

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire Master

Présenté à l'Université de Guelma
Faculté des Sciences et Technologie

Département de : Génie Civil
Domaine : « Science et Technologie »
Spécialité : « Génie Civil »

Option : Structure

Présenté par : BENYOUB Akila
BENZAIOU Abir

**Thème : Etude de la durabilité et réhabilitation du béton
armé dégradé par la corrosion**

Sous la direction de : **BOUDJAHM. Hocine**

2016

REMERCIEMENTS

Nos sincères remerciements à monsieur BOUDJAHM.H, qui a bien voulu proposer et diriger ce travail et surtout, pour son aide et sa contribution réelle qui ont permis de mener à terme ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury de s'avoir honoré en acceptant de juger ce modeste travail.

Nous remercions particulièrement mes familles pour leur soutien, leur amour et leur confiance en nos m'ont toujours été une source de motivation.

Enfin, nous remercions nos amis pour leur soutien et leurs encouragements.

DEDICACES

Nous dédions ce travail à :

- ❖ Nos parents
- ❖ Nos très chères mères à qui je dois tous
- ❖ Nos cher (es) frères et sœurs qui n'ont toujours soutenu.
- ❖ Tous ses amis (es)

Résumé

La pénétration des ions chlorures est la cause physico-chimique essentielle qui réduit la durée de service des ouvrages en béton armé par corrosion des armatures. Elle dépend principalement des caractéristiques des matériaux et des conditions environnementales. Comme les dommages résultants de ce phénomène sont très importants financièrement, il paraît essentiel d'améliorer la résistance du béton à la pénétration de cet agent agressif. A ce titre, la détermination du profil des concentrations en ions chlorures à l'intérieur de la matrice cimentaire est d'une importance majeure car elle permet d'évaluer le temps requis par les chlorures pour atteindre les armatures en quantité suffisante pour dépassiver l'acier.

L'objectif de ce mémoire est donc traité d'une part, des dégradations par corrosion des ouvrages en béton armé en service et, d'autre part, des techniques de prévention ou de réparations de ces désordres et de quantifier l'influence de l'enrobage, des caractéristiques des matériaux et de paramètre environnement sur la durée d'initiation de la corrosion dans les ouvrages en béton armé.

Mots clés : béton armé, corrosion, chlorures, climat, enrobage, armatures.

Abstract

The penetration of the ions chlorides is the essential physico-chemical cause which reduces the service life of the works to reinforced concrete by corrosion of the armatures. She depends mainly on characteristics of materials and on environmental conditions. As the resultant damage of this phenomenon is very important financially, he adorned the main part to improve the resistance of the concrete in the penetration of this aggressive agent. As such, the determination of the profile of the concentrations in ions chlorides inside the cementitious matrix is of major importance because she allows to estimate the time (weather) required by chlorides to reach (affect) the armatures in sufficiency for depassivat the steel.

The objective of this report thus is processed first, degradation by corrosion of reinforced concrete structures in and, on the other hand prevention techniques or repair of these disorders and to quantify the influence of coating, material characteristics and environmental parameter on the corrosion initiation time in reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete, corrosion, chlorides, climate, envelope, armatures.

Table de matières

Introduction Générale1

Chapitre I :La corrosion

Introduction3

I.1. Différents types de la corrosion4

I.1.1. Corrosion chimique (séché).....4

I.1.2. Corrosion biochimique5

I.1.3. Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation5

I.1.4. Corrosion électrochimique6

I.1.5. La corrosion atmosphérique6

I.2. Les facteurs de la corrosion6

I.3. Types de corrosions électrochimiques7

I.3.1. La corrosion uniforme (généralisé)8

I.3.2. La corrosion localisée8

I.3.2.1. Corrosion intergranulaire (intercristalline)9

I.3.2.2. Corrosion par piqûres9

I.3.2.3. Corrosion sous contrainte (C.S.C).....10

I.3.2.4. Corrosion par crevasses (caverneuse)10

I.3.2.5. Fragilisation par l'hydrogène11

I.3.2.6. Corrosion par érosion11

I.3.2.7. Corrosion galvanique12

I.3.2.8. Corrosion sélective12

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

Introduction..... 13

II.1. Le béton armé13

II.1.1. Le béton.....13

II.1.2. L'acier	14
II.2. Généralités sur la corrosion des aciers dans le béton	15
II.3. La passivation des armatures dans le béton	16
II.4. les étapes de corrosion.....	17
II.5. La dépassivation des aciers dans le béton	18
II.6. Amorçage de la corrosion par carbonatation	18
II.6.1. Généralités.....	18
II.6.2. Les réactions physico-chimiques	19
II.6.3. Les facteurs influençant la vitesse de carbonatation	21
II.6.4. Conséquence de la carbonatation sur le béton.....	23
II.7. Amorçage de la corrosion par pénétration des ions chlorures.....	25
II.7.1. Généralités.....	25
II.7.2. Les réactions physico-chimiques	25
II.7.3. Teneur critique en ions chlorures.....	26
II.7.4. Facteurs influant sur la pénétration des chlorures	27
II.8. Formation des produits de corrosion expansifs	31
II.8.1. Masse d'acier consommée	31
II.8.2. Surface d'acier consommée	31
II.9. Densité du courant de corrosion	33

Chapitre III : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion

III.1. Données concernant l'ouvrage.....	36
III.1.1. Introduction.....	36
III.1.2. Types de dégradations du béton armé	41
III.1.2.1. Les phases de dégradation.....	41
III.1.2.2. Les dégradations dues à la corrosion des armatures.....	42
III.1.3. Origines et mécanismes des désordres due à la corrosion.....	42
III.1.3.1. Les agents corrosifs dans les milieux au contact du béton	42
III.1.3.2. Les stades de corrosion	43
III.1.4. Conséquences des désordres	44

III.1.4.1. L'aspect de l'ouvrage	44
III.1.4.2. La sécurité vis-à-vis des usagers.....	44
III.1.4.3. La stabilité de la construction	44
III.1.5. Cas des ouvrages en béton précontraint	45
III.2. Caractérisation, diagnostic	45
III.2.1. Introduction. Objectifs du diagnostic	45
III.2.1.1. Place du diagnostic	45
III.2.1.2. Cas particulier de la corrosion des armatures.....	46
III.2.1.3. Objectifs du diagnostic de corrosion.....	46
III.2.1.4. Procédure à suivre	47
III.2.2. Visite préliminaire	47
III.2.3. Inspection détaillée	48
III.2.3.1. Préparation de l'inspection	48
III.2.3.2. Inspection.....	48
III.2.4. Investigation in situ	49
III.2.4.1. Mesures relatives aux armatures	49
III.2.4.2. Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement	52
III.2.5. Analyses et essais de laboratoire	54
III.2.5.1. Méthodes de prélèvements	54
III.2.5.2. Caractérisation chimique	54
III.2.5.3. Caractérisation minéralogique.....	55
III.2.5.4. Caractérisation physique.....	56
III.2.6. Rapport de diagnostic	56
III.3. Contraintes et exigences.....	56
III.3.1. Contraintes structurelles.....	56
III.3.1.1. Respect du fonctionnement de la structure en l'état	57
III.3.1.2. Respect des matériaux en place	58
III.3.2. Contraintes de site et d'exploitation	59
III.3.2.1. Localisation de l'ouvrage (agressivité du milieu, situation)	60
III.3.2.2. Structures en service.....	61
III.3.2.3. Ambiance (milieu ambiant, lors de l'application)	61
III.3.3. Exigences à prendre en compte pour les réparations.....	62
III.3.4. Durabilité.....	62

III.3.4.1. Les contrôles du résultat des traitements	63
III.3.4.2. Le contrôle des revêtements de protection des bétons.....	63
III.4. Les méthodes de réhabilitation... ..	63
III.4.1. Reconstitution de l'enrobage	63
III.4.1.1. Principes et définitions.....	63
III.4.1.2. Elimination des zones dégradées	64
III.4.1.3. Remplacement des armatures fortement corrodées	65
III.4.1.4. Protection des armatures	65
III.4.1.5. Etape de la réfection des bétons	65
III.4.1.6. Précautions particulières à prendre	66
III.4.1.7. Essais, contrôle et réception.....	68
III.4.2. Imprégnations	70
III.4.2.1. Principes et définitions.....	70
III.4.2.2. Domaine et limites d'emploi	71
III.4.2.3. Produits hydrofuges... ..	71
III.4.2.4. Procédure de choix et d'application	71
III.4.2.5. Contrôle du traitement	72
III.4.2.6. Essais de réception	73
III.4.2.7. Durée et efficacité du	73
III.4.3. Inhibiteurs de corrosion	74
III.4.3.1. Principes et définitions.....	74
III.4.3.2. Etat de l'art	75
III.4.3.3. Domaine et limites d'emploi	76
III.4.3.4. Procédure d'application	76
III.4.3.5. Contrôle de la mise œuvre	77
III.4.3.6. Durée et efficacité.....	77
III.4.4. Revêtements de surface	77
III.4.4.1. Revêtements pour le génie civil	77
III.4.4.2. Revêtements pour le bâtiment.....	85
III.4.5. Béton projeté	88
III.4.5.1. Principes et définitions	88
III.4.5.2. Rôle des adjuvants, des fibres et des fumées de silice.....	89
III.4.5.3. Procédure d'application du béton projeté... ..	89

III.4.5.4. Contrôle de la mise en œuvre	91
III.4.5.5. Domaine et limites d'emploi	91
III.4.5.6. Essais de réception	93
III.4.5.7. Durée et efficacité du procédé	93
III.4.6. Traitement électrochimiques	94
III.4.6.1.Principe	94
III.4.7. Recapitulatif	94
Conclusion Générale.....	95
Bibliographique	96
Annexe	101

LES ABREVIATIONS

E_A° : le potentiel standard d'électrode à l'anode

R_c : la constante des gaz parfaits

F : la constante de Faraday, $F=96487$ coulombs

T : la température

n : le nombre d'électrons libérés par la réaction

E_c : le potentiel de la cathode

E_c° : le potentiel standard d'électrode à la cathode

e' : la force électromotrice de corrosion

E/C : la teneur en eau

m_a : la masse d'acier consommée (g),

t : le temps

i_{corr} : la densité du courant de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

M_a : la masse molaire de l'acier ($M_a=55,85$ g/mol)

F_p : facteur de corrosion par pique

P_{max} : la profondeur de la pique

P_{moy} : la profondeur de pénétration due à une corrosion générale

P(t) : la profondeur maximale d'une pique le long d'une armature d'acier de surface A_a

a : la largeur de la pique

A_p : Section transversale de la pique

A_1 : La largeur de la pique à t_1

A_2 : la largeur de la pique à t_2

D_0 : le diamètre initial de la barre d'armature

n_b : Nombre de barres dans un élément en béton armé sujet à la corrosion

A_{ar} : La surface résiduelle d'acier dans cet élément à l'instant t

A_{anom} : la section des n_b barres contenues dans un élément en béton armé sujet à la corrosion

i_{anode} : la densité du courant de corrosion anode ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

$i_{cathode}$: la densité du courant de corrosion cathode ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

t_p : le temps depuis l'initiation de la corrosion

$i_{corr}(\text{ini})$: le courant de corrosion à l'initiation de la corrosion

e : l'enrobage en (cm)

C_t : la teneur totale en chlorure (Kg/m^3 de béton)

R_c : la résistance ohmique de l'enrobage (Ω)

T : le temps de corrosion (an)

HR : l'humidité relative (%)

A : une constante ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

$A(t)$: le coefficient d'absorption capillaire à une échéance donnée de l'essai, en Kg par m^2 de surface exposée à l'imbibition

C' : le coefficient d'absorption capillaire initial

S : la vitesse d'absorption par remontée capillaire ou absorptivité ($\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{S}^{1/2}$)

J : le flux diffusif ;

c : la concentration de l'espèce considérée

D_c : le coefficient de diffusion (m^2/S)

f_c : les chlorures libres

b_c : les chlorures liés

m_{tc} : la teneur volumique en chlorures totaux

m_{fc} : la teneur volumique en chlorures libres

P : la porosité accessible à l'eau ;

M_{bc} : la masse d'ions chlorures fixés par unité de masse de solide

C_{bc} : la concentration en ions chlorures liés (Kg/m^3 de béton)

C_{fc} : la concentration des chlorures libres (Kg/m^3 de la solution dans les pores)

α_L et β_L : les constantes de Langmuir dépendant de la teneur en C_3A

D_{eff} : le coefficient de diffusion effectif des ions chlorures

ρ_s : la masse volumique absolue du matériau

C_{tc} : la concentration totale en ions chlorures (Kg/m^3 de béton)

h : l'humidité relative dans les pores

W_e : la teneur en eau évaporable (m^3 de la solution interstitielle/ m^3 de béton)

D_c^* : le coefficient de diffusion apparent des chlorures

D_h^* : le coefficient de diffusion apparent de l'humidité

$D_{h,ref}$: la valeur de D_h dans les conditions de référence

t_e : le temps d'hydratation équivalent

U_h : l'énergie d'activation du processus de diffusion de l'humidité ($U_h / R = 4700 \text{ K}$)

α_0 : un paramètre ayant des valeurs entre 0,025 et 0,1

n' : un paramètre relatif à la diminution de la valeur de U_h par réduction de l'humidité relative.

HR_{ref} : l'humidité relative de référence

C_m, V_m et K_s : les trois paramaitre du modèle Brunaurer-Skalny-Bodor

V_{ct} et N_{ct} : coefficient dépendants du type de ciment

C : la concentration des ions chlorures

$C(x,t)$: la concentration des ions chlorures à une profondeur x et à un instant t donné

C_s : la concentration des chlorures sur la surface (considérer constant dans le temps)

C_{cr} : la concentration critique des chlorures

C_0 : la concentration initiale de chlorures dans le béton

D_c : le coefficient de diffusion des chlorures dans le béton

erfc: la fonction erreur

T_{ini} : le temps d'initiation de la corrosion

C.V : le coefficient de Variation

Tables des illustrations

Chapitre I : La corrosion

FIGURES

Figure I.1 :Exemple de corrosion chimique

Figure I.2 :Exemple de corrosion électrochimique

Figure I.3 :Exemple de corrosion uniforme

Figure I.4 :Exemple de corrosion localisée

Figure I.5 :Exemple de corrosion intergranulaire

Figure I.6 :Corrosion par piqure

Figure I.7 :La corrosion sous contrainte

Figure I.8:Corrosion par crevasses

Figure I.9: Corrosion galvanique

Figure I.10 :Corrosion sélective

TABLEAUX

Tableau I.1 :Les facteurs de la corrosion

Tableau I.2 :Indique la résistance intrinsèque à la corrosion de quelques métaux purs dans les différents milieux

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

FIGURES

Figure II.1 : Procédé de fabrication du ciment

Figure II.2 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton [2]

Figure II.3 :Mécanisme de dissolution de l'acier dans le béton en présence d'ions chlore [3]

Figure II.4 : Modèles principaux de détérioration de corrosion [3]

Figure II.5 : Passivation

Figure II.6 :Etapes de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton

Figure II.7 :Mécanisme de carbonatation de la Portlandite [7]

Table des illustrations

Figure II.8 : La progression de la carbonatation

Figure II.9 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E/C (20[□] C-50% HR). [9]

Figure II.10 : Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment

Figure II.11 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation [14]

Figure II.12 : Modèle de PAGE et al. D'attaque de l'acier par les ions chlorures [25]

Figure II.13: Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydraté et le rapport E/C

Figure II.14 : Isotherme de fixation du chlore sur deux mortiers [47]

Figure II.15 : Profil en chlorure total après imbibition de 48 heures sur matériaux secs par des solutions saines à 20g/l en NaCl [47]

Figure II.16 : Configuration de la pique [55]

TABLEAUX

Tableau II.1 : Teneurs critiques en ions chlorures et rapports Cl⁻/OH⁻ relevés dans la littérature.

Tableau II.2 : Analyse chimique des ciments de l'étude menée par FRANCY [48]

Tableau II.3 : Classification des courants de corrosion

Chapitre III : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion

Photos

Photo III.1.1 : Eclats en formation

Photo III.1.2 : Poutre support de réservoir

Photo III.1.3 : Poteau porteur sous garage

Photo III.1.4 : Poteau support de ligne électrifiée

Photo III.1.5 : Pile de pont

Photo III.1.6 : Paroi d'aéroréfrigérant

Photo III.1.7 : Pile en zone de marnage

Photo III.1.8 : Poutre de tablier

Photo III.1.9 : Quai en zone de marnage

Photo III.1.10 : Tuyau en béton armé

Table des illustrations

Photo III.1.11 : Parement en béton armé dans un monastère classé

Photo III.2.1 : Détection des armatures au radar

Photo III.2.2 : Mesures de potentiel

Photo III.2.3 : Roue électrode

Photo III.2.4 : Mesure de vitesse de corrosion

Photo III.2.5 : Prélèvements par carottage

Photo III.2.6 : Cristal de chloroaluminate

Photo III.2.7 : Spectre EDS associé

Photo III.3.1 : Contraintes de site

Photo III.3.2 : Projection en conditions difficiles

Photo III.4.1 : Protection des armatures

Photo III.4.2 : Reconstitution de l'enrobage

Photo III.4.3 : Action d'un produit hydrofuge

Photo III.4.4 : Application d'inhibiteur

Photo III.4.5 : Application d'inhibiteur

Photo III.4.6 : Application de la finition

Photo III.4.7 : Projection de béton

TABLEAUX

Tableau III.1 : Exemples d'essais de convenance pour caractériser un traitement par imprégnation d'hydrofuge

Tableau III.2 : les durées de garantie contractuelles à mentionner dans le marché, pour les différentes fonctions visées, selon la gamme d'épaisseur du revêtement

Introduction générale

Introduction Générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Les ouvrages en béton armé sont conçus et construits pour durer, mais ils se dégradent par le mécanisme de corrosion sous l'effet de l'agressivité de l'environnement au quel ils sont exposés.

La corrosion des aciers dans le béton est l'une des principales pathologies des ouvrages de génie civil. Elle entraîne des coûts très importants de maintenance, de réparation et peuvent dans certain cas mettre en cause la sécurité des structures et des usagers.

La corrosion ne se développe pas tant que le béton assure une protection physique ou chimique des armatures. En effet l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé (environ 13) qui confère une stabilité permanente à la couche de rouille adhérente aux armatures noyées dans le béton, phénomène appelé passivation.

Cependant, l'acier peut être dépassivé par deux mécanismes principaux dont la carbonatation du béton par le dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère ou par pénétration des ions chlorures (provenant de l'eau de mer, des embruns marins ou des sels de déverglaçâtes). Comparativement, la corrosion due aux chlorures est plus dangereuse que celle due à la carbonatation à cause de son développement rapide et le risque de rupture soudaine pour le cas des environnements sévères.

L'Algérie dispose d'une côte méditerranéenne de 1622 Km, d'où les principaux facteurs de corrosion mis en cause sont les chlorures provenant de l'eau de mer ou de l'air marin et l'utilisation de sels fondants pour le déverglaçage des routes en régions montagneuse.

Dans la durée de vie d'une structure en béton armé, on peut distinguer deux périodes : Une période d'initiation et Une période de propagation. La durée de la première période est déterminée par la vitesse de neutralisation du béton d'enrobage ou la vitesse de pénétration des agents agressifs tels que les chlorures.

Lorsque la concentration en chlorures au niveau des barres d'aciers est suffisamment importante, la période de propagation commence, puis l'acier se corrode et sa section diminue et cause la ruine de la structure.

La façon la plus simple et la plus efficace de prédire la durée de vie des ouvrages consiste à évaluer la phase d'initiation (ou d'incubation) de la corrosion.

Pour la corrosion par pénétration des chlorures, il s'agit de définir le temps nécessaire pour que le premier lit des armatures soit dépassivé. L'enrobage en plus d'offrir une protection

Introduction générale

chimique aux armatures, il s'agit comme une barrière physique qui limite la pénétration des ions chlorure.

L'objectif de ce mémoire, est de quantifier l'effet de l'enrobage, des caractéristiques des matériaux et de l'agressivité de l'environnement sur la corrosion des structures en béton armé dans un milieu marin.

Pour cela, le mémoire est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre, comporte une présentation sur la corrosion et des différents types.
- Le deuxième chapitre, comporte une présentation du milieu béton. ainsi, qu'une étude du phénomène de corrosion par pénétration des chlorures et par carbonatation.
- La troisième chapitre ,c'est l'objectif de "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion" est d'établir des recommandations pour guider dans le choix du mode de réhabilitation le mieux adapté pour une structure présentant de la corrosion, et ceci en fonction de critères tels que le processus de dégradation concerné, les caractéristiques du béton armé, le milieu environnant, les contraintes et sujétions rencontrées, etc.

On termine par une conclusion et de des recommandations.

Chapitre I :

La corrosion

Introduction :

La corrosion, du latin 'corrodée' signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphérique ou réactifs chimique). Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc.... plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés. [1]

En service les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux ; comme il a été déjà mentionné ci-dessus le processus de la corrosion entraîne une destruction des matériaux métalliques. Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne.

Les métaux se distinguent des autres matériaux par un ensemble de propriétés avantageuses tels que bonne ductilité, résistance élevée à la traction, résistance aux hautes températures, bonne conductibilité électrique et thermique, grande facilité de mise en œuvre etc. Leurs inconvénients est leur instabilité au contact de l'air et de l'eau ce qui diminue leur résistance à la corrosion et à l'usure, c'est-à-dire leur durabilité. Mais pour mieux remplir leur fonction pendant la durée de vie prévue on emploie des techniques de protection adéquates contre la corrosion. L'emploi de nouveaux matériaux résistant à la corrosion ont fait l'objet d'un grand nombre de recherche ces dernières années.

Au point de vue économique la corrosion est d'une importance primordiale. On estime par exemple que chaque année le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond environ à 150 millions de tonnes/ an ou encore 5 tonnes/ seconde. Ces pertes pouvaient être supérieures s'il n'y avait pas la protection contre la corrosion.

Le remplacement des équipements et matériel corrodés constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Les couts annuels imputables à la corrosion et à ses conséquences s'élèvent à plusieurs milliards de dollars par un dans la plupart des pays industrialisés. Aux Etats-Unis, les pertes occasionnées par la corrosion sont évaluées à plus de 7 milliards de dollars.

La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques et elle touche tous les domaines de l'économie du circuit intégré au pont en béton armé. L'évaluation des pertes dues à la corrosion doit prendre en considération

- Les pertes directes : remplacement des matériaux et équipement corrodés.
- Les pertes indirectes : réparation, pertes de production. Les mesures de protection : utilisation de matériaux plus résistants à la corrosion et plus chers, de revêtement et de protection cathodique
- Les mesures de préventions surdimensionnement des structures porteuses inspection, entretien.

Les pertes directes ne représentent donc qu'une partie des coûts de la corrosion .Elles sont souvent inférieures aux pertes indirectes.

Par exemple, si l'on doit arrêter une machine ou un équipement dont l'un des éléments constituant est corrodé, le prix de ce dernier est dérisoire par rapport aux pertes de gain dues au manque de production.

L'emploi des matériaux plastiques ou composites dans les différentes branches d'industrie ont trouvés une grande importance chez les utilisateurs, car ces matériaux résistent bien à la corrosion et n'exigent aucun revêtement de protection.

I.1.Différents types de la corrosion :

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il exposé à la corrosion et de mémé il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées. [1]

En général on peut résumer les différents types de la corrosion comme ci –dessous :

- Corrosion chimique (séché).
- Corrosion électrochimique (humide).
- Corrosion biochimique.
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).
- Corrosion atmosphérique.

I.1.1. Corrosion chimique (séchée) :

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse.

Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement.

Ces il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans CCl₄) l'exemple de la corrosion séchée en atmosphère.[1]

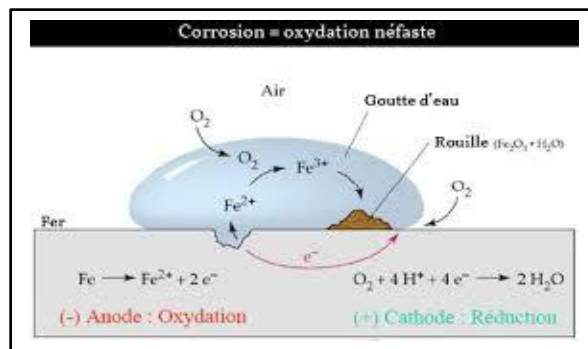


Figure I.1: Exemple de corrosion chimique

I.1.2. Corrosion biochimique :

Les bactéries présentes dans le milieu, modifient l'environnement en produisant par exemple de l'acide sulfurique qui vient consommer le métal

Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types :

- Chimique par production de substances corrosives telles que CO₂
- Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.
- Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Cela résulte de la formation de piqures sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène.

I.1.3. Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface de métal. Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement).

La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide ou la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion peut donc se développer à nouveau.

I.1.4. Corrosion électrochimique :

C'est une réaction électrochimique entre la surface des armatures et un liquide électrolyte. C'est le phénomène de corrosion le plus important dans le béton armé.

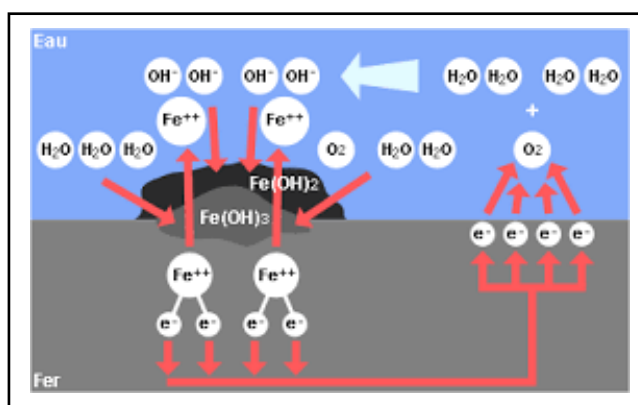


Figure I.2 : Corrosion électrochimique

I.1.5. La corrosion atmosphérique :

Elle désigne la réaction de l'oxygène de l'air à température ambiante avec un métal lorsqu'à la surface de ce dernier l'humidité et les polluants forment un film d'électrolyte.

I.2. Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- Facteurs métallurgiques,
- Facteurs définissant les conditions d'emploi,
- Facteurs dépendant du temps.
- Facteur définissant les modes d'attaques

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau I.1 : Les facteurs de la corrosion [1]

Facteur définissant les modes d'attaques	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-concentration du réactif -teneur en oxygène -pH du milieu -additions d'inhibiteurs -température -pression	-composition de l'alliage -procédé d'élaboration -impuretés -traitements thermiques -traitement mécaniques -addition protectrices	- état de surface -forme des pièces sollicitations mécaniques -emploi d'inhibiteurs -procédés d'assemblage	-vieillessement -tension mécaniques -température -modification des revêtements protecteurs

I.3.Types de corrosions électrochimiques

Le comportement de la corrosion d'un matériau en service, dépend d'une multitude de facteurs :

- Composition chimique et microstructure du métal.
- Composition chimique de l'environnement.
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.).
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements, etc).

La résistance à la corrosion n'est donc pas une propriété intrinsèque du métal, mais plutôt une propriété de l'interface métal-milieu, d'où la nécessité de caractériser la composition chimique et la microstructure de celle-ci, ainsi que son comportement électrochimique. La corrosion dépend donc d'un système extrêmement complexe dont les effets se manifestent, en pratique, sous une multitude d'aspect, parfois inattendus. [1]

La corrosion peut être classifiée suivant les formes et types. Une simple observation visuelle ou au microscope est apte à identifier la forme et le type de corrosion. Selon les formes, on distingue :

- La corrosion uniforme.
- La corrosion localisée.

I.3.1. La corrosion uniforme (généralisé)

Est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Ce type de corrosion est observé sur les métaux exposés aux milieux acides.

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou encore mécaniques. L'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse. A l'échelle macroscopique on ne distingue pas les lieux cathodiques des lieux anodiques, la surface entière du métal est simultanément cathode et anode (figure I.3). La corrosion non uniforme est celle qui n'est pas répartie sur toute la surface.

La corrosion uniforme peut être évitée par l'utilisation d'un revêtement ou par l'addition d'inhibiteur de corrosion ou encore par l'application de la protection cathodique.[1]



Figure I.3: Corrosion uniforme

I.3.2. La corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme par la direction claire des endroits anodiques et cathodiques. En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes

Les principales causes de cet aspect de corrosion sont :

- Surface de métal chimiquement hétérogène.
- Différence de potentiel dans les différentes zones du métal créées par la déformation.
- Endommagement local de la couche passive.

Les différents types de la corrosion localisée sont :

- Corrosion par piqûres.
- Corrosion intergranulaire (intercristalline).

- Corrosion sous contrainte.
- Corrosion avec érosion.
- Fragilisation par l'hydrogène.
- Corrosion sélective.
- Corrosion galvanique.
- Corrosion par crevasses.

I.3.2.1. Corrosion intergranulaire (intercristalline)

C'est une attaque sélective aux joints de grains, souvent, il s'agit de phases qui ont précipitées lors d'un traitement thermique. Donc le produit de corrosion se trouve aux joints de grains. L'attaque du métal s'effectue en profondeur, le long des joints de grains, ce qui conduit à une micro-fissure, alors la surface ne présente aucune altération.

La perte du métal est insignifiante, mais les caractéristiques sont sensiblement affectées, le métal peut se rompre sous un effort très faible. [1]

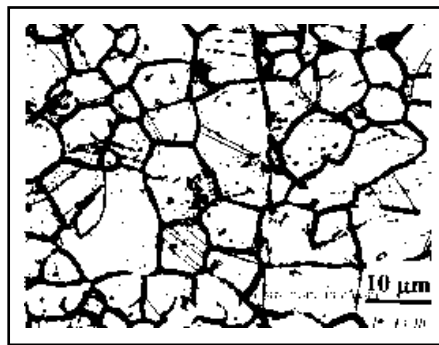


Figure I.4 : Corrosion intergranulaire

I.3.2.2. Corrosion par piqures :

C'est un type de corrosion localisée (figure I.5), qui se traduit à la surface du métal par la formation de trous étroits, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. L'origine de piqures est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales.

Bien que la quantité du métal corrodé soit faible, ce type de corrosion est très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des toles même épaisses. L'hétérogénéité de la surface est due à des défauts du film passif qui favorisent la mise à nu locale du métal, il en résulte la formation d'une micro-pile entre le métal mis à nu qui joue le rôle d'anode, donc se corrode et le métal passif qui constitue la cathode. Les défauts du film passif ont pour origine la présence d'inclusion dans le métal d'ions agressifs tels que les chlorures provenant de la solution et absorbés à la surface métallique ou une cause extérieure liée à l'utilisation du matériau (rayures).



Figure I.5 : Corrosion par piqure

I.3.2.3. Corrosion sous contrainte (C.S.C)

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif (figure I.6). En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas. La C.S.C se manifeste sous la forme de fessures qui peuvent être intergranulaires, soit transgranulaires. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mises en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation. [1]



Figure I.6: La corrosion sous contrainte

I.3.2.4. Corrosion par crevasses (caverneuse)

Est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène. [1]

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers,

sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqures. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqures (figure I.7).



Figure I.7: Corrosion par crevasses

La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer. La prévention contre la corrosion caverneuse impose l'utilisation d'assemblages sans interstices, soudés par exemple. Le nettoyage des dépôts et salissures, l'utilisation de joints solides et non poreux.

I.3.2.5. Fragilisation par l'hydrogène

L'hydrogène est un élément qui peut aisément diffuser dans les métaux et altérer leurs propriétés mécaniques. Ce phénomène a des conséquences pratiques considérables car il a de multiples occasions de pénétrer dans les aciers (élaboration, décapage, soudage, dépôts galvaniques, utilisation en milieu humide, hydrogène sulfuré, etc.) et il en résulte parfois, des ruptures catastrophiques immédiates ou différées selon les moyens de s'en prémunir, il existe trois types de fragilisations :

- **La fragilisation par décarburation**
- **La formation de soufflures**
- **La fragilisation par l'hydrogène dissous en présence de contrainte**

I.3.2.6. Corrosion par érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide (figure I.8).



Figure I.8 : Corrosion par érosion

I.3.2.7. Corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux et la dégradation du métal le moins résistant s'intensifie (figure I.9).



Figure I.9 : Corrosion galvanique

I.3.2.8. Corrosion sélective

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse (figure I.10).



Figure I.10 : Corrosion sélective

Chapitre II :
Corrosion des aciers dans le
béton

Introduction

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

II.1. Le béton armé

Connu depuis l'antiquité romaine, le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. D'abord employé en complément ou en substitution de la pierre, le matériau a connu un réel essor dans son association avec l'acier dans le béton armé. La complémentarité, à la fois mécanique et chimique, entre ces deux matériaux, a permis de construire de façon économique et fiable les ouvrages nécessaires à toutes les activités humaines.

II.1.1. Le béton

Le béton est mélange de ciment, eau, granulats et souvent adjuvants, réalisé en des proportions bien déterminées en fonction des caractéristiques que l'on veut obtenir. C'est une pâte considérée homogène résultante des réactions entre le ciment et l'eau.

Il y a une grande variété de ciments, mais le plus couramment utilisé est le ciment Portland CEM 1. Il est composé de clinker, de gypse (3 à 5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker est obtenu en cuisant, vers 1540°C, des mélanges appropriés de calcaire (80%) et d'argile (20%), il est principalement constitué de :

- Silicate tricalcique 3CaOSiO_2 ou C_3S
- Silicate bicalcique 2CaOSiO_2 ou C_2S
- Aluminate tricalcique $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A
- Aluminoferrite tétracalcique $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF

L'eau de gâchage incorporé lors de la confection du béton, lui confère à l'état frais la maniabilité et l'ouvrabilité, et développe la réaction d'hydratation du ciment et contribue à la résistance mécanique du béton au durcissement.

Les granulats sont issus de roches carbonatées (CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou siliceuse SiO_2 . Aggloméré par le ciment pour former une pierre artificielle. Selon le concept traditionnel, les granulats constituant le squelette du béton, et ils s'opposent à la propagation des microfissures provoqués par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance mécanique du béton.

Après l'addition de l'eau au ciment, des réactions chimiques vont s'opérer.

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

En effet, sous l'action de l'eau les principaux composés du ciment se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des composés hydratés.

Les produits d'hydratation majeurs sont les silicates de calcium hydratés C-S-H (50 à 70%) et de la portlandite ou hydroxyde de calcium Ca (OH) (25 à 27%).

Les C-S-H définissent la phase hydratée la plus importante, ce sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante :

$$(\text{CaO})_x (\text{SiO}_4)_y (\text{H}_2\text{O})_z \text{ avec } 0,6 < x/y < 2 \text{ et } z < 4$$

L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment et c'est d'elle que vont dépendre les propriétés mécaniques du matériau.

La portlandite, quand à elle, joue un rôle essentiel dans la durabilité des structures en béton armé et elle représente la réserve de basicité du matériau cimentaire, qui permet, en maintenant un pH élevé (> 12), de protéger par passivation les aciers de la corrosion.

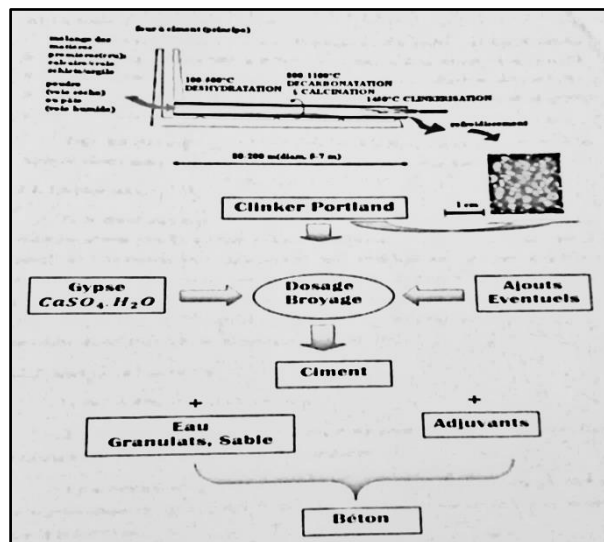


Figure II.1 : Procédé de fabrication du ciment et du béton

II.1.2. L'acier

Le béton a une bonne résistance à la compression mais une mauvaise résistance à la traction. Pour pallier à cette insuffisance, on dispose dans les parties tendues des armatures en acier qui a une bonne résistance à la traction. L'adhérence entre le béton et l'acier est nécessaire, et elle est fonction de la surface des armatures de la forme d'ancrage et de la résistance du béton.

Dans les constructions en béton armé, on utilise de l'acier ordinaire dont la durée de vie est assez longue pour satisfaire une durée de service déterminée.

II.2. Généralités sur la corrosion des aciers dans le béton

La corrosion des aciers dans le béton est une réaction électrochimique, qui nécessite la présence simultanée de quatre milieux :

- Une zone **anodique** (oxydation du fer),
- Une zone **cathodique** (réduction d'espèce chimiques en solution : eau ou oxygène dissous),
- Un **milieu conducteur d'électrons** (l'acier),
- Un **milieu électrolytique** (le liquide interstitiel du béton).

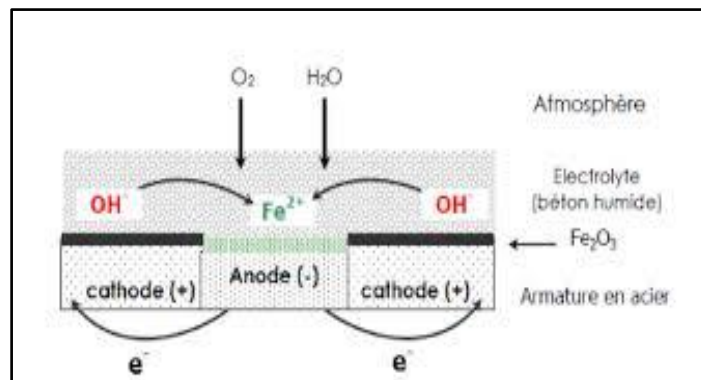


Figure II.2 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton [2]

Le béton, du fait de sa forte alcalinité ($pH > 12$), apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions, il y a formation de film protecteur très mince autour de ces aciers qui les protégera dans les conditions normales. En présence d'eau et d'oxygène, ce film passif peut-être détruit par des agents agressifs comme les chlorures et les sulfates.

La corrosion des armatures dans le béton a principalement lieu à la suite de la carbonatation du béton d'enrobage et de la pénétration du chlorure [3]. La couche passive formée sur l'acier et déstabilisée par l'abaissement du pH produit la réaction chimique entre dioxyde de carbone et les hydrate de la pâte de ciment. Les ions chlorures pénètrent dans la structure poreuse du béton et peuvent atteindre les armatures.

La corrosion ne se forme qu'une présence d'oxygène et d'humidité relative comprise entre 60% et 80%. Lorsque l'atmosphère est très sèche (humidité relative $< 40\%$), ou lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau désaérée (manque d'oxygène), la corrosion ne se produit en principe pas [4,5].

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

Le développement de la corrosion de l'acier dépend aussi d'autres facteurs comme le rapport E/C, le type de ciment, la qualité de l'interface acier-béton, l'épaisseur d'enrobage, la température, le pH, le potentiel de l'acier, les hétérogénéités de la surface de l'acier, etc. [4,5,6].

Le mécanisme de dissolution de l'acier dans le béton en présence d'ions chlore est représenté par la figure II.3 et la figure II.4 montre les modèles principaux de détérioration par la corrosion consécutivement à la carbonatation et à la pénétration des ions chlores.

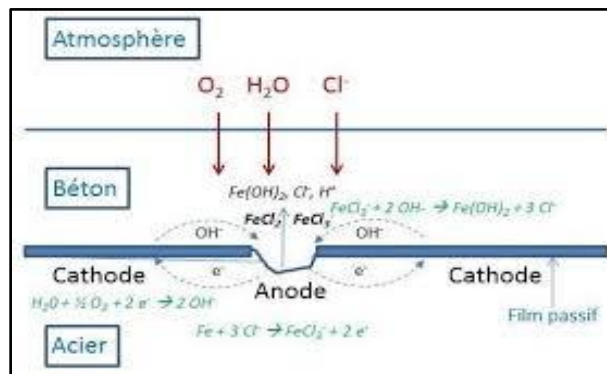


Figure II.3 : Mécanisme de dissolution de l'acier dans le béton en présence d'ions chlore [3]

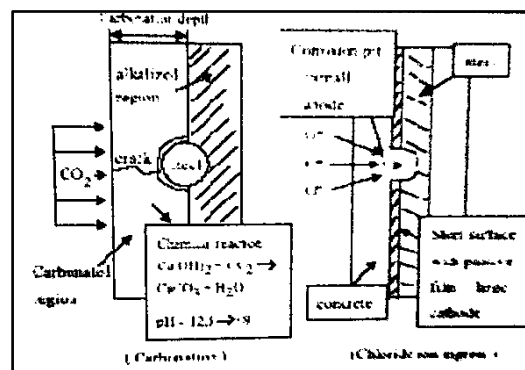


Figure II.4 : Modèles principaux de détérioration de corrosion [3]

II.3. La passivation des armatures dans le béton

Certains métaux et alliages ont la propriété de se passiver. En contact avec un milieu agressif, ils subissent une première attaque corrosive qui forme des produits de corrosion suffisamment insolubles, adhérents et compacts (oxydes) pour isoler le métal comme par revêtement : c'est la couche de passivation.

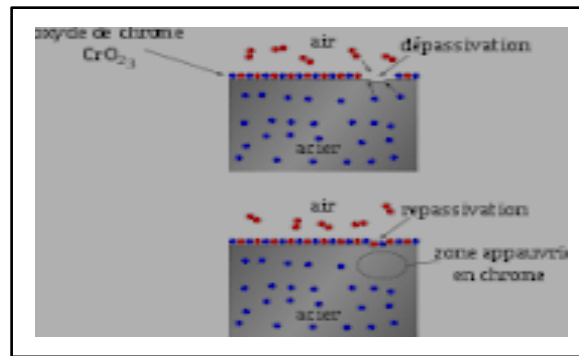


Figure II.5 : Passivation

Le pH de la solution interstitielle dans les pores du béton sain est compris entre 12,5 et 13,4. Avec cette valeur élevée de pH, l'acier se recouvre d'oxyde protecteur, qui forme la couche passive protégeant les aciers de la corrosion.

Lorsque les aciers sont dans une solution alcaline, ils recouverts d'un film d'oxyde. Dans le béton sain, cette couche passive est de 50-200 μ m d'épaisseur, elle est homogène et continue ; sa composition dépend du pH, du potentiel de l'acier et de l'existence de l'oxygène.

L'interface acier-béton peut être dans un état passif, semi passif ou active (corrosion) [5]. Pour l'état passif, le film d'oxyde se fait lentement et est composé de Fe_3O_4 - γ - Fe_3O_4 . Pour l'état semi passif, le film d'oxyde est constitué de deux couches, la première est directement sur la surface d'acier et composée de Fe_3O_4 - γ - Fe_3O_4 , la deuxième est formé d'un mélange de α - $FeOOH$ et de Fe_3O_4 - γ - Fe_3O_4 . Cette couche est inhomogène et poreuse due à sa formation rapide, en conséquence, moins efficace contre la corrosion.

II.4. les étapes de corrosion

Le processus de corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux phases (figure II.6)

- **1ère phase :** Au départ, l'acier est protégé par le film passif qui empêche la formation de rouille. Ensuite, durant la phase d'incubation, les agents agressifs pénètrent dans le béton et attaquent les armatures qui se dépassives progressivement. La période d'incubation correspond au temps requis pour que les aciers soient dépassivés sans qu'aucun dommage intérieur ni extérieur ne soit visible.
- **2ème phase :** C'est une période de propagation, où les réactions d'oxydation à la surface du métal produisent des oxydes et hydroxydes. La formation de ces produits d'oxydation va causer un gonflement et apparaître des fissurations sur l'enrobage de béton et à long terme causé la destruction de la construction.

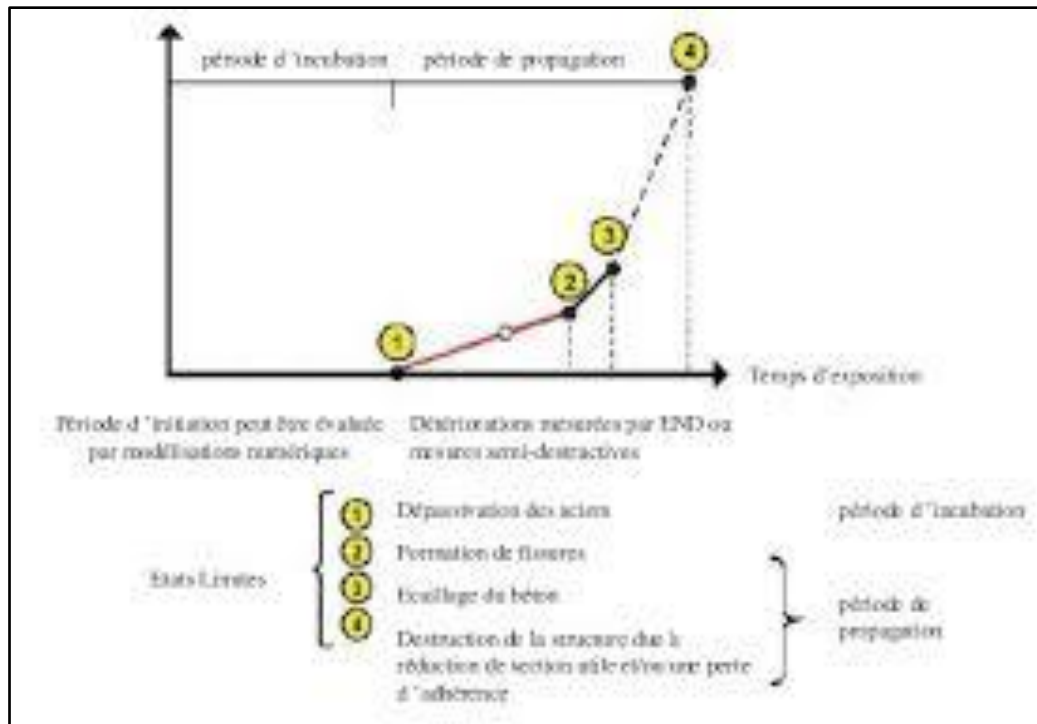


Figure II.6 :Etapes de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton

II.5. La dépasseivation des aciers dans le béton

La dépasseivation des aciers est la destruction du film passif qui les entoure.

Dans les bétons, la corrosion des armatures est essentiellement initiée par deux facteurs distincts :

- La carbonatation du béton d'enrobage au contact du CO_2 atmosphérique,
- La pénétration de chlorures depuis le milieu environnant (milieu marin, utilisation de sels de déverglaçage, milieu industriels particuliers.... etc...).

Si l'un de ces 2 phénomènes se produit, le pH du béton chute et l'acier n'est plus protégé. Une fois que l'acier d'armature est dépasseivé et est en contact simultané avec de l'oxygène et de l'eau (humidité), la dissolution du métal a lieu corrosion sous la forme de formation de rouille, puis perte de section.

II.6. Amorçage de la corrosion par carbonatation

II.6.1. Généralités

La carbonatation est un phénomène de vieillissement du béton, est l'un des facteurs principaux de détérioration des structures en béton armé exposées à l'atmosphère, et plus encore pour les structures exposées à de fortes concentrations de dioxyde de carbone comme les tunnels routiers, les ouvrages urbains, les parkings souterrains, etc.

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

Il correspond à la réaction des produits hydratés du ciment avec le CO₂ atmosphérique dissous dans la solution interstitielle. Ce qui engendre une diminution du pH (jusqu'à 9 environ).

La dépassivation de la couche protectrice des armatures se produit lorsque le pH est inférieur 9,5. La carbonatation provoque une destruction du film passif et la diminution de la porosité du béton (les produits des réactions de carbonatation ont des volumes supérieurs à ceux des réactifs).

II.6.2. Les réactions physico-chimiques

Le CO₂ atmosphérique ayant pénétré dans le béton se dissout dans la solution interstitielle des pores de la matrice cimentaire et réagit avec certains composés du béton pour former des carbonates de calcium. La carbonatation est une réaction de neutralisation des bases (les hydroxydes) par un acide (le gaz carbonique). En réalité, tous les composants du ciment, anhydres ou hydratés, peuvent réagir et se carbonater, à l'exception du gypse. Les mécanismes prépondérants sont ceux de la carbonatation de la portlandite Ca(OH)₂ et des silicates de calcium hydratés C-S-H. La dissolution du CO₂ dans la solution interstitielle s'écrit selon la réaction :



Dans l'eau, l'acide carbonique (H₂CO₃) se comporte comme un diacide faible dont la dissociation a lieu en deux phases désignées par la réaction :



Les ions OH⁻ dans les équations d'équilibre (II.9 et II.10) proviennent de l'autoprotolyse de l'eau qui s'écrit :



La dissolution du CO₂ entraîne une baisse de la concentration en OH⁻ dans la solution interstitielle, ce qui réduit le pH. Pour rétablir la basicité du milieu, la portlandite se dissout suivant la réaction :



Ainsi les ions calcium Ca²⁺ libérés au cours de la réaction (II.12) réagissent avec les ions carbonates CO₃²⁻ provenant de la réaction (II.10) pour former du carbonate de calcium :

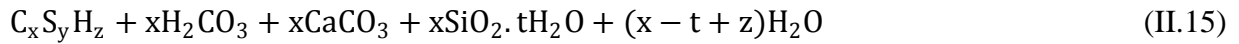


Les différentes étapes du mécanisme de carbonatation de la portlandite (Figure II.9) peuvent être représentées par l'équation simplifiée :



Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

Quand au C-S-H, ils se carbonatent et donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydraté (qualifié de gel de silice) et éventuellement de l'eau libre.



La carbonatation de la portlandite provoque un abaissement du pH dans le béton. Les C-S-H présentent la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment et confèrent au béton l'essentiel de sa résistance mécanique, mais ils ont un pouvoir tampon sur le pH de la solution interstitielle plus faible que la portlandite.

Par conséquent, leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation, n'est pas indispensable.

La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus importantes.

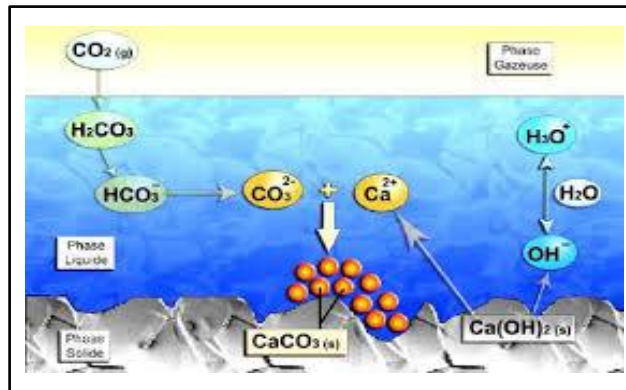


Figure II.7 : Mécanisme de carbonatation de la Portlandite [7]

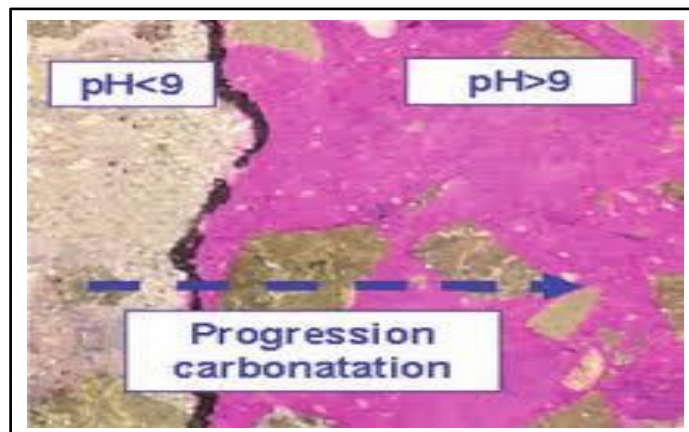


Figure II.8 : La progression de la carbonatation

II.6.3. Les facteurs influençant la vitesse de carbonatation

La vitesse de carbonatation dépend essentiellement des paramètres relatifs à l'environnement et au matériau béton lui-même. Les plus importants sont :

- **Le rapport E/C :**

Ce rapport est connu principalement pour contrôler la résistance mécanique, la durabilité, et l'imperméabilité du béton, et donc en conséquence le taux de corrosion d'armatures. La profondeur de carbonatation augmente avec l'augmentation du rapport E/C. Le coefficient de diffusion de l'oxygène pourrait également augmenter avec une augmentation du rapport E/C.

Le rapport E/C influence considérablement sur la porosité des matériaux à base de ciment [8]. Tout excès d'eau conduit à un excès de porosité favorisant la pénétration des agents agressifs en particulier le CO_2 .

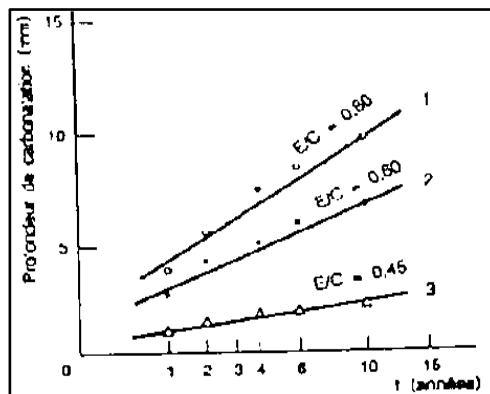


Figure II.9 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E/C (20°C -50% HR). [9]

- **Le dosage en ciment :**

Le dosage en ciment est responsable de la quantité de matière susceptible de se carbonater. Plus le dosage en ciment est élevé, plus il y a de matière pour la carbonatation. Et puisque la carbonatation provoque une diminution de la porosité, il y aura un freinage de la vitesse de pénétration du gaz carbonique [10], c'est-à-dire l'augmentation du dosage du béton à un effet ralentisseur sur la propagation de la carbonatation.

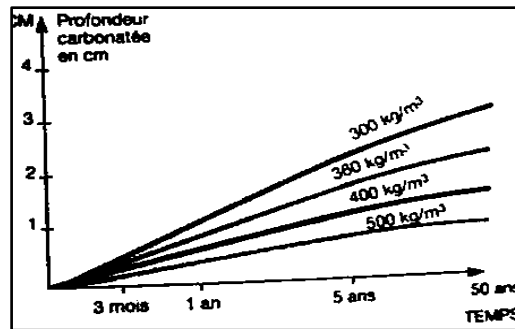


Figure II.10 : Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment

- **Le type de ciment :**

Les ciments avec des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes, pouzzolane) ont naturellement une teneur en composés susceptibles de se carbonater inférieure à celle du ciment Portland. Ainsi, la profondeur de carbonatation des ciments avec ajouts est supérieure à celle du ciment Portland [11,12].

- **La concentration en dioxyde de carbone :**

L'augmentation de la concentration en CO_2 induit un accroissement de la vitesse de carbonatation dans des endroits où la teneur en CO_2 est élevée (tunnels, garages, cheminées,...) [13]. Cependant, les variations de la teneur en CO_2 de l'air ont une influence sur les bétons de résistance modérée (≤ 30 MPa environ). Au-delà, la teneur en CO_2 n'a plus d'influence sur la carbonatation [14].

- **L'humidité relative :**

La teneur en eau du béton ou l'humidité relative de l'air en équilibre avec le béton, est un facteur qui présente une grande influence sur la cinétique de carbonatation. La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative comprise entre 60 et 80 %. Au-delà de 80 %, la cinétique diminue rapidement pour atteindre des valeurs extrêmement faibles lorsque les pores sont saturés d'eau (humidité relative $> 90\%$), sachant que la diffusion du CO_2 dans l'eau est dix mille fois plus faible que dans l'air [10] donc dans un environnement très sec, la cinétique de carbonatation est très faible, car la quantité d'eau présente dans les pores du béton est insuffisante pour dissoudre le dioxyde de carbone.

La Figure II.11 montre l'évolution de la corrosion d'un acier en fonction de l'humidité relative pour une atmosphère polluée par 0,01% de SO_2 . On constate ici que la corrosion devient importante dès que l'humidité relative atteint 60%.

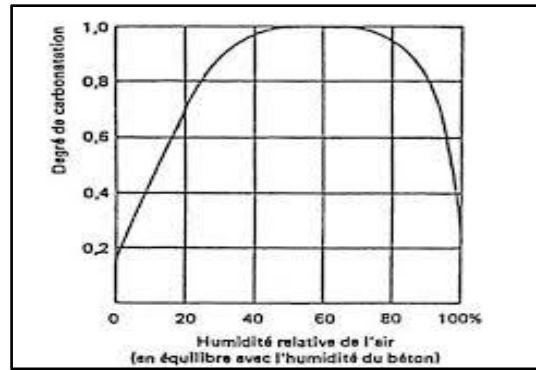


Figure II.11 : Incidence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation [14]

- **La température :**

L'effet de la température sur la vitesse de carbonatation est très discutable. D'une part, une élévation de la température accélère les réactions chimiques (thermo activation selon la loi d'Arrhenius). D'autre part, une augmentation de la température diminue la solubilité du CO_2 et diminue sa concentration dans la phase gazeuse [7]. Néanmoins, il est généralement admis qu'une élévation de la température engendre une accélération de la carbonatation [15] ;

- **La résistance à la compression :**

La résistance à la compression est en relation quasi linéaire avec la profondeur de carbonatation [16]. Quand la résistance à la compression du béton augmente, la carbonatation diminue du fait de la diminution de la porosité [16].

II.6.4. Conséquence de la carbonatation sur le béton

Pour le béton seul, la carbonatation a un effet bénéfique car elle diminue la porosité, ce qui améliore ces performances mécaniques et limite la pénétration des agents agressifs. Mais négativement, la baisse du PH de la solution interstitielle provoque la dépassivation du film protecteur des armatures et favorise la corrosion des aciers. Les principales conséquences de la carbonatation sur le béton armé sont :

- **Diminution de la porosité :**

La distribution de la taille des pores d'une pâte de ciment durcie est modifiée par la carbonatation [7]. Elle montre une notable réduction du volume des pores après carbonatation et ainsi une diminution de la porosité [20]. On observe une chute de la porosité de 31,6% à 25,6% après 32 mois de carbonatation naturelle d'un CEM I de $E/C=0,3$ [17].

- **Augmentation de la résistance mécanique du béton :**

La carbonatation induit localement une accumulation d'humidité dans les pores : en effet, la carbonatation de la portlandite et des C-S-H libère une partie de l'eau de structure des hydrates (équations II.14, II.15). Cette eau libérée peut participer à la composition de la

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressif. On note que la carbonatation de la portlandite est l'origine principale de cet élagage d'eau libre [7].

- Evolution des propriétés de transfert :

L'évolution de la microstructure, qui accompagne la carbonatation, influence sur la propriété de transfert des matériaux cimentaires : coefficients effectifs de diffusion aux ions et aux gaz et perméabilité aux gaz et à l'eau liquide.

Le coefficient effectif de diffusion aux gaz (oxygène ou hydrogène) est diminué après la carbonatation de matériaux à base de ciment CEM I [18]. Cependant, le coefficient de diffusion effectif des ions (chlorures par exemple) est augmenté à l'issue de la carbonatation de matériaux à base de ciment [19], ce phénomène pouvant être attribué aux grandes modifications de la structure des CSH après la carbonatation.

Quand à l'impact de la carbonatation sur la perméabilité, les essais menés par Thiery [7] montrent que la carbonatation provoque un accroissement de la perméabilité intrinsèque aux gaz et à l'eau liquide d'un béton assez poreux ($E/C > 0,45$), et une réduction pour un béton de porosité modérée. Son effet sur la perméabilité intrinsèque des bétons les moins poreux est négligeable.

- Retrait de carbonatation :

La carbonatation de la portlandite entraîne une augmentation de volume des solides de 3% à 19% selon le produit de réaction obtenu (Valérite, Calcite ou Aragonite), ce qui nous amène à penser qu'il s'agit d'un gonflement et non d'un retrait. Pourtant toutes les expériences mettent en évidence un (retrait).

Ce phénomène peut être attribué à la perte d'eau provoquée par la réaction [10], du fait de l'observation que la quantité d'eau libérée lors de cette réaction s'accompagne d'un retrait qui est du même ordre de grandeur qu'un retrait infligé par le départ de la même quantité d'eau sans carbonatation. Plusieurs autres hypothèses ont été avancées dans le but d'expliquer le retrait de carbonatation qui est un phénomène assez complexe [20,21,22]. Ces hypothèses ont permis de mieux comprendre ce phénomène mais pas d'aboutir à une conclusion déterminée et générale.

- Chute du pH de la solution interstitielle et corrosion des armatures :

L'alcalinité du béton ($pH > 13$) assure la passivation des aciers d'armatures. Or, la carbonatation du béton entraîne une baisse du pH favorisant leurs corrosions. Lors du phénomène de corrosion. Dans la zone anodique il y aura une diminution progressive de la surface d'armature et dans la zone cathodique la formation d'une rouille expansive qui

exercera une pression sur le béton qui entoure les armatures et provoqué l'éclatement du béton d'enrobage.

II.7. Amorçage de la corrosion par pénétration des ions chlorures

II.7.1. Généralités

Les ions chlorures présents dans le béton peuvent avoir été introduits par l'eau de gâchage ou par des agrégats contaminés, ou bien provenir du milieu environnant (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques). Les chlorures peuvent exister dans le béton sous les deux formes suivantes :

- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
- Les chlorures piégés ou liés qui résultent de la réaction chimique avec les hydratés du ciment, ou combinés avec des agrégats, ou adsorbés physiquement sur les parois des pores de béton.

Les chlorures pénètrent dans le béton et arrivent au contact de l'acier et quand leur teneur atteint un seuil critique, ils attaquent l'acier, initialement passivé, en des points localisés. Dans ces points l'armature est dépassivée et correspondent aux zones anodiques où l'acier se dissout. Le reste de la surface qui est encore passivé correspond aux zones cathodiques. La surface des zones cathodiques étant bien plus importantes que celles des zones anodiques, la dissolution de l'acier croît en profondeur plutôt qu'en surface, formant ainsi des piqûres ou des cavernes [23,24]. Le mécanisme de ce type de corrosion est complexe car la composition de la solution à l'intérieur de la piqûre est modifiée par rapport à celle de la solution interstitielle qui l'entoure [25].

II.7.2. Les réactions physico-chimiques

Les ions chlorures qui pénètrent dans le béton se combinent chimiquement avec l'aluminate tricalcique C_3A (composant du ciment) et forment des monochloroaluminates hydratés ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), relativement stable dans le béton.

Dans les piqûres, les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former l'acide chlorhydrique qui sont constamment recyclés :



Ces réactions engendrent une importante baisse du pH, entre 3,8 et 5 [26,27], la dissolution du fer est alors accélérée et les piqûres croissent en profondeur.

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

-Les ions ferreux diffusés hors de la piqure se combinent avec les ions hydroxyde de la phase interstitielle du béton tandis que la réaction cathodique est la même que dans le cas de corrosion en absence de chlorure.

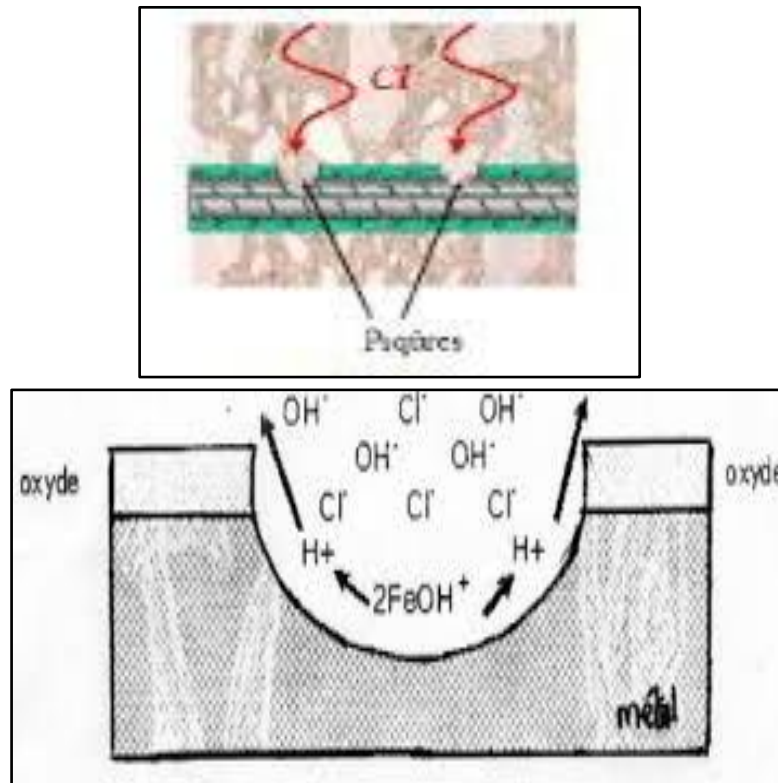


Figure I.12: Modèle de PAGE et al. D'attaque de l'acier par les ions chlorures [25]

II.7.3. Teneur critique en ions chlorures

Dans le cas où la solution interstitielle contient une faible concentration en ions chlorure, il n'y aura pas de dépassivation des armatures, il existe donc une teneur critique en ions chlorures nécessaire pour l'amorçage de la corrosion.

Dans la littérature, il existe plusieurs expressions C_{cr} , la teneur critique peut s'exprimer par le rapport Cl^-/OH^- (c'est le rapport des ions activant Cl^- sur les ions passivant OH^-), ou bien par la teneur en chlorures (libres+liés) par rapport au poids du ciment (de 350 Kg/m^3 par définition). Selon d'autres études, on considère que seuls les chlorures libres participent à la dépassivation des armatures et le seuil critique est exprimé en termes de la teneur en chlorures libre par rapport au poids du ciment. Enfin, il existe d'autres travaux qui expriment la teneur seuil par $[Cl^-]=1,8 \text{ mol/l}$ [5].

Le tableau II.1 présente des valeurs de ces seuils reportées dans la littérature.

Tableau II.1 : Teneurs critiques en ions chlorures et rapports Cl^-/OH^- relevés dans la littérature.

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

Concentration en chlorures	Référence
0,2% de Cl ⁻ solubles à l'acide en masse de ciment	Clear et al., 1973[29]
0,4 à 0,8% de Cl ⁻ totaux en masse de ciment	Locke et al., 1980[30]
0,4 de Cl ⁻ totaux en masse de ciment	Building Research Etablissement, 1982 [31]
0,15 de Cl ⁻ solubles à l'eau en masse de ciment	Holden et al. 1983 [32] Popovics et al., 1983 [34]
0,2% de Cl ⁻ en masse de ciment (béton armé) 0,08% de Cl ⁻ en masse de ciment (béton précontraint)	ACI 222R-89-,1989 [34]
0,06 à 1% de Cl ⁻ totaux en masse de ciment	ACI318-89-,1992 [35]
0,1% de Cl ⁻ totaux en masse de béton sec	Stoltzner et al., 1997 [36]
0,60 à 3,04% de Cl ⁻ totaux en masse de ciment selon les conditions expérimentales	Gouder et Halaka, 1970 [37]
0,45% à 1,15 de Cl ⁻ libres en masse de ciment selon le type de béton	Kayyali et Haque, 1995 [38]
0,097 à 0,19% de Cl ⁻ totaux en masse de ciment	Hope et Ip, 1987 [39]
0,14 à 0,22% de Cl ⁻ libres en masse de ciment 0,35 à 1% de Cl ⁻ totaux en masse de ciment selon la Quantité en C ₃ A	Hussain et al., 1995 [40]
Rapport Cl ⁻ /OH ⁻	Référence
0,6	Hausman, 1967 [41]
0,35	Gouda, 1970 [42]
0,29-0,30	Diamond, 1986 [43]
0,25-0,8	Goni et Andrade, 1990 [44]
3,00	Lambert et al., 1991 [45]

Ces seuils ne sont pas fixes car ils dépendent du pH, de l'humidité du béton, de sa teneur en oxygène, etc.

II.7.4. Facteurs influant sur la pénétration des chlorures

La pénétration des ions chlorures peut être influencée par des facteurs liés à la composition du matériau ou bien à sa mise en œuvre ou liés au milieu environnant. Les plus essentiels sont :

- Le rapport E/C :

Comme pour le phénomène de carbonatation, la migration des ions chlorures à travers la structure poreuse d'un béton est fortement liée aux propriétés de transfert des bétons (diffusivité et perméabilité). Ces propriétés de transfert sont elles-même liées à la microstructure des bétons. POWERS et al. [47] ont mis en évidence l'importante diminution de la perméabilité d'une pate de ciment lorsque le rapport E/C diminue au-dessous d'un rapport critique E/C = 0,70 (Figure II.13). Pour des rapports E/C plus élevés, le réseau des capillarités reste toujours interconnecté, même si l'hydratation du ciment est complète.

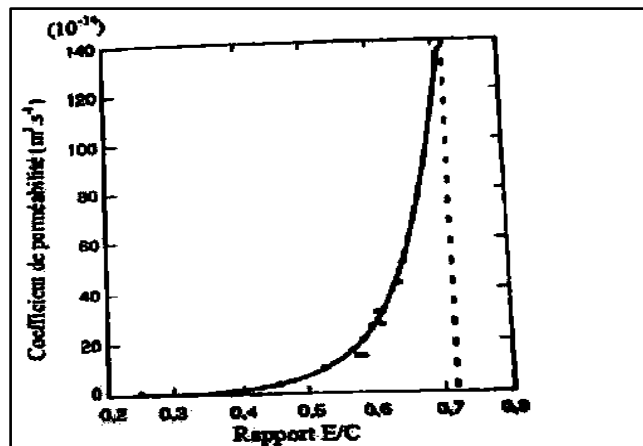


Figure II.13 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau des pâtes de ciment totalement hydratées et le rapport E/C

- Les additions minérales et les ajouts :

Les additions minérales et les adjuvants donnent au béton un niveau de résistance à la compression fixé. La résistance à la compression peut constituer un critère vis-à-vis de la durabilité.

Les fillers calcaire ne modifient pas la perméabilité et la diffusivité du béton, cependant, d'autres additions minérales, comme les laitiers, les cendres volantes ou encore la fumée de silice, modifient la nature et la texture de ces hydrates. Ils réduisent la portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne, en général, d'un affinement des pores et des capillaires, et donc une réduction de la perméabilité.

Cette action peut prendre quelques jours pour les fumées de silice, et quelques semaines pour les laitiers, et quelque mois pour les cendres volantes.

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

- La nature du ciment :

La nature du ciment joue un rôle important dans la fixation des ions chlorures. En effet, les chlorures sont soit adsorbés sur les C-S-H, soit fixés par les aluminates (C_3A) qui dépendent tous deux de la composition du ciment. FRANCY [47] a montré l'influence de la teneur en aluminates de ciment sur la quantité de chlorures fixés (figure II.17).

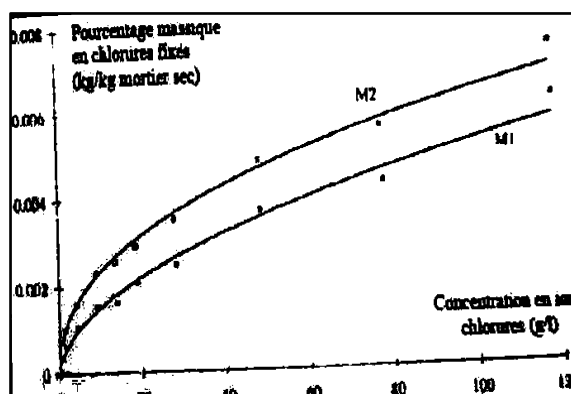


Figure II.14 : Isotherme de fixation du chlore sur deux mortiers [47]

FRANCY a fait une comparaison des isothermes de fixation du chlore de deux mortiers de référence M1 et M2 (sable Leucate et $E/C = 0,5$), chaque mortier utilisant un ciment différent (tableau II.2).

Tableau II.2 : Analyse chimique des ciments de l'étude menée par FRANCY [47]

Mortier	Type de ciment	Composition de Bogue (%)				
		C_3S	C_2S	C_3A	C_3AF	$CaSO_4 \cdot H_2O$
M1	CEM I	67,2	16,4	4,5	6,5	4,5
M2	CEM II	58,8	14,7	11,3	6,6	4,5

On constate que le mortier M2, dont la teneur en aluminates du ciment est supérieure à celle du ciment M1, possède une capacité de fixation environ 30% supérieur à celle du mortier M1, pour une même teneur en pate de ciment.

Une augmentation de la teneur en (C_3A) du ciment conduit donc à une diminution de la teneur en chlorures libres, c'est-à-dire à une augmentation de la teneur en chlorures fixés (pour une teneur en chlorures totaux constante).

- La teneur en eau :

Il est naturel de penser que la capacité de fixation du matériau vis-à-vis des ions chlorures est directement liée à la surface spécifique en contact avec la solution interstitielle : elle diminuerait avec l'humidité interne [49].

Cependant, malgré une diminution de la teneur en eau les parois des pores restent couvertes d'une couche adsorbée d'eau, il en résulte une augmentation de la solution au voisinage de ces pores [49]. Donc pour de faible teneur en eau, on aura des chlorures piégés dans une mince pellicule d'eau qui pourront être considérés comme fixés, et une diminution de la mobilité des ions chlorures.

- Le flux de liquide :

Les mouvements d'eau peuvent réduire la fixation des ions chlorures. Des essais d'imbibition capillaires par solution saline menés par FRANCY [47] montre que les ions chlorures sont transportés par l'eau (figure II.15) et qu'une durée d'imbibition insuffisante ne permet pas d'atteindre l'équilibre de fixation du chlorure. Ce fait est expliqué par :

- Les chlorures transportés par l'eau dans les gros pores n'ont pas tous de suite accès aux hydrates avec lesquelles ils interagissent ;
- La vitesse imposée aux ions peut réduire le nombre de chocs avec les parois des pores et donc le nombre de rétentions efficaces ;
- La forte énergie cinétique de mobilité des ions chlorures dans les pores peut favoriser la désorption par rapport à la fixation ;
- Un état initial sec du matériau peut rendre les hydrates inaptés à une fixation immédiate.

Ainsi, un flux convectif rapide gêne (ou retarde) la fixation des chlorures sur la matrice.

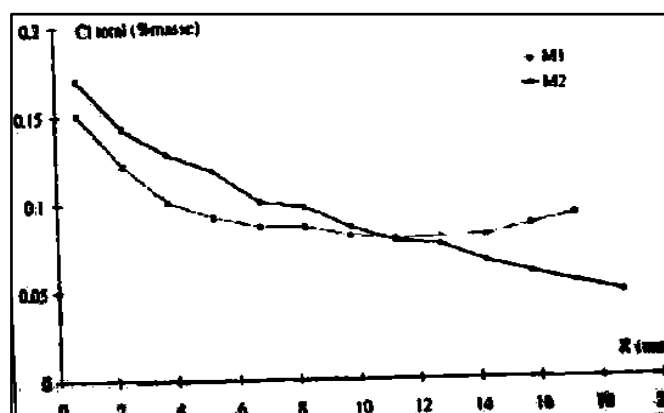


Figure II.15 : Profil en chlorure total après imbibition de 48 heures sur matériaux secs par des solutions saines à 20g/l en NaCl [47]

- La teneur en chlorure :

Les chlorures présents dans le béton peuvent soit être introduits lors du gâchage, soit provenir du milieu environnant. Lorsque la teneur en chlorures atteint ou dépasse une valeur critique ou valeur seuil [50,51,52], on dit qu'il y a dépassivation de la couche protectrice de l'acier, l'enrobage ne peut plus protéger les armatures et la corrosion s'amorce si les quantités d'eau et d'oxygène sont suffisantes.

II.8. Formation des produits de corrosion expansifs

En général, les produits de corrosion dominants sont l'hydroxyde ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) et l'hydroxyde ferrique ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Ces deux produits sont les plus majoritaires parmi les produits de corrosion (d'où l'appellation de produits expansifs). On présente dans cette partie les expressions des pertes d'aciers en masse et en surface suite aux réactions de corrosion.

II.8.1. Masse d'acier consommée

La masse d'acier consommée lors de la formation des produits de corrosion peut être exprimée par la loi de Faraday [53] ;

$$\frac{dma}{dt} = \frac{icorr Ma}{nF} \quad (\text{II.18})$$

Ou : m_a est la masse d'acier consommée (g), t est le temps à partir de l'initiation de la corrosion (an), i_{corr} est la densité du courant de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), M_a est la masse molaire de l'acier ($M_a=55,85 \text{ g/mol}$), n est la valence de l'acier $n=2$ lors de la formation de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $n=3$ lors de la formation de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, dont est déduite une valeur $n=2,5$ de façon empirique et F est la constante de Faraday ($F=96500 \text{ C/mol}$).

II.8.2. Surface d'acier consommée

La corrosion des aciers dans le béton peut être se faire sous deux formes :

Une corrosion généralisée, qui provoque une réduction uniforme de la surface d'acier et une corrosion par piqure, qui provoque une réduction localisée et fréquemment plus agressive.

La plupart des cas de corrosion par pénétration des chlorures, induit une réduction de la section de la barre par la formation de piqure. Ce phénomène a lieu lorsque les ions chlorures détruisent la couche protectrice de l'acier en des endroits localisés tout au long de la barre d'armature. Lorsque la corrosion est initiée en ces endroits, un environnement très agressif se forme à l'intérieur de ces piqures. L'intérieur de la piqure agit comme étant la région anodique donnant des électrons à la zone d'acier encore passive (cathode). Ce transfert d'électron crée un cycle auto-entretenu qui peut mener à des taux de pénétration dramatique (jusqu'à 1 mm/an) amenant à une réduction rapide des sections des barres d'armature [54]

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

La profondeur de la pique (P_{max}) est généralement plus grande que la profondeur de pénétration due à une corrosion générale (P_{moy}). Le rapport entre la profondeur de la corrosion par pique et celle de la corrosion générale est appelé facteur de corrosion par pique (F_p) et est défini par :

$$F_p = \frac{p_{max}}{p_{moy}} \quad (II.19)$$

Pour calculer la surface résiduelle des armatures sujettes à la corrosion par pique. Val et al [55] ont proposé un modèle supposant une forme sphérique de la pique (Figure II.18) et dans lequel la profondeur maximale d'une pique le long d'une armature d'acier de surface A_a est :

$$p(t) = \int 0,0116 X_{icorr} X F p x dt \quad (II.20)$$

Ensuite, en se basant sur la configuration présentée sur la figure II.18, la largeur de la pique (a) et sa section transversales A_p peuvent être exprimées par :

$$A_p(t) = \begin{cases} \pi \frac{D_0^2}{4} - A_1 + A_2 & P(t) \leq \frac{D_0}{\sqrt{2}} \\ \pi \frac{D_0^2}{4} & P(t) \geq D_0 \end{cases} \quad (II.21)$$

$$A_1 = 0,5 \left[\theta_1 \left(\frac{D_0^2}{2} \right) - a \left| \frac{D_0}{2} - \frac{(p(t))^2}{D_0} \right| \right] \quad A_2 = 0,5 \left[\theta_2 (p(t))^2 - a \frac{(p(t))^2}{D_0} \right] \quad (II.22)$$

$$a = 2 p(t) \sqrt{1 - \left(\frac{p(t)}{D_0} \right)^2} \quad (II.23)$$

$$\theta_1 = 2 \arcsin \left(\frac{a}{D_0} \right) \quad \theta_2 = 2 \arcsin \left(\frac{a}{2p(t)} \right) \quad (II.24)$$

ou : D_0 est le diamètre initial de la barre d'armature. Dans un élément en béton armé sujet à la corrosion par pique, contenant n_b barres, toutes de diamètre D_0 , la surface résiduelle d'acier dans cet élément à l'instant t est :

$$A_{ar} = A_{anom} - \sum_{m=1}^{n_b} A_{pm}(t) \quad (II.24)$$

$$\text{Ou : } A_{anom} = n_b \cdot \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} \quad (II.25)$$

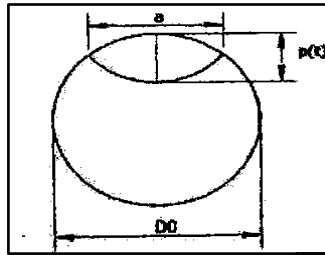


Figure II.16 : Configuration de la pique [55]

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

Le modèle proposé par Val et al.[55] est cohérent et assure une bonne représentation des piqures.

II.9. Densité du courant de corrosion

La corrosion dans le béton résulte d'un processus électrochimique dans lequel la réaction de dissolution (réaction anodique) est équilibrée par une ou plusieurs réactions dites cathodiques mettant en jeu des quantités de matière (ions surtout) et des électrons. A chacune de ces réactions élémentaires correspond une vitesse de corrosion qui est égale à la quantité de matière formée par unité de temps. A chacune des réactions cathodique et anodique correspond un potentiel électrique qui dépend de sa vitesse.

A l'état d'équilibre naturel, les vitesses des charges électriques dans les demi-réactions (anodique et cathodique) sont égales en valeur absolue. Leur valeur commune est appelé courant de corrosion i_{corr} [57] avec :

$$I_{\text{corr}}=i_{\text{anode}}=i_{\text{cathode}} \quad (\text{II.27})$$

Dans le **tableau II.3**, plusieurs classifications du risque de corrosion sont présentées en fonction des valeurs de l'intensité du courant de corrosion.

Tableau II.3 : Classification des courants de corrosion

Classification	Courant de corrosion i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				
	Dhir et al., 1994 [58]	Brite, 1995 [59]	Middleton et al.,1998 [60]	Gagné,2008 [61]	Breysse et al.,2008 [62]
Négligeable		<0,1		<0,2	<0,1
Faible	0,1	0,1-0,5	0,1-0,2	0,2-1,0	-
Modéré	1,0	0,5-1,0	0,5-1,0	1,0-10,0	-
Elevé	10,0	>1,0	>1,0	>10,0	-

La détermination du courant de corrosion n'est pas facile puisque ce paramètre dépend de plusieurs facteurs, dont la disponibilité en oxygène et en eau à la surface du métal, la qualité du béton et l'enrobage.

Vu et al [62] ont proposé une méthode empirique qui permet de déterminer le courant de corrosion dans un environnement ayant une humidité relative de 75% et une température de 20°C. Pour cet environnement spécifique, le courant de corrosion est exprimé en fonction de la teneur en eau du béton et de l'enrobage par :

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

$$i_{corr} (ini) = \frac{37,8(1-E/C)^{-1,64}}{e} \quad (II.28)$$

Avec : $i_{corr} (ini)$ le courant de corrosion au début de la propagation de la corrosion en ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) E/C la teneur en eau du béton et e l'enrobage en (cm). A partir des données de mesures du courant de corrosion, il a développé une relation entre le temps depuis l'initiation de la corrosion et le courant de corrosion :

$$i_{corr} (tp) = i_{corr} (ini) \cdot 0,85 \cdot t_p^{-0,29} \quad (II.29)$$

Ou : t_p est le temps depuis l'initiation de la corrosion. Ainsi, nous pouvons calculer le courant de corrosion à chaque instant à partir de l'initiation de la corrosion. Cette expression permet de prendre en compte la diminution du courant de corrosion dans le temps. Suite à la formation de produits rouillés à la surface de l'acier, la capacité de diffusion des ions fer diminue. Une réduction du rapport anode/cathode se produit également, ce qui se traduit par une diminution du courant de corrosion.

D'autres modèles de i_{corr} basés sur des mesures des paramètres de corrosion, ont été proposés. En particulier, Liu et al. [63] ont proposé à partir d'analyses de régressions multilinéaires une expression de la densité du courant de corrosion en fonction de la teneur totale en chlorure, de la température, de la résistance ohmique et de temps de la corrosion active :

$$i_{corr} = 0,926 \exp(7,98 + 0,7771 \cdot \ln(1,69C_t) - \frac{3006}{T} - 0,000116 \cdot R_c + 2,24 \cdot t^{-0,215}) \quad (II.30)$$

Avec : C_t la teneur totale en chlorure (Kg/m^3 de béton), T la température à la profondeur des armatures (K), R_c la résistance ohmique de l'enrobage(Ω) et t le temps de corrosion (an). R_c peut être exprimée au moyen d'une régression en fonction de C_t par [65] :

$$R_c = \exp(8,03 - 0,549 \cdot \ln(1 + 1,69 \cdot C_t)) \quad (II.31)$$

Plus récemment, des tests non destructifs et semi- destructifs ont été réalisés sur des échantillons de béton de béton dans différentes conditions relatives à l'environnement (humidité relative et température) et au matériau (teneur en eau et épaisseur d'enrobage) pour mesurer l'intensité du courant de corrosion [65]. Ensuite des analyses statistiques ont été réalisées sur les séries de mesures et ont permis d'élaborer un modèle empirique de i_{corr} par analyse de régression multiminéaire [65] :

$$\begin{aligned} \ln(i_{corr}) &= 0,0312(HR) - \frac{4736}{T} + 1,695 \left(\frac{E}{C}\right) - 0,391(e) + 14,589 \\ \Leftrightarrow i_{corr} &= A \cdot e^{0,0312 HR} \cdot e^{-4736/T} \cdot e^{-0,391 \cdot e} \cdot e^{1,695 E/C} \quad (II.32) \end{aligned}$$

Avec : HR l'humidité relative %, T la température(K), e l'enrobage (cm), E/C la teneur en eau et A une constante ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Chapitre II : Corrosion des aciers dans le béton

Le modèle de Vu et al. [64] ne permet pas de représenter l'effet de l'environnement sur l'évolution du courant de corrosion dans le temps. Le modèle empirique de Breysse et al [67] quantifie l'influence combinée des quatre paramètres (HR, T, e) E/C) sur la densité du courant de corrosion. Quant au modèle de Liu et al. [65], il permet de quantifier l'influence de trois paramètres (T, C_t, t).

Chapitre III :
Réhabilitation du béton armé
par la corrosion

III.1. Données concernant l'ouvrage

III.1.1. Introduction

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

Les ouvrages et éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants [66] :

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



Photo III.1.1 : Eclats en formation

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



Photo III.1.2 : Poutre support de réservoir

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



Photo III.1.3 :Poteau porteur sous garage

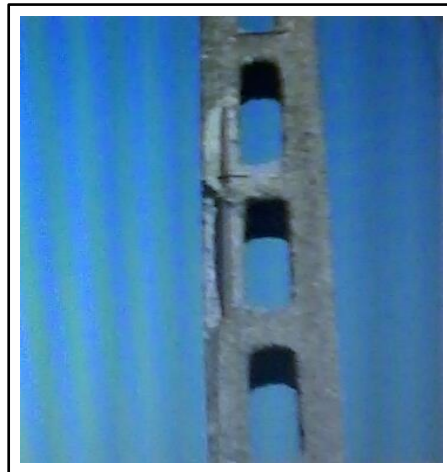


Photo III.1.4:Poteau support de ligne électricité

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

- **Ponts et ouvrages d'art** : dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, les appuis en superstructures, et les équipements de tablier où l'influence des sels de déverglaçage est importante.



Photo III.1.5 : Pile de pont

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



Photo III.1.6 : Paroi d'aéroréfrigérant

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

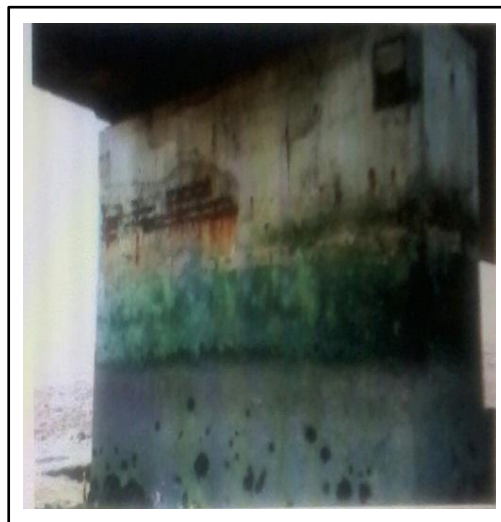


Photo III.1.7 : Pile en zone de marnage



Photo III.1.8 : Poutre de tablier



Photo III.1.9 : Quai en zone de marnage

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



Photo III.1.10 : Tuyau en béton armé

Il faut également signaler les **monuments historiques protégés** (églises ou autres ouvrages des architectes tels que A. Perret ou Le Corbusier), en béton armé, de plus en plus nombreux, qui possèdent leurs contraintes propres, notamment en termes de réparation.



Photo III.1.11 : Parement en béton armé dans un monastère classé

Certaines structures sont au contact de l'atmosphère : il s'agit, par exemple, des piles et tabliers de ponts, des silos ou des réservoirs.

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

Les milieux naturels que sont l'atmosphère, les sols ou les eaux, peuvent également contenir des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton armé, par exemple, des engrais ou des sels de déverglaçage. Il convient aussi de remarquer que le béton lui-même peut être dégradé de diverses façons. Mais, le processus de corrosion des armatures dépend en fait assez peu de son origine.

III.1.2. Types de dégradations du béton armé

III.1.2.1. Les phases de dégradation

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives :

- une phase d'incubation ou de latence (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, sans qu'il ne se produise encore des effets visibles,
- une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations du matériau.

La phase d'incubation s'arrête :

- ✓ soit lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un “volume critique ” provoquant un gonflement néfaste du béton (par exemple, par réaction sulfurique),
- ✓ soit lorsque l’enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion (par exemple, si l’enrobage est carbonaté).

La phase de développement est celle où les dégradations sont visibles. A ce stade les réparations deviennent lourdes et coûteuses [66].

III.1.2.2. Les dégradations dues à la corrosion des armatures

Les corps dissous dans le milieu qui environne l’ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d’entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO₂), les acides (engrais, etc.) et les chlorures. Un acier mis au contact d’un béton qui a une forte basicité (pH de l’ordre de 12) et qui n’est pas pollué par des chlorures, se recouvre d’oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits “intermédiaires ” qui ne sont pas stables en présence d’oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits “ finaux ” non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l’enrouillemt continu de l’acier [66].

C’est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu’après un certain délai. Les défauts invisibles sont des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l’enrobage de béton. Il s’agit aussi du début d’un éclatement (délaminage) de cet enrobage ou de la formation d’une fine couche de rouille sur l’acier. Dans certains cas, la dissolution des armatures se produit, sans aucune trace visible sur le parement.

Les dégradations mises en évidence sont des éclatements, des épaufrures et des fissures du béton d’enrobage. D’autres mécanismes peuvent également être à l’origine de ce type de désordres. Lorsque la corrosion est très avancée, des traces de rouille sont visibles, les armatures peuvent être mises à nu et leur dissolution (perte de section) constatée.

III.1.3. Origines et mécanismes des désordres dus à la corrosion

III.1.3.1. Les agents corrosifs dans les milieux au contact du béton

Les bétons armés sont au contact d’un milieu naturel : atmosphère, eaux ou sols. Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures. Ainsi, les sulfates contenus par exemple dans l’eau de mer et les eaux séléniteuses peuvent provoquer le gonflement du béton, s’ils sont en quantité suffisante. Mais les agents qui sont à l’origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures.

Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle.

Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes [surtout, la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$] en carbonate (CaCO_3) et abaisse le pH de la solution interstitielle depuis environ 13 jusqu'à environ 9. Ceci dégrade la passivation des armatures.

Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton. Ainsi, la teneur en chlorure dans le béton a un certain profil. Il s'agit d'une courbe " concentration-profondeur " qui est strictement décroissante, si les cycles humidification-séchage sont négligeables [66]. Dans le cas contraire, ce profil n'est décroissant qu'à partir d'une profondeur où le béton est, de façon permanente, saturé d'eau (l'eau interstitielle ne s'évaporant pas).

III.1.3.2. Les stades de corrosion

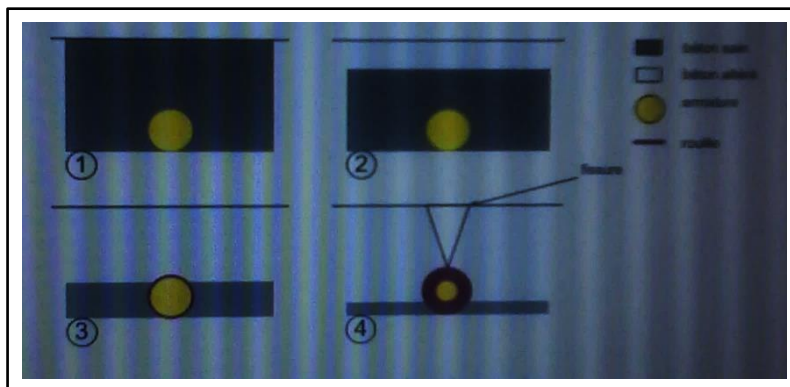
Le stade d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil.

La figure ci-après illustre ces stades de dégradation par corrosion due à des agents agressifs venant du milieu environnant [66].

Dans le cas de la carbonatation, ce seuil correspond au fait que les armatures se trouvent dans un béton carbonaté et suffisamment humide. Dans le cas des chlorures, le béton étant alors généralement humide et oxygéné, le seuil correspond très approximativement à un taux de 0,4% par rapport au poids de ciment. Cette valeur correspond à un rapport de concentrations $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ compris entre 0,6 et 1, suivant les ciments.

Pendant le stade de développement de la rouille, la vitesse de dissolution (corrosion) de l'acier est significative.

La rouille formée est le plus souvent gonflante et provoque une désagrégation de l'enrobage, par épaufrure, éclatement ou fissuration.



Dégradation due à la corrosion.

Cette dégradation procède par étape : dans le béton sain (1), un agent agressif pénètre progressivement (2), lorsque sa teneur est assez forte, l'armature commence à se corroder (3) et la rouille peut faire éclater l'enrobage (4)

L'apparition des fissures dépend fortement des caractéristiques de l'enrobage : épaisseur, résistance mécanique, etc. Plus précisément, une fois que l'armature a commencé à se corroder, les fissures apparaissent très tôt même dans un béton de bonne résistance mécanique. Les produits de corrosion diffusent facilement dans un béton poreux et tachent le parement.

III.1.4. Conséquences des désordres

III.1.4.1. L'aspect de l'ouvrage

Les efflorescences et les taches de rouille conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage de béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Ce point est parfois considéré comme étant de peu d'importance, par le gestionnaire des ouvrages. Par contre, ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire, car des éclats de béton peuvent se produire.

III.1.4.2. La sécurité vis-à-vis des usagers

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage. Leur prévention et leur élimination doivent donc être traitées avec soin.

III.1.4.3. La stabilité de la construction

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées. Il est apparu que ni la qualité du béton, ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influent sur la force résiduelle d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement.

En ce qui concerne les moments fléchissant et les efforts tranchants, une recherche expérimentale a porté sur l'effet de la corrosion sur ces grandeurs mécaniques.

Elle a montré que pour prévoir de façon conservatrice la tenue des éléments en béton armé, il suffit d'appliquer les modèles de calculs classiques, en considérant la section réduite des armatures ainsi que la section réduite de béton [66].

Ainsi, tant que les diminutions de section des armatures restent faibles et que l'enrobage reste cohésif, la corrosion de ces armatures ne modifie pas significativement la tenue au moment fléchissant ou aux efforts tranchants.

Mais lorsque la corrosion a atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être faits pour évaluer la tenue résiduelle de l'ouvrage. Ce document ne traite que du matériau et laisse de côté les problèmes de structures.

III.1.5. Cas des ouvrages en béton précontraint

Les aciers de précontrainte du béton sont soit directement noyés dans le béton (précontrainte par pré-tension), soit placés dans des gaines qui sont ensuite remplies d'un coulis d'injection, de cire ou de graisse (précontrainte par post-tension). Les aciers tendus et directement au contact du béton, risquent la corrosion avec dissolution et formation de rouille, comme les aciers de béton armé classique.

En outre tous les aciers de précontrainte tendus sont aussi soumis au risque de la corrosion fissurant, sans formation systématique de rouille. La ruine de la structure est alors difficile à prévoir.

Le cas spécifique des ouvrages en béton précontraint n'est pas détaillé dans ce document.

III.2. Caractérisation, diagnostic

III.2.1. Introduction. Objectifs du diagnostic

III.2.1.1. Place du diagnostic

Le guide technique "Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton" définit six étapes dans le processus conduisant à une action de réparation. Le diagnostic intervient dans les deux premières étapes de ce processus. La première étape, appelée « étape de mise en évidence de la dégradation », peut être déclenchée par une opération de surveillance (cas des ouvrages d'art par exemple), une opération d'entretien, ou à la suite d'un évènement accidentel (chute de morceaux de béton par exemple). Elle débouche sur le transfert de l'information vers les responsables qui sont ainsi sensibilisés au problème observé [66].

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

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

Il est à noter que ce texte ne remplace pas "l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art ", qui constitue un document de référence pour les ouvrages routiers, et qui décrit les modalités de cette surveillance.

III.2.1.2. Cas particulier de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que des éclats, épaufrures, taches de rouille. Dans certaines circonstances, toutefois, une délamination dans le lit des armatures peut se produire, sans signes apparents de corrosion. La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépendent à la fois de la position des armatures (enrobage, et espacement), de la qualité du béton d'enrobage (compacité et homogénéité), et de l'environnement (nature de l'agent agressif : chlorures). Ainsi, lorsqu'une corrosion se manifeste, il est raisonnable de s'attendre à ce que le processus de dégradation s'étende au-delà de la dégradation visible [66].

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

III.2.1.3. Objectifs du diagnostic de corrosion

Les objectifs d'un diagnostic de corrosion sont :

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

Des considérations d'ordre esthétique sont par ailleurs à prendre en compte dans de nombreux cas : bâtiments, monuments historiques, du fait de la nature des matériaux de base, de leur texture, de leur couleur et de la nature du ciment. Ceci est à prendre en compte dans l'établissement du programme d'investigations.

III.2.1.4. Procédure à suivre

La procédure à suivre pour un diagnostic, s'intègre dans une démarche globale qui peut mener jusqu'à des travaux de réparation.

La découverte des désordres sur une structure entraîne généralement :

- la mise en œuvre de mesures de sauvegarde si nécessaire (purges, filet de protection...),
- la réalisation d'une visite préliminaire et de certaines autres opérations dans le but d'établir un pré-diagnostic,
- la mise au point d'un programme d'investigation,
- le lancement des opérations liées au diagnostic...

L'ingénieur chargé des opérations de diagnostic doit avoir des compétences sur la physico-chimie des matériaux, l'instrumentation, les méthodes de réparation et de traitement. Dans les cas délicats, il devra s'associer avec un ingénieur spécialiste des structures (pour les problèmes d'ordre mécanique), ou un ingénieur chimiste de laboratoire (pour les problèmes liés aux gonflements du béton, etc.) [66].

III.2.2. Visite préliminaire

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

- la collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage : historique, documents, dossiers, rapports, implantation, orientation, date de construction, plans de coffrage et de ferrailage, environnement (nature chimique, vents dominants), matériaux (ciment, agrégats, dosage), etc.
- un examen succinct de l'intégralité de la structure, et le relevé de tous les symptômes avec prise de photographies. On utilisera les moyens d'accès les plus adaptés : il est nécessaire de voir de près les surfaces dégradées. Quelques tests simples (profondeur de carbonatation, présence de chlorures, alcali-réaction) pourront être envisagés à cette étape, afin d'orienter le programme d'analyse futur).

Après cette visite, l'ingénieur doit être capable :

- d'émettre un pré-diagnostic sur les causes probables des désordres,

- d'effectuer la mise au point du programme des investigations. Ce dernier tiendra compte de toutes les sujétions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc.,
- d'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garanties est nécessaire,
- et de faire évoluer les mesures de sauvegarde (limitation du trafic, mise sous surveillance renforcée...).

Il doit également estimer le coût probable et la durée des investigations, si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage...

III.2.3. Inspection détaillée

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

III.2.3.1. 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.).

III.2.3.2. Inspection

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

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

Ce relevé sera effectué en se référant à un guide des défauts.

III.2.4. Investigation in situ

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

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

III.2.4.1. Mesures relatives aux armatures

- Mesure de l'enrobage des armatures :

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

- enrobage (profondeur),
- estimation du diamètre des armatures,
- présence d'armatures adjacentes,
- reconnaissance du profil de l'acier.



Photo III.2.1 : Détection des armatures au radar

L'objectif de ces mesures est de localiser géographiquement les armatures faiblement enrobées (en relation avec les dispositions réglementaires d'une part, et les spécifications particulières d'autre part), d'estimer les surfaces concernées, et enfin d'apporter des éléments

quantitatifs pour une modélisation de l'évolution possible des phénomènes (en relation avec la profondeur de carbonatation ou de pénétration des chlorures). Il est à noter que ces méthodes ne font pas encore l'objet de norme.

- **Estimation des surfaces corrodées et évaluation des risques de corrosion :**

Mesures de potentiel

Parmi les méthodes électrochimiques pouvant être appliquées à la détection du risque de corrosion des armatures dans le béton, les mesures de potentiel sont les plus utilisées et les plus connues, du fait de leur simplicité et de leur caractère non destructif. Cette méthode permet une évaluation des risques de dé-passivation des armatures.



Photo III.2.2 : Mesures de potentiel



Photo III.2.3 : Roue électrode

Dès le contact de l'armature avec le béton, il s'établit à l'interface acier-béton, une différence de potentiel dépendant à la fois des réactions dites anodiques (oxydations : transformation du métal en oxydes) et des réactions dites cathodiques (réduction de l'oxygène). Ce potentiel est complexe et sa valeur dépend de l'état de corrosion des aciers (le potentiel tend vers des valeurs négatives dès qu'il y a amorce de corrosion), mais aussi de la teneur en eau du béton, de la teneur en éléments agressifs, de la profondeur de carbonatation,

de la compacité du béton, etc...Il ne peut être relié à ces facteurs par aucune loi, ni aucune formule mathématique, et la valeur absolue de ce potentiel n'aura donc que peu de signification. Néanmoins, les mesures effectuées sur des surfaces représentatives permettent d'établir une cartographie des probabilités de corrosion et de localiser les zones à risque maximum.

Les mesures de potentiel sont surtout utilisées en phase diagnostic(elles permettent la localisation des prélèvements ou de tests complémentaires), mais également pendant les opérations de réparation(localisation précise des zones à réparer). En surveillance continue, elles permettent également la détection d'un phénomène, bien avant qu'un désordre ne soit visible en surface, et ainsi de mieux planifier les réparations (mesures préventives). Elles ne permettent pas de déterminer la position des armatures (on utilisera pour cela des méthodes magnétiques ou de réflectométrie radar), ni leur vitesse de corrosion (perte d'épaisseur).

Elles ne s'appliquent pas :

- aux éléments enterrés ou immergés, à moins d'adapter la méthodologie à ces cas particuliers (par exemple, mettre hors sol, par affouillement, l'élément de structure, le temps de la dépolarisation pouvant demander plusieurs jours),
- au béton revêtu d'un produit électriquement isolant : celui-ci devra être retiré au droit des points de mesure,
- aux armatures actives du béton précontraint, car la présence de la gaine en matière plastique ou métallique, ne permet pas de récupérer le signal correspondant aux câbles. Dans le cas de fils adhérents, par contre, la méthode est applicable.

La méthode nécessite la mise à nu d'une armature, sa connexion à une borne d'unmillivoltmètre à haute impédance, dont l'autre borne est reliée à une électrode de référence placée sur le parement.

La jonction entre le béton et l'électrode doit être humide, et si ce n'est pas le cas, cette humidité doit être assurée (pulvérisation d'eau légèrement alcaline, coton imbibé, etc...). L'électrode de référence est une électrode dont le potentiel est constant, et défini par une suite d'équilibres électrochimiques.

Le tracé des cartographies, et l'étude des gradients de potentiel associés audéveloppement des méthodes informatiques (stockage des données) permettentmaintenant des interprétations plus fiables et plus précises, et ont conduit audéveloppement de ce type de mesures.Le matériel peut comprendre une ou plusieursélectrodes, ou des roues électrodes.

- **Estimation de la vitesse de corrosion**

Une autre méthode électrochimique permet d'estimer la vitesse de corrosion instantanée des armatures en une zone donnée [70].



Photo III.2.4 : Mesure de vitesse de corrosion

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

Les appareils permettant ce type de mesure possèdent leur propre système d'étalonnage.

III.2.4.2. Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement

- Détermination de la profondeur de carbonatation

Elle constitue une détermination du degré de vieillissement naturel du béton (mais surtout sa profondeur de neutralisation par le gaz carbonique).

Parmi les méthodes de détermination de la profondeur de carbonatation, la plus simple à mettre en œuvre, est le test à la phénolphthaléine. Celui-ci consiste à mesurer le front de coloration de cet indicateur sensible au pH, que l'on pulvérise sur une coupe fraîche de béton. Une norme européenne est en cours de mise au point. Il existe des modes opératoires (AFREM-AFPC, RILEM CPC 18). D'autres indicateurs colorés, ayant des plages de virage différentes (bleu de bromothymol, par exemple), peuvent être utilisés. Des précautions sont toutefois nécessaires pour établir la représentativité d'une mesure de profondeur de carbonatation : il faut faire un nombre suffisant de déterminations, tenant compte des conditions locales d'exposition, de l'hétérogénéité possible du matériau. Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode non destructive de détermination de la profondeur de carbonatation.

- **Mesures de résistivité**

La corrosion étant un phénomène électrochimique, et le béton étant un conducteur, la résistivité électrique de ce dernier est un paramètre significatif de l'intensité des échanges. Celle-ci dépend toutefois d'un certain nombre de paramètres : teneur en eau du béton, composition chimique de la solution interstitielle (présence de sels), etc...Les mesures de résistivité sur site ont été utilisées en parallèle avec les mesures de potentiel, pour affiner le diagnostic de la corrosion.

En effet, la vitesse de corrosion est contrôlée par la facilité avec laquelle les ions en solution passent au travers du béton, d'une zone anodique à une zone cathodique. Ainsi, de larges gradients de potentiel associés à de faibles résistivités seront caractéristiques de fortes vitesses de corrosion. Les mesures peuvent être influencées par la présence d'armatures à proximité du point de mesure, par l'effet d'échelle, ou par la présence d'une couche de surface ayant une résistivité différente de celle du cœur du béton. Par ailleurs, le principe même de la mesure (méthode de Wenner à 4 électrodes), possède ses limites. Une nouvelle méthode utilisant une contre électrode de petite taille a été décrite, et permet d'établir une échelle de risque à partir de la valeur de résistivité obtenue.

- **Mesures de perméabilité**

Les propriétés physiques du béton, dont sa perméabilité influencent la durée de la période d'amorçage de la corrosion. Une mesure de perméabilité à partir de la surface est particulièrement intéressante. Toutefois, ce type de mesures in-situ est influencé par la teneur en eau du béton, qui limite son application.

- **Perméabilité à l'air**: sa détermination consiste en la mise en pression d'une enceinte, et la mesure de la décroissance de la pression.
- **Perméabilité à l'eau** : dans ce cas, l'essai consiste en la mise en pression d'eau d'une enceinte, et la mesure du débit d'eau par avancement d'un piston destiné à la pression.

La localisation des zones de mesure de perméabilité doit être parfaitement définie, pour éviter les défauts de surface du béton (nids de cailloux, fissures, etc.) qui la perturbent. En l'absence de normes ou de spécifications, ces mesures restent comparatives.

- **Cohésion superficielle**

Cette détermination a son intérêt afin, par exemple, de définir la nature du revêtement ultérieur à mettre en place, dans le cas notamment d'enduit friable, ou en présence d'autre revêtement.

Elle se détermine à partir d'essais d'adhérence sur des pastilles collées sur la surface du béton (de section carrée $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ou circulaire de diamètre 5 cm).

La traction est effectuée à l'aide d'un appareil spécifique. Plusieurs mesures sont nécessaires dans une zone (3 au minimum). Les valeurs sont rapportées en MPA. A titre indicatif, l'application d'un revêtement sur un support béton nécessite un minimum de 0,5 MPA

III.2.5. Analyses et essais de laboratoire

III.2.5.1. Méthodes de prélèvements

Des prélèvements sont effectués, si nécessaire, dans des zones représentatives des états de dégradation, par carottage ou forage. Une procédure AFREM donne des indications sur ce point [66].

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



Photo III.2.5 : Prélèvements par carottage

III.2.5.2. Caractérisation chimique

Les caractéristiques chimiques du béton d'enrobage sont déterminées sur les prélèvements :

- Analyse chimique globale : elle comprend l'analyse de la fraction soluble, du résidu insoluble. Elle a pour objet de déterminer les caractéristiques du béton, dont le dosage en ciment, l'absence d'anomalie,
- dosage des chlorures totaux et des chlorures libres (solubles dans l'eau). Les méthodes sont décrites dans les procédures AFREM (ou RILEM). Les teneurs en chlorures s'expriment par rapport au béton ou par rapport au dosage en ciment. Ce dernier peut être connu, ou évalué en laboratoire à partir de la mesure de la silice soluble du ciment préalablement identifié (dans le dossier chantier ou par examen microscopique).

L'interprétation des résultats doit tenir compte non seulement des valeurs absolues mesurées, mais aussi de l'allure des profils de concentration,

- dosage des sulfates,
- autres déterminations particulières (par exemple, les sulfures).

III.2.5.3. Caractérisation minéralogique

Les caractéristiques minéralogiques du béton sont déterminées par :

- microscopie optique (lumière transmise ou réfléchie) pour la détermination de la nature du ciment, microscopie électronique MEB avec microanalyse élémentaire,
- diffraction des rayons X pour la recherche et la caractérisation des phases cristallines.



Photo III.2.6 : Cristal de chloroaluminate

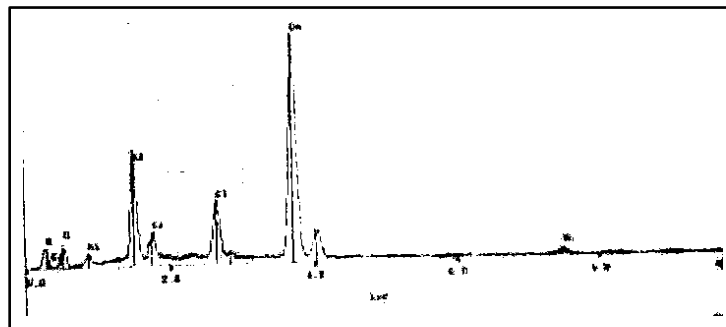


Photo III.2.7 : Spectre EDS associé

Un document AFREM-AFPC («Application des méthodes microscopiques à la caractérisation microstructurale des bétons») donne des indications sur ce point.

III.2.5.4. Caractérisation physique

Les caractéristiques physiques du béton d'enrobage sont surtout liées à leur résistance à la pénétration (transfert) des fluides :

- porosité à l'eau (éventuellement au mercure),
- perméabilité,
- diffusivité des corps tels que les chlorures,
- absorption capillaire,
- résistances mécaniques et éventuellement d'autres caractéristiques.

III.2.6. Rapport de diagnostic

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

Il comprend :

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

III.3. Contraintes et exigences

Ce chapitre dresse une liste non exhaustive de critères pouvant guider l'ingénieur, qui doit préconiser une réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. En effet, le choix de la méthode ou des produits de réparation est soumis à des contraintes et exigences qui sont liées au type de réhabilitation, ainsi qu'à la nature et à l'environnement de l'ouvrage à réparer [66].

III.3.1. Contraintes structurelles

L'une des conséquences de la corrosion des armatures du béton armé est un affaiblissement de la structure. L'ingénieur chargé d'étudier la réparation doit toujours avoir présent à l'esprit le respect de la sécurité de service de l'ouvrage, donc de sa stabilité. Il doit, avant même d'envisager des solutions de traitement de cette corrosion, estimer l'état général de la structure et en comprendre le fonctionnement. Il doit prendre en compte, comme pour un projet nouveau, les contraintes de service d'exploitation, de charges et d'environnement de la structure.

Une visite approfondie de la structure, permettra de déceler les indices révélateurs de la perte de résistance de la structure, tels que les fissures, les écaillages et écrasements locaux de béton etc. Quelquefois cette inspection révélera que la corrosion est d'abord due à un dysfonctionnement de la structure et qu'elle n'est en fait qu'un facteur aggravant. Les structures visitées sont en général en service et soumises à des chargements, leur âge et leur état général permettent à l'ingénieur d'apprécier les qualités de la conception d'origine et leur fonctionnement structurel.

Il ne convient pas de modifier systématiquement les structures, quand leur comportement est satisfaisant. Mais le traitement de la corrosion qui sera envisagé respectera en général le projet, en lui redonnant ses caractéristiques originelles.

III.3.1.1. Respect du fonctionnement de la structure en l'état

La corrosion des armatures du béton armé peut entraîner un appauvrissement des capacités portantes de la structure. Cette perte de résistance se manifeste par des altérations des matériaux qui sont les suivantes.

- Pertes de section du béton

Le foisonnement des oxydes de fer développe des contraintes qui peuvent endommager le béton, allant jusqu'à l'éclater. Il en résulte que les sections résistantes de béton diminuent, les contraintes s'organisent, et transitent par les zones adjacentes. La simple reconstitution de ces sections par un produit de ragréage, n'est pas toujours suffisante pour retrouver le fonctionnement originel de la structure. Il faudra quelquefois avoir recours à des techniques de vérinage pour soulager la structure, avant de reconstituer la section altérée. Cela peut être le cas dans des zones comprimées, la nature des produits de reconstitution devront alors tenir compte de la composition du béton en place et de son module d'élasticité. La forme de la découpe pour curer les zones altérées devra prendre en compte l'angle des joints de bétonnage de la zone à reconstituer, pour que les contraintes transitent correctement lors du rechargement.

- Pertes de section des armatures

La corrosion métallique est une dissolution, donc une perte de section des armatures. Le facteur de sécurité pris en compte dans les calculs de dimensionnement, s'en trouve réduit. L'ingénieur chargé de la réhabilitation de la structure devra estimer ces pertes. Cette tâche n'est pas facile ; l'estimation se fait généralement de façon statistique après une série de mesures des diamètres résiduels effectuées dans des sondages. Pour les visites d'évaluation, il est très rare de disposer des moyens d'accès utilisés pour l'exécution du chantier. Les sondages d'évaluation sont généralement réalisés dans des zones d'accès faciles, où les sections ne sont pas toujours les plus sollicitées. Il faut donc se garder la possibilité financière de faire exécuter de nouveaux sondages dans les sections les plus sollicitées, et prévoir un éventuel renforcement d'armature. Si la perte de section est supérieure à 10%, il convient de renforcer les armatures. Il faut, bien entendu, s'assurer que les charges de services n'ont pas évolué, et que réglementairement les armatures en place correspondent aux sollicitations. L'apport de nouvelles armatures peut alors se faire dans la masse, après démolition des zones et reconstitution du béton, soit par un apport externe enrobé dans un béton projeté connecté à la structure, soit par des armatures additionnelles collées sous forme de plaques de tôle ou de tissus de carbone.

- **Ancrage et entraînement des armatures**

Les oxydes de fer forment autour des armatures une gaine qui, à partir d'une certaine importance, peut diminuer leur adhérence au béton. Cette perte d'entraînement des barres conduit alors à une perte générale de la résistance de la structure. La mobilisation des efforts par les barres en traction peut être modifiée par un glissement relatif de l'ancrage lors de sollicitations, la mobilisation des efforts se fait alors avec de plus grandes déformations. Il faut alors quelquefois dégarnir les enrobages de béton altérés pour les reconstituer, ces opérations libèrent totalement les ancrages de barres. Quand ils ne sont pas accompagnés d'un étalement soigné de la structure avant le repiquage, ces dégarnissages modifient profondément son fonctionnement, et peuvent présenter un réel danger lors de l'exécution.

III.3.1.2. Respect des matériaux en place

Les traitements de corrosion des armatures du béton armé sont réalisés soit par des apports de matériaux en surface, soit par des reconstitutions de forme après purge, soit par des procédés agissant en profondeur. Le choix des techniques doit être fait en considérant les matériaux constitutifs de la structure, tant sur un plan physique que chimique. Ainsi, le traitement de la corrosion des armatures ne doit pas entraîner une dégradation du béton en place, qui serait due à l'incompatibilité de deux produits en présence. L'action des produits de protection des armatures ne doit pas engendrer, vis-à-vis du béton, des actions secondaires

préjudiciables au bon fonctionnement de la structure. Avant la préconisation du traitement, l'ingénieur s'assurera que la solution choisie est en adéquation avec les conditions de fonctionnement et le milieu ambiant de la structure. Les effets d'un traitement peuvent être de trois types.

- **Les actions irréversibles sur la nature des matériaux**

L'application de produits peut changer de façon irréversible la structure interne ou superficielle des matériaux traités. Certains produits de surface bloquent totalement la porosité du béton et « piègent » l'humidité dans les structures, ils les rendent ainsi plus sensibles aux cycles gel / dégel. Des produits d'imprégnations qui créent des minéraux peuvent modifier l'équilibre chimique du béton en place ou le module d'élasticité des zones fortement imprégnées en surface. D'autres produits peuvent empêcher à jamais la pose de revêtements ultérieurs, etc.

- **Les effets secondaires après traitement**

Certains traitements peuvent avoir des effets secondaires, après leur application sur certains bétons. Par exemple, les traitements électrochimiques qui augmentent le pH du béton d'enrobage, peuvent déclencher des réactions d'alcali-granulats. De même, l'utilisation de produit à effet gonflant (à long terme) peut créer des contraintes importantes, pouvant aller jusqu'à des fissurations ou des éclatements.

- **Les conséquences du choix des matériaux de remplacement**

Le choix des matériaux de remplacement ou de substitution des zones dégradées doit donc tenir compte de l'état de vieillissement des matériaux en place. Si certaines parties doivent être partiellement reconstruites, on devra s'assurer de la bonne compatibilité des matériaux entre eux. Certains produits, utilisés en ragréages, faciles d'emploi, rapides, et compatibles avec les armatures, ne sont pas toujours compatibles avec les bétons adjacents. Cela peut être le cas des produits dont le liant est à base de ciment alumineux au contact avec des bétons à base de ciment Portland CEM I.

III.3.2. Contraintes de site et d'exploitation

Le choix des produits et des procédés de réparation à préconiser influe fortement sur le caractère pérenne de la réparation. Il doit aussi tenir compte des contraintes d'exploitation et du respect de l'environnement pendant l'exécution.

Pour satisfaire aux exigences liées au site, l'ingénieur devra considérer au moins la localisation de la structure, ses caractéristiques et son ambiance.



Photo III.3.1 : Contraintes de site

III.3.2.1. Localisation de l'ouvrage (agressivité du milieu, situation)

- En site fluvial et maritime

Les sites maritimes et fluviaux sont caractérisés par la présence d'eaux plus ou moins salines et par une atmosphère humide, avec des embruns en bord de mer. La composition chimique de ces milieux les rend agressifs vis-à-vis du béton armé, surtout en présence de vent.

Par ailleurs, les chantiers de réparation ou réhabilitation doivent être conçus d'une façon telle que les eaux d'évacuation ne soient pas polluées.

- En site industriel

Sur un site industriel, il est difficile de dresser la liste des polluants et de leurs interactions.

Outre le choix de la solution technique compatible avec les produits présents sur le site, il faut souvent considérer l'enchaînement des phases de travaux avec les contraintes de l'exploitant.

Comme les pertes d'exploitation dues aux travaux sur des installations de production sont importantes, il est souvent préférable de prévoir des opérations courtes et partielles, se déroulant pendant des périodes d'arrêt de l'usine, plutôt que des traitements complets qui bloqueraient l'outil de production.

- En site urbain

L'atmosphère urbaine contient des polluants qui sont principalement des gaz d'échappement ou d'origine industrielle.

Les eaux de précipitation sont également agressives. Par ailleurs, les sels de déverglaçage répandus sur les chaussées sont entraînés par les véhicules dans les parkings souterrains, ou pénètrent dans le sol et finissent par agresser les canalisations enterrées.

Les réalisations des travaux sont plus contraignantes : elles prennent en compte les contraintes de circulation, la sécurité des usagers dans les endroits publics, etc.

- **En rase campagne**

L'ambiance en rase campagne est relativement peu agressive. Il convient de considérer les difficultés d'approvisionnement en continu pour certains « fluides », tels que l'électricité.

III.3.2.2. Structures en service

Le traitement d'ouvrages en cours d'exploitation doit être choisi en fonction des nuisances temporaires qu'il peut générer lors de sa réalisation telles que :

- les vibrations,
- le bruit,
- les odeurs,
- les poussières.

III.3.2.3. Ambiance (milieu ambiant, lors de l'application)

La qualité d'une réhabilitation dépend non seulement du produit ou du procédé de traitement, mais aussi des conditions de leur mise en œuvre. Des produits ou procédés performants, mais nécessitant des conditions de mise en œuvre délicates, risquent de mener à un échec, si toutes les spécifications ne sont pas respectées. Les procédés ou produits ont chacun leur limite d'application dans un milieu ambiant donné. Les notices techniques et recommandations pour la mise en œuvre doivent être minutieusement étudiées au préalable.

Il convient de vérifier en particulier, pour un site donné :

- l'hygrométrie,
- le point de rosée,
- la température,
- si l'espace est clos ou ouvert (gaz, ventilation, produit phase solvant, etc.).

Pour ce dernier point, les risques d'explosion et ceux pour la santé des applicateurs, doivent être pris en compte.



Photo III.3.2 : Projection en conditions difficiles

III.3.3. Exigences à prendre en compte pour les réparations

L'objet principal d'une réhabilitation est d'arrêter ou d'éviter la corrosion des armatures du béton armé. Mais le traitement choisi doit aussi répondre aux attentes du client qui peuvent être d'ordre fonctionnel ou esthétique, avec le respect du caractère original ou historique de la structure.

Ces exigences sont traitées au coup par coup. En général, le cahier des clauses techniques particulières fixera les critères de réalisation. Il est recommandé de demander à l'entreprise chargée du chantier, des planches d'essais pour valider les traitements à mettre en œuvre. Il peut aussi être demandé de réaliser in situ, une partie de structure qui servira d'essai de convenance. Cette dernière procédure offre l'avantage de pouvoir valider en une seule fois le matériel, les matériaux et la mise en œuvre de la « planche » de convenance. Ces validations peuvent concerner des exigences :

- de forme,
- de couleur,
- d'aspect,
- de respect de l'environnement

III.3.4. Durabilité

La durabilité d'une réhabilitation correspond au fait qu'elle ne doit pas être renouvelée avant un certain délai, qui est précisé dans une garantie. Cette durabilité dépend de la pertinence du choix de la technique retenue, de sa mise en œuvre et des sollicitations après traitement.

La pérennité de l'ouvrage correspond à son aptitude à remplir les fonctions prévues (mécaniques, esthétiques, etc.). Elle peut être allongée, après traitement de réhabilitation, quand les parements sont de plus revêtus d'un écran protecteur contre les agents agressifs.

La notion de garantie est une notion contractuelle, dont la durée est liée au traitement choisi, pour une structure dans des conditions d'exploitation données. La garantie prend effet après la réception des travaux.

La réception des travaux est un acte de fin de travaux qui atteste que la réalisation est conforme au contrat. Avant cette réception l'efficacité du traitement doit être vérifiée.

III.3.4.1. Les contrôle du résultat des traitements

Certaines vérifications sont simples, comme par exemple les couleurs, les formes, la rugosité etc. Il faut souvent faire appel à des laboratoires spécialisés pour effectuer ces contrôles.

III.3.4.2. Le contrôle des revêtements de protection des bétons

Les produits de protection du béton ne sont pas toujours exigés, bien qu'ils constituent une barrière contre les agents agressifs contenus dans le milieu environnant. La vérification des revêtements se limite généralement à des contrôles de leur adhérence au support, de leur aspect et de leur épaisseur.

III.4. Les méthodes de réhabilitation

III.4.1. Reconstitution de l'enrobage

Plusieurs méthodes sont disponibles pour réparer durablement un parement en béton, arrêter la progression des dégradations et éviter de nouveaux désordres. Elles supposent une mise en œuvre attentive, le contrôle des résultats et une surveillance adaptée [66].

III.4.1.1. Principes et définitions

La reconstitution du parement a pour objectif de restaurer l'apparence du béton, tout en arrêtant le processus de corrosion et 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 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 de la réparation, par l'apparition d'un couple galvanique entre la surface réparée et la surface adjacente (voir paragraphe 4.1.6).

Une attention particulière devra être apportée aux points suivants :

- 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. L'entreprise doit mettre en œuvre un phasage précis. Le recours à un étaieement 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.

III.4.1.2. Elimination des zones dégradées

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 et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P 95.101 (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.

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'éliminer l'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, hydro sablage, 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 l'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.

III.4.1.3. Remplacement des armatures fortement corrodées

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple) [66].

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement ou soudure, 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 soudures, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

III.4.1.4. Protection des armatures

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques ou esthétiques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements (BAEL 91, par exemple), pour un environnement donné. Il est également fonction 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, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation.



Photo III.4.1 : Protection des armatures [66]

III.4.1.5. Etape de la réfection des bétons

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

- de tenue verticale sans coffrage,
- de montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support,
- d'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- d'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,

- de coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité dynamique équivalent au béton support,
- de bonne protection des aciers.



Photo III.4.2 : Reconstitution de l'enrobage

Les produits de protection seront, de préférence, choisis dans la famille des produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés (Guide Technique : “ Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton ” LCPC SETRA). Ils doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque “ NF Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydrauliques ”.

Cette marque définit notamment, pour les produits de réparation de surface, les caractères normalisés garantis (classe d'adhérence, tenue aux chocs, etc.).

Lorsque pour des raisons esthétiques, des produits pré formulés ne peuvent pas être appliqués, il conviendra d'étudier un mortier spécifique, de même texture, couleur et aspect de surface que le béton en place. Les mortiers doivent être peu sensibles au retrait, résister au gel et être durables. Une autre approche consiste à appliquer une première couche de produit certifié NF ou équivalent, afin d'assurer l'accrochage sur le béton support, et une couche de finition pour l'aspect.

Enfin, il faut noter qu'il est difficile de masquer totalement des zones réparées localement. Parfois, ces zones réapparaissent sous forme de fantômes, du fait des différences de comportements entre le béton support et le produit de réparation. Une solution peut consister à appliquer un produit de protection sur toute la surface.

III.4.1.6. Précautions particulières à prendre

D'une façon générale, une structure réparée se trouve de nouveau exposée aux conditions d'environnement, qui ont déjà créé la corrosion.

Il faut donc s'assurer que les surfaces traitées ne vont pas engendrer de nouveaux désordres, notamment sur les zones adjacentes.

Il est malheureusement souvent constaté que des réparations locales sont responsables de nouvelles pathologies :

- la zone réparée éclate, et les armatures se corrodent de nouveau ;
- les zones adjacentes se fissurent, et ce sont les armatures non réparées qui se corrodent.

Ainsi à proximité d'une réparation locale, la corrosion se caractérise par l'apparition possible de zones anodiques (dissolution) à bas potentiel et de zones cathodiques (acier protégé). Le couplage entre ces surfaces se traduit par le passage d'un courant de corrosion sortant de la surface anodique. La préparation de surface et la reconstitution du parement ont pour effet de modifier les conditions électrochimiques des armatures. D'une façon générale, les zones réparées sont protégées d'une future corrosion. Toutefois :

- leur potentiel croît (l'armature se trouve progressivement de nouveau dans un état de passivité),
- de nouvelles anodes se créent autour de cette zone.

Des courants de corrosion vont se créer. La densité de courant, qui correspond à la vitesse de corrosion, sera d'autant plus importante que :

- la différence de potentiel est importante,
 - les surfaces anodiques sont plus petites,
 - la résistance électrique est plus faible (dépendant fortement de l'humidité et de la présence de sels),
 - les polarisations à la fois des zones anodiques et cathodiques sont plus faibles.
- Ces polarisations dépendent essentiellement des conditions électrochimiques régnant à l'interface acier/béton. Dans la zone anodique, plus le milieu sera pollué par les chlorures ou rendu voisin de la neutralité par la carbonatation, plus faible sera cette polarisation et plus grand sera le courant de corrosion. L'étendue des surfaces touchées par ces courants de corrosion dépend principalement de l'état d'humidité du béton pollué. En général la surface de cette zone ne dépasse pas quelques centimètres carrés. Au-delà, c'est la corrosion " naturelle " qui est le mécanisme principal de la dégradation.

En fait, plusieurs cas sont à considérer :

a- la réparation est effectuée correctement: les zones adjacentes sont passivées (absence totale de carbonatation, de chlorures). Les risques d'amorçage et d'évolution de corrosion localisée sont faibles. La corrosion était due à un défaut local (enrobage, ou béton défailants).

b- la réparation est effectuée correctement :les surfaces adjacentes sont protégées (zone sans carbonatation ou à faible teneur en chlorures), mais ces deux agents agressifs atteindront les armatures dans un délai de quelques années.

c- la réparation est effectuée correctement :les armatures sont exemptes de produit de corrosion, et elles sont protégées par l'alcalinité du produit de réparation (s'il est à base de ciment), ou par la résine (par l'effet isolant de celle-ci), mais les surfaces adjacentes sont en état de corrosion(c'est à dire que le béton y est carbonaté ou pollué par les chlorures).

d- la réparation n'est pas effectuée correctement, c'est à dire que l'armature n'a pas été dégagée puis enrobée de produit de réparation.

Dans les cas b, c, et d, les risques de corrosion sont importants, dans un délai difficile à déterminer mais pouvant être inférieur à dix ans, après la réparation (voir la partie 4.3 : inhibiteurs).

e- la réparation est effectuée à l'aide d'un mortier de résine, par principe non conducteur. Les mécanismes anode cathode ne peuvent s'appliquer. Toutefois, il apparaît à l'interface mortier de résine/armature/ancien béton un interstice, en cas de manque de continuité, dans lequel, la corrosion s'amorce par aération différentielle, puis des modifications chimiques se créent, en l'absence d'alcalinité (béton carbonaté), ou en présence de chlorures. Dans l'interstice, le milieu devient rapidement acide du fait de l'hydrolyse des produits de corrosion, et l'attaque progresse rapidement.

Ainsi, il ne faut pas négliger plusieurs points essentiels dans les phases de la réparation :

- le diagnostic;
- la préparation de surface de l'armature qui, si des traces de produits de corrosion subsistent, risque de participer à l'amorçage de corrosions ;
- à liaison produit de réparation-béton ancien, qui risque d'engendrer des interstices responsables d'amorçage de corrosions localisées.

III.4.1.7. Essais, contrôle et réception

- **Essai de convenance**

Une épreuve de convenance est nécessaire, il faut définir ses modalités : la surface, la longueur, ou le type d'élément nécessaires.

- **Mortiers de réparation**

Si les mortiers bénéficient du droit d'usage de la marque NF, aucun essai préalable n'est à effectuer. Dans le cas contraire, il y a lieu d'effectuer un ou plusieurs des essais prévus dans la norme (essais de convenance), qui devront donc être planifiés avant le démarrage du chantier.

- **Contrôles et réception des produits.**

Ces contrôles ont pour but de vérifier que les produits livrés sont conformes aux indications du Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) ou conformes aux normes, si elles existent, aux certificats de qualification et aux avis d'aptitude à l'emploi.

- **Contrôles de l'application**

Ces contrôles ont pour but de vérifier qu'à tout instant du chantier, l'exécution est conforme au CCTP. Les étapes les plus importantes sont les suivantes :

a- réception du support après préparation de surface

A ce stade, il faut s'assurer que les caractéristiques du support préparé (4.1.2 et 4.1.3) sont conformes aux hypothèses prises en compte pour la réparation ou le renforcement. La réception repose d'une part sur l'examen visuel de la surface traitée, sur un contrôle sonique (sondage au marteau), et enfin sur un contrôle du diamètre résiduel de l'acier. Ce contrôle a pour objectif de vérifier :

- la bonne préparation de toutes les surfaces prévues ;
- l'absence d'amorces de décollement ou de fissuration ;
- la compatibilité de la texture de surface avec l'application du produit de réparation ;
- l'absence de traces de rouille sur les armatures ;
- l'absence de pollution du support par des agents agressifs vis à vis des armatures (chlorures) ;
- la nécessité ou non d'un renforcement.

Un essai de cohésion superficielle, par traction directe, est également souhaitable. Il peut s'avérer nécessaire, dans le cas d'une forte pollution du support par les sulfates et les chlorures (risque de réaction avec le ciment du produit de réparation).

b- réception et contrôle des armatures de remplacement

c- contrôle de réception après application du mortier de réparation

Ce contrôle se fait par examen visuel et essai de cohésion superficielle par traction directe. Les paramètres importants de cet essai sont : le mode de rupture (dans le produit de

réparation, adhésif à l'interphase, ou dans le support), la valeur de résistance à la traction. Les conditions de l'essai et son interprétation sont contractuelles.

d- réception des supports avant mise en œuvre des revêtements

Il s'agit d'un examen visuel.

- **Réception finale des travaux**

Les essais de réception des travaux sont prévus dans les cahiers des charges, qui tiennent compte des normes ou de recommandations.

Leur objectif est de valider en fin d'exécution, le respect des cahiers des charges par l'entrepreneur : caractères géométriques, mécaniques, etc.

III.4.2. Imprégnations

III.4.2.1. Principes et définitions

D'une façon générale, les produits appliqués par imprégnation sont des consolidant ou des hydrofuges. Ils se distinguent par leur fonction principale :

- Un produit consolidant confère à une zone peu profonde altérée, une cohésion identique à celle du même matériau d'origine. Il ne s'agit donc pas d'une consolidation structurale à l'échelle d'un ouvrage.
- un hydrofuge constitue une barrière interne au matériau, vis-à-vis de la pénétration de l'eau liquide, sans trop affecter la perméabilité à la vapeur d'eau. Un hydrofuge est dit de surface, lorsqu'il est appliqué sur le béton durci.



Photo III.4.3 : Action d'un produit hydrofuge

Par sa fonction principale, un produit hydrofuge n'est ni un imperméabilisant, ni un anti graffiti. Certains produits ont des fonctions secondaires (antissalissure, etc.). Les consolidant 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.

Par la suite, seuls les hydrofuges de surface seront traités dans ce document. Il est à noter que certains points ne sont donnés qu'à titre indicatif.

La mise en œuvre de ces produits est spécifiée dans des documents tels que le Guide pour la protection du béton armé par application de produit à la surface du parement (LCPC).

III.4.2.2. Domaine et limites d'emploi

Une hydrofugation se justifie, si le béton subit une altération liée à un contact avec de l'eau liquide provenant de l'atmosphère (et non pas du sol ou d'une fuite d'eau). Ce traitement est appliqué à titre préventif ou curatif.

L'altération du béton n'affecte généralement que les zones soumises aux pluies battantes, au ruissellement ou au rejaillissement. Il est donc inutile d'hydrofuger des zones qui sont, par exemple, à l'intérieur d'un bâtiment.

Les dégradations liées aux sels solubles s'intensifient après hydrofugation. Pour assurer une bonne durabilité au traitement, il est important de limiter les risques de pénétration d'eau et de sels par l'arrière de la surface traitée.

Les surfaces sur lesquelles l'eau stagne, ne peuvent pas non plus être traitées efficacement.

Enfin, les traitements hydrofuges s'insèrent dans une procédure globale de réparation. La compatibilité entre les diverses techniques de réparation doit être assurée et surtout les objectifs à long termes doivent être clairement définis (les possibilités de "retraitement", notamment pour les imprégnations d'inhibiteurs de corrosion ou d'application postérieure de tout autre produit destiné à migrer en phase liquide, etc.).

III.4.2.3. Produits hydrofuges

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 (siliconâtes, silanes, silanes). Mais il existe aussi des hydrofuges acryliques, des résines fluorées et d'autres.

La classification des hydrofuges tient compte de la taille des molécules. Pour une application donnée, il convient de choisir le produit qui est adapté à la porosité du béton à traiter. Il est à noter que de nombreux produits hydrofuges sont en " phase solvant ", ce qui signifie qu'avec l'évolution de la législation européenne, certains de ces produits vont disparaître au profit de ceux en " phase aqueuse ".

III.4.2.4. Procédure de choix et d'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.

- **Diagnostic**

Avant de traiter le béton par un hydrofuge, il est indispensable de définir si cette opération 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 et l'étendue des altérations qui affectent le matériau,
- l'absence de fissure ou de délamination du béton,
- l'origine des dégradations,
- les caractéristiques principales du béton à traiter (notamment sa porosité),
- et enfin si aucune contre-indication ne s'oppose au traitement.

- **Choix du produit et essais préliminaires**

Le choix d'une famille d'hydrofuges est réalisé :

- seulement après une caractérisation préalable du support,
- mais aussi après avoir clairement défini les conditions de la mise en œuvre sur chantier (saison, traitements préliminaires envisagés, mise en peinture postérieure...).

L'efficacité et la durabilité du traitement hydrofuge sont optimisées, en sélectionnant un produit particulièrement adapté au support et à ses propriétés physiques (tailles de pores, couleur, etc.). L'optimisation est faite à partir d'essais de convenance. Elle concerne la concentration du produit et sa consommation, en tenant compte de la procédure d'application.

- **Procédure d'application**

La durabilité du traitement est conditionnée par la profondeur de pénétration. Les principales techniques d'application sont le pinceau, le rouleau et le pulvérisateur pour les silicones et le pulvérisateur ou le pistolet " ailes ".

En général, le produit doit avoir une bonne répartition dans le support, c'est pourquoi l'utilisation du pulvérisateur (ou de " l'airless ") est souvent privilégiée. 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 (généralement, les températures limites conseillées se situent entre 5 et 30°C). 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.

III.4.2.5. Contrôle du traitement

Le contrôle du traitement a pour objectif de vérifier :

- que les produits et les conditions de mise en œuvre, définis dans la procédure d'application, ont été respectés,
- et que le traitement a été efficace.

Par ailleurs, certains essais sont proposés pour caractériser un traitement d'hydrofugation, et se font soit sur site soit sur des prélèvements de béton (tableau ci-après). Mais il est aussi important de vérifier que ce traitement ne modifie pas trop d'autres propriétés du béton, telles que :

- des propriétés structurelles (porosité, etc.),
- des propriétés de transfert (perméabilité à la vapeur d'eau, etc.),
- ou des propriétés esthétiques (couleur, brillance).

Tableau III.1 : Exemples d'essais de convenance pour caractériser un traitement par imprégnation d'hydrofuge

Essai sur site	Profondeur de pénétration	Effet hydrofuge
Effet perlant	Oui	Oui
Essai de perméabilité	Non	Oui

Essais sur prélèvements	Profondeur de pénétration	Effet hydrofuge
Frange d'imbibition	Oui	Non
Mouillage ou microgoutte	Oui	Oui
Attaque acide	Oui	Non
Angle de contact	Oui	Oui
Test d'imbibition capillaire	Oui	Oui

III.4.2.6. Essais de réception

Les essais de réception des travaux sont prévus dans les cahiers des charges. Le seul essai non destructif, qui peut être effectué pour la réception d'une imprégnation, est la mesure de la perméabilité du béton traité. Il s'agit soit de la perméabilité à l'eau, soit de la perméabilité à l'air.

III.4.2.7. Durée et efficacité du traitement

L'efficacité d'un traitement par imprégnation est, en général, de deux ans. Elle porte à la fois sur la tenue à la pénétration d'agents agressifs dans le béton et sur l'aspect du parement.

III.4.3. Inhibiteurs de corrosion

III.4.3.1. Principes et définitions

Par définition, un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou arrête le processus de corrosion d'un métal placé dans ce milieu [66].

Ses fonctions essentielles sont les suivantes :

- de pénétrer une couche de béton très hétérogène par nature (variations de compacité notamment),
- d'abaisser la vitesse de corrosion du métal, sans en affecter ses propriétés (ni celles du milieu environnant),
- d'être stable dans le milieu considéré et compatible avec celui-ci, à la température d'utilisation,
- d'être efficace à la concentration recommandée,
- de ne pas être toxique.

Par ailleurs, la teneur en inhibiteur doit être réglée, en tenant compte de divers paramètres tels que les facteurs géométriques ou la forme des matériaux, leur état de surface, etc. La corrosion étant un processus électrochimique, l'action de l'inhibiteur se fait au niveau de l'une des réactions élémentaires du mécanisme de cette corrosion, et plus particulièrement au voisinage immédiat de la surface : transport des espèces réactives, formation d'intermédiaire, adsorption, etc.

Le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être divers. L'inhibiteur recouvre (adsorption) la surface du métal, et réduit les surfaces de réactions élémentaires. Il peut former également des composés avec le métal et le liquide environnant et modifier les réactions d'interface. Dans les deux cas, la vitesse de corrosion peut être ralentie, voire annulée.



Photo III.4.4 : Application d'inhibiteur [66]



Photo III.4.5 : Application d'inhibiteur [66]

Les inhibiteurs de corrosion sont classés selon leur mode d'action :

a- Les inhibiteurs anodiques sont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Si ce blocage n'est que partiel, il peut entraîner localement une augmentation de la densité de courant sur ces surfaces. Il peut conduire à un processus de corrosion localisé, plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif au droit de l'acier.

b- Les inhibiteurs cathodiques induisent une augmentation de la surtension cathodique, et réduisent donc le courant de corrosion. Si ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils ne présentent pas par contre le danger de corrosion localisée. Ces inhibiteurs précipitent souvent des sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions OH⁻ sur les cathodes.

c- Les inhibiteurs mixtes sont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques.

III.4.3.2. Etat de l'art

Plusieurs inhibiteurs à bases chimiques, organiques et inorganiques, ont été employés depuis une dizaine d'années, dans la réhabilitation de divers ouvrages en béton armé. Le

système de maîtrise de l'efficacité du traitement est propre à chacun des composants chimiques de base.

Lors de l'utilisation pour le béton armé d'un inhibiteur appliqué sur le parement, il est demandé au produit :

- d'avoir une action rapide et vérifiable ;
- d'être performant pendant de nombreuses années ;
- d'être efficace en milieu basique, neutre (carbonatation), voire acide (en présence de chlorures, la surface métallique en voie de corrosion dans les cellules occluses, est au contact d'acide chlorhydrique).

III.4.3.3. Domaine et limites d'emploi

La délimitation précise du champ d'application dépend de l'inhibiteur considéré. Les paramètres d'efficacité à prendre en compte lors d'une étude sont les suivants :

a- l'influence de l'état de surface de l'acier(absence de discontinuité acier/béton) : l'utilisation des inhibiteurs de corrosion permet de protéger l'ensemble des aciers en situation de risque de corrosion, sans avoir à purger le béton contaminé ou carbonaté, à condition qu'aucun phénomène d'épaufrure ou décollement acier / béton n'ait débuté.

b- la pénétration du produit : la pénétration des inhibiteurs à l'intérieur d'un béton dépend de nombreux paramètres : porosité du béton, humidité, degré de carbonatation, type de ciment utilisé, teneur en chlorures, traitements préalables, etc.. Ainsi, cette pénétration ne peut pas, à ce stade des connaissances, faire l'objet d'une modélisation précise.

Par conséquent, il est toujours nécessaire de vérifier la pénétration de l'inhibiteur par des tests de validation in situ.

c- la concentration minimale efficace au droit des armatures. Celle-ci doit être précisée par le fabricant, sur la base de résultats d'essais représentatifs, en tenant compte notamment de la teneur en chlorures dans le béton au droit des armatures (limite d'efficacité).

Le recours aux inhibiteurs permet de conserver au maximum l'aspect initial de l'ouvrage et de réduire les zones à dégarnir.

III.4.3.4. Procédure d'application

Avant d'appliquer un inhibiteur, la surface du béton doit être préparée. Il s'agit d'éliminer la peinture ou autre revêtement par sablage ou hydro sablage. Il est à noter qu'un traitement par inhibiteur n'est pas possible si la surface a été préalablement traitée avec un hydrofuge.

Un inhibiteur qui est sous forme liquide, s'applique directement à la surface du béton. Afin de respecter les consommations prescrites par l'applicateur, ou par les procédures définies

pendant la phase de validation, l'application s'effectue en plusieurs passes. Les solutions gélifiées s'appliquent en une fois.

Plusieurs méthodes d'application peuvent être testées, afin de valider la mise en œuvre la plus adaptée.

III.4.3.5. Contrôle de la mise œuvre

- Mise en œuvre

Le système qualité de l'applicateur doit permettre, tout au long de la mise en œuvre du traitement, de contrôler le respect :

- des consommations,
- de la procédure d'application retenue lors des tests de validation. Dans l'état actuel des connaissances, il apparaît indispensable de procéder à l'évaluation de la quantité de produit dans le béton et à la détermination de sa concentration au droit de l'armature, à des échéances définies contractuellement, sur la base des essais de convenance (validation de la procédure). Cette concentration doit être conforme aux spécifications du fabricant, concernant la concentration minimale efficace (voir 4.3.3 c).

- Essais de réception

L'application est considérée comme acceptable lorsque la quantité minimale d'inhibiteur au niveau des armatures à traiter est atteinte, et démontrée par l'analyse d'échantillons représentatifs de l'ouvrage.

En outre, les documents de suivi qualité de la mise en œuvre du traitement doivent être remis au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

III.4.3.6. Durée et efficacité.

Le retour d'expérience sur des ouvrages traités par inhibiteur d'imprégnation est actuellement d'une dizaine d'années. La durabilité du traitement peut être vérifiée :

- par des mesures de teneur en inhibiteur au niveau de l'acier après quelques années
- par le suivi dans le temps des mesures de potentiels (cartographie) ou de courants de corrosion (résistance de polarisation).

Aucune norme ne définit les classes d'inhibiteur permettant de juger de leur efficacité intrinsèque. Il n'existe pas non plus pour l'instant de procédure de qualification des produits.

III.4.4. Revêtements de surface

III.4.4.1. Revêtements pour le génie civil

La mise en peinture des ouvrages de génie civil en béton a, en général, pour principaux objectifs :

- d'améliorer l'esthétique de l'ouvrage, par la mise en couleur ou la création de motifs décoratifs, en vue de lui donner un aspect particulier, ou d'homogénéiser, lorsque nécessaire, la teinte de ses parements,
- d'augmenter le confort et la sécurité des usagers, tout en facilitant le nettoyage (exemple : revêtement des tunnels),
- de participer à la sécurité de l'ouvrage (exemple : balisage des pylônes),
- de contribuer à la protection du béton : la mise en place d'un système de peinture en couche mince, dans la mesure où il apporte une amélioration de l'imperméabilité du support peut permettre de ralentir la pénétration de l'humidité extérieure et d'améliorer ainsi la durabilité du béton.

Ainsi les ouvrages concernés sont essentiellement les tunnels, les murs de soutènement, les écrans antibruit et dans certains cas les ponts.



Photo III.4.6 : Application de la finition [66]

Il existe une procédure de qualification concernant les systèmes de peinture pour béton de génie civil. Elle porte sur des critères d'adhérence, d'aspect et plus généralement sur des considérations d'ordre esthétique, et non pas sur des critères visant à apprécier la capacité effective des systèmes testés à remplir une fonction de protection. L'ensemble de cette procédure est décrit dans le guide " Mise en peinture des bétons de génie civil " (LCPC, Juin 1999) qui apporte aussi toutes les informations utiles sur la mise en œuvre des systèmes de peinture et le contrôle de la qualité de leur application.

Lorsque c'est principalement une fonction de protection qui est recherchée (protection contre la pénétration des chlorures, protection contre la pénétration du gaz carbonique laquelle entraîne une carbonatation progressive de la peau du béton, etc.) d'autres types de revêtements peuvent être envisagés. Ils seront désignés ci-après par revêtements minces. Il convient de préciser toutefois qu'il n'existe actuellement aucun référentiel technique permettant de qualifier ces produits et d'orienter le choix d'un produit en fonction du problème.

La mise au point d'un tel référentiel est en cours, ainsi que la rédaction d'un guide sur la protection des bétons armés par application de produits à la surface du béton.

➤ **Principes. Définitions. Etat de l'art**

- **Les peintures**

La " mise en peinture " désigne la protection par système de peintures ou lasure dans des épaisseurs sèches comprises entre 20 et 600 μm .

Les systèmes de peinture s'appliquent dans des quantités humides totales allant de 300 à 1500 g/m^2 , selon la densité et l'extrait sec, les lasures dans des quantités restant inférieures à 300 g/m^2 , mais pouvant varier selon l'absorption du support.

Un système de peinture est constitué d'une succession de couches, qui ont chacune un rôle spécifique, en vue d'obtenir un revêtement final présentant les caractéristiques escomptées.

Une peinture est constituée :

- **d'un liant (aussi appelé résine ou polymère)** : la nature chimique du liant permet de désigner la peinture ; il s'agit, par exemple, de peinture époxydique, polyuréthane, vinylique, acrylique ou hydraulique modifiée par des résines,
- **de matières de charge** : elles confèrent à la peinture des caractéristiques physiques particulières (rhéologie, aspect, ...),
- **de pigments** : ils apportent la couleur, l'opacité, ...
- **d'additifs** : il peut s'agir d'agents mouillants, thixotropes, fongicides, ...
- **d'un véhicule** : eau (peinture dite en phase aqueuse), ou solvant (peinture en phase solvant). Il existe aussi des peintures avec très peu, voire sans véhicule. Le plus souvent un système type de peinture comporte 3 couches :
 - ✓ la couche primaire qui assure l'adhérence du système sur le support,
 - ✓ la couche intermédiaire qui assure la compatibilité entre la couche primaire et la couche de finition et donne au système une épaisseur suffisante,
 - ✓ la couche de finition qui apporte la fonction esthétique et assure la résistance du système aux agressions extérieures.

La performance d'un système de peinture dépend de l'épaisseur de chaque couche et du respect de ces épaisseurs. Il est à signaler que l'évolution de la réglementation en matière de protection de l'environnement favorise actuellement le développement des peintures en phase aqueuse. Les peintures peuvent être mono ou bi-composants ; dans ce dernier cas, la peinture est obtenue à partir d'un mélange base - durcisseur ou ciment et latex.

- **Les lasures**

Les lasures sont utilisées pour conserver ou mettre en valeur la texture superficielle d'un parement en béton. Elles sont incolores ou colorées et contrairement à une peinture, elles ne sont pas opacifiantes.

Une lasure est composée :

- de liant (généralement de type acrylique ou polyuréthane),
- d'un véhicule (eau, solvant),
- de pigments ou colorants,
- éventuellement de matières de charge.

Une lasure est généralement appliquée en deux couches, la première étant diluée.

- **Les revêtements minces**

Les revêtements minces peuvent être :

- des revêtements plastiques épais contenant généralement des charges grossières et à base de résines acryliques ou polyuréthanes,
- des revêtements d'imperméabilité à base de résine acrylique,
- des revêtements divers à base de polyuréthane ou LMH.

Selon leur nature, ces produits sont appliqués à l'aide de spatules ou de machines spéciales.

➤ **Procédure d'application - acteurs de la mise en œuvre et matériel**

- **Procédure**

Différentes conditions doivent être nécessairement réunies pour obtenir un bon accrochage des produits et une durabilité suffisante des revêtements :

- qualité de préparation des supports,
- choix de la nature du revêtement et de ses composants,
- application réalisée dans de bonnes conditions,
- épaisseur sèche globale déposée et régularité,
- âge du support béton (2 mois minimum).

Le fascicule 65A du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) prévoit que les systèmes utilisés doivent être des systèmes qualifiés. L'entreprise doit définir les produits utilisés, dans son plan d'assurance qualité (PAQ).

- **Matériels**

Les matériels utilisés pour la préparation du support doivent être identiques à ceux utilisés lors de l'épreuve de convenance. Selon l'état et le type du support, et en fonction du but final recherché, les modes de préparation du support sont multiples :

- brossage, dépeussierage,
- ponçage,
- lessivage,
- projection d'abrasifs : la récupération et le traitement de l'abrasif avant mise en décharge doivent être prévus,
- projection d'eau sous pression : le respect de la valeur de pression retenue pour les essais de convenance est fondamental.

Les matériels utilisés pour l'application des produits sont conformes à ceux de l'épreuve de convenance et aux éléments indiqués dans les fiches techniques produits. Ces fiches techniques précisent le cas échéant pour chaque moyen d'application possible, un taux de dilution et une quantité de produit déposable. Pour les applications au pistolet, une attention particulière est portée aux buses de projection.

➤ **Processus d'exécution et contrôles**

- **Essai préalable**

Dans le cas particulier d'un béton avec des défauts de surface apparents et pour lequel l'application d'un système de peinture risque de ne pas être suffisante pour masquer l'ensemble

des défauts, un essai préalable doit être réalisé avant la rédaction de l'appel d'offres. Cet essai préalable permet de vérifier, avant le lancement du dossier de consultation, que le choix technique envisagé répond bien aux résultats attendus.

- **Mise en œuvre**

La mise en œuvre d'un revêtement s'effectue selon un processus d'exécution auquel sont attachées différentes étapes de contrôle. Il s'agit des étapes suivantes :

a) les opérations préalables au chantier

Avant le démarrage des travaux doit être organisée une réunion regroupant l'ensemble des acteurs concernés, à savoir : le maître d'œuvre, le chef de chantier, le contrôle externe de l'entreprise et l'agent de l'organisme chargé des contrôles extérieurs.

Cette réunion a pour principaux objectifs :

- d'examiner en commun la consistance des travaux, leur mode d'exécution et les contrôles prévus,
- d'examiner les solutions aux difficultés particulières (zones à ragréer, zones difficiles d'accès, etc.),
- d'organiser l'épreuve de convenance,

- de définir le programme des travaux liés en particulier au déplacement de l'échafaudage et aux conditions d'application et de séchage des couches ainsi que le programme des contrôles.

b) l'épreuve de convenance

L'épreuve de convenance, à ne pas confondre avec l'essai préalable, et rendue obligatoire par le fascicule 65A du CCTG permet de vérifier, après passation du marché, que dans les conditions du chantier, sur une surface représentative de l'ouvrage les modalités retenues répondent bien aux objectifs. Réalisée avec les moyens, le personnel et les produits du chantier, elle porte à la fois sur la préparation du support et sur l'application. Elle permet de vérifier que les moyens de l'entreprise sont bien adaptés pour réaliser le travail prévu et de juger de l'aspect du revêtement appliqué sur le béton de l'ouvrage.

c) le contrôle de la préparation du support

Il porte sur :

- la liste des produits utilisés (les abrasifs par exemple),
- la conformité du matériel,
- la réception des surfaces,
- l'adéquation du revêtement à la fonction exigée,
- la cohésion superficielle du support (supérieure ou égale à 0,5 MPA),
- la conformité de l'abrasif.

d) le contrôle des produits

Les principaux points à vérifier concernent :

- L'identité des produits utilisés sur le chantier, il s'agit de vérifier par échantillonnage (selon la norme NF EN 21512) la conformité des produits. Ces tests sont basés sur les Caractéristiques d'Identification Rapide du produit (données CIR),
- l'étiquetage des récipients qui doit comporter le nom du produit, le numéro de lot de fabrication, la dénomination base ou durcisseur, le poids, la date limite d'utilisation, l'étiquetage de sécurité, etc.,
- les conditions de stockage (température et hygrométrie convenables),
- le suivi des quantités livrées.

e) les contrôles juste avant l'application

Il y a lieu, avant de procéder à l'application, de vérifier :

- l'humidité du béton,

- la température et l'hygrométrie de l'air (adéquation de tous ces critères par rapport aux produits à appliquer),
- la température du support (elle doit être de 3°C supérieure au point de rosée).

En ce qui concerne les produits, le contrôle avant application porte sur :

- l'identification et l'étiquetage des produits,
- les proportions et mélanges des constituants,
- la nature et la quantité de diluant utilisé,
- l'homogénéisation,
- le respect du temps de malaxage, de mûrissement et de la durée pratique d'utilisation du mélange.

Il faut également vérifier :

- la conformité des techniques et matériels utilisés aux solutions retenues,
- pour les nouvelles couches, le respect des phases de séchage minimal et délais de recouvrements entre couches.

f) les contrôles lors de l'application

Ces contrôles consistent essentiellement à mesurer les consommations de produit pour chaque couche du système. Ces mesures peuvent être réalisées :

- Par pesée de la quantité de produit en pot avant et après son application sur une surface connue et délimitée de l'ouvrage,
- par comptage des récipients qui contiennent le produit et qui sont préalablement marqués et utilisés pour une surface définie de l'ouvrage,
- par mesure de l'épaisseur humide.

➤ Domaines d'application et limites d'emploi

Dans le cas d'une recherche de l'amélioration sur le plan esthétique, l'aspect du support béton avant revêtement est essentiel pour la qualité du résultat final : un revêtement de 20 à 600 µm ne peut pas masquer toutes les imperfections de surface.

Un revêtement par peinture permet de masquer des différences de couleur, voire de texture, dans la mesure où les défauts restent limités.

Si les défauts sont plus importants (bullage, nids de cailloux ou éclats), il faut préalablement utiliser des produits de réparation de surface qui permettent de faire disparaître ces irrégularités, la peinture étant ensuite destinée à ré-uniformiser la teinte de l'ensemble du parement.

➤ **Essais de réception**

Les contrôles de réception portent sur :

- **l'épaisseur du film sec** : elle peut être évaluée à partir de l'épaisseur humide mesurée lors des applications et de la valeur de l'extrait sec de la peinture ; elle peut être également mesurée à l'aide d'un microscope (incision à 45 ° dont on mesure la largeur selon la norme NF T 30 123) ou par examen à la loupe micrométrique sur un carottage en surface,
- **l'aspect** : il s'agit de détecter des défauts tels que coulures importantes, surépaisseurs, faïençage, cloquages,
- **l'adhérence** : le contrôle de l'adhérence sur chantier est réalisé par un essai d'arrachement conformément à la norme NF T 30 062 ; cet essai est délicat, et doit être répété en un nombre suffisant de points représentatifs,
- **la couleur** : le contrôle de la couleur s'effectue selon la norme NF T 34 554-2 ; les caractéristiques colorimétriques mesurées à la réception servent à vérifier ultérieurement que leur variation éventuelle dans le temps reste conforme aux exigences du marché.

➤ **Durée et efficacité du procédé**

La mise en peinture réalisée selon les règles de l'art, permet d'obtenir, pour la plupart des ouvrages (ponts, tunnels), des durabilités de revêtement de l'ordre de 15 ans. Cette durabilité est variable selon les épaisseurs sèches du revêtement, la nature des peintures (mono ou bi-composante) et leur aptitude ou non à être lessivées (cas des tunnels). Il convient de distinguer divers types de garantie :

- celle relative aux fonctions principales attendues en termes de protection du béton,
- celle relative au décollement ou au cloquage du revêtement,
- celle relative à la couleur,
- celle relative à la fissuration, si cette caractéristique est spécifiée. L'attention est attirée sur le fait que dans la pratique, cette dernière exigence complémentaire ne peut généralement être satisfaite que par des systèmes dont l'épaisseur est supérieure à 600 μm .

Tableau III.2 : les durées de garantie contractuelles à mentionner dans le marché, pour les différentes fonctions visées, selon la gamme d'épaisseur du revêtement [66]

Epaisseur du film sec	Fonction(s) principale(s)	Décollement, cloquage	Fissuration	Uniformité et constance de la couleur
50 µm à 300 µm	2 ans	2 ans (*)	-	2 ans
300 µm à 3 mm	10 ans	10 ans (**)	10 ans	2 ans

(*) Dans le cas des systèmes de protection par peinture, cette valeur de 2 ans, réduite par rapport aux valeurs qui figurent dans l'additif au fascicule 65 A du CCTG – août 2000 (respectivement 4 ans pour les peintures mono composantset 5 ans pour les peintures bi composants) est significative d'une bonne tenue du système, Sans décollement, ni cloquage - condition essentielle pour que la fonction principale de protection visée puisse être assurée en plus de l'aspect esthétique. (**) La garantie de 10 ans pour la fonction principale de protection implique une bonne tenue du système,sans décollement ni cloquage pendant une durée de 10 ans, supérieure aux 6 ans minimum prévus par l'additif au fascicule 65 A du CCTG – août 2000 pour les systèmes de protection à base de peinture mono composant, et aux 8 ans minimum s'ils sont à base de peinture bi composant.

III.4.4.2.Revêtements pour le bâtiment

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

- La fonction esthétique, sur les surfaces nues ou vieilles (couleur, aspect de brillance, etc.) ;
- la correction des défauts de surface (porosité, fissures) ;
- la fonction technique, par la protection du support vis-à-vis de l'environnement. Les produits de revêtement sur béton doivent en effet empêcher l'eau et ses éléments agressifs de pénétrer dans le béton et assurer des fonctions d'étanchéité à l'eau, à la vapeur d'eau ou au gaz carbonique.

Il n'existe pas de procédure de qualification, mais des Documents Techniques Unifiés (DTU), maintenant normalisés, qui définissent le contenu des travaux à effectuer, au travers des Cahiers des Clauses Techniques.

Les produits doivent être conformes aux normes qui les concernent.

➤ **Classification des revêtements**

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

- Revêtements à vocation essentiellement décorative : entrent dans cette catégorie, trois classes de revêtements D1, D2, D3 ;
- Revêtements d'imperméabilité, appliqués à titre curatif pour pallier les désordres susceptibles d'affecter le clos (fissures infiltrâtes), classés en fonction de leur aptitude à résister au support : I1, I2, I3, I4.

- **Revêtements à vocation décorative**

- **Revêtements de classe D1** : ce sont pour la plupart des produits incolores, qui maintiennent l'aspect d'origine du parement, mais améliorent le comportement à l'eau et aux salissures du support. Ce sont les hydrofuges et les lasures.
- **Revêtements de classe D2** : ce sont les peintures. Elles sont toutes constituées de liant (composant filmogène), de pigments (fonction à la fois protectrice, couvrante), de charges (pouvoir opacifiant), et d'un solvant. Plusieurs classes de peinture existent, selon leur nature chimique ou celle de leur solvant :
- **phase solvant** : ce dernier est en général constitué d'hydrocarbures, de dérivés chlorés, d'alcools, d'esters, de cétones, d'aldéhydes ;
- **phase aqueuse** : le solvant est l'eau, ce qui est favorable vis à vis de l'environnement, mais ces peintures sèchent difficilement par temps froid.

Les peintures siloxanes qui ont un caractère hydrofuge et une forte perméance à la vapeur sont des peintures en phase aqueuse.

- **peintures minérales** : elles sont à base de silicates ou de chaux éteinte, et de colorants. Intéressantes par l'aspect décoratif final obtenu, et leur forte perméance à la vapeur d'eau, elles sont plus vulnérables à l'eau de pluie.

Les peintures microporeuses pour façades doivent être conformes à la norme NF T 30-804. Leur application doit être conforme au DTU 59.1 (norme NF P 74-102-1). La norme NF T 36-005 donne la classification des vernis, peintures et préparations assimilées.

- **Revêtements de classe D3** : les revêtements plastiques épais (RPE) en font partie. Ils ont une fonction de correction de l'état de surface, soit en améliorant la planéité, soit en créant un aspect structuré, et une fonction de complément d'imperméabilisation. Ils sont constitués d'une résine de copolymère vinylique ou acrylique en dispersion

aqueuse, de charges de pigments et d'adjuvants. Ils sont appliqués en forte épaisseur (2 à 3 kg/m²). Toutefois, ils n'ont pas d'élasticité suffisante pour résister à une fissuration du support. Les spécifications sont données dans la norme NF T 30-700, et leur application doit être conforme au DTU 59.2.

Les revêtements semi-épais (700 g/m²), destinés à masquer le faïençage, sont décrits dans la norme NF T 34-720.

- **Revêtement d'imperméabilité**

Ce sont des systèmes multi couches (sauf la classe I1), appliqués à titre curatif, pour pallier des désordres affectant le clos. Ils possèdent une réelle fonction technique d'imperméabilité à l'eau liquide. Ils sont constitués d'une couche d'impression, et d'une ou plusieurs couches de produit de peinture (copolymères en dispersion aqueuse), présentant une élasticité suffisante pour résister à la fissuration du support existante (I1 et I2) ou à venir (I3 et I4). Le système I4 comprend en plus une armature incorporée dans la couche de finition.

Le DTU 42.1 (norme NF P 84-404-1) définit l'exécution des travaux de ces revêtements, les produits étant choisis en fonction des défauts de surface constatés, selon la norme NF P 84-401-3. Les produits doivent satisfaire à la norme NF 84-403 quant à leurs caractéristiques (maintien de l'aspect, imperméabilité, isolation thermique). Une étude préalable de reconnaissance est nécessaire pour sélectionner la nature des travaux préliminaires à effectuer (décapage ou conservation des anciens revêtements).

• **Enduits de façade**

Les enduits de façade sont à base de liants hydrauliques, et/ou de chaux aérienne. Ils appartiennent à deux catégories :

- les enduits traditionnels, exécutés en trois couches distinctes (DTU 26.1) ;
- les enduits mono couches prêts à l'emploi. Ils font l'objet d'un classement MERUC, fournissant des indications sur leurs caractéristiques mécaniques.

➤ **Garanties**

Des garanties contractuelles peuvent être proposées par le fabricant (pour un chantier donné avec des conditions particulières), mais les garanties légales sont :

- La garantie biennale dite de bon fonctionnement, qui s'applique aux revêtements de classe D (D1, D2, D3). La bonne tenue (norme NF T 36-001) est l'absence de cloquage, de craquelage, d'écaillage, de décollement au-delà de 5% de la surface de l'élément de référence.

- La garantie décennale qui s'applique aux revêtements de classe I. Elle porte uniquement sur la fonction imperméabilité (le cloquage, l'encrassement, le farinage ne sont pas pris en compte, car ils ne portent pas préjudice au clos). Enfin, la fonction décorative sera appréciée par rapport à une surface de référence, qui devra comporter toutes les opérations prévues au descriptif.

III.4.5. Béton projeté

III.4.5.1. Principes et définitions

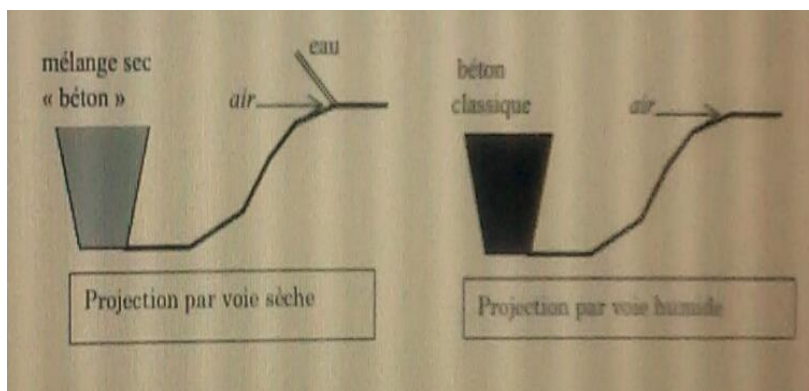
Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projeté grâce à de l'air comprimé, sur une paroi [66].



Photo III.4.7 : Projection de béton

Il faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne :

- par voie sèche avec ou sans pré-mouillage : l'eau est introduite au niveau de la lance,
- par voie mouillée : l'eau est introduite au malaxage du béton



III.4.5.2. Rôle des adjuvants, des fibres et des fumées de silice

Un béton projeté peut aussi contenir des adjuvants, des fibres ou des fumées de silice.

a- L'utilisation des adjuvants confère au béton des propriétés spécifiques lors de la mise en œuvre :

Projection par voie humide

- obtention et maintien de la fluidité, grâce à des stabilisateurs de prise introduits à la sortie de la centrale pour une optimisation des conditions de transport,
- obtention de la consistance initiale, grâce à des activateurs introduits quelques mètres avant la lance,
- mise en œuvre efficace grâce à des accélérateurs de prise (raidisseurs) introduits en bout de lance, mais entraînant parfois une baisse des résistances mécaniques à long terme.

b- L'adjonction de fibres confère au béton projeté des propriétés complémentaires qui dépendent de la quantité et du type de fibres :

- cohésion améliorée du béton frais,
- limitation des effets du retrait,
- amélioration possible des caractéristiques mécaniques (résistance accrue au cisaillement et à la flexion).

Le comportement de post-fissuration confère au matériau une ductilité (recommandations AFTES sur le Béton Projeté Renforcé de Fibres – BPRF, conclusions du projet national BEFIM).

c- L'utilisation de fumée de silice améliore l'aptitude à la projection (béton plus collant) ainsi que la durabilité (béton plus dense).

III.4.5.3. Procédure d'application du béton projeté

La procédure d'application doit justifier les matériaux et les moyens choisis pour leur mise en œuvre.

➤ **Préparation du chantier : études**

Les études portent sur la formulation du béton en regard des exigences du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE), avec notamment la technique de projection et le choix des constituants ainsi que les caractéristiques attendues.

a- Pour les renforcements structurels, la voie sèche ou éventuellement la voie mouillée à flux dilué est préférable, et les dosages en ciment doivent être minimaux.

b- Les études prennent en compte, le plus en amont possible, les sujétions de chantier liées :

- à l'environnement (bruit – pollution),
- à l'accès (aménagement et plate-forme de travail suffisante pour que le porte-lance puisse effectuer le travail convenablement – distance entre lance et surface de 0,50 m à 1,50 m environ),
- à la signalisation (sécurité), à la circulation (vibration du support).

Le Plan Assurance Qualité (PAQ) de l'entreprise doit détailler les dispositions qui s'y rapportent.

Les études précisent :

- la conception des travaux (phasage, type d'échafaudages, matériel de projection, mode de transport et distance maximum, etc.),
- les caractéristiques du béton projeté (durée pratique d'utilisation, épaisseur à projection, nombre de passes, délai entre passes),
- la qualité du support de projection (degré de propreté, humidité, etc.),
- la cure du béton projeté,
- le délai nécessaire de travaux hors circulation....

➤ **Exécution du chantier**

La commande du béton tient compte des résultats de l'étude et de la convenance en intégrant les sujétions de transport et de mise en œuvre (cadences, programmes). Les adjuvants utilisés doivent être admis à la marque NF lorsqu'elle existe ou équivalent. L'approvisionnement est fonction du mode de projection choisi. Dans le cas d'un Béton Prêt à l'Emploi (BPE), le PAQ (Plan Assurance Qualité) de la centrale BPE s'applique. Dans le cas d'une fabrication de chantier, l'approvisionnement des matières premières se fait soit en vrac, soit en sac (mélange sec prêt à l'emploi). L'identification et le contrôle de qualité s'effectuent dans le cadre du contrôle interne en procédant par lots (liés le plus souvent aux phases du chantier). Le stockage doit permettre d'avoir la quantité suffisante pour éviter une rupture de bétonnage et de conserver les matières premières sans détérioration de leur qualité (pollution...). En voie sèche, le contrôle de l'humidité des matériaux est un point important à contrôler. La qualité d'une réparation par béton projeté est fortement liée aux conditions d'exécution et notamment à la qualification du porte-lance. L'essai de convenance réalisé, conformément à la norme NFP 95102, permet de s'assurer que toutes les conditions (personnel, moyen, choix des matériaux) sont réunies pour une bonne exécution des travaux.

➤ **Choix des matériels**

Les machines sont identifiées : elles doivent correspondre à l'utilisation attendue (capacité, puissance, débit (air, eau) résistance). Leurs caractéristiques sont définies au PAQ en regard des objectifs fixés au cahier des charges, avec une attention particulière pour le choix des équipements et notamment sur les adaptations qui conditionnent le bon déroulement de la projection. Toutes les bascules ou balances nécessaires au dosage pondéral doivent être étalonnées. Les doseurs en adjuvants doivent être asservis au débit de la machine à projeter et agréés par un essai de convenance. Certains matériels doivent être prévus en réserve, pour éviter l'interruption de chantier qui serait de nature à nuire à la qualité finale de l'ouvrage.

➤ **Qualification du personnel**

L'équipe doit être qualifiée, c'est-à-dire ayant des références certifiées pour des travaux similaires ou ayant suivi une formation sanctionnée par un certificat de qualification obtenu après contrôle des connaissances théoriques ou pratiques. Le nombre de personnes est adapté à l'importance du chantier. Le PAQ entreprise précise les fonctions et les responsabilités de chaque membre de l'équipe ainsi que les références de ces personnes.

➤ **Procédure opératoire**

L'opération de bétonnage respecte la chronologie suivante :

- préparation du support,
- scellements éventuels de connecteurs,
- mise en place éventuelle du ferrailage et des piges de contrôle d'épaisseur
- projection du béton en respectant le phasage
- passes successives (respect du nombre et délai entre passes),
- arrêt de bétonnage en fin de lot ou de journée, suivant les règles de l'art,
- couche de finition éventuelle (toujours distincte de la couche structurelle).
- protection par cure, si nécessaire.

II.4.5.4. Contrôle de la mise en œuvre

➤ **Contrôle intérieur**

Il porte sur :

- les épreuves d'étude et de convenance,
- la vérification de la conformité de la livraison à la commande pour le béton (cas du Béton Prêt à l'Emploi (BPE)), les matériaux (ciment/granulats, adjuvants/ajouts/eau ou les sacs prédosés, dans le cas du béton fabriqué sur place), les armatures, les produits de cure,

- les prélèvements conservatoires des matériaux, en vue d'analyses éventuelles,
- la vérification de l'état du support et des surfaces de reprises entre couches,
- la vérification de la mise en place du ferrailage,
- le contrôle d'exécution et de la qualité du béton projeté,
- le contrôle d'épaisseur du béton projeté,
- le contrôle de cure,
- le contrôle d'adhérence au support.

➤ **Contrôle extérieur**

Il porte sur les points d'arrêt suivants :

- la validation de l'épreuve d'étude,
- la validation de l'épreuve de convenance,
- la vérification de l'état du support, de la mise en place du ferrailage et des piges de profondeur,
- le contrôle d'adhérence au support,
- la vérification de la qualité du béton projeté (épaisseur, texture, résistance).

III.4.5.5. Domaine et limites d'emploi

➤ **Béton projeté par voie sèche**

Avantages

Les avantages du béton projeté par voie sèche sont les suivants :

- grande souplesse d'utilisation : il est facile d'arrêter le travail et de redémarrer sans avoir à se livrer à des nettoyages fastidieux,
- grandes distances de transport : il est possible d'installer la machine à projeter à quelques centaines de mètres du lieu de travail. Dans des cas précis – par exemple, réparations de tunnels SNCF - des installations spécialement étudiées permettent un transport sur plus d'un kilomètre, sans reprise,
- possibilité de projeter de fortes épaisseurs en une seule couche même sans accélérateur,
- résistances élevées : l'effet de compaction exercé par les graviers projetés à grande vitesse et le faible E/C tendent à améliorer les résistances,
- obtention aisée de béton à hautes performances,

Domaines d'emploi privilégiés

Ils sont les suivants :

- réparation et renforcement de structure,

- réalisation de voiles minces avec armatures,
- projection immédiate de terrain avec activité discontinue et volume restreint,
- projection en falaise,
- rénovation d'ouvrages souterrains, etc.

Limites d'emploi et inconvénients

Ce sont :

- une capacité de production limitée,
- un dégagement de poussière, à la machine et à la lance
- une appréciation visuelle de la teneur en eau par le porte-lance,
- une perte par rebond importante,
- dans le cas de béton fibré, un appauvrissement en fibres dans le béton placé,

➤ **Béton projeté par voie mouillée**

Avantages

Les avantages du béton projeté par voie mouillée sont les suivants :

- capacité de production élevée, atteignant le double ou le triple de la voie sèche,
- diminution des poussières, améliorant les conditions de travail,
- diminution des pertes par rebond,
- meilleur contrôle de la qualité du béton,
- composition du béton en place homogène dans l'épaisseur de la couche,
- robotisation, améliorant les conditions de travail.

Domaines d'emploi privilégiés

Ils sont les suivants :

- travaux en espace confiné,
- soutènement en tunnel nécessitant des cadences importantes de projection,
- projection sur support fragile, etc.,
- **Limites d'emploi et inconvénients**

Ce sont :

- moins de souplesse ; formulation exigeant une mise au point rigoureuse (fluidité, stabilisation, etc) et une régularité de la consistance,
- un transfert sur de grandes distances difficile,
- des adjuvants raidisseurs ou accélérateurs obligatoires pour compenser la fluidité et la stabilisation du béton projeté,

- l'usage recommandé d'un stabilisateur pour permettre un temps d'utilisation suffisant du béton gâché pour minimiser les nettoyages lors des arrêts ponctuels de la machine à projeter,
- un compactage et une adhérence plus faible,
- la nécessité d'un dosage initial en ciment élevé (minimum 400kg/m³) pouvant entraîner des retraits importants.

III.4.5.6. Essais de réception

Les essais de réception sont définis dans les normes, les recommandations, ou les procédures contradictoires. Leur objectif est de valider en fin d'exécution, les engagements de l'entrepreneur qui a accepté de satisfaire aux exigences du marché : caractères géométriques, caractères esthétiques, caractéristiques mécaniques, caractères physico-chimiques, etc.

III.4.5.7. Durée et efficacité du procédé

La projection du matériau sur un support lui confère des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques intéressantes, surtout par voie sèche, du fait de la très grande vitesse :

- richesse élevée en ciment du mélange projeté, au voisinage de la surface réceptrice, du fait des rebonds des plus gros granulats,
- compaction dans l'épaisseur de la couche.

Les propriétés attendues sont les suivantes :

- adhérence au support,
- résistances mécaniques précoces élevées,
- module élastique voisin de celui du support,
- fissuration maîtrisée : l'ajout de fibres améliore encore cette propriété,
- protection du support vis à vis des agents agressifs et des actions du gel-dégel avec des précautions particulières : (formulation, mise en œuvre),
- possibilité de projeter des couches épaisses en une seule passe.

III.4.6. Traitement électrochimiques

Leur objectif est de redonner au béton d'enrobage, sa capacité à protéger les armatures. Il s'agit soit d'augmenter le pH du béton qui a été carbonaté (ré-alkalinisation), soit d'extraire les ions chlorures qui ont pénétré cet enrobage (déchloruration). L'aspect du béton traité est respecté.

III.4.7. Récapitulatif

Plusieurs procédés existent pour réhabiliter le béton armé dégradé par la corrosion. Aucun d'eux n'est applicable dans tous les cas [66].

Conclusion générale

Conclusion Générale

Les structures en béton armé souffrent de graves problèmes de dégradation affectant considérablement leur durabilité. En Algérie, elles sont dues essentiellement à la pénétration des chlorures. Aussi, pour améliorer la performance et la durabilité des structures en génie civil, il est indispensable de connaître les paramètres influant la corrosion induite par les chlorures.

La durée de vie de ces structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physiques et chimiques de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux constitutifs à se protéger contre ces attaques. En pratique, on doit faire en sorte que la période d'amorçage soit la plus longue possible. Dans cette perspective, l'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de l'enrobage et des facteurs climatiques sur la corrosion par pénétration des chlorures.

Dans notre étude, on s'interace beaucoup plus sur la réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion et est d'établir des recommandations pour guider dans le choix du mode de réhabilitation le mieux adapté pour une structure présentant de la corrosion, et ceci en fonction de critères tels que le processus de dégradation concerné, les caractéristiques du béton armé, le milieu environnant, les contraintes et sujétions rencontrées, etc.

A l'issue de ce travail, il est recommandé d'intégrer les critères environnementaux dans les codes de conception comme sources d'agression dans la définition des classes d'exploitation des ouvrages, afin de concevoir des bétons plus durables dans les environnements agressifs.

Bibliographique

Bibliographie

- 1-BENSAADA.S "cours de corrosion" Edition : P/n° 5267
- 2- Béton de fibre à ultra-hautes performances- Recommandations provisoires. Documentation scientifiques et techniques de l'association Française de Génie –Civil, AFGC, Bagnaux, 152p, janv.2002.
- 3- Ming-Te Liang and Ji-Jie "Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure "Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue, March 2005, pp 540-550.
- 4-Pietro Pedoferrri; Cathodic protection and cathodic prevention"Construction and Bulding Matérials, Volume 10, July 1996, pp 391-402.
- 5- Shamsad Ahmed, "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review", Cement and Concrete Composites, Volume 25, May-July 2003, pp 459-471.
- 6- Metha P-K., concrete structure, Propreties and Materials, Prentice Hall, New Jersey, 1986, pp 449-550.
- 7- Thiery. M., Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hyditiqes, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- 8- Loo.Y.H, Chin.M.S., Tam. C.T, Ong.K.C.G., A carbonation prediction model for accelerated testing of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 46 no. 168, p. 191-200,1994.
- 9- Baron. J,Ollivier. J.P, "la durabilité des bétons Presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chassées, Paris, 1992,pp 453.
- 10-Houst. Y.F., Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pate de ciment durcie, Thèse N°1108 de l'Ecole polytechnique Fédérale de Laussane, 1992.
- 11- Venuat. M., Alexandre. J., De la carbonatation du béton, Revue des Matériaux de Construction, no. 638,p. 421-427,1968.
- 12- Ho. D.W.S., Lewis. R.K., of concrete and its Prediction, Cement and concrete Research, vol. 17, no.3, p. 489-504,1987.
- 13- Nischer. P., The Quality of the concrete Texture, Betnwerk+Fertigteil- Technik,vol.52, p.683-696, 1986.

- 14-Ollivier. J.P, Vichot. A, La durabilité des bétons, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pages 840 ,2008.
- 15- CIMbéton, La durabilité des bétons, Collection technique, T48, 2006.
- 16-Tsukayama R., Abe H., Nagatakis S., Long-term experiments on the neutralization of concrete mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement, 7e congress international de la chimie des ciments, Paris, 3,4,30-35, 1980.
- 17- Pihlajavaara S.E. , Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste, *Materials and Structures*, vol. 1, no. 6, p.521-527, 1968.
- 18- Daimon M. , Akiba T, kondo R., Through pore size distribution and kinetics of carbonation reaction of Portland cement mortars, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 54, no. 9, p. 423-428, 1971.
- 19- Ngala V.T., Page C.L., Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol.27, no. 7, p. 995-1007,1997.
- 20- Powers T.C., A hypothesis on carbonation shrinkage, *Journal of the Portland Cement Association Research & Development Laboratories*, vol. 4, no. 2, p.40-50, 1962.
- 21-Hunt C.M., Tomes L.A., Reaction of blended Portland cement paste with carbon-dioxide, *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry* 66A, p. 473- 481, 1962.
- 22- Swenson E.G., Sereda. P.J., Some ageing characteristics of lime, *Journal of Applied Chemistry*, vol. 17, no. 7,p. 198-202, 1967.
- 23- Nurnnberger U., *Betonwerk Fertigteil-Technik* 50 (1984), p. 601.
- 24- Neville A., Chloride attack of reinforced concrete: an overview, *Materials and Structure* (1995), pp. 63-70.
- 25- Page C.L., Short. N.R., Holden W.R., The influence of different cement on chloride induced corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete Research* 16 (1996), pp. 79-86.
- 26- Byforts K., “Chloride-initiated reinforcement corrosion (chloride binding) CBI report 1:90”, Swedish Cement and concrete Research Institute, Stockholm, 1990.
- 27- Van Muylder J., Vansathler L., Winand R and Pourbaix M., “Electrochemical behavior of iron in localized corrosion cells in the presence of chloride”, 7th int. Cong on Metel. Corr, Rio de Janerio, vol.2, 1978, pp 705.
- 28- Page C.L., Lambert P., Vassie P.R.W., Investigations of reinforcement corrosion I: The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete, *Materials and Structures* 24 (1991), pp. 243-252.

- 29- Clear K.C., Hay R.E. Time to corrosion of reinforcing steel in concrete slabs, vol.1, Report No. FHWA-RD-73-32, Federal Highway Administration, Washington D.C, (1973).
- 30- Locke C.E., Siman A., Electrochemistry of reinforcing steel in salt-contaminated concrete, ASTM STP 713, pp.3-16.
- 31- Building Research, The durability of steel in concrete: Part 2 Diagnosis and assessment of corrosion-cracked concrete, Digest 264, Building Research Establishment, Goston (1982).
- 32- Holden W.R., Page C.L., Short M.R., The influence of chlorides and sulfates on durability of reinforced concrete, Corrosion of reinforcement in concrete construction, A.P. Crane Edition, Ellis Horwood (1983), pp.143-150.
- 33- Popovics S., Simeonov Y., Boshinov G., Barovsky N., Durability of reinforced concrete in sea water, Corrosion of reinforcement in concrete construction, A.P. Crane Edition, Ellis Horwood (1983), pp.143-150.
- 34- ACL 222R-89, Building of Metals in Concrete, American Concrete Institute, Détroit (1989).
- 35- ACL 318-89, Building Code Requirements, American Concrete. American Concrete Institute, Détroit (1992).
- 36- Stoltzen E., Kanudsen A., Buhr B., Durability of marine structures in Denmark, Proceedings of International Conference Repair of Concrete Structures, From theory to practice in a marine environment, Aage Blankvoll Edition, Norvege (1997). P.59.
- 37- Gouda V.K., Halaka W.Y., Corrosion and corrosion inhibition of reinforced steel, British Corr. Journal 5 (1970), pp.204-208.
- 38- Kayyali O.A., Haque M.N., The ratio of Cl/OH^- in chloride contaminated concrete. A most important criterion, Mag. Concrete Res. 47 (1995), pp.208-234.
- 39- Hope B.B., IP A.K.C., Chloride corrosion threshold in concrete. ACI Materials Journal july-august (1987), pp.306-314.
- 40- Hussain S.E., Rasheeduzzafar S.E., Al- Musallam A., Al-Gahtani A.S., Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete, Cem. Concr. Res 25 (1995), pp.1543-1555.
- 41- Hausmann D.A., Steel corrosion in concrete. How does it occur, Materials Protection 6 (1967), pp. 19-23.
- 42- Gouda V.K., Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel I: Immersed in alkaline solutions, British Corr. Journal 5 (1970), pp. 198-204.
- 43- Diamond S., Chloride concentrations in concrete pore solutions resulting from calcium and sodium chloride admixtures, Cement, Concrete, and Aggregates 8 (1986), p.97.

- 44- Goni S., Andrade C., Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in presence of chlorides, *Cement and Concrete Research* 20 (1990), pp.525-539.
- 45- Lambert P., Page C.L., Vassie P.R.W., Investigation of reinforcement corrosion. Electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete, *Materials and Structures* 24 (1991), pp.351-358.
- 46- POWERS T.C., COPELAND L.E., HAYES J.C., MANN H.M., 1954, «Permeability of Portland cement paste», *J. Amer. Concr. Inst.* Vol. 51, n° 3, pp. 285-298.
- 47- FRANCY O., 1998, « Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers partiellement saturés en eau », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
- 48- NILSSON L.O., POULSEN E., SANDBERG P., SORENSEN H.E., KLINGHOFFER O., 1996, « HETEK – chloride penetration into concrete – state of the art », Ed. The Danish Road Directorate, Copenhagen.
- 49- GREGG S.J., *The surface chemistry of solids*, 2nd edition, Ed. Chapman & Hall Ltd, London.
- 50- Glass G.K., Buenfeld N.R., The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, *Corrosion Science*, vol. 39, no.5, p. 1001- 1013, 1997.
- 51- Pettersson K. dans Dhir., RK Jones M.R.,(Eds).*Concrete 2000*, vol.1, E&FN Spon, London, p. 461, 1993.
- 52- Projet Funded by the European Commission under the Transport, RTD Programme of the 4th Framework Programme- Bridge Management and Condition Monitoring, BRIME PL97-2220, January 2001.
- 53- Chen D., Mahadeven S., Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation, *Cement & Concrete Composites* vol. 30, no. 3, p. 227-238, 2008.
- 54- Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R., *Corrosion of steel in concrete*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 392 pages, 2004.
- 55- Val D.V., Melchers R.E., Reliability of deteriorating RC slab bridges, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, vol. 123, no. 12, p. 1638-1644, 1997.
- 56- Raharinaivon A., Arliguie G., Chaussadent T., Grimaldi G., Pollet V., Taché G., *La corrosion et la protection des aciers dans le béton*, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 167 pages, 1998.
- 57- Dhir R.K., Jones M.R., McCarthy M.J., PFA concrete : chloride-induced reinforcement corrosion. *Magazine of Concrete Research*, vol. 46, no. 169, p. 269-277, 1994.
- 58- BRITE/EURAM. *The residual service life of reinforced concrete structures*, Final Technical Report, Report No. BRUE-CT92-0591, 1995.

- 59- Middleton C.R., Hogg V., Review of deterioration models used to predict corrosion in reinforced concrete structures, CUED/D- STRUCT/TR.173, Cambridge University, 1998.
- 60- Gagné R., GCI 714- Durabilité et réparations du béton, Cours de l'Université de Sherbooke (Québec, Canada), 2008.
- 61- Breyse D., Yotte S., Salta M., Schoefs F., Ricardo J., Pereira E., Uncertainties in NDT condition assessment of corroding structures in marine environment, dans la conference MEDACHS 08: Construction heritage in coastal and marine environments. Damage, diagnostics, maintenance and réhabilitation. LNEC, Lisbon, Portugal, January 2008.
- 62- Vu K.A.T., Stewart M.G., Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models, Structural Safety, vol. 22, no.4, p.313-333,2000.
- 63- Liu Y., Weyers R.E., Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures, Cement and Concrete Research, vol. 28, no. 3, p. 365-79, 1998.
- 64- Liu Y., Modeling the time-to-corrosion cracking of the over concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures, these de doctorat de Virginia Polytechnic Institute, Etats-Unis, 1996.
- 65-Breyse D., Yotte S., Salta M., Schoefs F., Ricardo J., Chaplain M., « Accounting for variability and uncertainties in NDTcondition assessment of corroded RC-structures », European Journal of Environmental and Civil Engineering vol. 13, no. 5, special issue: Durability and Maintenance in maritime environment, p. 573- 591, 2009.
- 66- Document scientifique AFGC : "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion", Novembre 2003

Annexe

Annexes

Annexe 1 – Sur la gestion des ouvrages en béton armé

La démarche qui est proposée ici, est surtout celle d'un gestionnaire d'ouvrages relevant de l'État ou de collectivités territoriales (murs de soutènement, ponts...) mais elle peut être adaptée à d'autres gestionnaires qui ont à gérer d'autres parcs d'ouvrages (bâtiments, réservoirs...).

Il faut tout d'abord rappeler :

- qu'il faut s'attendre dans les années à venir à un développement des désordres dus à la corrosion car de nombreux ouvrages ont été construits à partir des années 50 et le parc des plus anciens (ceux âgés de 40 à 50 ans) présente déjà de nombreuses traces de corrosion voire des corrosions avancées (les ponts en béton armé sont très exposés aux agressions d'autant qu'un grand nombre d'entre eux sont soumis aux fondants...);
- que les désordres et défauts du matériau "béton armé" peuvent avoir plusieurs causes (gel-dégel, alcali-réaction, réaction sulfatique...) même si, la corrosion est la plus fréquente. Il est donc nécessaire d'identifier les origines des désordres avant d'envisager toute intervention sur un ouvrage ;
- que les gestionnaires et les maîtres d'ouvrages souhaitent minimiser au maximum la gêne aux usagers, qu'ils ont beaucoup de mal à accepter qu'un ouvrage soit fermé pour travaux et qu'ils imposent parfois des contraintes telles que les réparations ne sont pas durables car les travaux ne peuvent être exécutés correctement.

L'expérience tirée du contrôle réglementaire des dossiers d'études de réparations élaborés par les gestionnaires montre que :

- actuellement, la gestion est du type "curatif". Il n'y a intervention qu'à partir du moment où les désordres deviennent nettement visibles et que les morceaux de béton qui se détachent mettent en jeu la sécurité des usagers et des tiers. Les réparations à effectuer sont donc lourdes et coûteuses (élimination du béton pollué et reconstitution de l'enrobage des armatures...);
- les gestionnaires maîtrisent mal "la commande du diagnostic-pronostic" indispensable pour évaluer les causes et l'importance des désordres ;
- les gestionnaires maîtrisent mal "la commande et le suivi des études de réparation". En particulier, le contrôle extérieur pendant l'élaboration du projet est souvent insuffisant. La maîtrise du contrôle du projet est pourtant indispensable pour obtenir des solutions

adaptées aux désordres et aux contraintes imposées au chantier et donc des réparations durables ;

- les gestionnaires semblent souvent ignorer :
 - ✓ que l'on peut détecter le moment où les agents agressifs vont atteindre les armatures et amorcer la corrosion grâce aux méthodes d'investigation actuelles sous réserve d'effectuer périodiquement quelques campagnes de mesures durant la vie de l'ouvrage et surtout avant sa mise en service pour avoir "l'état de référence" ;
 - ✓ qu'il est possible d'intervenir pour éliminer les agents agressifs (extraction des chlorures...) ou pour "stopper" leur progression (mise en œuvre d'une protection...) et, ce le plus souvent, avec un minimum de gêne dans l'utilisation de l'ouvrage ; que ces mesures préventives et curatives sont souvent nettement moins coûteuses voire plus durables que les réparations traditionnelles lourdes visées ci-devant ;
 - ✓ qu'à budget identique, "**la démarche préventive**" permet de maintenir en état de service un plus grand nombre d'ouvrages que "**la démarche curative actuelle**".

Annexe 2 – Démarche Générale

Il convient de suivre la démarche développée ci-après lorsqu'un ouvrage en béton armé est dégradé par corrosion.

La méthodologie à appliquer pour déterminer la ou les techniques de réhabilitation est celle qui est décrite dans ce guide. Elle comprend les quatre phases suivantes.

1. **Le diagnostic** : il a pour but de déterminer la nature des désordres et, en cas de corrosion, l'origine de celle-ci et son étendue. Il permet de savoir si la corrosion est localisée ou généralisée ce qui a une très grande importance dans le choix des techniques de réparation.
2. **Les exigences et les contraintes** : le maître de l'ouvrage doit préciser dans "son programme" ses exigences (simple remise en état de l'ouvrage (réparation) ou remise en état avec modification de son état de service (renforcement, élargissement), en tenant compte de son état de conservation (force portante, etc.). Le maître d'œuvre devra respecter le programme à la lettre sauf impossibilité technique avérée. Il doit aussi recenser ou faire recenser les contraintes imposées durant les travaux (maintien en service partiel ou total de l'ouvrage etc.), d'environnement (pollution,

bruit, hygiène, sécurité etc. et techniques pour la mise en œuvre de la méthode de réhabilitation (conditions de température et d'hygrométrie à respecter, prise en compte des chocs et vibrations dus au trafic, aux engins de démolition et incidence sur la tenue des produits de réparation en cours d'application, détermination des matériels nécessaires pour accéder à l'ouvrage et pour effectuer les travaux etc.).

3. **L'étude technico-économique** : cette étude comparative concerne le choix des actions à entreprendre (fermeture définitive, réparation, remplacement, maintien en état...) avec leur incidence économique. La décision finale étant du ressort du maître de l'ouvrage.

Si cette étude aboutit à la décision d'une réhabilitation elle doit alors permettre de choisir la ou les techniques les mieux adaptées.

4. **La mise au point du marché de réparation** : le maître d'œuvre doit préciser les hypothèses sur l'état de l'ouvrage si cela est nécessaire (contractualisation partielle ou totale des résultats des études effectuées pendant les phases précédentes, visite contradictoire de l'ouvrage avec chacun des candidats de la consultation, état des lieux avec le candidat désigné...), les différentes contraintes imposées, les règles de sélection des offres, les variantes et les propositions techniques autorisées.

En outre, le maître d'œuvre doit indiquer quelles garanties ou responsabilités seront demandées à l'entrepreneur (par exemple, responsabilité civile en cours de travaux contre les dommages causés à l'ouvrage à réparer, à d'autres ouvrages, aux usagers et aux tiers etc.), garanties particulières de durée fixée sur certains des travaux de réparation (par exemple, revêtement de protection, inhibiteur de corrosion etc.).

Il y a lieu de rappeler qu'après réception des travaux de réparation, outre la mise en œuvre de la responsabilité contractuelle (en cas d'application défectueuse du contrat), de la garantie de parfait achèvement (article 44.1 du CCAG) ou des garanties particulières (article 44-3 du CCAG), peuvent s'appliquer également les principes de la responsabilité décennale (article 45 du CCAG qui vise les articles 1792 et 2270 du code civil).

Les principes de la responsabilité décennale s'appliquent aux travaux de réparation (travaux neufs sur existant) mais normalement pas aux désordres que pourrait subir l'ouvrage du fait des travaux de réparation. Ces désordres relèvent de la responsabilité de droit commun (dite responsabilité délictuelle ou quasi-délictuelle visée par les articles 1382, 1383... du chapitre II du code civil dont la durée de prescription de 30 ans à compter de la réalisation du dommage ou de son aggravation a été réduite à 10 ans par la loi n°85-677 du 5 juillet 1985 se reporter à l'article 2270-1 du code civil qui vise les actions en responsabilité civile extra-contractuelle).

A ceci s'ajoute aussi la responsabilité en matière de produits défectueux visée par les articles 1386-1 à 1386-18 du code civil.

Annexe 3 – La commande d'un diagnostic

La compétence technique du gestionnaire est à considérer ; deux cas se présentent :

- si le gestionnaire a les compétences techniques suffisantes, il assure lui-même la coordination des différents intervenants ;
- dans le cas contraire, il a besoin "**d'un expert**" (ou **d'un groupe d'experts dans les cas complexes**) qui lui apporte assistance et conseil pour coordonner les intervenants, passer les commandes et conclure.

Pour passer une commande de diagnostic, après qu'un **pré-diagnostic** ait été effectué, il convient de distinguer les cas suivants :

- **Cas d'une commande à un laboratoire** : il convient de préciser les contraintes à prendre en compte pour effectuer les relevés et les mesures (moyens d'accès, etc.), les parties à examiner, les relevés à faire, les mesures à effectuer (leur nombre et leurs emplacements), la présentation attendue pour les résultats des mesures et quelle interprétation est souhaitée. Il faut aussi préciser les délais. Il est à noter que si l'ouvrage, en plus des problèmes de corrosion, présente un problème structurel il convient de prévoir la possibilité de demander au laboratoire de participer au diagnostic en collaboration avec le bureau d'études et vice et versa.
- **Cas d'une commande à un bureau d'études** : le recours à un bureau d'études est à prévoir dans le cas de problème structurel, notamment pour un ouvrage ancien (par exemple, à cause modifications des règlements de calculs, des règles de charges etc.), ou lorsque les désordres ont des causes multiples.

Avant de passer commande d'un diagnostic, il convient par exemple :

- de rassembler les plans, les documents d'exécution (se reporter au dossier de l'ouvrage) ;
- de fournir au bureau d'étude les éléments nécessaires au recalcul (plans, notes de calculs, résultats des essais de résistance des bétons etc.) ;
- de définir les hypothèses et les règlements à prendre en compte (avec l'appui éventuel de l'expert)...

Il est à noter :

- qu'il est utile d'associer un bureau d'études et un laboratoire pendant la phase de diagnostic ;

- qu'il faut interdire que le diagnostic soit assuré par celui qui exécutera la réparation (on ne peut être juge et partie).

La démarche générale qui vient d'être décrite pour la commande d'un diagnostic se simplifie ou et se diversifie dans les situations suivantes :

- en l'absence de problème structurel, le recours à un bureau d'études n'est pas indispensable ;
- dans le cas, où le pré-diagnostic est suffisamment fiable la commande de diagnostic peut être intégrée à la commande d'études ;
- dans le cas où des moyens d'accès lourds sont nécessaires, il faut prévoir que les mesures in situ nécessaires soient réalisées lors d'une inspection détaillée périodique (IDP) ce qui entraîne un gain de temps et d'argent

Annexe 4 – La commande de l'étude technique

L'étude technique est à lancer dès que le diagnostic a été effectué, son objectif est d'aboutir au choix d'une solution technique (démolition-reconstruction, réhabilitation etc.), sachant que la décision finale appartient au maître d'ouvrage.

Le gestionnaire, seul s'il est compétent ou assisté d'un expert, fait appel à :

- un laboratoire, s'il s'agit d'un problème de matériaux, sans conséquence structurelle (attention, aux ouvrages anciens qui, même s'ils n'ont pas de désordres apparents importants, peuvent masquer des problèmes de force portante délicats) ;
- un laboratoire et un bureau d'études, si les désordres ont (ou pourraient avoir) des conséquences structurelles (d'où l'importance des conseils de l'expert).

Cette étude technique se déroule en trois phases : la première est consacrée au choix de la solution à adopter (démolition-reconstruction, réparation...), la seconde, après la première prise de décision du maître de l'ouvrage, à l'étude détaillée de la solution de réparation (si cette dernière a été choisie) et la troisième au montage du dossier de consultation des entreprises (DCE).

Remarque : la première phase n'est pas strictement indispensable lorsque le diagnostic montre que les travaux de réparation sont possibles, seront d'un montant raisonnable et devront pouvoir rendre à l'ouvrage son "état de service et ce pour de nombreuses années.

Première phase : le choix de la solution

L'étude comparative doit permettre au maître d'ouvrage de savoir quelle solution présente le meilleur coût-efficacité à moyen et à long terme.

En effet, l'expérience montre que "l'acharnement thérapeutique", sauf cas particulier, conduit à engager des réparations multiples au fur et à mesure que les années passent parce que l'ouvrage continue à se dégrader par tous les bouts ce qui aboutit à terme à des dépenses rédhibitoires !

Il faut donc faire ressortir pour chaque solution :

- ses avantages et ses inconvénients ;
- les contraintes qu'elle impose pendant la phase travaux ;
- sa durée de vie estimée (en admettant que les travaux seront bien exécutés) ;
- la durée des travaux ;
- son coût.

Deuxième phase : approfondissement de la solution retenue (est détaillé dans ce qui suit le cas d'une réparation)

Remarque : si après cette première phase, la solution de réparation est retenue, comme elle fait souvent appel à différentes techniques pour combattre la corrosion du béton armé, c'est au cours de cette seconde phase que ces différentes techniques sont à étudier en détail et à comparer.

L'étude fournie doit comprendre la description de la réparation ou des réparations et les précautions à prendre dans toutes les phases des travaux (température et hygrométrie qui influent sur les conditions de préparation et de mise en œuvre des produits - hygiène et sécurité du personnel et des tiers car certains produits peuvent être toxiques ou inflammables...) ;

- les moyens à mettre en œuvre (étalement de l'ouvrage existant, moyens d'accès, matériel nécessaire à la préparation des surfaces à traiter, matériel de mise en œuvre des produits et matériaux compte tenu des conditions d'accès et de travail, dispositifs de protection adaptés aux conditions climatiques prévisibles etc.) ;
- la préparation de surface à effectuer ;
- les raisons du choix du type ou des types de produit retenus (nature spécifications à respecter) et leurs conditions de mise en œuvre ;
- les produits de protection à appliquer après la réparation si cela est nécessaire (c'est souvent le cas pour masquer l'effet peau de léopard) ;
- les divers contrôles (internes et extérieurs) à effectuer durant les différentes phases des travaux pour s'assurer de la bonne réalisation des travaux (nature et intensité) ;
- la durée de vie probable de la réparation ;

- le coût initial et le coût d'entretien (ne pas négliger les conditions d'enlèvement ou de recouvrement des produits),
- le suivi qui devra être effectué.

Troisième phase : le montage du dossier de consultation des entreprises (DCE)

Il convient de rendre contractuelles les conclusions de la phase précédente à partir du moment où la solution a été choisie et préciser dans les différentes pièces du marché les exigences du maître d'œuvre :

Le règlement de la consultation (RC)

- le contenu des deux premières phases du PAQ que doit fournir l'entrepreneur. Elles sont détaillées le cadre de PAQ auquel le RC doit renvoyer (la première phase a lieu lors de la remise des offres et la seconde avant la signature du marché qui "contractualise" et complète les propositions initiales) ;
- le contenu du mémoire technique réparations que doit remettre l'entrepreneur (moyens à mettre en œuvre, fiches techniques des produits, conditions de préparation et de mise en œuvre des produits, précautions à prendre...) ;
- les propositions techniques que doit fournir l'entrepreneur (une proposition technique n'a aucune incidence sur les quantités et les prix) et quelles sont les variantes de conception ou d'exécution autorisées (les variantes ont une incidence sur les quantités et les prix) et les compléments à apporter au CCAP et au CCTP (pour simplifier le jugement des offres prévoir que l'entrepreneur remette une proposition conforme à la solution de base et pas plus d'une variante) ;
- la nécessité de prendre en compte les exigences d'hygiène et de sécurité détaillées dans le dossier hygiène et sécurité ;
- les conditions de jugement des offres.

Le cahier des clauses administratives particulières (CCAP)

- les dispositions en matière de responsabilités et garanties auxquelles devra souscrire l'entrepreneur (responsabilité civile, garanties contractuelles...) ;
- le cadre du PAQ ;
- la liste des pièces constitutives du marché (cadre du PAQ...) et liste des documents contractuels (normes 1...) ;
- la liste des documents d'exécution et le calendrier prévisionnel de fourniture et de visa ;

- l'équipement du laboratoire de chantier (cas des grosses réparations) ou le matériel de mesure et de contrôle nécessaire sur du chantier ;
- les dérogations éventuelles aux documents généraux.

Le cadre du plan d'assurance de la qualité (PAQ)

Première phase du PAQ (lors de la remise des offres)

- la liste des sous-traitants potentiels (références, moyens en personnel et matériel, extraits du Manuel d'Assurance Qualité (MAQ)...) ;
- la liste des fournisseurs potentiels (références, moyens de fabrication, fiches techniques, homologations, extraits de MAQ) ;
- la liste des bureaux d'études potentiels (références, organisation, équipements, qualification du personnel...) ;
- la liste des laboratoires chargés de certaines études et des mesures sur le chantier (références, organisation, équipements, qualification des personnels...) ;
- liste minimale des procédures et des documents de suivi qui devra être complétée par l'entrepreneur.

Deuxième phase du PAQ (avant la signature du marché)

- l'organigramme du chantier et la note d'organisation générale relative au contrôle de la qualité ;
- la liste des sous-traitants et fournisseurs qui doivent être choisis avant la signature du marché² ;
- le bureau d'étude et l'organigramme de l'équipe qui sera chargée des études.

Troisième phase du PAQ (pendant la période de préparation des travaux³)

- la mise au point finale de la note d'organisation générale ;
- l'établissement des procédures et des documents de suivi y compris les fiches de nonconformité (sauf pour les travaux prévus en fin de chantier et de faible importance) ;
- l'établissement du plan d'organisation des contrôles et du bordereau récapitulatif.

Quatrième phase du PAQ (pendant les travaux)

- la mise à jour des procédures et des documents de suivi ;
- le renseignement des fiches de suivi ;
- la gestion du plan de contrôle et du bordereau récapitulatif ;
- les conditions d'exercice du contrôle extérieur (points d'arrêt prévus et contrôles inopinés).

Cinquième phase du PAQ (après achèvement des travaux)

- le regroupement des documents qualité pour le maître d'œuvre 4.

Le cahier des clauses techniques particulières (CCTP)

Chapitre 1, dispositions générales et description de l'ouvrage

- la description des conditions climatiques (incidence sur les travaux et les dispositifs de protection pendant la mise en place des produits...);
- les exigences de durabilité (incidences sur la reconstitution de l'enrobage des armatures, la mise en place de produits de protection...);
- les exigences d'aspect de l'ouvrage après réparation (mise en peinture, teinte, texture...);
- les contraintes particulières imposées au chantier (mise sur étaieage de l'ouvrage à réparer pour assurer sa stabilité, évacuation et traitement des déchets...).

Chapitre 2, préparation et organisation du chantier

- les hypothèses de calcul à respecter dans les études ;
- l'état des lieux contradictoire au début de la période de préparation des travaux (les travaux de réparation pouvant causer des dommages à l'ouvrage existant) ;
- les documents à fournir par l'entrepreneur (dispositions générales, liste des documents sans oublier la réunion préalable de validation et de coordination du programme d'exécution des travaux, des procédures, des documents de suivi... sous la présidence du maître d'œuvre, qui fait l'objet d'un point d'arrêt) ;
- les conditions de tenue du journal de chantier et les renseignements que doit y apporter l'entrepreneur ;
- la liste des points critiques et des points d'arrêt (prévoir d'annexer le cadre de PAQ au CCTP) ;
- les procédures d'exécution à fournir par l'entrepreneur (fixer le contenu minimal des différentes procédures. Se reporter au logiciel CAPTDCE du SETRA).

Chapitre 3, provenance, qualité et préparation des matériaux

- le tableau récapitulatif des produits et matériaux à mettre en œuvre ;
- les généralités sur la conformité aux normes et le principe de l'équivalence (pour mémoire) ;
- les produits de réparation (fixer les exigences en matière de performances, l'organisation des épreuves d'études [si besoin est par exemple, si le produit n'est pas homologué ou conforme à une norme...], les conditions de réception des produits

[type de conditionnement, conditions de transport, le délai d'information préalable du maître d'œuvre des livraisons qui doit figurer au CCAP, la remise d'un double du bordereau de livraison, les prélèvements conservatoires, les essais à effectuer...]⁵, l'organisation de l'épreuve de convenance qui est un point d'arrêt [réalisation d'un béton témoin, test de préparation de surface, préparation et mise en œuvre des produits, test de réparation d'une réparation volontairement ratée, contrôles internes et extérieurs prévus...]).

Chapitre 4, exécution des travaux

- les travaux préparatoires (liste des instruments de mesure [thermomètre, hygromètre, duromètre Shore...] et récapitulation des mesures à effectuer avec leur périodicité...);
- les ouvrages provisoires imposés [étalement partiel ou total de l'ouvrage existant, moyens d'accès nécessaires pour effectuer les travaux et les contrôles, abris de protection contre les intempéries...] ⁶ ;
- les contraintes à respecter pendant l'exécution des travaux (maintien du trafic, conditions climatiques, ordre des opérations délais entre phases de réparation...);
- la mise en œuvre des produits de réparation (les exigences de résultats [texture et résistance du support, dureté et adhérence des produits...], les exigences de moyens [matériel nécessaire à l'élimination du béton souillé, des parties rouillées...], la consistance du contrôle interne sur le matériel, la préparation des surfaces, la préparation et la mise en œuvre des produits, les conditions d'intervention du contrôle extérieur [points d'arrêt et types de contrôles...];
- les conditions de stockage et d'évacuation des déchets ;
- les conditions de réception de l'ouvrage réparé (essais, mesures...) ⁷.

Le bordereau des prix unitaires (BPU)

Le bordereau des prix doit définir avec précision le contenu des prestations (s'inspirer des définitions des prix du fascicule 65A et du logiciel "CAPTDCE" du SETRA).

Annexe 5 – Exécution des travaux

Lors de l'exécution des travaux, il faut :

Nota : ne figurent ci-après que les points essentiels à la bonne exécution d'une réparation.

- veiller à bien anticiper les différents délais administratifs et les contraintes de dernière minute (intervention des lobbies au dernier moment...);
- essayer de lancer le marché au bon moment (par exemple, lorsque les conditions climatiques, de circulation permettent de mettre en œuvre la technique prévue.

Dans le cas où c'est impossible, il faut avoir prévu dans le marché la mise en œuvre d'abris de protection) ;

- appliquer pour le jugement des offres les règles du RC de façon que la dévolution du marché aille au "mieux-disant" 8;
- prévoir aussi pour le maître d'œuvre un plan d'assurance de la qualité (PAQ) et veiller à le gérer sans retard et avec efficacité ;
- veiller tout particulièrement à ce que les travaux de purge du béton dégradé ne mettent pas en jeu la stabilité de l'ouvrage à réparer. La mise sur cintre est parfois nécessaire ;
- faire respecter le contenu des pièces du marché (sauf erreur manifeste dans les prescriptions du marché, il ne faut pas céder aux propositions de modifications en cours de travaux), gérer sans retard les problèmes techniques qui peuvent se poser (faire appel au réseau technique, faire des relevés contradictoires, remplir le journal de chantier...)... ;
- veiller à ce que l'entrepreneur gère avec efficacité et sans retard les différents documents du PAQ ;
- assurer le suivi de l'ouvrage réparé en prévoyant la remise de l'ouvrage au gestionnaire avec un procès-verbal (PV) donnant la périodicité des inspections détaillées périodiques (IDP), les dates des fins de garanties et responsabilités, la périodicité des essais de contrôle de l'efficacité des réparations (mesure de la profondeur de carbonatation, des profils des chlorures...)..

Leurs caractéristiques sont résumées dans les tableaux ci-dessous.

Il est rappelé que chaque procédé ou traitement doit comporter les étapes suivantes :

- Evaluation de la structure
- Nature et causes des éventuelles dégradations
- Choix entre les solutions possibles sur le plan technique
- Compatibilité entre les procédés et les exigences diverses. En effet, la plupart du temps, plusieurs options différentes sont possibles : la solution retenue doit être compatible avec les exigences diverses, les choix techniques et le coût supportable.

Reconstitution de l'enrobage

Domaine d'action	Restauration de l'apparence du parement
Mise en œuvre	Enlèvement du béton dégradé. Brossage, remplacement d'armatures Protection éventuelle. Application de produit NF ou assimilé
Limites et précautions d'emploi	Phasage précis des opérations (risques de déséquilibre de la structure)
Efficacité. Contrôle et durée	Réception des armatures de renforcement Contrôle des renforcements, Réception des supports
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Risques de récurrence si la partie corrodée n'est pas parfaitement enlevée, Attention aux effets cathodiques adjacents

Béton projeté

Domaine d'action	Réparations, renforcements structurels
Mise en œuvre	Projection sur la paroi à l'aide d'air comprimé selon deux techniques : voie sèche et voie mouillée
Limites et précautions d'emploi	Respecter la norme NF 95102 pour la composition comme pour les épaisseurs
Efficacité. Contrôle et durée	Réception des armatures, Contrôle d'adhérence, Confection des caisses de convenance avec carottage pour le contrôle des caractéristiques
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Surcharges

Produits protecteurs : Hydrofuges de surface

Domaine d'action	Action hydrophobe sur le parement
Mise en œuvre	Application sur la surface par rouleau ou pulvérisateur. La préparation du support est fondamentale
Limites et précautions d'emploi	Emploi lorsque l'altération est due à un contact avec de l'eau liquide provenant de l'atmosphère Ne pas appliquer sur des surfaces horizontales
Efficacité. Contrôle et durée	Contrôle de l'efficacité par l'essai perlant (qualitatif)
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Mauvaise compatibilité des hydrofuges avec les sels solubles et certains produits de traitement

Produits protecteurs : Inhibiteurs de corrosion

Domaine d'action	Ralentissement du processus de corrosion des armatures
Mise en œuvre	Par pulvérisation en plusieurs passes (forme liquide) sur la surface du béton ou application directe sur la surface (forme gélifiée) ou sur l'acier
Limites et Précautions d'emploi	Incompatibilité avec les éléments déjà traités par hydrofuges Limites liées à des teneurs en chlorures trop élevées
Efficacité. Contrôle et durée	Efficacité dépendante de la nature du produit et de la quantité disponible au niveau des aciers (dosage de l'inhibiteur) Contrôle par mesures de potentiels ou de courants de corrosion
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Certains inhibiteurs minéraux interagissent avec le béton Risque d'apparition d'efflorescences devant être nettoyées

Revêtements de surface : Peintures, lasures et autres revêtements

Domaine d'action	Amélioration du parement : action esthétique, limitation de l'encrassement, action protectrice du béton
------------------	---

Mise en œuvre	Application en plusieurs couches sur un support ne présentant pas d'imperfections trop importantes
Limites et précautions d'emploi	Protection superficielle, non curative L'état du support au moment de l'application a un rôle déterminant
Efficacité. Contrôle et durée	L'efficacité est liée à la qualité de l'adhérence entre le support et le revêtement, Risques de cloquage, craquelage, écaillage. Contrôle de la perméabilité de surface
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Attention à la tenue aux rayons UV dans le choix des produits Risque d'incompatibilité avec certains traitements du béton

Revêtements de surface : Enduits pour le bâtiment

Domaine d'action	Amélioration de la surface du béton : esthétique, correction des irrégularités de surface (porosité, fissures), protection vis à vis de l'environnement
Mise en œuvre	Selon la nature du produit
Limites et précautions d'emploi	Protection superficielle, non curative
Efficacité. Contrôle et durée	L'efficacité est liée à la qualité de l'adhérence entre le support et le revêtement, Risques de cloquage, craquelage, écaillage.
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	

Document de références

Normes

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

Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique			
N° de normes	Titre	Nature du liant	Année

NF P 18-800	Définitions, classification, conditionnement, marquage, conditions de réception	H – R	1989
NF P 18-802	Contrôle sur chantier	H – R	1992
Produits ou systèmes de produits destinés aux réparations de surface du béton durci			
NF P 18-840	Caractères normalisés garantis- Normes d'essais garantis – Normes		1993
NF P 18-852	Essais d'adhérence sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-853	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-854	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-855	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces sciées	H – R	1992
NF P 18-856	Essai de tenue aux rayonnements U.V.	H – R	1993
NF P 18-857	Essai de tenue aux chocs sur surfaces sciées après cycles	R	1993
NF P 18-858	Essai d'adhérence sur surfaces rugueuses	H – R	1993
NF P 18-859	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces rugueuses	R	1993
NF P 18-860	Essai de tenue aux chocs répétés sur surfaces rugueuses	R	1993
NF P 18-816	Essai après cycles de gel-dégel, de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface rugueuse	R	1993
NF P 18-862	Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvette à surface rugueuse	R	1993

H : produits hydrauliques

R : résines de synthèse

Ouvrages d'art, Normes sur les techniques de réparations		Année
NF P 95-101	Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés	1990

La réalisation des travaux de béton projeté doit se faire conformément à des normes (NF P 95 102, NF EN 934-2) et à des recommandations, telles que le Fascicule n°3 du STRRES (Syndicat des entrepreneurs spécialistes des travaux de réparation et de renforcement des structures) et la recommandation de l'ASQUAPRO (Association pour la qualité de la projection des mortiers et bétons) sur la prévention, l'hygiène et la sécurité lors des projections de béton.

NF P 95.102 “ Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – béton projeté ”

NF EN 934-2 “ Adjuvants pour bétons. Définitions, exigences ”

Selon la norme P 84-403, un hydrofuge de classe D1 permet de maintenir l'aspect d'origine du parement de la façade ou de lui donner un aspect peu différent. Cette norme ne définit aucun critère ni spécification.

Selon le projet de norme européenne pr EN 1504-2, une imprégnation hydrophobe du béton est "destinée à produire une surface hydrofuge, caractérisée par le fait que les pores ne sont pas remplis mais seulement couverts. Aucun film ne se forme à la surface et l'aspect n'est pratiquement pas modifié". Cette norme définira des méthodes d'essai avec des spécifications auxquelles devront répondre les hydrofuges.

Nota : se reporter aux différents chapitres du présent guide ; aux différents guides visés par le présent texte, aux fascicules du C.C.T.G... qui donnent des listes de normes et aussi au répertoire des textes et documents techniques essentiels édité par le SETRA et remis à jour tous les ans, au Cd-rom "Noémie" qui donne les textes des normes relatives au génie civil (consulter le SETRA), aux publications de l'AFNOR...

Avertissement :

Un marché public doit faire référence aux normes qui doivent être visées mais seulement lorsqu'elles sont réellement applicables **aux besoins** du marché considéré. En outre, il est nécessaire de faire des choix (classe, niveau...) voire de compléter la norme par des exigences spécifiques. Il est donc indispensable de lire le contenu d'une norme avant de la viser dans un marché quelconque ;

• attention à bien respecter les principes de l'équivalence entre les normes fixés dans les décrets relatifs au statut de la normalisation. Se reporter au rappel du bas de la page 9 dans le préambule du fascicule 65 A du CCTG. Cette clause est intégrée également dans "CAPTDCE" (voir le paragraphe "logiciels" ci-après).

C.C.T.G. :

- le fascicule 65 A et son additif ;
- le fascicule 67 titre 1 étanchéité des ponts routes – support en béton de ciment ;
- le fascicule 67 titre 3 étanchéité des ouvrages souterrains – support en béton de ciment (voir en particulier les étanchéités en film mince adhérent au support à base de résines synthétiques) ;
- le fascicule 74 relatif aux réservoirs en béton ;
- le fascicule 56 protections des ouvrages métalliques contre la corrosion (à adapter)...

Nota : le chapitre 8 de l'additif au fascicule 65A relatif aux peintures sur béton et les différents chapitres du fascicule 67 titre 3 et ses annexes (CCTP type), en particulier l'annexe 5 sur les étanchéités par produits coulés ou projetés, polymérisés ou polymérisables en place, donnent des cadres de rédaction des pièces écrites qui peuvent être utilisés pour les produits de protection.

Guides :

- défauts apparents des parements de béton (LCPC 1975) ;
- mise en œuvre des plans d'assurance de la qualité (SETRA - SNCF - TP de France - SNBATI décembre 1991) (1) ;
- guide pour une démarche d'assurance qualité -- Étude de conceptions et d'exécution ouvrages de génie civil (SETRA - SNCF - SNTP - MFQ 1997) ;
- choix et applications des produits de réparation de protection des ouvrages en béton (LCPC - SETRA août 1996) ;
- protection des bétons armés (LCPC décembre 2002) ;
- Norme Européenne NF EN 12696 (indice de classement A 05-668) “ Protection cathodique de l'acier dans le béton ” Juillet 2000
- méthodologie du contrôle de réparation d'ouvrages d'art - recueil des fiches techniques (consulter les laboratoires membres du réseau technique) ;
- mise en peinture des bétons de génie civil (LCPC 1999) ;
- les systèmes de peinture pour les bétons de génie civil - partie 1 : qualification partie 2 : liste des systèmes de peinture qualifiés pour les bétons de génie civil (LCPC) ;

- guide d'utilisation du fascicule 56 (SETRA - CETE de Normandie - FIPEC – UNPVF 1989);
- STER 81 surfacage, étanchéité et couche de roulement et mise à jour (SETRA 1981) voir en particulier le surfacage et les plaquettes étalons ;
- sous-dossier STER 81 réfection des étanchéités et des couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art ;
- Fascicule n° 3 “ Béton projeté ” du STRRES (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes des travaux de réparation et de renforcement de structures), 1987
- “ Recommandations pour la prévention, l'hygiène et la sécurité lors des projections des mortiers et bétons ” de l' ASQUAPRO.
- “ Marché pour la réparation et les modifications d'Ouvrages d'Art ”
Recommandations du SETRA.

Remarque : (1) ce guide aurait besoin d'un rafraîchissement : suppression des classes de PAQ, calendrier de fourniture des documents à revoir, remise des documents de suivi au fur et à mesure du déroulement du chantier...

Avis techniques :

Etanchéité des ponts routes - avis techniques (SETRA).

Marque N F :

Liste des produits spéciaux destinés aux réparations des ouvrages en béton hydraulique.

Publications :

Maintenance et réparation des ponts (presse ENPC 1997).

Logiciels :

CAPTDCE logiciels de rédaction des pièces de marché (CCTP, BPU...) (consulter le SETRA).