le procédé de collage est le suivant (**Figure IV-15)**

- Nettoyage à l'acétone de la face de collage de la plaque,
- Traitement de surface à réparer par sablage,
- Traitement par eau sous pression et meulage,
- Nettoyage de la surface par un dépoussiérage,
- Le polymère époxy est appliqué sur la plaque de composite,
- La plaque est ensuite pressée sur la surface, l'excédent de colle est enlevé,

- Une pression à l'aide d'un sac à vide est appliquée jusqu'à complète polymérisation du polymère. **[18]**



FIGURE1. PROCEDE PAR COLLAGE DE PLAQUES (SIKA, 1996)

Figure IV-15 : Procède Par Collage De Plaques (SIKA, 1996).**[18]**

IV.4.5.4. Renforcement des poteaux

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite. **[19]**



FigureIV- 16 : Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites. **[19]**

IV.4.5.5.Renforcement des poutres

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres. **[19]**



Figure IV- 17: poutres en BA renforcées par matériaux composites. **[19]**

IV.4.5.6. Renforcement des dalles

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé.



Figure IV- 18 : tablier de pont en BA renforcé par matériaux composites **[19]**

IV.4.5.7. Renforcement des murs



Figure IV- 19 : Mur en BA renforcé par matériaux composites **[19]**

IV.4.5.8. Avantages des matériaux composites

Les matériaux composites présentent des avantages tels que :

▪ Résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée :

▪ Poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRF (Polymère Renforcé en Fibre) est inférieure de 10% au poids des platines d'aciers.

▪ Maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.

▪ Vu la difficulté d'assemblage et de transport sur site des platines d'acier, les PRF sont beaucoup plus concluants que ces derniers.

▪ Facilité de préparation de surfaces

▪ La non nécessité d'une fixation mécanique : comparativement aux platines d'acier, cependant le collage des matériaux composites doit être minutieux.

▪ La durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leurs zones de fixation seront fissurées.

▪ Tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente comparativement à celle des platines d'aciers.

▪ Réduction du risque gel- dégel : la mise en œuvre du bandage des matériaux composites favorise une bonne étanchéité vis-à-vis de la formation du phénomène gel- dégel

▪ La maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue.

▪ Réduction du temps d'exécution et mise en œuvre : la préparation, le transport et la mise en œuvre des platines d'aciers prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites.

▪ L'aptitude de précontrainte dans les matériaux composites : un nouveau champ des bandes plats de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures.**[19]**

IV.4.6. Béton projeté

- Le béton projeté, encore appelé gunite, est un béton mis en œuvre par propulsion sous forme de jet après malaxage.
- La propulsion du béton se fait à l'aide d'une lance sur une paroi, et par impulsion d'un jet d'air comprimé.
- Sa mise en œuvre nécessite donc une machine capable de projeter du béton semi-liquide à l'aide d'un tuyau et d'une buse.

Le béton réalisé par propulsion permet entre autres la réalisation de formes complexes ou difficiles d'accès comme les arrondis de piscine ou de bassins.Il est utilisé dans la réalisation de travaux souterrains, ou en travaux de réparation et de soutènement. **[24]**



Figure IV-20 : béton projeté

IV.4.6.1. Les techniques de réalisation du béton projeté

La confection et la diffusion du béton projeté se font essentiellement à l'aide de deux techniques de projection : la projection par voie humide et la projection par voie sèche.**[24]**

IV.4.6.2. La projection par voie humide ou mouillée

- Pour la projection par voie humide, le malaxage du mélange granulats-ciments est effectué en centrale ou dans une toupie avec de l'eau, comme pour un béton destiné à être coulé.
- Le mouillage est effectué de façon uniforme, tout en assurant au béton une plasticité suffisante pour le transport.
- Le béton est transporté à travers des convoyeurs, et la projection est effectuée grâce à la pression de l'air comprimé, en associant éventuellement des adjuvants liquides.
- Cette méthode est fréquemment utilisée en BTP pour la réalisation de tunnels, de piscines et des surfaces complexes.
- Elle est aussi utilisée dans le cas de projection en faible épaisseur ou vers le bas.**[24]**

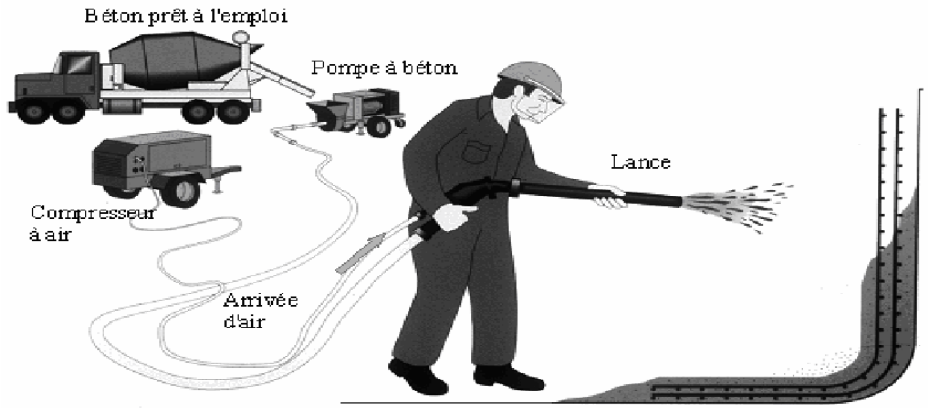


Figure IV-21 : projection par voie humide [13]

IV.4.6.3. La projection par voie sèche

- Pour cette technique, le mélange granulat-ciment est malaxé sans eau, soit moins de 3 % d'humidité.
- La propulsion est effectuée par air comprimé dans une tuyauterie vers la lance de projection. Le mélange n'est humidifié qu'à la sortie de la lance de projection.

Cette méthode est fréquemment utilisée pour les chantiers en extérieur difficilement accessibles, et permet d'utiliser de gros granulats et de réguler le dosage en ciment en fonction de l'ouvrage.**[24]**

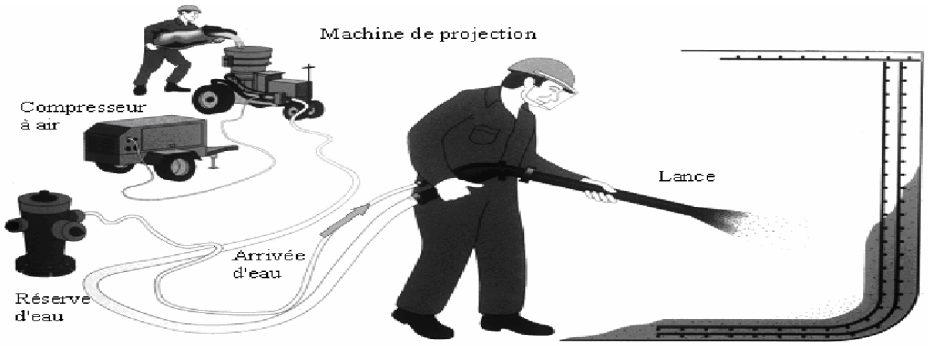


Figure IV-22 : projection par voie sèche **[13]**



a) mélange à du béton **b) béton classique**

Figure IV-23: Les techniques de projection. (a) : par voie sèche, (b) : par voie humide **[21]**

IV.4.6.5. Domaines d'application du béton projeté

Le béton projeté possède de nombreux domaines d'application. Nous avons entre autres :

- La construction de tunnels ou de souterrains ;
- Le renforcement et l'amélioration de structures présentant des défauts ;
- Les travaux de construction de piscines : le béton projeté se révèle être un excellent matériau pour construire une piscine. Il s'adapte très bien et est très résistant ;
- Les travaux de réparation, de protection et de consolidation de parois ou de talus ;
- La réparation de parois en bétons après des dommages causés par un incendie ;
- La mise en place de structures diverses en béton et de formes libres : le béton projeté est particulièrement adapté aux travaux complexes ;
- L'exécution des travaux nécessitant des revêtements de béton monocoque.

La technique du béton projeté est donc une technique aux applications diverses, et utiles dans de nombreux domaines **[24]**

IV.4.6.6. Avantages et inconvénients du béton projeté

a)- Projection par voie sèche

Tableau IV-3 : Avantages et inconvénients du béton projeté par voie sèche. [21]

Avantages	Inconvénients
- grande souplesse d'utilisation : il est facile d'arrêter le travail et de redémarrer sans avoir à se livrer à des nettoyagesfastidieux, - grandes distances de transport : il est possible d'installer la machine à projeter à quelques centaines de mètres du lieu detravail. - possibilité de projeter de fortes épaisseurs en une seule couche même sansaccélérateur, - résistances élevées : l'effet de compaction exercé par les graviers projetés à grande vitesse et le faible E/C tendent à améliorer lesrésistances, - obtention aisée de béton à hautesperformances, - robotisation possible pour augmenter les cadences et les conditions detravail.	- capacité de productionlimitée, - dégagement de poussière, à la machineet à la lance (pouvant être réduit en humidifiant legranulat), - appréciation visuelle de la teneur eneau par leporte-lance, - perte par rebondimportante, - perte de fibres dans le béton placé (cas de bétonfibré), - risque de détérioration des supports fragiles.

- Projection par voie mouillée

Tableau IV- 4: Avantages et inconvénients du béton projeté par voie mouillée**[21]**

Avantages	Inconvénients
- capacité de production élevée, atteignant le double ou le triple de la voiesèche, - diminution des poussières, améliorantles conditions detravail, - diminution des pertes parrebond, - meilleur contrôle de la qualité dubéton, - composition du béton en placehomogène dans l'épaisseur de lacouche, - dans le cas de béton fibré, dosage en fibres du béton en place proche du dosageinitial, - robotisation, améliorant les conditions de travail.	- moins de souplesse ; formulation exigeant une mise au point rigoureuse (fluidité, stabilisation) et une régularité de laconsistance, - transport sur de grandes distancesdifficile, - adjuvants raidisseurs ou accélérateurs obligatoires pour compenser la fluidité etla stabilisation du bétonprojeté, - usage recommandé d'un stabilisateur pour permettre un temps d'utilisation suffisant du béton gâché pour minimiser les nettoyageslors des arrêts ponctuels de la machine àprojeter, - compactage et une adhérence plusfaible, - nécessité d'un dosage initial en cimentélevé (> 400kg/m^3) pouvant entraîner des retraits importants.

IV.4.7.1. Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle

La précontrainte additionnelle est souvent la solution souhaitable quand une partie importante d'un membre doit être renforcé ou lorsque les fissures qui se sont formésdoivent être fermées. Cette technique utilise des torons de précontrainte ou des barres utilisées pour l'application des contraintes de compression, l'ancrage adéquat fournis par des éléments mis à l'extérieur dès l'élément. Cette procédure se diffère suivant Le tracé deprécontrainte utiliser qui peut être rectiligne ou polygonal. La précontrainte additionnellepeut être employée pour renforcer et/ ou répare une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoir, silos…) ou éléments structuraux tels :

dalles de plancher ou poutres.**[20]**



Figure IV- 24 : précontrainte additionnelle.**[19]**

IV.4.7.2. Les différents tracés de la précontrainte additionnelle

le tracé des armatures de précontrainte additionnelle peut être rectiligne ou polygonal. Un câblage rectiligne est plus pratique et aussi facile à le mettre en œuvre et les pertes d'effort par effet de frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrages, et sont de faibles estimation **[20]**

a. Tracé rectiligne

Un câblage rectiligne est plus pratiques et aussi facile à le mettre en œuvre et les pertes d'effort par effet de frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrages, et sont de faibles estimations. **[18]**

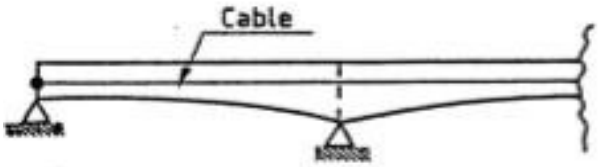


Figure IV- 25 :le tracé rectiligne **[20]**

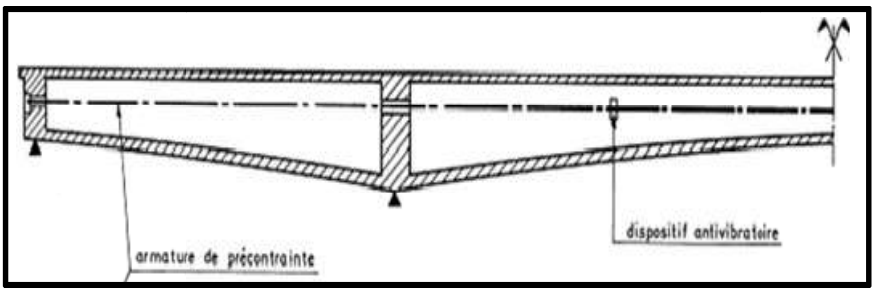


Figure IV- 26 : Traces Rectiligne.**[18]**

b. Tracé polygonal

Par contre le tracé polygonal qui consiste à dévier les câbles, de façon à optimiser l'effet du précontraint tant sur le plan de la résistance en flexion que sur celui de la résistance à l'effort tranchant. Les pertes par frottement sont un peu plus fortes que dans le cas d'un tracé rectiligne, tout en restant modérées, et la mise en œuvre est plus compliquée, à cause de la confection des déviateurs, mais c'est la conception la plus courante car la plus efficace.**[18]**

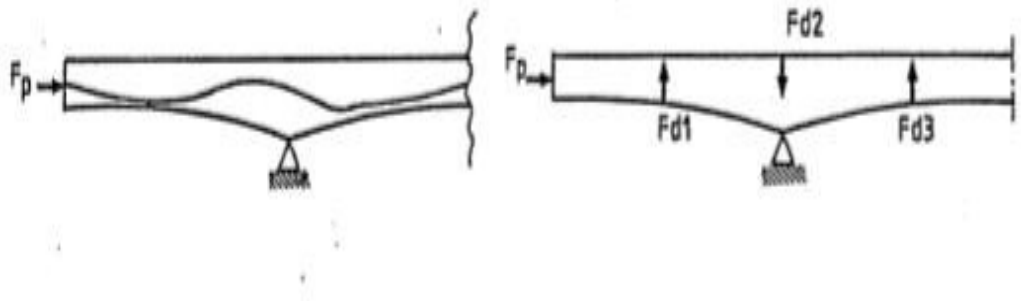


Figure IV- 27: le tracé polygonal **[20]**

IV.4.8. Tôles d'acier collées

L'utilisation de plaques d'acier collées afin de renforcer des insuffisances locales ou globales s'est développée ces dernières années. C'est une technique économique qui modifie peu l'aspect et les dimensions de la structure à réparer. Ces plaques sont généralement facilement inspectables pour faire le suivi des dégradations. Le collage de la plaque à la surface du béton assure un bon transfert des efforts et permet ainsi une augmentation de la résistance et de la raideur de la structure renforcée. Les plaques d'acier collées peuvent être utilisées afin d'effectuer un renforcement en flexion, en cisaillement ou pour confiner des colonnes en béton



Figure IV- 28: plaques d'acier collées **[19]**

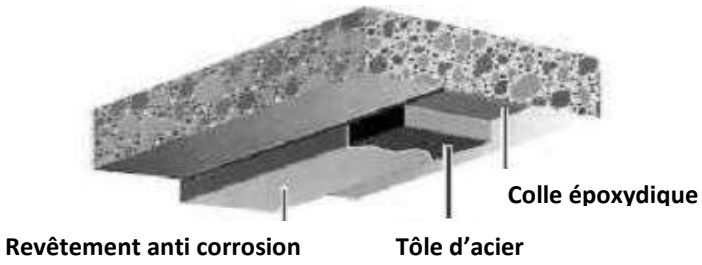


Figure IV-29 : Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite **[21]**

Ces méthodes présentent beaucoup d'inconvénients tels que : La difficulté de la mise en œuvre, la durée, la corrosion des aciers, etc. Dès lors, les chercheurs ont tenté de trouver des matériaux de substitution qui régleraient ce problème.

Diverses conditions doivent être réunies pour obtenir les meilleurs résultats eneffectuant un renforcement par plaques d'acier. Il faut vérifier que la structure elle-même peut recevoir ce type de modification et que d'autres défauts n'apparaîtront pas suite aurenforcement.

Cette technique efficace a montré ses limites :

- L'acier est l'objet de la corrosion, il demande une maintenance et une protection coûteuse.
- La collation demande une surface de traitement spéciale et une pression constante jusqu'à la collation totale de l'acier.
- Les plaques d'acier sont lourdes et trop raides.
- Elles ne peuvent pas être collées dans des surfaces concaves.
- Dans les plaques c'est très difficile d'éviter les boules d'aire entre les tôles et le support, ce qui implique une malle adhérence.**[19]**

IV.4.8.1. Avantages et inconvénients des tôles collées

Tableau IV -5: Avantages et inconvénients des tôles collées. **[21]**

Avantages	Inconvénits
- il n'exige que des interventions mineures sur la structure; - il est d'un emploi souple; - les renforts sont peu encombrants.	sensibilité de l'acier àl'oxydation; - impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (sollicitation le long d'une face); - nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pourassurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif); - nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage; - impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités deréparation. - coût relativementélevé.

Conclusion

Nous avons donné dans ce chapitre une présentation succincte des principales techniques de réparation ou de renforcement des constructions en béton armé. Quel que soit la méthode utilisée, le but est de rendre les sections d'acier et de béton à son état initial. Cette condition pourrait être satisfaite par l'ajout d'un autre matériau. L'objectif est que la structure puisse reprendre les charges qui lui sont appliquées voire même un supplément de charge si c'est nécessaire pour que l'ouvrage réponde à l'évolution des besoins des propriétaires.

Il existe encore beaucoup d'autres techniques, en effet ce domaine évolue en fonction des multiples résultats de recherches et développement en cours.

Etude de cas



<u>OBJET :</u> DIAGNOSTIC TECHNIQUE

DE SIDI FREDJ

V.1. OBJET DU RAPPORT

L'objet de ce présent rapport est l'établissement d'un diagnostic technique du centre de thalassothérapie de Sidi Fredj lequel présente d'importants désordres.

Le diagnostic technique visuel consiste à :

- Recenser les désordres apparus au niveau des éléments porteurs du centre en question.
- Interpréter l'origine des désordres observés en précisant le lien entre les causes et les effets.
- Préconisation de recommandations techniques portant sur les solutions à adopter pour remédier aux désordres observés et assurer la pérennité de l'ouvrage.

V.2. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est conçu d'un bâtiment central composé de quatre blocs séparés par des joints de dilatation en Entre-sol + Sous-sol + RDC + 5 Etages et de plusieurs ouvrages annexes, tel que, la piscine extérieure, une salle des fêtes extérieure, des locaux techniques (bâche à eau, groupe électrogène, buanderie, chaufferie) en RDC , ainsi qu'un ensemble de baraques en dur abritant le foyer, des garages pour maintenance des véhicules et un Mur de Soutènement servant de brises vagues .



FigureV-1 : Bloc principal.



Figure V-2 : Vue d'ensemble des locaux extérieurs pour personnel et maintenance.

La structure porteuse de la partie centrale du centre Thalassothérapie est constituée d'une ossature mixte (portiques et voiles) en béton armé.

Les majeures parties des planchers sont en dalles pleines et certaines parties se présentent en plancher en corps creux surmontés par une dalle de compression.

L'accessibilité entre les niveaux est assurée principalement par un escalier central à deux volées en béton armé. Deux blocs ascenseurs (04 cabines) et monte-malades (02 cabines) sont également disponibles pour desservir les différents niveaux. Leur structure étant des voiles en béton

armé en forme de U solidaire à l'ossature du bâtiment. Deux escaliers de secours en béton armé à double volées sont aussi disposés à l'extérieur du bâtiment, et couvrent l'ensemble des niveaux. Ces deux escaliers prennent naissance à partir de la structure du bâtiment.

D'autre part, il est à signaler que Le remplissage extérieur est réalisé en maçonnerie (aggloméré en béton). Le même matériau est également utilisé pour les cloisons de séparation intérieures. Les deux façades principale et postérieure ont reçu un habillage en verre au droit des soubassements de balcons (brise soleil).

Les locaux techniques situés sur la façade EST sont édifiés en structure souple en portiques auto stables en béton armé (R+0) avec des planchers en corps creux. L'habillage extérieur et les cloisons intérieures sont en maçonnerie en aggloméré de béton (parpaing) en général. Le procédé d'étanchéité appliqué sur ces terrasses est le procédé traditionnel.

A noter l'existence d'une galerie souterraine en béton armé traversant la chaussée et reliant le bâtiment central et la bâche à eau extérieure exploitée pour l'eau douce. Cette galerie est accessible via le niveau entresol (sous la piscine).

Aussi, on constate l'existence d'un sous sol à usage technique dans lequel passe l'ensemble des canalisations d'alimentation et d'évacuation des salles de soins et de l'hôtel.

Les locaux abritant le foyer pour personnel et les garages de maintenance de véhicules, sont édifiés en dur (maçonnerie chainée). Le matériau utilisé est le parpaing pour l'habillage extérieur et pour les cloisons. Le système de toiture est une charpente en bois sur laquelle est fixée une couverture en tôle ondulée en fibrociment.

La piscine extérieure est construite en béton armé, posée sur terre plein, son système constructif étant des voiles périphériques en béton armé prenant naissance à partir d'un radier représentant le fond de la piscine.

Le coté SUD du centre Thalassothérapie, étant près de la mer, se voit protégé par un grand mur de forme arquée en béton armé avec contreforts. Le mur a été donc conçu pour repousser les vagues maritimes et les empêcher de s'approcher de la structure du bâtiment et des terrasses de plaisance situées de ce coté.

V.3.CONSTATATION DES DESORDRES

Lors de notre visite des lieux, il nous a été donné de constater que cet ouvrage ne présente pas à l'état actuel des désordres pouvant menacer sa stabilité d'ensemble, sous charges normales, les désordres recensés concernent essentiellement la partie local chaufferie et les sous faces des bassins. Ces désordres sont illustrés comme suit

- **Corrosion très avancée des armatures avec perte importante de matière.**
- **Éclatement de béton avec apparition d'armatures moyennement corrodées.**
- **Traces d'infiltration d'eau en sous plancher.**
- **Défauts d'étanchéité des terrasses.**

- **Désordres dans les locaux techniques extérieurs.**
- **Désordres dans les locaux extérieurs destinés à la maintenance.**
- **Désordres dans les ouvrages extérieurs.**
- **Désordres dans les espaces extérieurs annexés au bâtiment central**



FigureV-3 : Traces d'infiltration au droit de la verrière au niveau de la cuisine du bloc central accompagnées de corrosion des cornières supportant les carreaux de verres.



FigureV-4: Perte d'enrobage constatée en sous face du palier de repos en béton armé de l'escalier extérieur coté piscine mettant en évidence des armatures corrodée



FigureV-5 :Perte d'enrobage constatée au droit du linteau en béton armé de la piscine extérieure mettant en évidence des armatures corrodées



FigureV-6 : Par ailleurs, nous avons constaté d'importantes dégradations affectant principalement plusieurs éléments porteurs notamment les poteaux, les voiles, les poutres et les dalles pleines.



Figure V-7 : Eclatement d'enrobage des poteaux mettant en évidence la corrosion très avancée des armatures longitudinales et transversales**.**



Figure V-8- : Fissuration du dallage sur le contour du bassin en béton armé



Figure V-9 : Fissuration du mur en brique creuse surmontant la structure extérieure de la piscine. Ce mur a été rajouté et réalisé sans raidisseurs verticaux et horizontaux pour servir de support aux éléments métalliques porteurs de la couverture de la piscine.



Figure V-10 :Eclatement de béton d'enrobage et fissures verticales le long des armatures longitudinales du poteau extérieur (foyer personnel).



Figure V-11 :Perte de masse et chute partielle du béton d'enrobage de la sous face de la poutre de l'espace dépôt, mettant à nu des armatures fortement corrodés.



FigureV-12 : Fissures constatées au niveau du fond de la piscine dues probablement à un affaissement.



Figure V-13 :Dégradation du revêtement mural en pierre taillée, bleue revenant à la partie surélevée du voile périphérique du bassin

V.4 INTERPRETATION DES DESORDRES

L'ensemble des désordres, sont dus à la concomitance de plusieurs facteurs, pouvant engendrer les différentes pathologies rencontrées qui sont à caractère évolutif, ces facteurs sont résumés dans les points suivants :

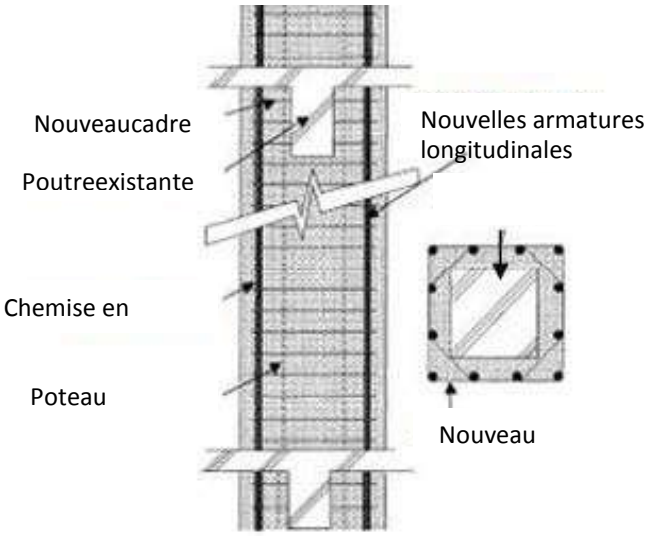
- Usure et fatigue des matériaux du fait de la présence d'une humidité permanente.
- Probablement la défectuosité de l'étanchéité du bassin en question permettant l'infiltration des eaux salées causant la dégradation des éléments structuraux objet du présent rapport.
- Le disfonctionnement et vétusté des divers réseaux présentant des fuites importantes; altérant ainsi les éléments en contact direct.
- Absence d'un entretien périodique engendrant l'aggravation des pathologies amorcées au niveau des éléments porteurs. En effet, le béton n'étant pas étanche, l'eau de mer s'infiltre et attaque les armatures qui se rouillent et génèrent l'expansion du béton ainsi que son éclatement.
- La fragilisation des voiles porteurs par les différentes réservations effectuées pour le passage des conduites.

V.5- Les solutions proposées

- Enlever tout le béton dégradé.
- Démolir les poteaux fortement flambés.
- Nettoyer les barres de ferraillage ainsi les surfaces du béton qui reste.
- Renforcer les barres si sont fortement dégradées.
- Procéder par un chemisage de touts les poteaux
- Utilisation d'un béton de qualité (bonne résistance)pour la réparation des zones éclatées ainsi dans la cage d'escalier.

V.5.1. Poteaux.

Pour touts les poteaux endommagés la meilleure solution a
proposée est le renforcement des poteaux avec un chemisage de ces derniers :



FigureV-14- : Chemisage en béton armé de poteau

V.5.2.les murs en maçonnerie

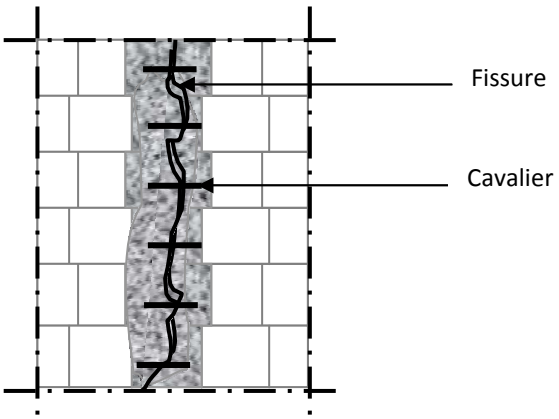
Dépendant de l'épaisseur des ouvertures des fissures, différentes méthodes de réparation peuvent être utilisées. Ces méthodes peuvent aller de la simple injection au remplacement de tout le mur en passant par celle qui consiste à remplacer les briques ou les moellons le long de la fissure. Si la largeur des fissures dépasse 10 mm et si les briques ou les moellons sont endommagés le long de cette fissure, l'injection seule n'est plus efficace : **[16]**

V.5.2.1-Pour les fissures verticales

-Agrafage du murs

On peut restituer à une section fissurée sa résistance à la traction en posant des cavaliers, un peut à la manière dont on coud du tissu

Cette opération consiste à dégager les briques ou les moellons sur une largeur de 15 à 20 cm de part et d'autre de la fissure et de les remplacer soit par d'autres en utilisant un mortier très riche en ciment, soit par du béton avec des fers ronds ou avec des fers plats en forme de U.**[17]**



Le mur est dégarni sur environ la moitié de son épaisseur; le vide ainsi créé est rempli de béton ou avec de la nouvelle maçonnerie avec un mortier riche en ciment; les cavaliers sont aussi utilisés en travers de lafissure.

FigureV-15: Réparation de fissure verticale à l'aide des cavaliers.

-Gainage

L'augmentation de l'épaisseur du mur en le gainant avec du béton armé peut être réalisée si sa résistance est insuffisante.

Il existe plusieurs types 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 ce cas, en plus de l'âme du mur, ses deux extrémités. Les deux solutions de renforcement, gainage sur une face ou sur deux faces, sont possibles. La rigidification par les deux faces donne un meilleur comportement, cependant elle coûte plus chère et exige l'accession aux deux parties du mur.

La gaine du mur doit être conforme aux critères suivants :

- Les caractéristiques mécaniques des nouveaux niatériaux 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 de béton ajoutée.

- Le diamètre des aciers transversaux des potelets d'extrémités ne doit pas être inférieur à 8 mm. L'espacenient de ces cadres ne doit pas être supérieur à l'épaisseur du mur et 15 cm.

- Le nouveau béton doit adhérer à l'ancien en rendant la surface du mur existant rugueuse et en réalisant des trous tous les 60 cin au maximum dans chaque direction. **[17]**

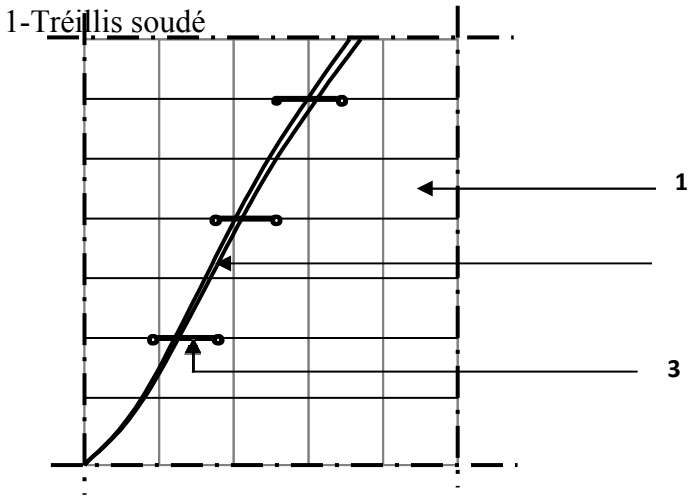


Figure V-16-: Gainage du mur fissuré (vue deface).

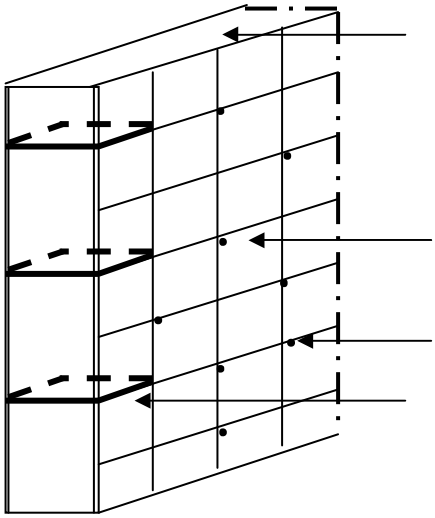


Figure V-17-: Gainage du mur fissuré sur les deux faces

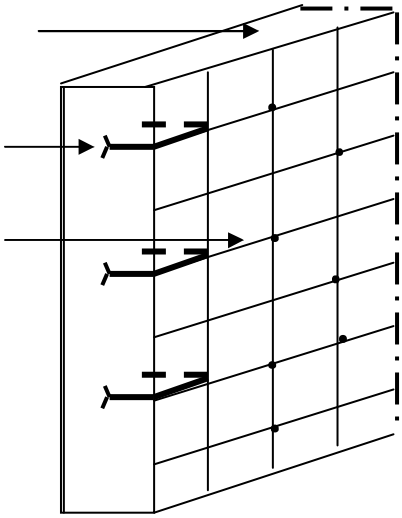


Figure V-18: Gainage du mur fissuré sur une face

V.5.2.2-Pour les fissures inclinées

Dans le cas des fissures inclinées, l'injection seule n'est pas suffisante et il faudrait procéde à la réalisation de potelets en béton armé en plusieurs endroits pour rigidifier le mur.

Pour cela il faut dégager des briques ou les moellons sur une largeur de 15 à 20 cm le long

d'un tracé vertical, sur une profondeur de 10 à 15 cm. La cheminée ainsi créée est remplie de béton armé. Si la réalisation des potelets est difficile ou impossible, il est possible de réaliser des chaînages apparents de part et d'autre du mur **[16]**

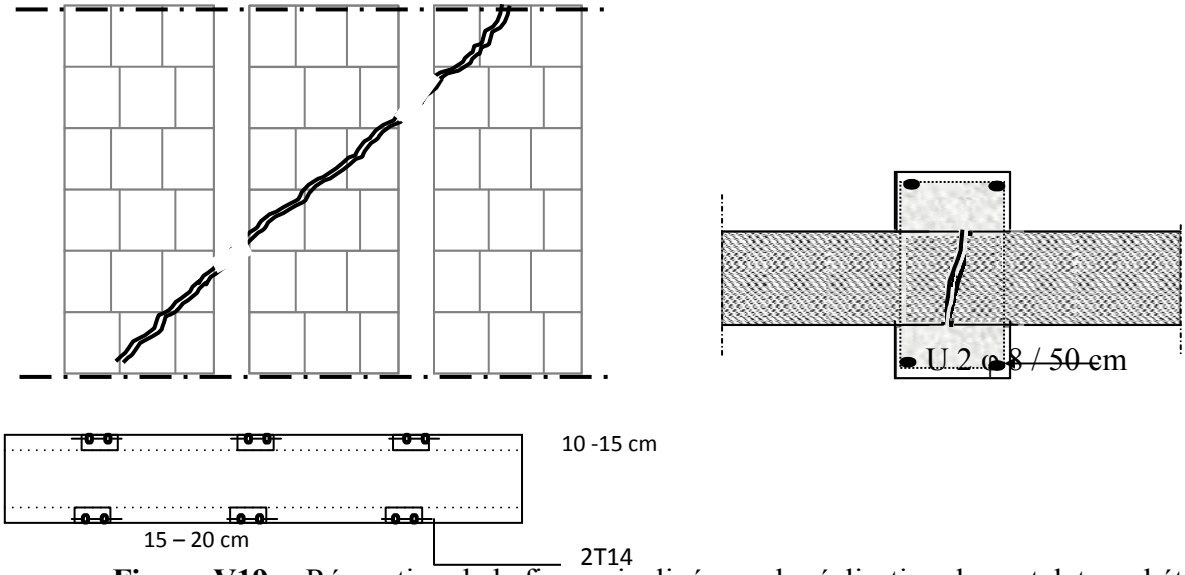


Figure-V19- : Réparation de la fissure inclinée par la réalisation des potelets en béton armé

V.5.3-Cas Eclatement



Figure V-20-Eclatement

-Réparation : Réparation ponctuelle : elle consiste à éliminer soigneusement les partiesendommagées du béton, puis à reconstituer l'élément enlevé par un rapiéçage à l'aide demortier. Cette solution est adaptée à de petites zones dégradées ne dépassant pas quelquescentimètres carrés.

-Ragréage superficielle : le traitement consiste à éliminer soigneusement les partiesendommagées du béton puis à reconstituer l'élément enlevé par un rapiéçage à l'aide demortier. Pour cette méthode, la composition du mortier implique une mise au point préalableimportante, ce qui explique que cette méthode ne peut être utilisée que pour des façadesprésentant des éclatements de manière globale et systématique.

Substitution de pierre identique : Ce traitement consiste à substituer à une pierre tropendommagée pour être réparée ou consolidée, une pierre identique ou aux caractéristiquesphysiques et mécaniques très proches. Le même principe peut être appliqué pour un mur enbrique.

Substitution de pierre artificielle : Cela consiste à éliminer soigneusement les partiesendommagées puis à reconstituer l'élément enlevé par un rapiéçage à l'aide de mortier. Pourqu'il n'y ait pas de contraste avec le reste de la façade, le mortier est souvent associé à despoudres de pierre. Le même principe s'applique au mur de brique.

V.5.4.Cas de dégradation : Epaufrures.Désagrégation

1-Cause : eau



Figure V-21- Epaufrures. Désagrégation

2-Traiteret objectifs

-Arrêter la corrosion desarmatures

-Prévenir l apparition de nouveaux désordres

-Etre efficace etdurable

-Restaurer l'esthétique dubâtiment

-Redonner le milieu alcalin (pH>13)

D'où une méthodologiespécifique

Techniques de réparation

La technique la plus utilisée est le ragréage : consiste a reconstituer une partie de béton détérioré en appliquant un nouveau mortier ou résine

3-Techniques de réparation

La technique la plus utilisée est le ragréage : consiste a reconstituer une partie de béton détérioré en appliquant un nouveau mortier ou résine

4-Méthodologie de réparation

-Préparer soigneusement lesupport

-Purger le béton dégradé

-Dégager les armatures

-Eliminer larouille

Ne jamais laisser les armatures brossées ou sablées sans protection

5-Protéger les armatures

Primairesd'accrochage

Produits anticorrosion

Produits passivant

Peintures

Exemples defournisseurs

Sika (Monotop610 AC)

MBT France (Masterseal 300MC)

Lanko (Lanko670 Passivant)

Weber et Broutin(Madafer)

6-Mise en ouvre (mortier hydraulique)

Support propre etdépoussièré

Humidifier les parties àréparer

Attention à la température (gel,canicule)

Tourner avec lesoleil

En cas devent

-Produits de cure éliminéavantpeinture

7-La finition et la protection La durabilité de la réhabilitation

Dépend du choix technique

De sa mise en œuvre(applicateur)

Application de peintures (genreRPE)

Imperméabilisant

Laisser respirer lesupport

Etendre la finition dans les zones non touchées (actionpréventive

-Exemple de réparation



Figure V-22- : réparation Epaufrures. Désagrégation

V.6.RECOMMANDATIONS TECHNIQUES

Compte tenu de l'époque de sa réalisation, il est à noter que le centre de thalassothérapie a été édifié selon des normes antérieures à la réglementation en vigueur ne répondant pas, de ce fait, aux exigences relatives aux dispositions parasismiques actuelles.

Les pathologies recensées étant à caractère évolutif, les éléments structuraux porteurs fortement avariés ont subi une diminution de leur résistance pouvant enchainer une éventuelle redistribution des efforts et occasionnerait de ce fait, l'instabilité de l'ensemble de l'ouvrage.

A cet effet, il est fortement recommandé d'engager une action systématique pour la réparation des parties endommagées de l'ouvrage, laquelle est jugée inéluctable en procédant aupréalable à un étaiement étudié des éléments porteurs et à la suppression de toutes les parties instables et inadhérentes.

Procéder par la suite à :

- La mise hors service du bassin présentant des désordres et à des investigations approfondies afin de localiser les points d'infiltrations d'eaux et leur origines puis d'y remédier selon la pathologie observée. Il est évident que le système d'étanchéité mis en place fera l'objet d'une reprise totale selon la réglementation régissant ce type d'ouvrage.
- La reprise totale des éléments de structure fortement avariés, de manière à maintenir les mêmes caractéristiques géométrique et section du ferraillage. Aussi, tout élément structurel présentant des désordres importants pouvant affecter la stabilité de l'ouvrage, implique une reprise systématique identiquement à l'état initial.

- Application d'un revêtement hydrofuge afin de protéger le béton de surface contre l'attaque de l'humidité et des ambrins marins.
- La réfection selon des schémas simplifiés des réseaux défectueux : d'adduction et d'évacuation des eaux, tout en assurant la protection des pourtours au droit des réservations créées dans les éléments porteurs (dont la résistance est à vérifier).
- Développer un programme d'entretien périodique de l'ensemble de l'ouvrage.

Par ailleurs, concernant les éléments porteurs présentant des avaries locales, la méthode de réparation serait définie après décapage des enrobages fissurés, cette opération consisterait généralement à la :

- Préparation du support par le décapage du béton dégradé au moyen de techniques appropriées jusqu'à atteinte des surfaces saines
- Décapage des barres et traitement des armatures atteintes selon le degré de leur corrosion, par des produits adaptés, avec apport de nouvelles armatures
  de renfort si nécessaire pour le cas de armatures effritées tout en assurant un recouvrement et un enrobage suffisants.
- Nettoyage des surfaces décapées de tous débris et poussières.
- La reprise de bétonnage en adoptant une technique appropriée selon le cas et selon l'ampleur de la dégradation des bétons ; par des techniques appropriées relatives à l'élément traité, tout en assurant une épaisseur suffisante de l'enrobage ainsi que l'adhérence de la surface de l'ancien béton avec celle du nouveau béton (par l'emploie d'une résine de reprise de bétonnage), lequel doit être confectionné selon une étude de composition de béton appropriée qui convient le mieux aux sections additionnelles.
- Précaution d'emploi des produits additifs (inhibiteurs de corrosion – résines) et vérification de leurs fiches techniques.
- Concernant les éléments métalliques supportant les toitures (Salle de fitness et piscine extérieure), il est recommandé de les reprendre dans leur totalité.
- En ce qui concerne l'étanchéité terrasse, il y aura lieu de procéder à leur réfection selon le Document Technique Réglementaire D.T.R E 4.1 relatif aux travaux d'étanchéité des toitures terrasses et toitures inclinées « support maçonnerie »
- Les revêtements muraux détériorés seront décapés et repris conformément aux règles de l'art et aux recommandations du D.T.R E6.

V.7 CONCLUSION

A la lumière du constat effectué, et compte tenu de l'état de l'ouvrage, nous avons décelé d'importantes pathologies évoluant vers une instabilité structurelle, occasionnés principalement par la défectuosité de l'étanchéité et les réseaux d'adduction et d'évacuation d'eau associée à l'absence d'un entretien régulier de l'ouvrage.

Néanmoins, vue l'importance et l'âge de cet ouvrage, il est utile de prendre en charge les recommandations techniques sus citées, afin d'assurer sa pérennité et de lui conférer un meilleur état de service.

Par ailleurs, il est important de confier les tâches techniques liées à l'étude et le suivi des travaux de réparation à un bureau d'engineering qualifié ; et de désigner une entreprise pluridisciplinaire spécialisée ayant des références avérées, pour une intervention efficace basée sur le respect des règlements et normes en vigueur afin d'éviter toutes imperfections et vices générateurs de désordres.

En outre, tout procédé et méthode curative qui seront éventuellement proposés par le bureau d'engineering doivent être appuyés par un référentiel en matière de réglementation et/ou d'un avis technique dont l'application est vérifiée vis-à-vis des différentes sollicitations.
Nous restons à votre disposition pour tout complément d'information.

Conclusion générale

Les constructions en béton armé souffrent de plusieurs phénomènes de dégradations plus ou moins prononcés qui sont liés d'une part aux techniques et au conditions de mise en œuvre, et au non respect des propriétés du béton sur chantier (enrobage insuffisant, mauvais choix des constituants…). Et d'autre part, à d'autres facteurs comme les conditions de milieu extérieur ainsi que l'exploitation de l'ouvrage et son entretien.

L'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause et les conséquences de ces problèmes.

Les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance ou de comportement sont dues à plusieurs facteurs qu'on ne peut pas les maitrisés tous, donc la notion de la structure parfaitement durable c'est une notion irréalisable, cette vulnérabilité des structures nous exige à faire recourt a des réparations ou des renforcements à travers le cycle de vie de l'ouvrage. A cet effet il faut avoir plus de compréhension sur les mécanismes de dégradation.

Les principales méthodes de réparation d'un ouvrage en béton armé sont utilisées dans le but est de rendre les sections d'acier et de béton initial durable et de satisfaire cette condition par l'ajout d'un autre matériau de réparation ou de renforcement.

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

Bibliographie

[1] Nassima KHIAL. Utilisation des méthodes non destructives pour la caractérisation des bétons dans un environnement agressif. Thèse de doctorat. UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL. Soutenue en 2016.p 10.11.12.13.14.15.16

[2] CHAOUI Abdelraouf . YAHIAOUI Mohamed Abdechafi . Diagnostic des structures en béton armé dans la région de Médéa . Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de Master en génie civil .UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA. JANVIER 2013 p3.4.6.7

[3] BOUSSOUR Ali MELOUANE Mohamed . Evaluation du béton armé dégradé par la corrosion Région Médéa . Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de Master en génie civil . UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA Faculté des sciences et de technologie.2O14/2015 .p 4.6.7 .10.83.89. 38.39.40.54.55

[4] KHINECHE HOURIA ,Diagnostique de la fissuration dans les constructions (Cause et classification),Mémoire de Master Génie Civil , Université Mohamed khider – Biskra, Juillet 2019 p 30.33.34.35

[5] ITMAIZEH Ehab. PATHOLOGIE DE STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ. Mémoire de Master Académique, Université de Larbi Tébéssi, Algérie, 2015/1016,p. 4.5.6.7.11….18.33…37 .39 .52.53

[6] HoumeurMouaadh Et-TayibLammari Yacine. Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives. Mémoire de Master. Université 08 Mai 1945 de Guelma, Algérie, 2018,p 44…..57

[7] KHOBIZI Sena. réhabilitation de structures en béton armé. mémoire de master II. université 08 Mai 1945 Guelma, Algérie, Juin 2017

[8] Pathologies, diagnostic à l'aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé : état de l'art

[9] Valentine RINCKER. Diagnostic des structures existantes du relevé visuel au confortement des ouvrages en passant par les moyens d'investigations des structures en béton. INSA, Strasbourg, 2009, p. 67.

[10] HoumeurMouaadh Et-TayibLammari Yacine. Pathologie des bétons des stations d'épuration sous l'influence des eaux agressives. Mémoire de Master. Université 08 Mai 1945 de Guelma, Algérie, 2018, p 72.73.75.76

[11] ISAE – Cnam Liban. Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé. Mémoire de master. Université libanaise, Paris, p 5.11.12.13.14.15.

Bibliographie

https://www.researchgate.net/publication/301731750_Methodes_de_reparation_et_de_protection_des_ouvrages_en_beton_arme

[12] BENGUESMIA CHADLI MUSTAPHA AMINE .ABDELMALEK ABDEL NOUR . Réhabilitation des ouvrages en béton armé . Université des Sciences et de la Technologie MOHAMED BOUDIAF d'Oran.Faculté d'Architecture et de Génie Civil
Département de Génie Civil .Projet de fin d'étude Pour l'Obtention du Diplôme de Licence en Génie Civil. Promotion 2011-2012 . p 33

https://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme11.html#_Toc328237989

[13] http://thesis.univ-biskra.dz/1107/3/Chapitre%2001.pdf

[14] BENGUESMIA CHADLI. MUSTAPHA AMINE. ABDELMALEK ABDEL NOUR. Réhabilitation des ouvrages en béton armé. Projet de fin d'étude Pour l'Obtention du Diplôme de Licence en Génie Civil. Université des Sciences et de la Technologie MOHAMED BOUDIAF d'Oran. Promotion 2011-2012 .P 48

[15] Ouiza KACI.OUTIL D'AIDE A LA DECISION APPLIQUE AUX OUVRAGES D'ART. MEMOIRE DE FIN D'ETUDES En vue de l'obtention du diplôme de , Master Professionnel ,Spécialité en Génie Civil . UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU , 2016-2017 p 13.14.15

[16] Dr. OUZAA KHEIRA, Docteur en Génie Civil – Option : Structures, U.S.T.O, RÉHABILITATION DES STRUCTURES, Université des sciences et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF U.S.T.O, Année universitaire 2014-2015, p 8-9.33.34.35.36.

[17] CATALOGUE DES METHODES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES
CENTER NATIONAL DE RECHERCE APPLIQUEE EN GENIE PARASISMIQUE C .G.S 624C.N.R.A.G.P.92./8 p 11

[18] Hamlaoui Salim , Maintenance, entretien et réparation des ponts, Université Mohamed Khider – Biskra, Mémoire présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Magistère Spécialité : génie civil ,2012,p 77.78 .81.83….86.89

[19] Ould El HacenZein El Abidine, RENFORCEMENT DU BETON PAR LES MATERIAUX COMPOSITES, Université de Tébessa, Mémoire de Master Académique Option : Génie civil / structures, 24-05-2016,p 20-23-24

[20] Mohcene BOUKHEZAR , REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POUTRES AU MOYEN DES MATERIAUX COMPOSITES, Université Mentouri,

Bibliographie

Constantine, Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Magister en Génie Civil, Juillet 2009,p 22-23-32-33

[21] Kahina TAREK , Réparation et Renforcement des Structures en Béton Armé à Ossatures Poteaux-Poutres avec Référence Particulière à
l'utilisation des Composés en Polymères Renforcés par la Fibre de
Carbone ou de Verre, Université des Sciences et de la
Technologie HOUARI BOUMEDIENE Faculté de Génie Civil
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER EN GENIE CIVIL, 07 /07 /2011,p 86-87-88-109

[22] Hicham BELHANNACHI, REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POTEAUX EN BETON ARME , Université Mentouri , Constantine, Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Magister en Génie Civil, Juillet 2009, p 14.

[23] Riad BENZAID , Contribution à l'Étude des Matériaux Composite Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE , Réalisée en cotutelle avec l'INSA de Rennes- France Pour l'obtention du diplôme de Doctorat Es Science en Génie Civil Option: Mécanique des structures, 06 juillet 2010,p 18

[24] https://artisanbeton.be/beton-projete/

[25] M. OULD KHAOUA Younes , - M. ALOUAOUI Djamal eddine, Renforcement du béton ordinaire Par un béton autoplacant fibré, Mémoire de pour l'obtention du Fin d'Etudes diplôme de Mastère « LMD » en Génie civil, Université Dr YAHIA FARES de MEDEA,Mai 2016 ,p 59 ,60,61,62,63