



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie



Département de Génie Civil & Architecture

N° d'ordre : M ...../GCA/2018

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

### *Thème*

*L'IMPACT DE LA CORROSION DES ARMATURES SUR LES  
DEGRADATIONS DU BETON ARME*

Présenté par :

-Ghobrini Mohammed Tadjeddine

-Cheikh Amina

*Soutenu le 11/07/2019 devant le jury composé de :*

**Président** : Mme ELMASCRI Setti

**Examineur** : Mr BOUHALOUFA Ahmed

**Encadreur** : Mr. Kada Bouhadjeb

**Année Universitaire : 2018 / 2019**

# Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre 1 : aspects bibliographiques du PFE

1.1. Introduction a la pathologie .....	3
1.1.1. Définitions et Généralités.....	5
1.1.2. Pathologie de l'acte de construire .....	5
1.1.3. Pathologie de l'art de construire .....	6
1.1.4. Pathologie des ouvrages .....	6
<b>1.2. PATHOLOGIES STRUCTURALES .....</b>	<b>7</b>
1.2.1. DESCRIPTION ET PHENOMENES DES DEGRADATIONS POTENTIELLES .....	5
1.2.2. Les principales causes physiques de la dégradation structurale.....	8
1.2.3. L'origine des dégradations... ..	9
1.2.4. Conséquences techniques et économiques de l'endommagement des structures en béton armé....	13
<b>1.3. Conclusion.....</b>	<b>14</b>

## Chapitre 2: les dégradations affectant le béton armé

<b>2.1. Principales causes et conséquences .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Pathologies d'origine physique .....</b>	<b>15</b>
2.1.1. Retrait.....	15
2.1.2. Ressuage.....	16
2.1.3. Érosion du béton .....	16
2.1.4. Usure (Délamination) .....	17
2.1.5. Dégradations dues aux facteurs de températures extrêmes :.....	18
<b>2.3. Pathologies d'origine mécanique .....</b>	<b>20</b>
2.3.1. Abrasion .....	20
2.3.2. Chocs.....	20
2.3.3. Surcharge .....	21
2.3.4. Désordres dus aux mouvements différentiels des fondations et tassement.....	21
2.3.5. Explosions et événements accidentels .....	22
<b>2.4. Dégradations dues aux agressions chimiques :.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5. Les autres causes de dégradation des bétons :.....</b>	<b>23</b>
2.5.1. Mauvais positionnement des armatures .....	23
2.5.2. Mauvaise qualité des bétons employés .....	23
2.5.3. Vibration trop important .....	24
2.5.4. Cycle humidité / sécheresse .....	24

2.5.5 Cas particulier de l'action de l'eau de mer .....	24
2.5.6 Mise en œuvre : .....	24
<b>2.6. Propriétés du béton et des matériaux .....</b>	<b>25</b>
2.6.1. Influence des propriétés des matériaux entrant dans la fabrication du béton : .....	25
<b>2.7. Les effets des actions naturelles .....</b>	<b>26</b>
2.7.1. La température .....	26
2.7.2. Les effets du vent .....	26
2.7.3. Actions dues aux séismes .....	26
<b>2.9. Actions à caractère accidentel .....</b>	<b>26</b>
2.9.1 Les chocs .....	26
<b>2.10. Défaut d'entretien : .....</b>	<b>27</b>

### **Chapitre 3: influence de la corrosion sur les armatures dans le béton**

<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2. Effet de la corrosivité des milieux en contact avec l'acier .....</b>	<b>29</b>
3.2.1. Corrosivité des milieux en contact avec l'acier : .....	29
3.2.2. Corrosivité des eaux .....	30
3.2.3. Corrosivité des sols .....	30
3.2.4. Corrosivité des bétons .....	31
<b>3.3. Les types de corrosion .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4. LES OUVRAGES ET ELEMENTS CONCERNES PAR LA CORROSION DES ARMATURES : .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5. LA CORROSION DES ACIERS DANS LE BETON : .....</b>	<b>36</b>
3.5.1 Présentation générale : .....	36
3.5.2. Processus de la corrosion : .....	37
3.5.3. Les étapes de la corrosion des armatures : .....	38
3.5.4. La dépassivation des armatures : .....	39
3.5.5. La carbonatation .....	40
3.5.6. Les ions chlorures .....	44
3.5.7. Dégradation du béton d'enrobage .....	46
<b>3.6. Facteurs influents de la corrosion .....</b>	<b>47</b>
3.6.1. Influence de la composition du béton : .....	48
3.6.2. Influence de l'humidité : .....	48
3.6.3. Influence de l'enrobage : .....	48

<b>3.7.CONSEQUENCES DES DESORDRES PROVOQUES PAR LA CORROSION DES ARMATURES</b> .....	<b>51</b>
3.7.1.La sécurité vis-à-vis des usagers :.....	51
3.7.2.La stabilité de l'ouvrage : .....	51
<b>3.8. CONCLUSION</b> .....	<b>52</b>

### **Chapitre4 : Protection et réhabilitation des armatures dans le béton**

<b>4.1.Introduction</b> .....	<b>53</b>
4.1.1.Moyens de lutte contre la corrosion:.....	53
4.1.2.Protection contre la corrosion des armatures dans le béton: .....	57
<b>4.2. La réhabilitation des ouvrages contre la corrosion</b> .....	<b>59</b>
4.2.1. Démarche à suivre pour réhabiliter un ouvrage en béton armé dont les armatures sont corrodées.....	59
<b>Conclusion</b> .....	<b>61</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>6</b>

## *Listes des figures*

### **CHAPITRE 1 : ASPECTS BIBLIOGRAPHIQUES DU PFE**

Figure 1.1: Causes physiques de la détérioration du béton.....	9
Figure 1.2 : Exposition du béton dans un environnement marin.....	10
Figure 1.3:Principales causes des problèmes de durabilité des structures de béton.....	11
Figure 1.4 : schéma du processus d'élaboration et de mise en service d'un ouvrage en béton armé.....	11
Figure 1.5: Contamination par les sels de déglacage.....	12
Figure 1.6: Pénétration des chlorures dans une poutre caisson.....	12
Figure 1.7: UN Pont à tablier continu.....	13

### ***Chapitre 2 : les dégradations affectant le béton armé***

Figure 2.1: fissuration et contamination par les chlorures d'une poutre caisson.....	16
Figure 2.2: Ressuage du béton.....	16
Figure 2.3 : érosion du béton.....	17
Figure 2.4:Délamination d'une dalle.....	17
Figure 2.5:Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou.....	18
Figure 2.6: béton après un incendie.....	19
Figure 2.7: Action du gel dans les fissures du béton.....	19
Figure 2.8: Abrasion du béton.....	20
Figure 2.9: Choc sur une glissière de sécurité et une pile de pont.....	21
Figure 2.10: fissuration et éclatement du béton sous charges trop importantes.....	21
Figure2.11 : Tassements d'un fut de fondation.....	22
Figure 2.12: Ressuage du béton après vibration.....	25

### ***Chapitre3 : influence de la corrosion sur les armatures dans le béton***

Figure 3.1: Effets de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées.....	28
Figure3.2 : Palplanche en acier.....	31
Figure3.3 : Corrosion d'armatures avec éclatement du béton.....	32
Figure3.4 : Armature corrodée avec réduction de la section utile.....	32
Figure 3.5: Eclats en formation.....	34
Figure 3.6: poutre support de réservoir.....	34
Figure 3.7: pile de pont.....	35
Figure 3.8: Pile en zone de marnage.....	36
Figure 3.9: Tuyau en béton armé.....	36

Figure 3.10 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton.....	37
Figure3.11 : Les étapes de la corrosion des aciers dans les bétons, Induite par des agents agressifs.....	37
Figure3.12: diagramme de la détérioration du béton.....	39
Figure 3.12: Principe de la réaction chimique aboutissant la formation de rouille.....	40
Figure 3.14: Exemple d'échantillon carbonaté .....	41
Figure 3.15: Éclatement du béton dû à la carbonatation.....	41
Figure 3.16: les différentes dégradations d'éléments structuraux d'origines diverses.....	42
Figure 3.17: Schéma de principe de la formation de la carbonatation.....	43
Figure 3.18: La progression de la carbonatation.....	44
Figure 3.19: Mise en évidence de la carbonatation de la matrice cimentaire des échantillons de béton des poutres de la structure porteuse.....	44
Figure 3.20: Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure.....	45
Figure 3.21: Corrosion par piqûres liées aux chlorures.....	46
Figure 3.22: Exemples de dégradations dues à la corrosion des armatures.....	47
Figure 3.23: Insuffisance d'enrobage .....	49
Figure 3.24: types de fissures développées lors de la corrosion des aciers.....	50
Figure 3.25: types de dégradations favorisées par l'insuffisance de l'enrobage.....	50
Figure 3.26: Décollement du parement du pilier et fissuration du chevêtre .....	51
<b>Chapitre4 : Protection et réhabilitation des armatures dans le béton</b>	
Figure 4.1 : Revêtements métalliques.....	55
Figure 4.2: Protection cathodique par courant imposé.....	58
Figure 4.3: Diagramme de Pourbaix simplifié du système fer/eau.....	59

*Liste des tableaux*

***CHAPITRE 1 : ASPECTS BIBLIOGRAPHIQUES DU PFE***

Tableau 1-1: Principales dégradation en fonction des conditions climatiques ..... 10

***Chapitre4 : Protection et réhabilitation des armatures dans le béton***

Tableau 4-1: Types de revêtements..... 53

## *Introduction générale*

La durabilité des constructions en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent résister à ces agressions, des désordres dont le plus fréquent est la corrosion des armatures apparaissent dans le béton de ces structures. Ces désordres sont généralement dus à des défauts de conception, à une mauvaise mise en œuvre ou à des causes accidentelles ; ils hypothèquent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation, leur ruine.

Bien conçu et mis en œuvre suivant les règles de l'art, le béton offre aux armatures une protection à la fois physique et chimique. L'enrobage assure la protection physique en jouant un rôle de barrière vis-à-vis de l'environnement. Sa qualité (compacité, teneur en ciment, imperméabilité, etc.) et son épaisseur (3cm en milieu non agressif et 5cm en milieu marin) sont des facteurs essentiels à la bonne tenue des armatures face à la corrosion.

L'alcalinité élevée du béton assure la protection chimique en recouvrant, selon le phénomène de passivation, les armatures d'un film extrêmement mince d'hydroxyde de fer. Mais, en présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, le dioxyde de carbone etc. La corrosion pourrait donc apparaître avec comme conséquences la réduction des sections d'acier et formation de rouille, dont le volume, aux moins deux supérieur à celui du fer initial, entrainera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

Des études faites à travers le monde montrent que la corrosion des armatures est le principal responsable de la dégradation des ouvrages en béton armé et absorbe la plus grande partie des ressources financières destinées aux activités d'entretien et de renouvellement des ouvrages de génie civil; ceci est la preuve que ce phénomène doit être pris très au sérieux. Que de nombreux ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures exigent de nouvelles interventions peu de temps seulement après

qu'ils aient été réparés pour la même raison a attiré notre attention et nous a amené à penser que la corrosion qui fait tant de mal à nos ouvrages en béton armé n'est pas traitée avec tout le sérieux qui doit lui être dû. Plusieurs raisons peuvent être mises en cause :

- la méconnaissance du phénomène de la corrosion et de la démarche à suivre pour résoudre les problèmes de corrosion.
- beaucoup de techniciens chargés du contrôle et de l'entretien, ne procèdent pas au préalable à des investigations sérieuses pour évaluer l'ampleur des dégâts dans la structure avant d'engager des travaux de réparation.
- certains se contentent uniquement de l'apparition des dégradations visuelles sur l'ouvrage telles que : les tâches de rouille, les infiltrations d'eau, l'éclatement du béton, les fissures...

Pour connaître l'effet de la corrosion, les ouvrages en béton armé et sur leur dégradations, définir les causes et trouver le moyens adéquats pouvant remédier au problème et prévoir une réhabilitation efficace et durable, nous avons opté pour notre mémoire de fin d'étude, pour une étude d'initiation à une recherche bibliographique, sur le thème «*Synthèse bibliographique sur l'impact de la corrosion des armatures sur les dégradations du béton armé*». Les objectifs visés par notre recherche bibliographique sont :

Les conséquences qui en découlent sont la non détection des dégradations cachées qui vont se propager avec le temps, le risque de baser les travaux sur un concept erroné, la mauvaise évaluation des couts des réparations.

## **PLAN DU MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Quatre chapitres seront présentés dans ce mémoire.

Le premier chapitre porte sur les aspects bibliographiques pathologiques ayant effet sur les pathologies des constructions et leur durabilité.

Le deuxième chapitre présente une revue non exhaustive des principales dégradations du béton et sur leurs origines.

Le troisième chapitre soulève l'influence de la corrosion sur les armatures dans le béton.

En fin Le quatrième chapitre expose protection et réhabilitation des armatures dans le béton

# ***CHAPITRE 1 : ASPECTS BIBLIOGRAPHIQUES DU PFE***

## **1. 1.Introduction a la pathologie :**

Dans toutes les études d'ouvrages en génie civil, les codes et règlements de calcul offrent un coefficient de sécurité important allant dans le sens de la sécurité. Il en résulte théoriquement que l'effondrement d'un ouvrage est un phénomène rare. Tout ouvrage bien conçu, doit alors supporter, sans faiblir, les charges auxquelles il est soumis.

Pourtant, de nombreux ouvrages, ne manquent pas de poser le problème de sinistralité. Les mêmes problèmes réapparaissent régulièrement dans des ouvrages comparables placés dans des conditions semblables. Ceci donne à penser que la sinistralité résulte de l'emploi involontaire mais répété de dispositifs de construction inappropriés, de méthodes de conception ou d'exécution mal adaptés ou des deux à la fois. Cet état de fait est souvent le résultat d'absence de coordination entre les différents actants de la construction.

Aussi, les problèmes ne surgissent souvent qu'au bout de quelques années et à ce moment là, les responsables risquent d'avoir changé d'activité ou de ne plus pouvoir traiter de la question pour des raisons quelconques.

### **C'est là le problème !**

Ce qui est pratiquement inévitable dans un sens, n'implique pas la réciproque dans l'autre.

Des prix bas poussent nécessairement à revoir les prestations à la baisse en faisant l'économie de la qualité. Mais dans l'autre sens les prix plus élevés, voir intéressants, n'impliquent pas la révision des prestations à la hausse !

Dans le premier cas c'est la nécessité économique qui fait loi, dans le second c'est la satisfaction et donc c'est l'image de marque et par conséquent la fidélisation du client qui est en jeu.

**Que faire ? Serions-nous en face d'un mal incurable ? Et ce malgré les progrès de la science du bâtiment et le développement de la technologie de construction des ouvrages.**

L'une des voies à suivre est le développement de véritables démarches de prévention des désordres. Connaître en fait les composantes de la prévention c'est d'abord passer par la connaissance de la pathologie.

La logique de la prévention est donc simple en théorie: Il faut procéder à l'analyse des causes de la pathologie en vue de promouvoir des actions capables d'éviter le renouvellement des mêmes erreurs.

Aussi, la description de pathologies potentielles, qu'il s'agisse de problèmes liés aux études de conception architecturale et technique ou lors de l'exécution des travaux de réalisation, pouvant être détectés avant la réception des ouvrages et la mise en jeu des garanties apporte une contribution certaine à la prévention des désordres.

### **1.1.1 Définitions et généralités :**

**Pathologie** : ce terme est depuis peu utilisé en construction en génie civil. L'étude des désordres et surtout l'étude statistique, systématique et ordonnée des désordres et des sinistres sont en effet, relativement récents.

La signification de ce terme issu de la science médicale est la suivante :

D'après le Robert: « Science qui a pour objet l'étude et la connaissance des causes et symptômes des maladies ».

Si l'on applique cette définition aux constructions en béton armé, les maladies seraient les désordres qui, en s'aggravant, donnent lieu à des sinistres ; ces derniers pouvant conduire à la ruine des ouvrages.

D'après le Littré: « Science qui traite de tous les désordres survenus soit dans la disposition des organes, soit dans les actes qu'ils remplissent ».

La transposition de ce terme aux ouvrages est assimilable à la notion de transformation, réparations après désordres ou sinistres et, à la limite, reconstruction.

**Désordre** : On peut retenir :

- d'après le Robert : « Altération, perturbation, trouble ».

- d'après le Littré : « Dérangement, dérèglement, vice, perturbation, trouble »

**Vice** : d'après le Robert, la définition de ce mot est plus proche de : défaut, imperfection grave, défectuosité.

Le terme 'vice de construction' est très usité. Mais, il s'applique surtout aux ouvrages neufs, plus qu'aux ouvrages dégradés par l'usage ou les agents extérieurs. Comme pour le terme 'pathologie' on trouve des analogies avec la médecine : vice de constitution.

Le Littré parle aussi de vice rédhibitoire et vice caché.

### **Sinistre :**

- d'après le Robert : « événement catastrophique naturel qui occasionne des dommages, des pertes... » ,
- d'après le Littré : « pertes et dommages qui arrivent aux assurés surtout en cas d'incendie, de naufrage... ».

Ce terme est couramment utilisé en matière d'assurance. C'est en fait l'aggravation des désordres qui conduit aux sinistres et éventuellement à la ruine partielle ou totale d'un ouvrage.

D'après le Robert, « Remèdes » désigne « tout ce qui est employé au traitement d'une maladie ».

Un terme analogue est proposé est celui de « solution ».

**Ruine** : d'après le Robert, une ruine est la « grave dégradation d'un édifice allant jusqu'à l'écroulement partiel ou total ».

Le Littré donne une autre définition : « destruction d'un bâtiment qui tombe de lui même ou que l'on fait tomber ».

En d'autres termes, la ruine constitue l'état ultime, limite ou final d'une construction ou d'un ouvrage après destruction partielle ou totale.

«Tomber en ruine » signifie « crouler, s'effondrer ». Il y a donc aggravation des dommages puisque l'on arrive à l'effondrement ou à la destruction totale ou partielle de l'ouvrage.

**Réparation** : ce terme correspond aux opérations nécessaires au maintien de l'ouvrage après sa construction. On peut distinguer deux types de réparations : petites et grosses.

**Restauration** : les travaux de restauration visent à remettre un bâtiment ou un ouvrage dans son état originel du fait de son intérêt architectural ou historique.

**Réhabilitation** : les travaux de réhabilitation visent à la fois à conforter un bâtiment et à le remettre en état en le dotant des éléments de confort moderne :

- Apport d'isolation thermique.
- Modernisation des installations intérieures (réseaux : électricité, chauffage, fluides, sanitaire).

**Ruine** : d'après le Robert, une ruine est la « grave dégradation d'un édifice allant jusqu'à l'écroulement partiel ou total ».

Le Littré donne une autre définition : « destruction d'un bâtiment qui tombe de lui même ou que l'on fait tomber ».

En d'autres termes, la ruine constitue l'état ultime, limite ou final d'une construction ou d'un ouvrage après destruction partielle ou totale.

« Tomber en ruine » signifie « crouler, s'effondrer ». Il y a donc aggravation des dommages puisque l'on arrive à l'effondrement ou à la destruction totale ou partielle de l'ouvrage.

### **1.1.2 Pathologie de l'acte de construire :**

L'acte de construire est universel, il dépasse le cadre des pays et des époques et s'adapte aux besoins spécifiques des populations en fonction de leurs besoins, de leurs modes de vie et de leurs ressources [1].

Il consiste en effet, à assembler des matériaux totalement disparates: pierres, béton, briques, bois, plâtre, plastiques, textiles, papier, peinture, etc., destinés à cohabiter dans un même environnement, afin d'abriter les hommes. Ces matériaux réagiront sur l'environnement, et les uns sur les autres. Les hommes aussi.

### **1.1.3. Pathologie de l'art de construire :**

Le 20<sup>ème</sup> siècle, ayant subi deux guerres mondiales (grands conflits destructeurs) et des crises économiques à répétition, est entré dans une phase de construction indigente où tout est prétexte à l'économie (tendance accentuée par l'apparition de l'actuelle crise économique mondiale). Les exigences de confort de l'habitation augmentent, par conséquent l'on tente de promouvoir la qualité. Cependant la qualification professionnelle des entreprises est gravement compromise par une insuffisance de formation et d'autres phénomènes tels que la sous-traitance en cascade.

L'art difficile de l'architecte, dans son rôle de concepteur, consiste à créer pour l'homme un environnement matériel et social adapté à ses aspirations, et dans lequel il fait bon vivre.

Il existe d'abord une pathologie de l'architecture parce que l'homme évolue et la construction est faite pour durer. L'architecte doit percevoir les aspirations futures de l'occupant et non pas se contenter de ses aspirations présentes. L'architecte doit ensuite construire selon le budget qui lui est alloué, et le drame est alors en lui même, car il doit abandonner un certain nombre d'idées relatives à une conception confortable pour la sacrifier à l'économie abusive du moment : il faut coûte que coûte rester dans les prix plafonds réglementaires ou permettre au promoteur de présenter des prix d'achat concurrentiels, sous-estimant parfois les coûts d'exploitation et d'entretien. Et l'on paye parfois chèrement certains choix imposés.

C'est ainsi que tout les parcs d'ouvrages d'art et de logements sont pour la majorité des cas très dépréciés : problèmes techniques, dégradations des éléments des structures, ambiance concentrationnaire, vétusté, monotonie ou laideur structures ou de leurs façades, infiltration d'eau, isolations thermiques et phoniques insuffisantes.

#### **1.1.4. Pathologie des ouvrages :**

En construisant, l'homme fait intervenir les lois de la nature à son profit. C'est tout au moins ce qu'il cherche, mais il ne les maîtrise pas toujours, soit qu'il ait sous-estimé l'importance de certaines d'entre elles, soit qu'il les ait totalement oubliées ou ignorées.

Les matériaux subissent dans leurs environnement : des actions mécaniques de la pesanteur et du vent, des actions hygrothermiques et chimiques de l'air environnant ainsi que des matières agressives.

Dans les calculs classiques de résistance, on néglige généralement un certain nombre de phénomènes, considérés comme secondaires, ou on en tient compte d'une manière forfaitaire. Parmi ces phénomènes, on peut citer :

### **a. actions mécaniques :**

C'est ainsi qu'on ne calcule pas (sauf exception) la valeur :

- 1- Des moments de flexion exercés dans les éléments par leur rotation aux appuis.
- 2- Des longueurs de flambement des poteaux portant des planchers superposés.
- 3- Des tassements différentiels entre semelles de fondation grandeur différentes, bien qu'exerçant sur le sol la même pression.

On se limite aussi, autant que possible aux calculs unidirectionnels (poutres), voire bidirectionnels (portiques), passant très rarement au tri directionnel à l'aide d'ordinateurs et de programmes dans lesquels il faut alors introduire un grand nombre de cas de chargement et dont les résultats prend vite l'aspect inextricable. Et pourtant la nature demeure à trois dimensions, et l'état de chacune d'elles réagit sur les deux autres.

L'eau, sous ses trois aspects : vapeur, liquide et glace, à une très grande influence en pathologie.

### **b. actions hygrothermiques :**

Chaque matériau possède un équilibre qui lui est propre vis-à-vis l'état hygrométrique et de la température de l'air environnant. Il tend vers cet équilibre, plus ou moins lentement et modifie son évolution quand l'ambiance évolue.

D'une manière générale, les matériaux augmentent de volume avec l'augmentation de leur teneur en eau et leur température et diminuent de volume dans le cas contraire.

La chaleur agit de deux manières : en dilatant par effet thermique et en diminuant l'humidité relative de l'air ambiant entraînant une réduction de teneur en eau des matériaux et un retrait.

Le béton fraîchement coulé est gorgé d'eau et en séchant, il perd son eau et accuse un retrait. L'humidité accompagnée de la chaleur favorise le développement d'organismes végétal, animal ou microbien.

### **c. actions chimiques et biologiques :**

Ce phénomène entraîne pour certains matériaux des dégradations.

Les calcaires peuvent se désagréger en milieux nitrurés.

La cohabitation des matériaux présentent des lois de comportement différentes et sont capables de s'altérer les uns les autres en causant certains désordres.

## **1.2. Pathologies structurales :**

### **1.2.1. Description et phénomènes des dégradations potentielles :**

#### **Bref historique des problèmes de durabilité :**

Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état.

Il existe aussi de très nombreux cas où une mauvaise durabilité a provoqué la ruine complète ou partielle des ouvrages.

#### **Les principales causes:**

À une certaine époque, on ne connaissait pas tous les mécanismes de destruction et les façons d'éviter les détériorations.

- Gel-dégel
- Réactions alcalis-granulats
- Corrosion

On accordait trop d'importance à la résistance à la compression et pas assez aux facteurs environnementaux (on ne devrait pas concevoir un stationnement extérieur en béton de 20MPa).

Une partie des échecs peut aussi être associée l'évolution de la technologie de fabrication et de la performance des ciments. La performance des ciments progresse constamment et on peut atteindre une résistance donnée en utilisant un rapport E/C toujours de plus en plus élevé.

En 1945, pour obtenir 33 MPa on devait utiliser 380 kg/m<sup>3</sup> de ciment et un E/C de 0,47.

En 1978, seulement 250 kg/m<sup>3</sup> de ciment peuvent suffire avec un E/C de 0,72 !

En termes de résistance, ces deux bétons sont équivalents. Leur durabilité est cependant complètement différente.

La réactivité chimique des ciments était plus faible (MPa en réserve)

Il n'y avait pas de fluidifiants ni de super plastifiants (on devait utiliser plus de ciment par m<sup>3</sup> !)

Le contact n'est pas toujours adéquat entre les chercheurs, les concepteurs et les propriétaires d'ouvrage. Les recommandations touchant à la durabilité n'atteignent souvent pas les bonnes personnes en raison des trois solitudes du monde de la construction: Les responsables des matériaux, les concepteurs et les ingénieurs de chantier.

Pour obtenir un ouvrage durable, il faut :

- Utiliser un matériau durable.
- Concevoir la structure en fonction des facteurs environnementaux.
- Exercer un bon contrôle de la qualité des matériaux et des techniques de construction.

### **1.2.2. Les principales causes physiques de la dégradation structurale :**

Ont regroupé les principales causes physiques de détérioration des structures de béton (Fig1.1) en deux grandes catégories [2][3]:

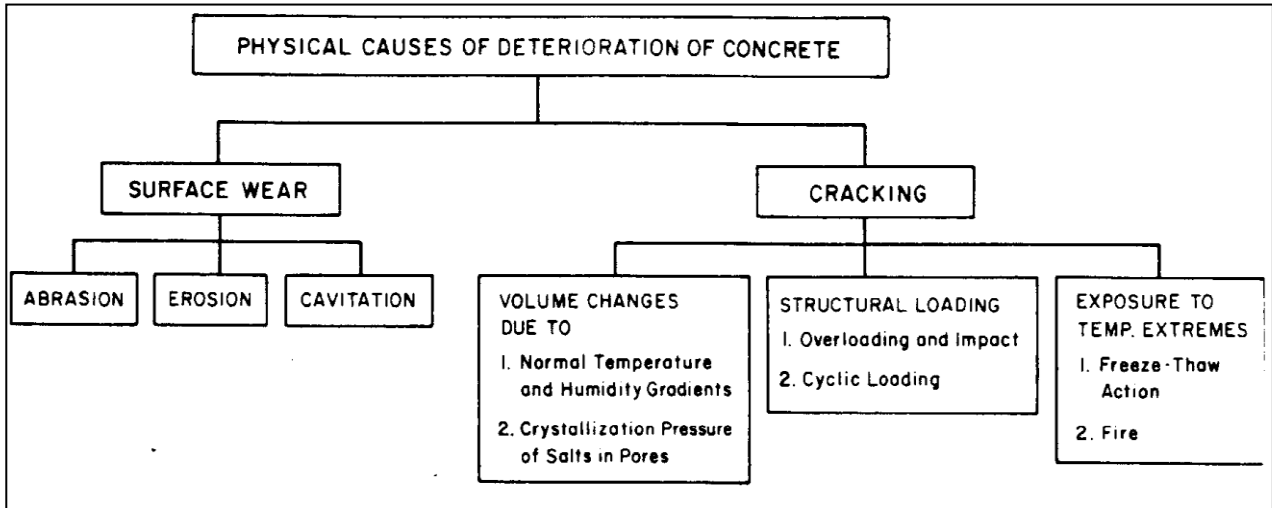
#### **A) Dégradations de surface**

- Abrasion.
- Érosion.
- Cavitation.
- Écaillage.

#### **B) Fissuration interne :**

- Gradients d'humidité ou de température.
- Pressions de cristallisation.
- Chargement structural.

- Exposition aux températures extrêmes : Gel – Feu.



**Figure 1.1: Causes physiques de la détérioration du béton**

### 1.2.3. L'origine des dégradations :

#### Les facteurs climatiques et environnementaux :

Il est clair qu'une structure de béton évoluera de manière très différente en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition face aux agents potentiellement agressifs.

Par exemple, un béton de 20 MPa sans air entraîné ( $E/C = 0,6$ ) pourrait être acceptable pour fabriquer un trottoir ou un parapet de pont à Mexico.

Pendant dans un climat beaucoup plus rude (Montréal par exemple !), il serait totalement inacceptable d'utiliser un tel béton dans ce type d'ouvrage.

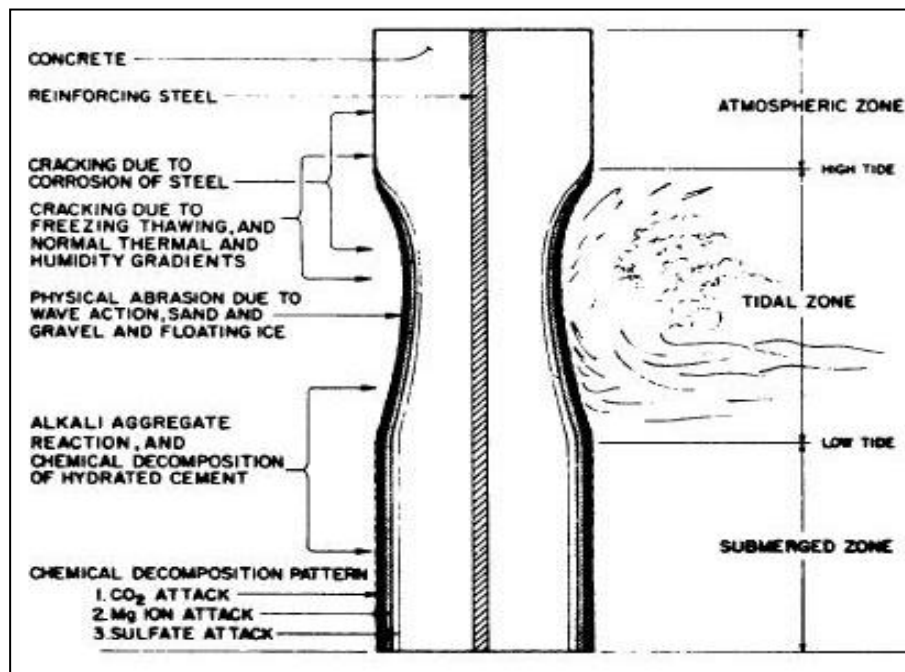
Dans les climats chauds et secs, les problèmes de durabilité sont beaucoup plus rares. Les exigences touchant à la qualité du béton y sont généralement moins sévères.

Pas de gel, peu de précipitations, pas de sels de déglçage, peu d'écart thermique, etc. On retrouve parfois des cas de dégradation par des eaux agressives (eau souterraine, eau de mer) [4].

Les différents mécanismes à la source des dégradations sont très souvent en fonction des conditions climatiques et du type d'exposition du béton (Tableau 1.1).

**Tableau 0-1: Principales dégradation en fonction des conditions climatiques**

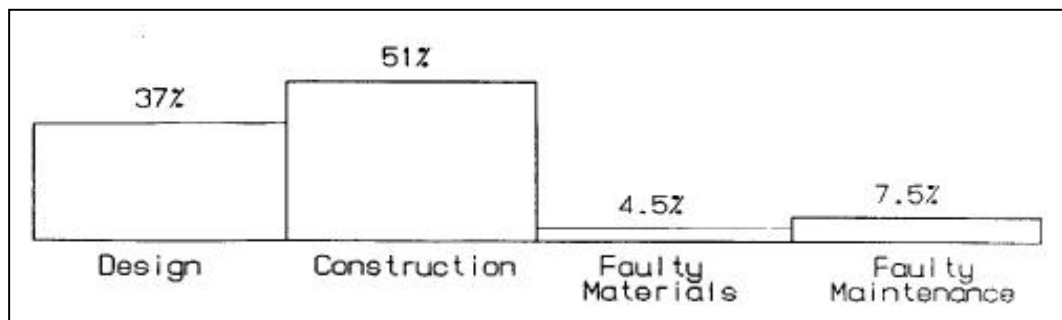
<b>Climat tempéré froid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cycles de gel-dégel et taux d'humidité élevé</li> <li>• Fissuration interne due au gel-dégel</li> <li>• Écaillage dû aux sels fondants</li> <li>• Corrosion des armatures</li> <li>• Réactions alcalis-granulats</li> </ul>
<b>Climat tempéré chaud et humide</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attaque par les eaux agressives</li> <li>• Réactions alcalis-granulats</li> </ul>
<b>Climat sec</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbonatation</li> </ul>
<b>Environnement marin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attaque par l'eau de mer (sulfates)</li> <li>• Corrosion des aciers d'armature</li> <li>• abrasion par les glaces</li> <li>• Détérioration par les cycles de gel-dégel</li> </ul>



**Figure 1.2 : Exposition du béton dans un environnement marin**

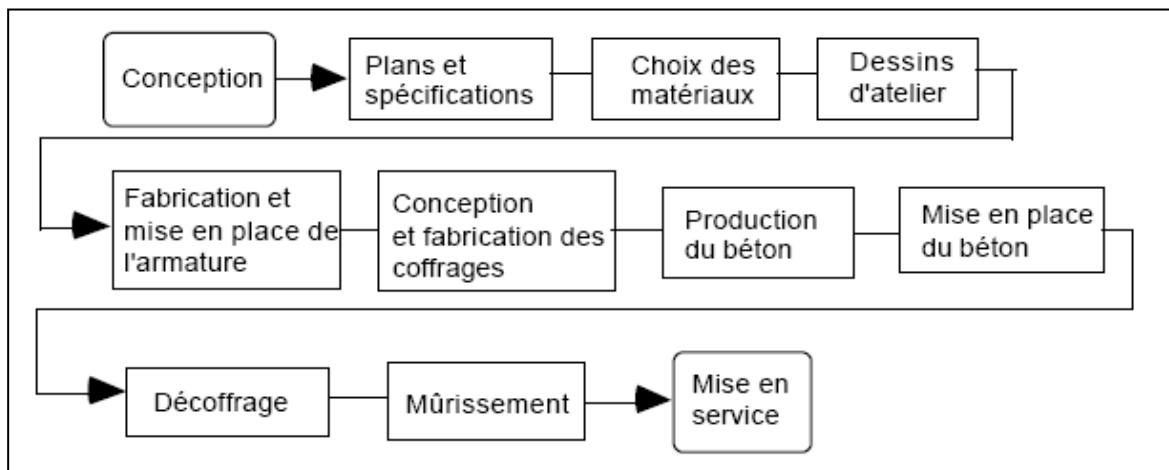
En plus des facteurs climatiques et environnementaux, les dégradations qui affectent les ouvrages en béton peuvent avoir plusieurs autres origines. On peut généralement regrouper ces autres facteurs en quatre grandes familles (Fig1.3) [5] [6].

- 1) Les facteurs reliés à la conception de l'ouvrage.
- 2) Les facteurs reliés à la mise en œuvre de l'ouvrage.
- 3) Les facteurs reliés aux caractéristiques des matériaux et du béton.
- 4) Les facteurs reliés à l'entretien de la structure.



**Figure 1.3:Principales causes des problèmes de durabilité des structures de béton**

Le processus qui mène de la conception à la livraison finale des ouvrages peut être relativement complexe. Le cas d'une structure de béton par exemple (Fig1.4)



**Figure 1.4 : schéma du processus d'élaboration et de mise en service D'un ouvrage en béton armé**

#### **A. Conception des structures :**

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

- En choisissant des critères de conception appropriés on peut diminuer considérablement le stress environnemental sur la structure.

Exemple: Dans le cas d'un pont routier (Fig1.5 et 1.6), il est important de prévoir un drainage adéquat pour limiter les accumulations d'eau et de sels fondants. Il faut aussi prévoir un recouvrement de béton suffisant pour offrir une bonne protection contre la corrosion des aciers d'armature.

Parmi les principaux critères de conception qui contrôlent la durabilité d'une structure de béton on retrouve [7] [8] :

- Tous les aspects liés au système de drainage et d'évacuation des eaux (pour diminuer les problèmes de gel-dégel et d'écaillage)
- Le calcul des aciers d'armature et le choix de l'épaisseur de recouvrement des armatures (corrosion).
- Le choix des enduits protecteurs ou des imperméabilisants

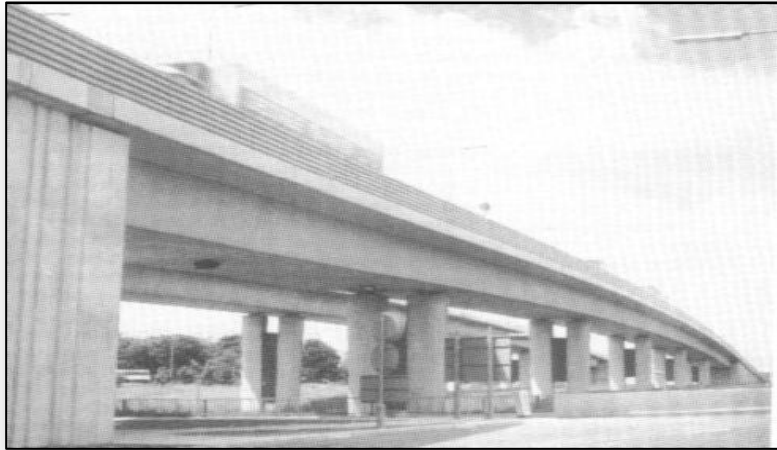
- Le choix d'une géométrie particulière de la structure qui permettrait de diminuer le stress environnemental (forme et disposition des colonnes et des poutres).



**Figure 1.5: Contamination par les sels de dégivrage**



**Figure 1.6: Pénétration des chlorures dans une poutre caisson**



**Figure 1.7: Un Pont à tablier continu**

#### **1.2.4. Conséquences techniques et économiques de l'endommagement des structures en béton armé :**

Le monde fait face à des sérieux problèmes de durabilité du béton qui affectent un très grand nombre de structures et tout particulièrement celles qui sont associées au réseau routier (ponts).

D'autres types de structures sont aussi affectés

- Barrages.
- Tunnels.
- Réservoirs.
- silos.
- Produits de béton : pavés, tuyaux, regards d'égout, etc.

Aux États Unis seulement, on estime que les coûts de réparation des structures de béton armé endommagées avoisinent de 54 milliards de dollars.

Chaque année, c'est environ 600 millions de dollars supplémentaires qui s'ajoutent à cette liste.

C'est par centaine qu'on peut compter les structures ou les parties de structures (ponts, ponceaux, viaducs, tabliers de pont et trottoirs, stationnements multi étagés) qui doivent être réparés ou reconstruits en raison de leur état avancé de détérioration.

Dans la majorité des cas, on pourrait démontrer que les coûts de réparation et d'entretien des structures endommagées en viennent rapidement à dépasser les coûts initiaux de construction.

Dans certains pays d'Europe (en particuliers en France, Allemagne et Italie), le service d'entretien du Ministère des transports réservent plus de la moitié de leurs budgets pour l'entretien des structures en béton dont l'endommagement est relié à la corrosion des aciers d'armature.

Au Canada, on estime à environ cinq milliards de dollars le coût de réparation des stationnements multi étagés urbains affectés par des problèmes de corrosion

Il y a aussi l'effet sur la qualité de vie des usagés du système routier et sur l'activité socio - économique de toute une région.

-Interruption de la circulation.

-Réduction de la capacité de service.

-Retards.

-Embouteillages.

-Baisse de la performance du transport en général.

### **1.3. Conclusion :**

La durabilité d'un ouvrage est liée à une qualité de construction sans faille.

C'est une chaîne qui part du concepteur qui doit connaître les limites du matériau, passe par le calculateur qui doit connaître les règles de dimensionnement et s'intéresser à l'élaboration de plans allant au détail de toutes les opérations de fabrication et de réalisation.

Elle touche ensuite tous les corps de métiers : coffreur, ferrailleur, bétonnier, personnel de chantier qui doivent chacun en prendre soin jusqu'à la réception par l'utilisateur qui doit l'entretenir par des opérations de maintenance.

Si l'un des maillons de la chaîne est défaillant, la chaîne est alors défaillante. Ainsi, l'imperfection de plusieurs maillons a aussi un effet cumulatif.

## ***CHAPITRE 2 : LES DEGRADATIONS AFFECTANT LE BETON ARME***

### **2.1. Principales causes et conséquences :**

Le béton est un formidable matériau de construction. Cependant, au cours du temps, il peut être amené à se dégrader.

Les dégradations peuvent être d'ordre mécanique, à la suite de chocs, de vibration, d'affaissement géotechniques ... Ces dégâts se traduisent souvent par l'apparition de fissures ou d'éclats qu'il convient de repérer et d'identifier.

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

### **2.2. Pathologies d'origine physique :**

Par dégradations physiques, on entend l'ensemble des causes qui peuvent provoquer l'éclatement du béton comme, par exemple :

- le retrait.
- le ressuage.
- l'érosion.
- l'exposition répétée à des cycles gel-dégel.
- l'usure.
- les phénomènes thermiques, y compris les incendies.

#### **2.2.1. Retrait :**

Le retrait est un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein du béton et qui se développe sous diverses formes depuis la prise du béton jusqu'à son vieillissement.

Il correspond à l'action du départ de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur de l'élément de structure. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle.

Les différents types de fissures de retrait peuvent être classés, suivant leur ordre chronologique d'apparition, en trois types :

**Fissures apparaissant une ou deux heures après le bétonnage :** Ces fissures sont provoquées par le tassement du béton frais. Elles sont relativement profondes et ouvertes et affectent les surfaces horizontales provoquant un gradient vertical de l'ensemble des caractéristiques physiques et mécaniques.

**Fissures apparaissant juste après le décoffrage :** Ces fissures affectent aussi bien les surfaces horizontales que les parements verticaux. Ces fissures sont généralement fines et peu profondes, mais elles peuvent être plus ouvertes lorsque le retrait thermique en est la cause.

**Fissures apparaissant plusieurs jours ou plusieurs mois après le décoffrage :** ces fissures sont créées par le retrait à long terme. Ce retrait résulte du départ de l'eau en raison de la mise en équilibre hygrométrique de la structure en béton avec son milieu extérieur [9] [10].



**Figure2.1: fissuration et contamination par les chlorures d'une poutre caisson.**

### **2.2.2. Ressuage :**

Le ressuage correspond à l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la face supérieure du béton frais. Il peut aussi se manifester en dessous des barres d'armature horizontales situées au voisinage de la face supérieure.

Ces barres constituent des points fixes qui gênent le tassement, ce qui engendre la création des fissures qui pénètrent jusqu'au lit d'armatures. [11]



**Figure 2.2: Ressuage du béton**

### **2.2.3.Érosion du béton :**

Malgré sa résistance mécanique, le béton reste un matériau qui peut être fragilisé par son environnement. Le vent, par son action battante, L'eau de pluie par son écoulement, l'action des cours d'eau et de l'eau de mer conduisent t à l'érosion du béton. Ceci réduit l'enrobage des armatures et facilite la pénétration des agents agressifs.

**Érosions :** Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement (Fig2.3).



**a) Béton sans érosion**



**b) Béton avec érosion**

**Figure 2.3 : érosion du béton**

#### **2.2.4. Usure (Délamination) :**

La Délamination du béton apparaît lorsque celui-ci est durci et se produit par une action de l'air et l'eau en trappés sous une surface donnée d'un béton et provoquant la séparation d'une partie du béton variant de quelques centimètres à quelques mètres carrés. Le plan de séparation se situe souvent dans le béton et non plus entre la couche d'usure et le béton. Elle est causée par de l'eau de ressuage ou par des bulles d'air piégées sous une surface de béton ou de mortier. Des zones plus faibles sont ainsi créées et l'action intensive de la circulation et du retrait provoquent alors la Délamination de cette couche superficielle.

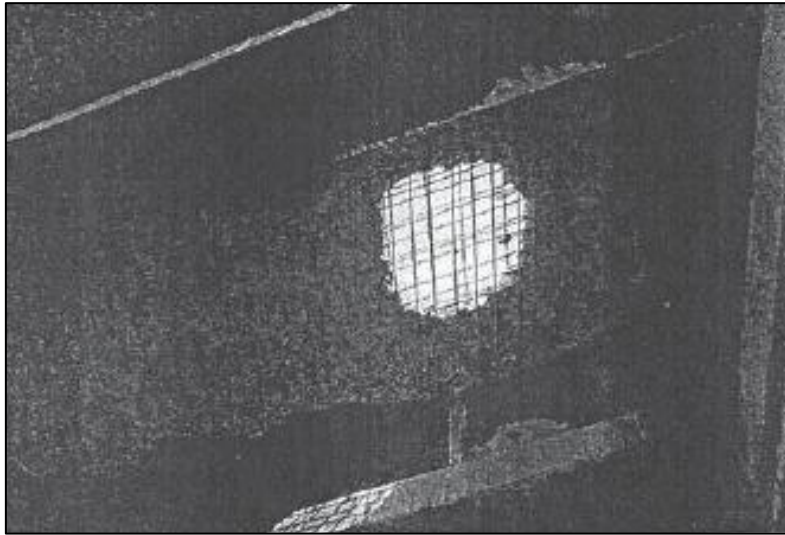
Si l'eau et l'air peuvent se dégager avant que la surface du béton ne soit complètement étanchée, la Délamination a peu de chance de se produire.

Par contre, si le béton est visqueux, les bulles d'air et l'eau auront des difficultés à s'en échapper. La teneur en air du béton joue également un rôle prépondérant : les bétons contenant plus de 3 % d'air entrainé sont en effet sensibles à la Délamination.



**Figure 2.4:Délamination d'une dalle**

Dans le cas des ponts par exemple, l'action conjuguée des sollicitations climatiques, des sels anti-verglas et du trafic circulant directement sur le béton des hourdis de ponts a provoqué des délaminations du béton sur un nombre considérable d'ouvrages d'art. Dans les cas les plus graves, cette pathologie aboutit à la chute de plaque de béton et à la création de trous dans les tabliers de ponts.



**Figure 2.5: Délamination du béton d'un hourdis de pont aboutissant à la formation d'un trou**

#### **2.2.5. Dégradations dues aux facteurs de températures extrêmes :**

##### **a) Le Feu :**

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

Le béton est un matériau qui présente un bon comportement lorsqu'il est soumis à des hautes températures.

Et c'est l'une des raisons pour lesquelles il est largement utilisé pour la réalisation des structures porteuses des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Malgré ce bon comportement, face à un incendie, les performances du matériau peuvent être plus ou moins affectées en fonction de la température maximale atteinte, de la durée de l'incendie et de la composition du matériau (nature des granulats notamment).



**Figure 2.6: béton après un incendie**

**b) Cycle gel/ dégel :**

Tous les bétons ne sont pas sensibles aux cycles de gel-dégel. Seuls les bétons dits "gélifs" s'altèrent. Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.

L'action du gel est une des causes principales de détérioration des ouvrages en béton et des soutènements dans les régions nordiques d'Europe, d'Amérique, d'Asie mais également dans certaines régions algériennes (infrastructures routières, remontées mécaniques, cornières ....).

Les dégradations se manifestent sous forme de fissurations internes ou d'écaillage et concernent essentiellement les structures horizontales (ponts, terrasses...), susceptibles d'être saturées en eau et donc plus sensibles à l'action du gel.



**Figure 2.7: Action du gel dans les fissures du béton**

## 2.3. Pathologies d'origine mécanique :

Les bétons peuvent subir des agressions de type mécaniques. Celles-ci peuvent à tout moment survenir à la suite de :

- Abrasion.
- Choc.
- Surcharges.
- déplacement (y compris les tassements).
- Explosion.
- Fatigue.
- Vibrations.

### 2.3.1. Abrasion :

Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.

L'abrasion du béton est essentiellement due à un manque de compacité du béton à la mise en œuvre. La fissuration de surface résulte d'un manque d'étanchéité au niveau des joints de coffrage ou de la reprise de bétonnage (Fig2.8).



**Figure 2.8: Abrasion du béton**

### 2.3.2. Chocs :

Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage.

Exemples : piles de pont, sols d'ateliers, éléments bétons préfabriqués,...



**Figure 2.9: Choc sur une glissière de sécurité et une pile de pont**

### **2.3.3. Surcharge :**

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton (Fig2.10).



**Figure 2.10: fissuration et éclatement du béton sous charges trop importantes**

### **2.3.4. Désordres dus aux mouvements différentiels des fondations et tassement :**

Les mouvements de terrain constituent une des causes les plus fréquentes des fissures et des lézardes des murs traditionnels. De tels mouvements peuvent avoir de multiples causes, certaines sont intrinsèques au terrain (humidification des sols cohésifs, versants instables, etc.), d'autres sont

en lien direct avec les caractéristiques des fondations existantes dans la construction du bâtiment en question ou avec l'action des constructions proches.

Souvent –mais pas toujours– les dommages apparaissent progressivement, de telle sorte qu'il est possible de disposer de l'information nécessaire quant à leur évolution et aux mesures préventives adoptées en conséquence

**Tassement** : Enfoncement d'un ouvrage sous l'effet de la compression et de la déformation du sol qui le supporte

**Tassement différentiel** : Différence de tassement entre fondations ou entre points de la fondation.

Le tassement différent en deux points d'un ouvrage peut entraîner de graves désordres si la dénivellation est importante.



**Figure2.11 : Tassements d'un fut de fondation**

#### **A. Cause des tassements :**

- Présence d'une couche de sol fin dangereux :  
Argiles jeunes n'ayant pas eu le temps géologique d'être bien serrés par des couches de sédiments suffisamment épaisses et présentant ainsi une compressibilité plus ou moins forte.
- Éboulements et glissements de terrain.
- Modification des niveaux hydriques (rabattage de nappe, ...).
- Vibrations produites par le trafic routier ou par les machines.

## **B. Phénomènes pathologiques engendrés :**

- Effondrement partiel ou total.
- Basculement – enfoncement.
- Fissuration.
- Remblais rapportés mal compactés.
- Dessiccation des couches superficielles.

### **4.3.5. Explosions et évènements accidentels :**

Dans les sociétés occidentales, la population éprouve généralement un sentiment de sécurité envers les ouvrages dans lesquels elle vit et travaille. Ce sentiment résulte du fait qu'une grande part des risques susceptibles d'affecter les ouvrages a été correctement anticipée et traités par les ingénieurs. Les règles employées pour la conception et la construction assurent le plus souvent une sécurité effective. Les risques ne sont alors perçus que lorsque surviennent des accidents ou des défaillances spectaculaires.

Certaines catastrophes ont eu un large retentissement (la rupture du Pont de Tacoma, l'effondrement des tours jumelles du World Trade Center, l'écroulement de la tribune du stade Furiani à Bastia).

Plus récemment, l'effondrement du Terminal E de Roissy ou la défaillance brutale du pont autoroutier de Minneapolis sur le Mississippi nous ont rappelé que les ingénieurs ne sont pas infaillibles et que ces phénomènes spectaculaires peuvent affecter aussi bien des ouvrages anciens que des ouvrages neufs.

Ces évènements sont très différents, par leur nature aussi bien que par leurs causes ou leurs conséquences. Des défaillances moins exceptionnelles ou des accidents.

## **2.4. Dégradations dues aux agressions chimiques :**

Le béton est susceptible d'être attaqué par différents types d'agents agressifs chimiques acides (acide sulfurique, nitrique, phosphorique, acétique, lactique, ...). Parmi ces agents on peut principalement citer :

- l'acide sulfurique.
- les déchets chimiques industriels.
- l'attaque acide bactérienne.
- les pluies acides.
- les substances agricoles.
- les engrais chimiques et les eaux usées industrielles.
- l'activité biologique (algues, bactéries).

- la réaction alcali-granulats ou cancer du béton.
- la corrosion des armatures du béton.
- 

Les bétons peuvent aussi manifester d'autres pathologies chimiques telles que la carbonatation, la réaction sulfatique, la formation de gel ou de cristallisation d'étringite secondaire, etc.

La durabilité des armatures est nettement conditionnée par les conditions chimiques dans lesquelles elles se trouvent. Les armatures se corrodent lorsque le béton est acidifié. L'acidification sera surtout conditionnée par les conditions initiales de mise en œuvre :

-la nature du ciment et du rapport Eau/Ciment (E/C).

-les conditions de cure: protection d'un béton pendant la phase de prise et de durcissement, qui limite, entre autres, l'évaporation de l'eau à la surface du béton, provoquée par le vent et le soleil.

-l'exposition météorique.

-la porosité.

## **2.5. Les autres causes de dégradation des bétons :**

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

### **2.5.1. Mauvais positionnement des armatures :**

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

### **2.5.2. Mauvaise qualité des bétons employés :**

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

### **2.5.3 Vibration trop importante :**

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

#### **2.5.4. Cycle humidité / sécheresse :**

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

#### **2.5.5. Cas particulier de l'action de l'eau de mer :**

L'action de l'eau de mer est complexe. Moins nocive que certaines eaux fortement salées par suite d'une carbonatation de surface du béton faisant obstacle au lessivage de la chaux et à la pénétration des sulfates, elle agit principalement par l'intermédiaire du sulfate et du chlorure de magnésium qu'elle contient, parfois par l'intermédiaire de l'hydrogène sulfuré (cas de la mer Méditerranée).

Ce sont, bien sûr, les parties de structure situées dans la zone de marnage qui sont les plus exposées à ces réactions chimiques, en plus de l'action mécanique des vagues.

#### **2.5.6. Mise en œuvre :**

Le béton est un des rares matériaux de construction où les composants sont rassemblés au site, ou près du site de construction, pour ensuite être dosés, malaxés et mis en place dans les coffrages pour obtenir un produit fini. Il existe un très grand nombre de variables qui contrôlent ce type de production. Il y a donc toujours une possibilité qu'il y ait un maillon faible dans la chaîne de production qui fasse en sorte que la durabilité de l'ouvrage soit handicapée.

Si les méthodes de mise en place et de mûrissement ne permettent pas au béton de développer toutes ses qualités, la durabilité de l'ouvrage pourra être considérablement réduite.

Les principaux points à surveiller concernant la mise œuvre sont:

- Les méthodes de mise en place du béton  
Il faut adopter une technique appropriée de mise en place du béton dans les coffrages pour éviter les nids d'abeilles et la ségrégation. Il faut aussi surveiller les techniques de finition de surface.
  
- La mise en place des aciers d'armature

Dans l'exemple suivant, on constate qu'une partie de l'eau de gâchage c'est accumulé à la surface d'une dalle en béton fraîchement coulée, c'est le phénomène de ressuage.



**Figure 2.12: Ressuage du béton après vibration**

## **2.6. Propriétés du béton et des matériaux :**

Les propriétés du béton ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage.

Pour fabriquer un ouvrage durable, il faut donc utiliser un matériau durable.

Les caractéristiques du béton qui contrôlent sa durabilité peuvent être regroupées en trois grandes familles.

### **2.6.1. Influence des propriétés des matériaux entrant dans la fabrication du béton :**

#### **-Type de ciment :**

Certains types de ciment offrent de meilleures performances en présence d'eau de mer ou de granulats potentiellement réactifs. En milieu marin, il peut être nécessaire d'utiliser un ciment à faible teneur en alcalis.

#### **-Type de granulats :**

Certains granulats sont gélifs, c'est-à-dire qu'ils sont sensibles à l'action des cycles de gel-dégel. Il faut donc éviter de les utiliser dans les bétons exposés au gel.

Il existe aussi des granulats qui peuvent réagir avec les alcalis du ciment pour former des produits expansifs qui peuvent faire fissurer le béton (réaction alcalis-granulats). Il existe des essais d'acceptation qui permettent d'identifier les granulats potentiellement réactifs.

- **Ajouts minéraux** : (fumée de silice, cendres volantes, laitiers)

Les ajouts minéraux peuvent modifier considérablement le comportement du béton exposé à un environnement donné. Ils peuvent parfois améliorer ou diminuer la durabilité du béton. Les effets sont fonction du type et du dosage de l'ajout minéral.

## **2.7. Les effets des actions naturelles :**

### **4.7.1. La température :**

Les effets de la température se manifestent de nombreuses façons.

On peut distinguer deux types d'actions selon qu'elles affectent directement les propriétés des matériaux ou le comportement mécanique des constructions.

### **4.7.2. Les effets du vent :**

L'action du vent sur les structures se manifeste de nombreuses manières : cela va de l'effet de dessiccation du béton frais en surface à la pression dynamique appliquée aux structures et à leur mise en mouvement éventuelle, pouvant provoquer des phénomènes de flottement ou de galop dans le cas de structures souples (ponts à câbles).

### **4.7.3. Actions dues aux séismes :**

Nombreuses sont les régions du monde qui connaissent une activité sismique régulière, atteignant parfois une rare violence. Les conséquences d'un séisme peuvent devenir dramatiques dès que l'accélération au sol dépasse 0,3g. De façon schématique, un séisme est un déplacement imposé induisant, dans les diverses parties d'un pont, des efforts dont l'intensité est d'autant plus élevée que les parties en question sont plus lourdes et rigides.

L'analyse effets des séismes sur les constructions a permis de mettre en évidence les principes de conception permettant d'éviter les effondrements catastrophiques, voir de limiter le degré d'endommagement et ces principes sont maintenant à la base de :

- nombreux codes de calcul.
- classification de zones de sismicité des règles de construction parasismique applicables.

## **4.8. Actions à caractère accidentel :**

### **4.8.1. Les chocs :**

#### **a) Les chocs de véhicules routiers et ferroviaires**

Les chocs de véhicules sur les constructions et les ouvrages d'art sont des accidents relativement fréquents. Si l'on s'en tient aux chocs avec dommages nécessitant des réparations, dus aux seuls véhicules lourds, des statistiques récentes montrent que leur fréquence sur les autoroutes françaises est de l'ordre de 6 chocs /an pour un réseau d'environ 6200 km.

Les chocs sur tabliers sont moins fréquents, mais beaucoup plus dangereux dans le cas des passerelles, du fait de leur légèreté, ou même dans le cas de tabliers de ponts peu robustes. Les détériorations vont de simples épaufrures (mais qu'il convient de traiter pour éviter la corrosion des armatures) à de véritables fractures.

#### **b) Les chocs de navires et de bateaux :**

Les chocs sur tabliers sont moins fréquents, mais beaucoup plus dangereux dans le cas des passerelles, du fait de leur légèreté, ou même dans le cas de tabliers de ponts peu robustes. Les détériorations vont de simples épaufrures (mais qu'il convient de traiter pour éviter la corrosion des armatures) à de véritables fractures

Les chocs de navires (en site maritime) ou de bateaux (sur les voies navigables) contre des piles de ponts sont des événements moins rares qu'on ne le pense généralement. Dans le monde, la fréquence d'accidents aux conséquences catastrophiques, avec pertes de vies humaines (300 à 400 personnes ont trouvé la mort dans ce genre de circonstance entre 1985 et 2009) ou importants dégâts affectant les ouvrages et les constructions, est de l'ordre 0,4 bâtiment et de 1,5 pont /an.

## **2.8. Défaut d'entretien :**

- Des programmes d'entretien ou de protection sont généralement nécessaires pour éviter ou retarder certains types de dégradations des structures.
- Un bon programme d'entretien peut contribuer à prolonger très significativement la vie utile d'un ouvrage

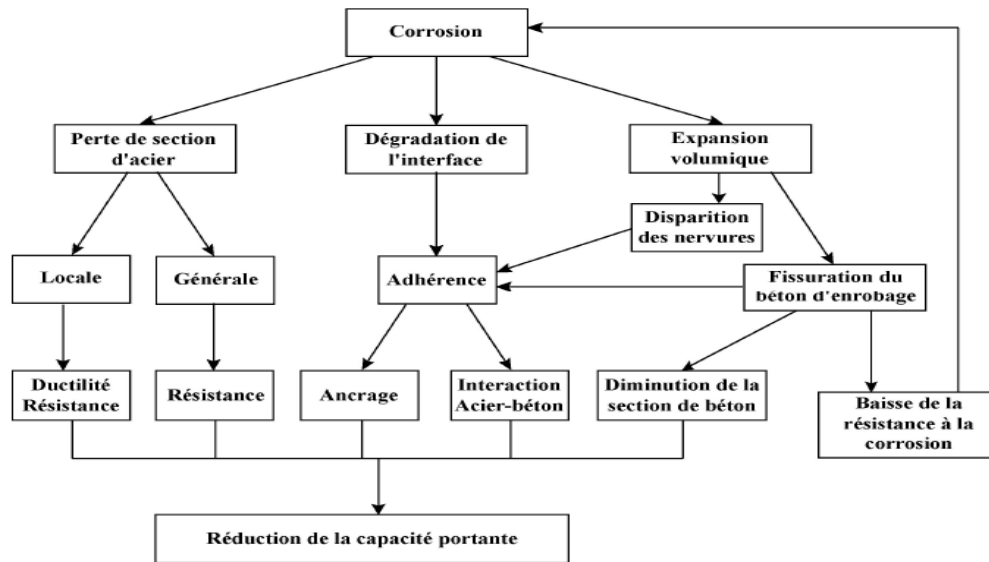
## ***CHAPITRE3 : INFLUENCE DE LA CORROSION SUR LES ARMATURES DANS LE BETON***

### **3.1. Introduction :**

La corrosion des armatures est une des causes majeures de dégradations des structures et ouvrages en béton armé. 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. Pour optimiser le dimensionnement et réaliser des ouvrages plus résistants et plus durables, les concepteurs ont besoin de connaître le processus de corrosion et ses interactions environnementales et structurelles. La corrosion va se développer principalement selon deux processus : la carbonatation du béton lente et uniforme le long de l'armature et l'attaque par les chlorures qui, lorsqu'ils se trouvent en quantité suffisante aux abords de l'armature, génèrent des piqûres de corrosion, ce processus étant rapide en terme cinétique et fortement localisée. Quand la corrosion devient active, le comportement mécanique de la structure change, ceci est essentiellement dû à la diminution de la section d'armature corrodée. Le volume de l'acier corrodé est nettement plus important que celui de l'acier sain, cette augmentation volumétrique génère des pressions sur le béton et ainsi le fissure.

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses recherches ont été faites sur la corrosion des armatures dans le béton dans l'objectif d'en prédire l'influence. Les effets et conséquences de la corrosion sont divers et peuvent être représentés par la Figure 3.1

Il est donc primordial de prendre en considération ce phénomène et essayer de prédire l'endommagement du béton de recouvrement.



**Figure 3.1: Effets de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées.**

### 3.2. Effet de la corrosivité des milieux en contact avec l'acier :

L'acier entre dans le bâtiment sous de multiples formes : tôles formées à froid pour les façades, les couvertures et les planchers, profilés laminés à chaud pour les ossatures, armatures pour les bétons, tuyaux pour les canalisations ou encore cornières, châssis, escaliers, garde-corps, ancrages, boulons et quincaillerie. Il constitue l'un des métaux les plus utilisés car il allie à sa légèreté des propriétés techniques exceptionnelles et des atouts économiques incontestables. Il possède entre autres une bonne résistance à la traction, une excellente aptitude à la déformation et une bonne soudabilité.

Si l'acier possède incontestablement un certain nombre de qualités, il présente, comme tous les métaux, l'inconvénient majeur de s'oxyder au contact des éléments corrosifs qui l'entourent. Sa corrosion risque alors d'altérer les performances de l'ouvrage et d'en réduire la durée de vie.

Les problèmes de corrosion de l'acier ne peuvent donc en aucun cas être négligés. L'évaluation du risque de corrosion du métal dans son milieu d'utilisation peut permettre de retarder la corrosion, de limiter son ampleur et, dans le meilleur des cas, d'éviter son apparition. Ceci nécessite de prendre connaissance des facteurs de corrosion présents dans l'environnement avant la réalisation de l'ouvrage. Une fois la corrosivité du milieu déterminée sur la base de ces facteurs, la nuance d'acier et son moyen de protection peuvent ensuite être choisis en tenant compte de cette contrainte.

### **3.2.1. Corrosivité des milieux en contact avec l'acier :**

La corrosion est une destruction du matériau par un retour spontané du métal à un état naturel de plus grande stabilité, c'est-à-dire sous forme d'oxydes et d'hydroxydes. Suivant son application, l'acier sera exposé aux environnements plus ou moins corrosifs que sont l'atmosphère, l'eau, le sol et le béton. A chacun de ces milieux correspond toujours une phase aqueuse qui est manifeste lorsqu'il s'agit de canalisations ou de réservoirs d'eau, mais qui est plus discrète lorsqu'il s'agit de béton armé.

La présence de deux espèces oxydantes majeures dans cette phase aqueuse, à savoir l'oxygène dissous et les ions  $H^+$  ou protons, favorise le développement de la corrosion par oxydation du fer, élément principal de l'acier.

Des réactions précipitent l'oxydation de l'acier par des produits qui forment un film à la surface du métal. Si, par chance, ce film est imperméable, insoluble et non fragile, il peut isoler efficacement le métal de son environnement et enrayer le processus de corrosion. On parlera alors de passivation du métal.

Dans le cas de l'acier, le film d'oxyhydroxyde de fer n'est protecteur que dans des conditions très particulières : en milieu acide fortement oxydant ou en milieu alcalin ( $pH > 9-10$ ). En effet, l'acier (non allié) n'est pas un métal dit 'passivable' à l'inverse d'alliages d'aluminium ou d'aciers inoxydables dont l'emploi repose spécifiquement sur cette propriété.

Dès lors que le film n'est pas protecteur, l'oxydation du fer se poursuit et entraîne progressivement la dissolution de l'acier non protégé. Il s'ensuit une réduction graduelle de son épaisseur – soit localisée, soit généralisée – se traduisant par une série de désagréments pas forcément dangereux, mais souvent préjudiciables et inadmissibles : taches et piqûres des tôles et des profilés, éclats et fissures du béton armé, percements de canalisations, ...

### **3.2.2. Corrosivité des eaux :**

L'eau étant l'un des principaux éléments nécessaires à la corrosion, les ouvrages en acier constamment ou temporairement immergés dans une eau aérée ou véhiculant cette dernière subiront une corrosion plus importante que ceux exposés à l'atmosphère et seulement occasionnellement en contact avec l'eau de condensation, la pluie ou la neige [12].

Si, pour certains ouvrages, des métaux peuvent être immergés dans l'eau (ouvrages portuaires, stations de forage en mer, pipelines, ...), les cas les plus fréquents de corrosion des

métaux par l'eau concernent les canalisations des installations sanitaires et de chauffage ainsi que les canalisations d'évacuation [13].

La nature de l'eau et sa chimie varient selon son origine (eau souterraine, eau de pluie, eau d'évacuation, eau de ruissellement, eau industrielle, eau de ville, ...) et selon son utilisation (véhiculée ou stockée, aérée ou non aérée, chauffée, surchauffée ou refroidie, ...).

L'eau en contact avec l'acier des canalisations, des cuves ou des citernes peut contenir, en quantités variables, des sels minéraux dissous, des gaz dissous, des matières organiques ou minérales en suspension (sable, limon, argile, matières végétales, ...) et des microorganismes (bactéries, amibes, virus, ...) qui constituent autant d'agents influençant la corrosivité de l'eau.

### **3.2.3. Corrosivité des sols :**

Les sols sont toujours humides et l'eau interstitielle qui y circule est chargée de nombreux sels (sulfates, chlorures, nitrates, acides organiques, ...). Ils constituent de ce fait des milieux électrolytiques propices à la corrosion des métaux.

Les ouvrages concernés par la corrosivité des sols sont les éléments métalliques de renforcement de remblai, les parois de palplanches, les canalisations enterrées, les conduits souterrains, les supports d'ancrage, les buses métalliques, les réservoirs de stockage, ... Comme ces ouvrages ne peuvent pas faire l'objet d'un entretien régulier et qu'il est impossible de modifier la nature des sols, il est important de bien déterminer la corrosivité de ces derniers afin de prendre des mesures appropriées de protection de l'acier.

Les paramètres à considérer pour juger de la corrosivité d'un sol et donc de la nécessité d'appliquer ou non une protection à l'acier sont :

- la nature du sol (pH, acidité, alcalinité, ...)
- sa texture (perméabilité à l'oxygène)
- sa teneur en eau (présence d'une nappe phréatique à proximité)
- sa résistivité électrique (teneurs en sels dissous)
- la nature des sels présents (chlorures, sulfates, sulfures, ...)
- La présence de bactéries, dont les bactéries sulfato-réductrices qui, en milieu désaéré, accélèrent la corrosion de l'acier)
- la présence de courants vagabonds (voies ferrées, lignes à haute tension, protection cathodique de structures situées à proximité, ...) [13].



**Figure3.2 : corrosivité des sols (Palplanche en acier).**

#### **3.2.4. Corrosivité des bétons :**

La corrosion des armatures du béton est cependant le phénomène de dégradation le plus fréquent des ouvrages en béton armé. Le pH basique ( $\text{pH} > 11$ ) d'un béton sain et celui de la solution interstitielle contenue dans les pores du béton sont favorables à la formation d'une couche de passivation (produit blanc à base de ferrite de calcium hydraté) qui protège les armatures contre la corrosion en éliminant tout contact que pourrait avoir l'acier avec l'oxygène et l'eau, même si, avant d'être enrobées par le béton, ces armatures étaient couvertes de rouille par leur exposition à l'atmosphère. Le béton assure donc par son alcalinité une protection des armatures.



**Figure3.3 : Corrosivité du béton (armatures avec éclatement)**

du béton).



**Figure 3.4 : Armature corrodée avec réduction de la section utile.**

En effet, le béton alcalin évolue en réagissant avec son environnement. Aucun béton de construction n'est parfaitement étanche et tous les bétons subissent des altérations provoquées par des contraintes mécaniques thermiques ou des réactions chimiques qui entraînent des fissurations.

La dépassivation des armatures est initiée lorsque la carbonatation ou les chlorures ont traversé le béton d'enrobage et atteint les armatures. La corrosion se développe ensuite en présence d'oxygène et d'humidité. La rouille verte s'oxyde en magnétite noire ou en oxyhydroxyde de fer avec libération de protons. Ceux-ci acidifient le milieu, qui devient dès lors plus agressif et amplifie la corrosion. Il n'y a pas de corrosion lorsque l'atmosphère est très sèche (humidité relative < 40 %) ou lorsque le béton est totalement immergé dans de l'eau désaérée. L'humidité relative la plus favorable à la corrosion est de l'ordre de 70 à 80%. Au-delà, la diffusion de l'oxygène nécessaire au développement de la corrosion est considérablement diminuée.

Les produits de corrosion occupant un volume largement supérieur au volume initial de l'acier, la formation de rouille exerce une pression interne dans le béton, ce qui peut entraîner sa fissuration, voire son éclatement. Selon l'état d'oxydation, le fer métallique peut en effet former des oxydes ou hydroxydes dont le volume peut être jusqu'à six fois supérieur au volume initial. La fissuration du béton facilite ensuite le transport des agents agressifs jusqu'au niveau de l'acier, ce qui aura pour conséquence une augmentation de la vitesse de corrosion. Deux autres effets nuisibles de la corrosion sur la stabilité de l'ouvrage en béton se produisent : la perte d'adhérence et la réduction de la résistance des barres d'acier en raison de la diminution de leur section utile par progression de la corrosion [14].

### 3.3. Les types de corrosion :

- **la corrosion uniforme** : c'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée sur les métaux exposés aux milieux acides.

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

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

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

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

Dans la plupart des cas (corrosion galvanique, caverneuse, par piqûres, etc.), c'est la formation d'une pile de corrosion qui est à l'origine de la corrosion.

Une pile de corrosion est une pile électrochimique qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent des hétérogénéités du matériau ou du milieu environnant. La surface de l'acier est alors constituée d'une multitude de micro-piles, elles-mêmes constituées de zones dites anodiques où les électrons sont libérés et de zones cathodiques où les électrons sont consommés.

### 3.4. Ouvrages et éléments concernés par la corrosion des armatures :

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



Figure 3.5: 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.



Figure 3.6: 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).

- **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.



**Figure 3.7: 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.

- **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.



**Figure 3.8: Pile 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).



**Figure 3.9: Tuyau en béton armé.**

### 3.5. La corrosion des aciers dans le béton :

#### 3.5.1. Présentation générale :

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH (de l'ordre de 13), l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes.

En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives [15].

La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément :

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable.
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique.
- la présence d'un agent agressif.

Dans tous les cas, la corrosion ne peut se développer qu'en présence d'oxygène, ce qui explique, entre autres, que les cinétiques de corrosion dans les structures immergées en béton sont très faibles.

#### 3.5.2. Processus de la corrosion :

Les processus fondamentaux de la corrosion des aciers dans le béton sont illustrés sur les figures (3.10).

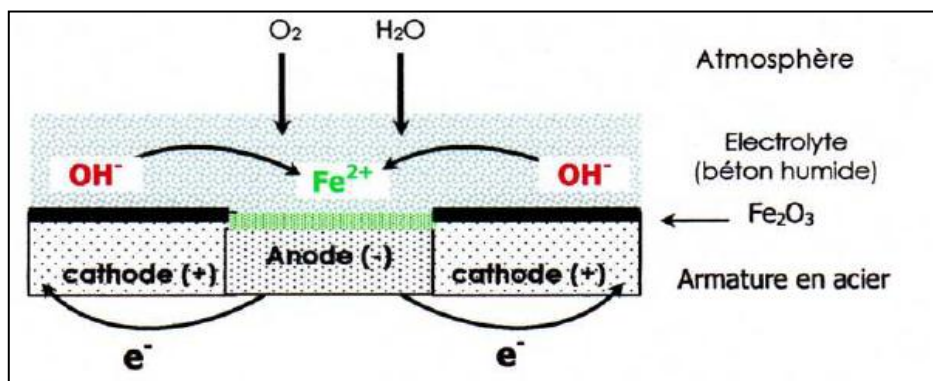
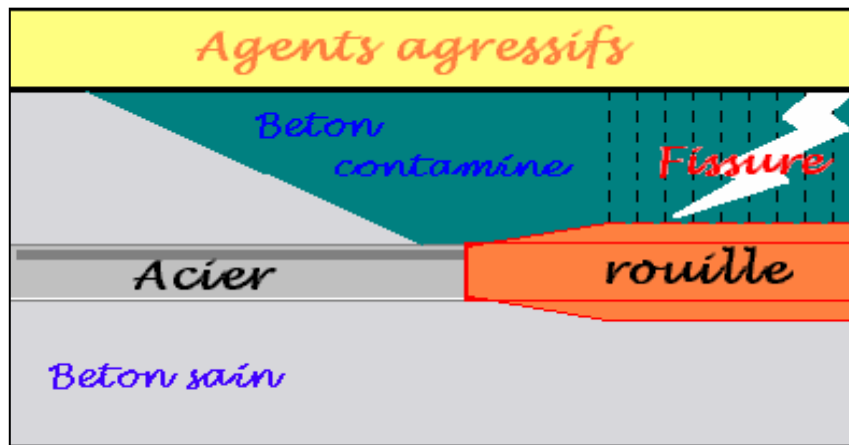


Figure 3.10 : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton.



**Figure 3.11 : Les étapes de la corrosion des aciers dans les bétons, Induite par des agents agressifs.**

L'agent agressif pénètre dans l'entourage puis déclenche la formation de rouille. Celle-ci se développe et peut fissurer l'enrobage.

L'oxygène qui peut diffuser dans le béton via le réseau poreux, se dissout dans la solution interstitielle et finit par atteindre la surface de l'acier. Sur cette surface, dans la zone cathodique, l'oxygène est réduit en ion hydroxyde (OH<sup>-</sup>).

Quelque soit la réaction cathodique mise en jeu, la production d'ions hydroxyde fait augmenter le PH de la solution interstitielle au niveau de la zone cathodique.

La réaction anodique correspondante est la dissolution de l'acier. Celle-ci entraîne une diminution de la section de l'acier qui peut finir par rompre.

Sous certaines conditions, le cas lorsque le béton a été carbonaté et que le pH de la solution interstitielle est descendu en dessous de 9 ou lorsqu'une quantité suffisante d'ions chlorure (Cl<sup>-</sup>) a pénétré dans le béton, saturé en eau, et atteint l'armature de ce fait, la section de l'acier peut continuer de se réduire et la rupture de l'armature se produire. Ce processus, préjudiciable à la durée de vie d'un ouvrage, est favorisé lorsque le béton est saturé en eau car l'évacuation des ions Fe<sup>2+</sup> de la surface de l'acier est facilitée.

La corrosion devient préjudiciable lorsque la vitesse de corrosion de l'acier est très élevée et que les produits de corrosion, ne pouvant être évacués de la zone de corrosion, s'accumulent à la surface de l'acier, des fissures apparaissent. Ces fissures vont accélérer la pénétration des espèces agressives et de ce fait les processus de corrosion.

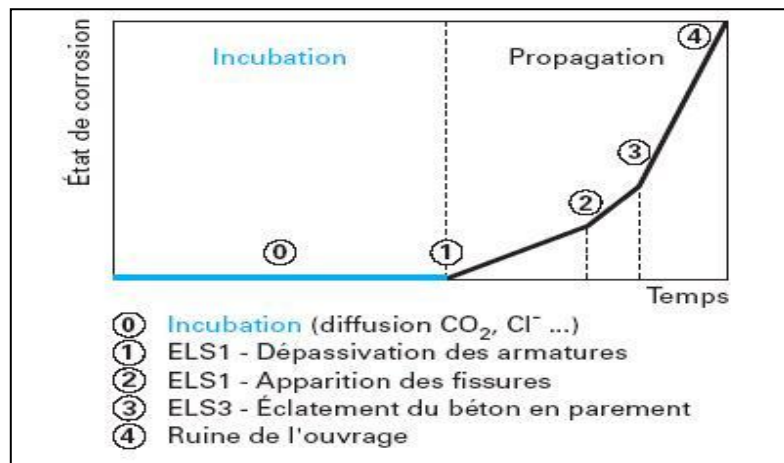
**Un processus corrosion → fissures → pénétration d'espèces agressives → plus de corrosion → plus de fissures → plus d'espèces agressives ... s'instaurent.**

### 3.5.3. Les étapes de la corrosion des armatures :

La corrosion avec formation de rouille des armatures dans les bétons comporte deux phases. Dans une première phase (ou stade), les éléments agressifs, tels que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ou les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton. C'est le stade d'incubation. La seconde phase est celle dite de propagation qui commence lorsque ces corps agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser, d'une part, la pénétration des agents agressifs à travers le béton et, d'autre part, les conditions de dépassivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal et la croissance de la rouille.

La dégradation se fait donc en deux grandes parties (Fig 4.9): L'incubation et la propagation. Pendant, l'incubation, le béton résiste aux attaques extérieures. Ensuite vient la propagation où se passent la dépassivation des armatures, l'apparition de fissures et l'éclatement du béton en parement pour finir par la ruine de l'ouvrage.



**Figure 3.12:** diagramme de la détérioration du béton.

Il est à noter que les aciers à haute résistance utilisés pour la précontrainte du béton, peuvent subir une fissuration spécifique, par corrosion sous contrainte. Ce cas n'est pas traité ici.

### 3.5.4. La dépassivation des armatures :

Si un acier est préalablement recouvert de produits passivants (cas du béton sain), cette protection est altérée le plus souvent par l'introduction de deux agents pouvant se présenter

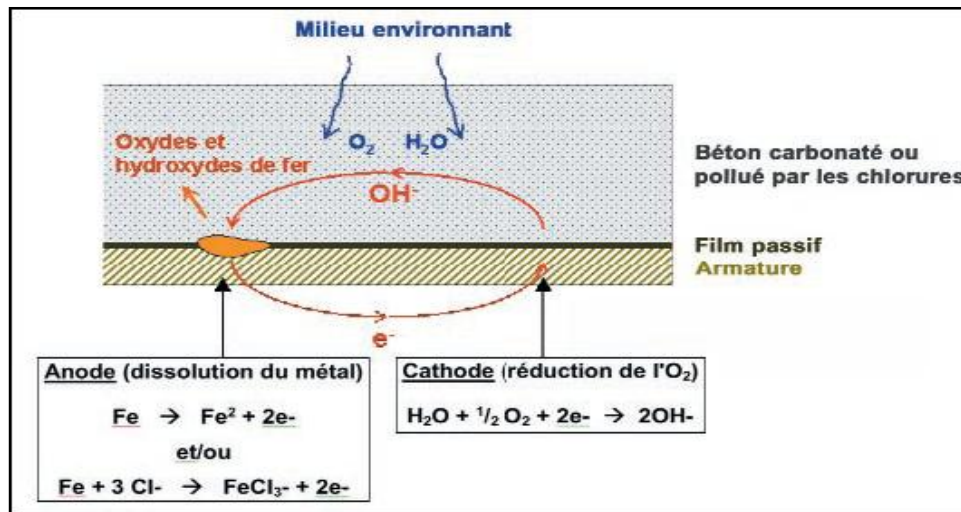
simultanément : le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (carbonatation) et l'ion chlorure Cl<sup>-</sup> (chloruration) en excès au niveau des armatures. Il se produit alors une dépassection.

Les deux phénomènes de carbonatation et de chloruration interagissent entre eux puisque la carbonatation, en changeant la structure du réseau poreux, peut affecter la diffusion des chlorures au sein du béton. En effet, après carbonatation, il a été observé une réduction de la porosité totale et une redistribution de la taille des pores, rendant plus difficile la pénétration des chlorures.

Le mécanisme de dépassection comprend les étapes suivantes :

- la couche passivante est détruite localement là où la teneur en chlorure ou en dioxyde de carbone est très forte ;
- de la rouille se forme là où la passivation a disparu ;
- la rouille se transforme en des oxydes (ou hydroxydes) poreux si la teneur en oxygène est assez élevée.

Lorsque le pH du béton est inférieur à environ 9 (Fig3.10), les teneurs critiques en chlorures et en carbonates provoquant la dépassection de l'acier sont très faibles et correspondent à des eaux naturelles, potables. C'est pourquoi, en pratique, ce PH est souvent considéré comme étant la valeur critique de dépassection de l'acier [20].



**Figure 3.13: Principe de la réaction chimique aboutissant la formation de rouille.**

### 3.5.5. La carbonatation :

La carbonatation du béton, vulgairement appelé « la maladie du béton », entraîne des problèmes de résistance en traction sur les structures en béton armé car les barres d'acier, censées garantir cette résistance, n'adhèrent plus au béton lorsqu'elles sont corrodées.

La stabilité du film passif est étroitement liée à la valeur du pH au voisinage de l'acier. Or, lorsque le pH devient inférieur à 12 environ, le film disparaît. Par conséquent, tous les mécanismes en mesure de provoquer une diminution du pH dans le béton, peuvent donc contribuer à amorcer ou accélérer la corrosion des aciers d'armature. Dans la majorité des cas, c'est le phénomène de carbonatation qui est principalement responsable de l'abaissement du pH dans le béton.

La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ), présent dans l'air à un taux moyen de 0,03 % en volume (taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural) et certains constituants du béton tel que le ciment.

La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes [16].

La vitesse de carbonatation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la perméabilité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant. La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité comprise entre 40% et 80%, 60% étant considéré comme la valeur la plus critique. Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le  $\text{CO}_2$ , alors que dans les environnements très humides, le béton étant saturé, la diffusion de  $\text{CO}_2$  est considérablement ralentie.

De très fortes teneurs, dans un béton, en cendres volantes (>30%) et en laitiers (>50%) peuvent accélérer significativement sa vitesse de carbonatation. La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) de ce matériau (Fig3.11).



**Figure 3.14: Exemple d'échantillon carbonaté**

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

Ceci explique l'éclatement du béton autour des armatures corrodées (Fig.12).



**Figure 3.15: Éclatement du béton dû à la carbonatation**

Les exemples des photos (a), (b), (c) et (d) montrent des les différentes dégradations d'éléments structuraux d'origines diverses.



**Photo(a) : Corrosion par carbonatation des aciers sur un départ de poteau.**



**Photo(b) : En se corrodant, les aciers augmentent de volume(en bas), comparé à une armature saine(en haut).**



Photo (c) : Corrosion importante en sous face chevêtre d'une poutre pont.



Photo (d) : Oxydation générale d'un Pont

Figure 3.16: les différentes dégradations d'éléments structuraux d'origines diverses.

Le schéma de la figure (3.17) illustre le principe de la formation de la carbonatation.

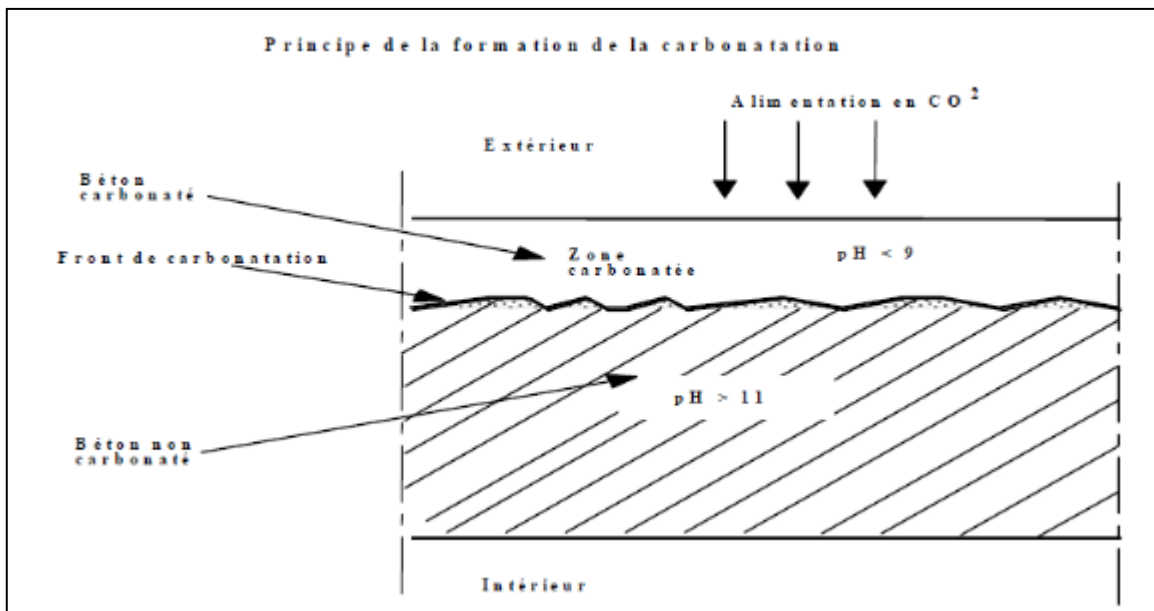


Figure 3.17: Schéma de principe de la formation de la carbonatation.

a) **Les conséquences de la carbonatation :**

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le front de carbonatation est au moins égal à

leur profondeur d'enrobage. Les désordres associés correspondent alors pour l'essentiel à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert [17].

#### b) La mesure de la carbonatation :

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

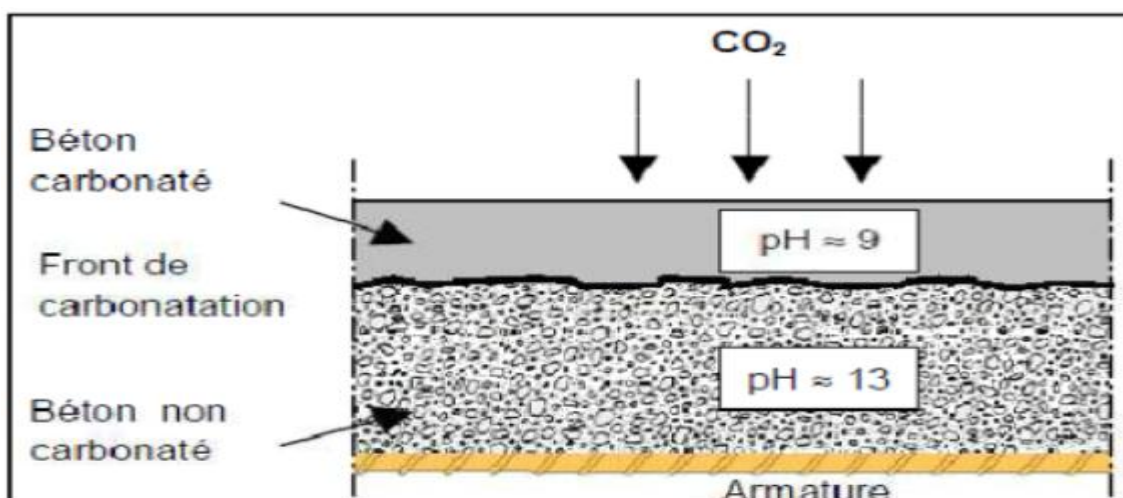
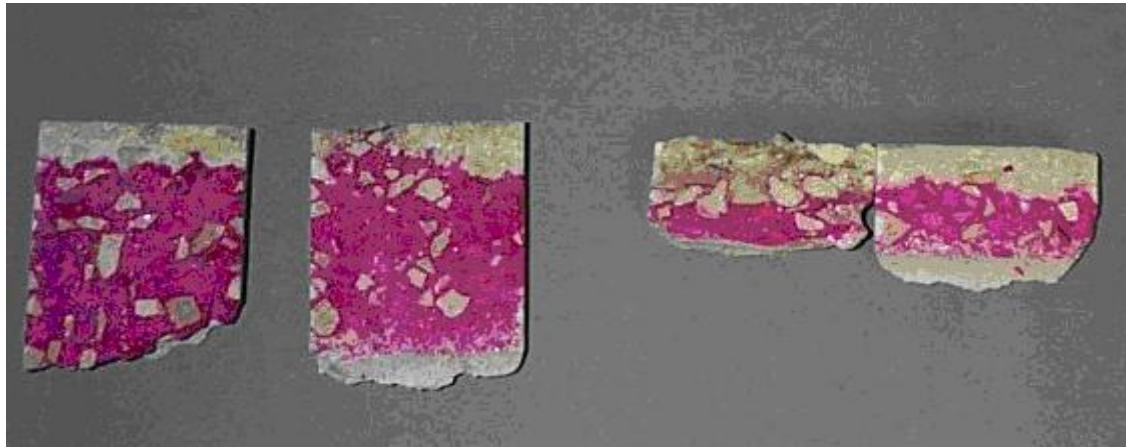


Figure 3.18: La progression de la carbonatation



1 : zone carbonatée (incolore)

2 : zone non carbonatée (coloration rose)

**Figure 3.19: Mise en évidence de la carbonatation de la matrice cimentaire des échantillons de béton des poutres de la structure porteuse.**

### 3.5.6. Les ions chlorures :

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé.

Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle.

La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est autocatalytique. [16] [17]

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton. Les chlorures existent sous deux formes dans le béton.

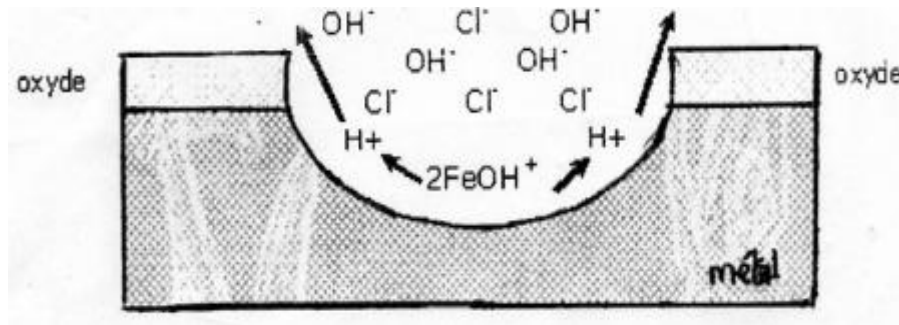
- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
- Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores.

Seuls les chlorures libres participent à la corrosion des armatures.

Les chlorures ayant atteint l'armature attaquent l'acier initialement passivé, en certains points localisés. Le film passif est alors détruit localement et laisse apparaître des zones anodiques où l'acier est dissout. Le reste de la surface qui est encore passivée correspond aux zones cathodiques.

La surface des zones cathodiques étant bien plus importante que celle des zones anodiques, la dissolution de l'acier croît en profondeur plutôt qu'en surface de l'acier formant ainsi des piqûres ou des cavernes.

Ce mécanisme est schématisé (Fig3.20) Les piqûres continuent de croître si la concentration locale en ions chlorure est suffisante (la concentration des chlorures doit augmenter tandis que celle des ions hydroxyde doit diminuer). Si ce n'est pas le cas, la repassivation de l'acier est possible.



**Figure 3.20: Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure**

Sur le plan pratique, les paramètres qui peuvent influencer sur cette teneur critique en chlorure sont : le dosage en ciment (et le rapport Eau/Ciment), la valeur du pH, la nature du ciment (fixation de chlorure, etc.) et celle des additifs éventuels (cendres, etc.), la température moyenne, la teneur en oxygène et l'humidité du béton. L'état d'enrouillement initial des armatures a également un effet sur la valeur de la teneur critique en chlorure.

Le seuil critique est considéré atteint s'il y a 0,2 à 0,4% d'ions chlorure par rapport à la masse du ciment. Il est à noter que la teneur en chlorure qui amorce une corrosion n'est pas reliée à la vitesse de corrosion des armatures, une fois dépassivées.



**Figure 3.21: Corrosion par piqûres liées aux chlorures.**

### **3.5.7. Dégradation du béton d'enrobage :**

Les stades de la corrosion des aciers dans les bétons, induite par des agents tels que les chlorures ou le dioxyde de carbone. L'agent agressif pénètre dans l'enrobage, puis déclenche la formation de rouille. Celle-ci se développe et peut fissurer l'enrobage.

Le béton qui enrobe une armature peut être altéré par le milieu environnant, pour des raisons:

- Physiques : le gel peut le faire éclater, etc.
- Mécaniques : le béton peut se fissurer sous l'action d'une charge excessive, chimiques, notamment à cause de certains corps (gaz ou ions) contenus dans le milieu environnant.

D'une façon générale, les constructions en béton armé sont au contact de l'atmosphère, de l'eau (rivière, mer, etc.) ou de sols. Ces milieux sont plus ou moins pollués et contiennent certains corps (gaz ou liquide) qui peuvent entrer dans le béton et modifier les caractéristiques de celui-ci et en particulier la composition chimique de la solution interstitielle.

Les agents agressifs les plus fréquents sont les eaux pures, les chlorures dans l'eau et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère.

L'eau pure peut lessiver (lixiviation) le béton en dissolvant certains constituants du ciment et augmenter la porosité du béton.

La pénétration du dioxyde de carbone dans le béton est un phénomène de diffusion. Elle est rapide lorsque le béton est assez sec. Mais la réaction de carbonatation n'a lieu que s'il reste de la solution interstitielle dans le béton. C'est pourquoi, les conditions les plus favorables à la pénétration du dioxyde de carbone correspondent à une humidité relative moyenne, de l'ordre de 65%.

Ces phénomènes conduisent donc à des gonflements et à des contraintes de traction dans le béton d'enrobage. Ces contraintes de traction entraînent l'apparition d'une fissuration, parallèle aux aciers, qui diminue en outre la qualité de l'adhérence acier/béton et l'éclatement du béton d'enrobage.

Les manifestations des phénomènes de corrosion sur le parement des ouvrages peuvent donc aller de traces ou de coulures de couleur rouille lorsqu'ils sont encore peu développés jusqu'à la mise à nu des armatures corrodées (Fig3.22). [18]



a. Pont en bord de mer



b. Bâtiment en zone urbaine

**Figure 3.22: Exemples de dégradations dues à la corrosion des armatures.**

**Conséquences pratiques :** Pour ralentir la pénétration des agents agressifs, il faut formuler le béton et le fabriquer, de telle sorte que sa porosité soit faible et que le coefficient de diffusion de ces agents soit faible également.

### **3.6. Facteurs influents de la corrosion :**

La tenue, face à la corrosion des armatures dans le béton est fonction des paramètres concernant l'acier et le béton ainsi que des propriétés existantes à leur interface. Cela est déterminé par la composition de la solution interstitielle du béton et des caractéristiques métallurgiques de l'acier. Les facteurs environnementaux (humidité, température, dioxyde de carbone, ions chlorure)

ne peuvent affecter directement le processus de corrosion mais ils peuvent causer des dégradations du béton et accélérer l'entrée d'espèces agressives rendant la solution interstitielle en contact avec l'acier plus corrosive.

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

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

### **3.6.1. Influence de la composition du béton :**

Tout ce qui conditionne la solution interstitielle et la porosité du béton est un facteur pouvant affecter ou non la corrosion. Le type et la teneur en liant, les additions minérales et le rapport E/C (Eau/ciment) déterminent la performance d'un béton. Le choix de la formulation du béton et de la nature de ses principaux constituants constitue une approche pour augmenter la résistance à la corrosion du béton. Toutes modifications de la formulation d'un béton produisant une augmentation de sa compacité ou une réduction de sa perméabilité ont généralement un effet favorable sur la résistance à la corrosion.

Le rapport E/C a une très grande influence sur la porosité du béton : plus il est important, plus la porosité est grande, facilitant ainsi la pénétration des espèces agressives puis la corrosion de l'acier. L'influence du rapport E/C est bien plus importante que le type de liant utilisé.

Quant aux ajouts minéraux, en faibles quantités, ce sont les cendres volantes et les fumées de silice qui ont généralement une influence bénéfique puisqu'elles produisent une très nette diminution de la perméabilité, du coefficient de diffusion et de la conductivité du béton.

L'augmentation de la compacité provoquée par les ajouts minéraux, utilisés en quantité suffisante, peut de plus annuler largement les effets néfastes de la diminution du PH interne et de la moins grande quantité d'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) qui découlent de l'utilisation de ces ajouts.

### **3.6.2. Influence de l'humidité :**

L'effet du taux d'humidité, ou degré de saturation en eau, dans le béton est important car la vitesse de corrosion dépend fortement de ce taux, celui-ci influençant directement la conductivité, la résistivité électrique et la diffusion de l'oxygène.

L'influence de l'humidité a été déjà.

La corrosion des aciers, dans le cas des structures ou des parties de structures immergées, ne constitue généralement pas un problème majeur puisque l'oxygène ne parvient que très difficilement à atteindre les armatures.

### 3.6.3. Influence de l'enrobage

Parmi les origines de dégradations du béton, les facteurs chimiques sont les plus importants dans les altérations en volume de l'enrobage de béton.

Il ne se produit pas de corrosion lorsque l'atmosphère est très sèche (humidité relative > 40% : absence d'électrolyte).

Il n'y a pas de formation de rouille lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau désaérée (manque d'oxygène).

L'humidité relative la plus favorable pour que la corrosion se produise est de 70% à 80%. Pour des valeurs plus élevées, la diffusion de l'oxygène est considérablement diminuée.

Mais l'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont mettre les espèces agressives pour arriver à l'armature. Parfois, la durée de vie d'une structure peut être fortement améliorée en augmentant l'épaisseur de l'enrobage, barrière mécanique freinant, voire stoppant la pénétration d'espèces participant à la corrosion des armatures.

Le potentiel électrochimique qui est à la base de la formation d'une cellule de corrosion peut être généré de deux façons :



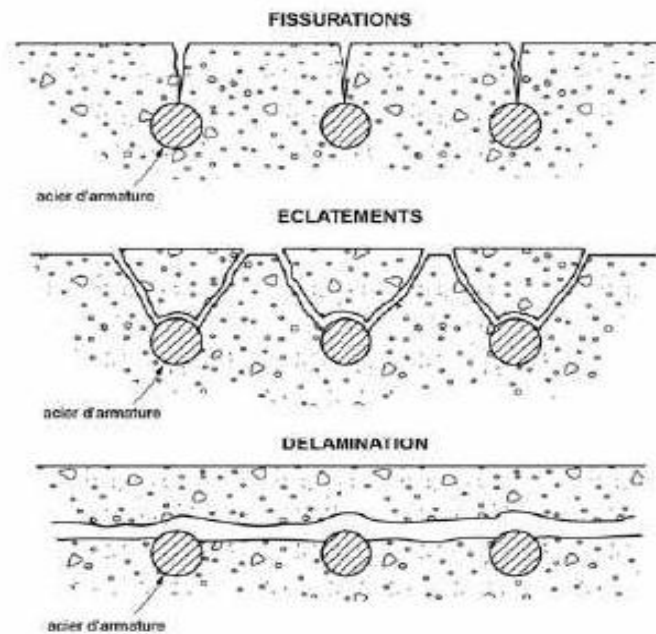
**Figure 3.23: Insuffisance d'enrobage.**

#### **A) Dégradation mécanique de l'enrobage :**

Lorsque la couche de rouille sur l'acier s'épaissit du fait de la corrosion métallique, une perte d'adhérence peut se produire parce que l'enrobage du béton s'est dégradé du point de vue mécanique.

D'une façon générale, les produits de corrosion ont une masse plus élevée que le métal qui leur donne naissance. [4] Si, de plus, ces produits sont poreux et rigides, comme c'est le cas de la rouille usuelle sur les armatures, ils sont plus volumineux que le métal et exercent une pression sur le béton d'enrobage.

Selon la géométrie (épaisseur d'enrobage, diamètre des armatures) et les caractéristiques mécaniques du béton, celui-ci peut soit se fissurer longitudinalement à l'aplomb de l'acier, soit se détacher (épaufre), comme l'indique la Figure 3.24.



**Figure 3.24: types de fissures développées lors de la corrosion des aciers**



**b. Insuffisance de l'enrobage favorisant la corrosion**

**a. Insuffisance d'enrobage fissuration et le décollement des parements**

**Figure 3.25: types de dégradations favorisées par l'insuffisance de l'enrobage.**



**Figure 3.26: Décollement du parement du pilier et fissuration du chevêtre**

### **3.7. Conséquences des désordres provoqués par la corrosion des armatures :**

#### **3.7.1. La sécurité vis-à-vis des usagers :**

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

#### **3.7.2. La stabilité de l'ouvrage :**

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. Ainsi, tant que les diminutions de section des armatures restent faibles et que l'enrobage reste cohésif, la corrosion des 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.

### **3.8. CONCLUSION :**

La corrosion est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé et pour cela, elle doit être prise très au sérieux. De nombreux ouvrages nécessitent très souvent de nouvelles interventions contre cette pathologie alors qu'ils venaient d'en être traités. Cette situation peut être imputée soit à la non maîtrise du phénomène de corrosion par les techniciens et les ingénieurs, soit à une mauvaise démarche adoptée lors des réparations ou au choix d'une méthode de réhabilitation inadéquate inefficace.

Les différents facteurs influents sur la corrosion des armatures sont l'humidité, l'enrobage, influence de la teneur en chlorure, influence d'autres agents agressifs (tels que les sels, etc.), effet de l'oxygène. Les différents mécanismes mis en jeu dans le processus de corrosion influent sur le comportement mécanique des structures. En effet, lorsque la corrosion est amorcée son action est directe sur le comportement des éléments de structures ou sur la structure totale.

Ainsi pour traduire la dégradation des structures corrodées, ces paramètres doivent être pris en considération. Pour l'acier la difficulté réside dans le comportement de l'interface. Pour ce qui est de l'enrobage, plus il est épais plus le processus de corrosion est lent.

Par ailleurs, la carbonatation du béton et la concentration critique en chlorure sont les principaux facteurs de déclenchement de la corrosion et par conséquent sont des causes de dégradation des ouvrages en béton armé dans la mesure où elles conduisent à la dépassivation des armatures et à leur oxydation. Dans ce cadre, la caractérisation des effets néfastes de la carbonatation sur les propriétés de transfert du béton, constitue une étape clé pour l'étude de sa durabilité.

Il est donc impératif de quantifier l'influence de la carbonatation sur la perméabilité et la porosité sur des bétons de différentes résistances et caractéristiques microstructurale.

## Chapitre 4 : Protection et réhabilitation des armatures dans le béton

### 4.1. Introduction :

On peut considérer que plus de 80% des dégradations du béton armé sont provoquées par la corrosion des armatures, elle-même générée par la carbonatation du béton et/ou la contamination par des ions chlorures (Tutti, 1982).

Une grande partie des travaux du génie civil qui s'effectuent actuellement dans le monde, surtout en Amérique du nord, en Europe et au Japon, sont des travaux de maintenance et de protection, car la majorité des ouvrages en béton armé ou précontraint dans le monde entier ont plus d'une trentaine d'années. On estime que 10 à 20% des ouvrages dans le monde seraient détruits chaque année par la corrosion s'il n'y avait pas de travaux de préservation et de réhabilitation. C'est pourquoi le développement des techniques de protection et de réhabilitation devient une nécessité absolue pour éviter les dégâts de corrosion et réduire les pertes économiques.

#### 4.1.1. Moyens de lutte contre la corrosion:

Compte tenu, en particulier, des impératifs de sécurité et d'économie, les problèmes de la corrosion sont souvent délicats à résoudre.

Le choix des moyens de protection doit être Soigneusement analysé.

Nous ne citons ici que les principaux procédés applicables à l'anticorrosion.

##### A) Protection par revêtements:

Ces revêtements isolent le matériau de l'électrolyte. Ils peuvent être métalliques, non métallique et chimique, comme on peut voir au tableau 4.1.

Tableau 4-1: Types de revêtements

Métallique	Non métallique		chimique
	Organique	Inorganique	
Zinc	<i>peintures</i>	<i>émaux</i>	<i>phosphates</i>
Aluminium	<i>laques</i>	<i>béton</i>	<i>oxydes</i>
Bétons	<i>Résines</i>		
Plomb	<i>Graisses</i>		
Etain	<i>cires</i>		
Cadmium			
Cuivre			
Nickel			
Chrome			
Argent			
Or			

### ▪ **Revêtements non métalliques:**

Les revêtements non métalliques sont des peintures, soit des polymères, soit des goudrons.

En ce qui concerne les peintures, il faut appliquer au moins deux types différents : une couche de fond et des couches de finition. La peinture utilisée pour les couches de fond doit mouiller parfaitement la surface à peindre et y adhérer. Ces peintures contiennent souvent des poudres de zinc ou d'aluminium, qui agissent comme anode, ou des pigments (comme le chromate de zinc), qui peuvent jouer le rôle d'inhibiteur.

Les polymères utilisés comme revêtements sont soit thermoplastiques (PET, PVD, etc.) soit thermodurcissables (polyépoxydes, etc.).

Les structures enfouies sont souvent protégées par des revêtements à base de goudron, d'asphalte ou de bitume.

Les revêtements doivent être continus et adhérents ; toutefois, en pratique et en cours d'utilisation, ils ne le sont jamais parfaitement. C'est pourquoi, afin de minimiser les risques de corrosion, il faut prévoir des moyens de protection supplémentaires, comme la protection anodique ou des traitements de surface préalables (par exemple, la phosphatation), et également concevoir adéquatement les structures.

### ▪ **Revêtements métalliques:**

Par rapport au métal à protéger, les revêtements métalliques peuvent être soit anodiques, soit cathodiques.

Ainsi, le zinc, qui est anodique par rapport à l'acier, joue le rôle d'anode sacrificielle dans les pièces en tôle galvanisée.

Le chrome, par contre, est cathodique par rapport à l'acier ; par conséquent, au niveau de chaque discontinuité du revêtement, il y a corrosion de l'acier sous la couche de chrome.

On peut effectuer les revêtements métalliques par placage électrolytique, par immersion dans un bain de métal liquide, par métallisation à la flamme, par soudage, par laminage, etc.

La figure 4.2 résume les méthodes d'application et indique les métaux qui peuvent servir de revêtements.

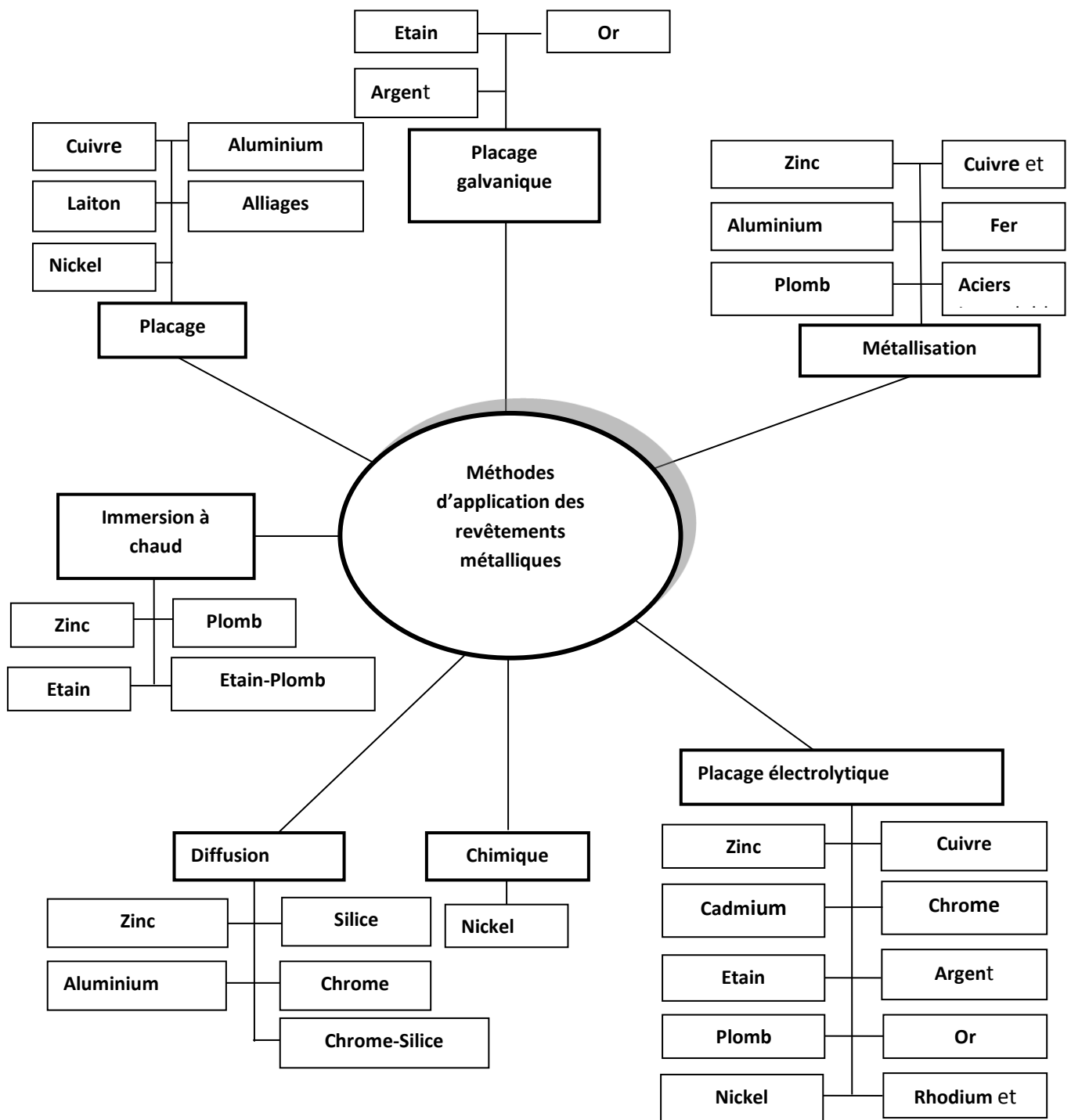


Figure 4.1 : Revêtements métalliques.

## **B) Protection électrochimique:**

Pour effectuer la protection électrochimique d'un métal, on modifie son potentiel de dissolution de façon à ce que celui-ci utilisé soit dans la zone d'immunité, soit dans la zone de passivité. Dans le première cas, le potentiel de corrosion doit être inférieur au potentiel d'équilibre métal-solution ; on parle alors de protection cathodique.

Dans un second cas, il doit être supérieur à ce potentiel d'équilibre, et c'est la protection anodique.

### **▪ Effets secondaires des techniques électrochimiques :**

Les effets bénéfiques des méthodes électrochimiques sont bien assurées néanmoins des effets négatifs dits secondaires pourrait apparaître lors de l'application d'une de ces techniques ces effets dépendent des niveaux de potentiel et de densité de courant utilisés qui peuvent influencer les caractères d'origine du béton.

En effet, la polarisation de l'acier provoque une redistribution des espèces ioniques existant autour de l'acier, la réduction électrochimique des espèces ionique sur la surface d'acier peut provoquer des effets négatifs tels que la flagellation des aciers par hydrogéné l'endommagement de l'interface acier-béton et/ou la dissolution de certaines des phases du béton suite a la valeur élevé du PH.

Le déplacement des espèces cationiques vers la surface de l'acier peut provoquer la solvation de la pate de ciment. L'accumulation des cations autour de l'acier pourrait commencer ou accélérer la réaction alcali-silice.

## **C) Protection par inhibition:**

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

Un inhibiteur est une "substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif.

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

#### **4.1.2. Protection contre la corrosion des armatures dans le béton:**

##### **A) Couverture des armatures:**

Les essais de laboratoire et l'examen de bétons détériorés montrent qu'un facteur essentiel pour la durabilité est l'épaisseur du recouvrement des armatures. La norme SIA 162 prévoit, que la couverture doit être de 1.5 cm au moins pour les constructions à l'abri des intempéries et de 2.5cm si elles ne sont pas à l'abri. Le recouvrement est à augmenter jusqu'à un maximum de 5cm dans les milieux agressifs. Rappelons que pour même béton le temps pour la carbonatation atteignant une armature située à 4cm de la surface sera quatre fois plus long pour une armature située à 2 cm. On constate que sur ce plan les normes ne sont trop souvent pas respectées et que de nombreux ouvrages se dégradent déjà quelques années après leur construction.

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

##### **B) Revêtements anticorrosion:**

Les revêtements anticorrosion peuvent être classés en différentes catégories :

- I- Imprégnation en profondeur (résines en solution ou en émulsion aqueuse).
- II- Revêtements pelliculaires non armés (résines époxydes, polyuréthanes).
- III- Revêtement armé (1 à 3 mm d'épaisseur, résines époxydes et polyuréthanes).
- IV- Mortiers de résines (3 à 20 mm d'épaisseur, résines époxydes et polyuréthanes chargés).

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

### **C) Protection cathodique :**

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

### **D) Protection des armatures par les inhibiteurs de corrosion:**

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

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

Les méthodes principales d'application pour des inhibiteurs de corrosion sont:

- ajoutés comme mélange au béton frais.
- appliqué sur la surface du béton durci.

Les inhibiteurs peuvent aussi être ajoutés

- soient aux mortiers de réparation.
- utilisés comme traitement extérieur sur les barres d'acier.

Selon les différents mécanismes de la protection, l'inhibiteur de corrosion peut être :

#### **1) Anodique :**

L'action anodique d'inhibiteurs sur la dissolution de l'acier et de réduire le taux de corrosion par une augmentation du potentiel de corrosion de l'acier. L'inhibiteur anodique le plus généralement utilisé est le nitrite de calcium ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ). Le nitrite de sodium, le benzoate de sodium et le chromate de sodium ont été également employés.

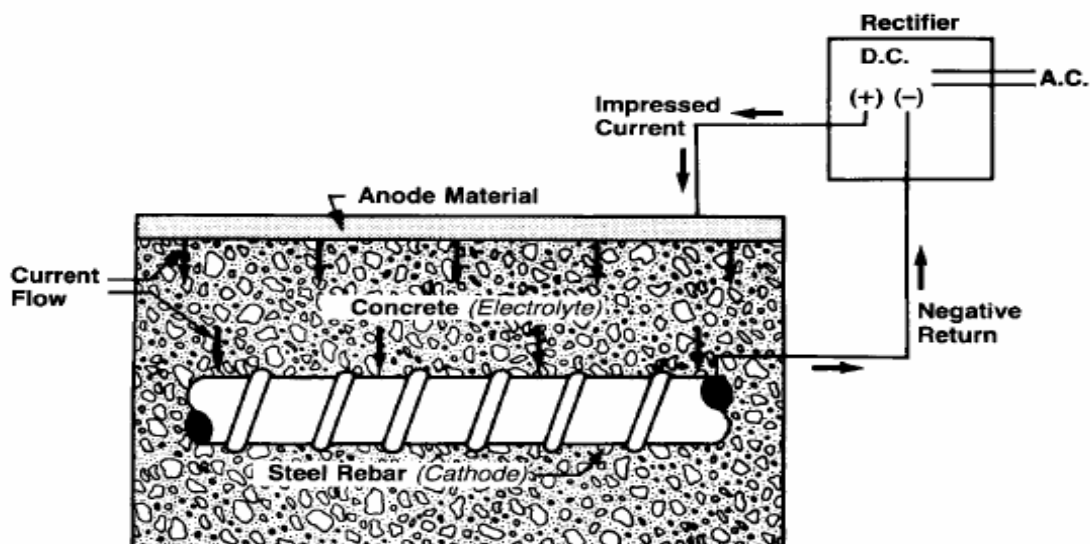


Figure 4.2: Protection cathodique par courant imposé.

a. Cathodique:

Les inhibiteurs cathodiques agissent sur la réaction de l'oxygène sur la surface en acier et ils réduisent le taux de corrosion par une diminution de potentiel de corrosion.

Les inhibiteurs cathodiques les plus généralement utilisés sont l'hydroxyde de sodium et carbonate de sodium, qui est censé à augmenter le pH près de l'acier, et réduire le transport de l'oxygène en couvrant la surface en acier. Des phosphates, le silicate et les polyphosphates sont également employés.

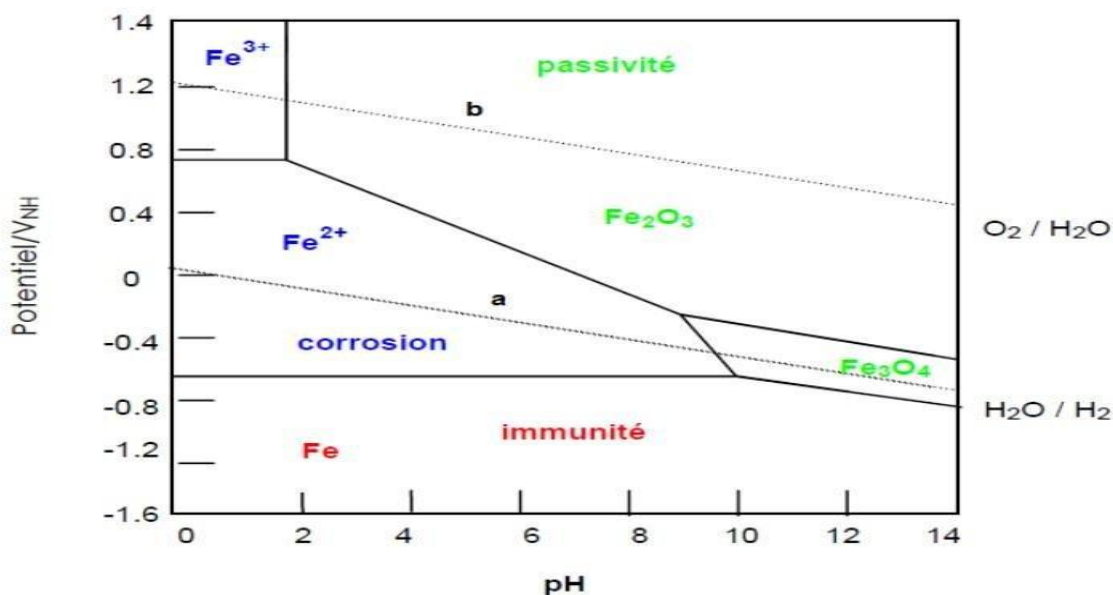


Figure 4.3: Diagramme de Pourbaix simplifié du système fer/eau.

## **2) Mixte :**

Les inhibiteurs mixtes agissent sur les sites anodiques et cathodiques en même temps. Ils réduisent le taux de corrosion sans changement du potentiel de corrosion. Généralement ils agissent par l'adsorption extérieure au-dessus de la surface de l'acier en contact avec l'inhibiteur et forment par conséquent une couche protectrice mince.

Les inhibiteurs mixtes, avec les groupements hydrophobes qui ont les groupes polaires tels que N, S, OH sont efficaces. Des composés organiques de polymère tels que l'amine et l'aminoalcool (AMA) sont également employés.

## **4.2. La réhabilitation des ouvrages contre la corrosion :**

### **4.2.1. Démarche à suivre pour réhabiliter un ouvrage en béton armé dont les armatures sont corrodées :**

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 les techniques de réhabilitation est celle qui est décrite dans ce contexte. Elle comprend les quatre phases suivantes :

#### **A) 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.

#### **B) 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.).

### **C) 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.

### **D) 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 ou des garanties particulières, peuvent s'appliquer également les principes de la responsabilité décennale.

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), A ceci s'ajoute aussi la responsabilité en matière de produits défectueux.

## *Conclusion*

La dégradation de la matière et des œuvres réalisés par l'homme lui impose le devoir de chercher à conserver ce qu'il a créé. C'est pour quoi, on doit connaître les conditions dans lesquelles se produisent les phénomènes de corrosion pour utiliser les moyens d'y faire face.

De nombreux ouvrages nécessitent très souvent de nouvelles interventions contre cette pathologie alors qu'ils venaient d'en être traités. Cette situation peut être imputée soit à la non maîtrise du phénomène de corrosion par les techniciens et les ingénieurs, soit à une mauvaise démarche adoptée lors de la protection ou au choix d'une méthode de réhabilitation inadéquate inefficace.

L'objectif visé ici était d'exposer le phénomène de corrosion, ses mécanismes et les conséquences sur la performance et durabilité des ouvrages en béton armé.

Pour y parvenir, il est jugé indispensable :

- De présenter le matériau béton armé et les différentes pathologies dont il peut être atteint car on ne peut pas prétendre soigner un mal dans un corps si on ne connaît pas bien le corps en question.
- Etudier l'impact du milieu environnant sur le comportement des ouvrages et leurs dégradations.
- Exposer le mécanisme de la corrosion et les dommages qu'elle peut causer aux structures.
- Donner les étapes à suivre pour pouvoir établir un diagnostic fiable sur un ouvrage en béton armé.
- Adopter des méthodes fiables pour la réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures, leur mise en œuvre et leur limite.

Jusqu'au jour l'idée de suivi des projets, dans la majorité des entreprises algériennes, reste limitée à l'esthétique, l'hygiène et l'architecture, et atteint à peine l'entretien du béton armé.

Même si certains codes mentionnent quelques méthodes de réparation du béton armé, il sera intéressant pas seulement de s'approfondir dans les normes de ces méthodes, mais aussi de détailler le savoir-faire dans le domaine du management de tels projets et du suivi d'un ouvrage sous une norme algérienne spécifique.

## **Références bibliographiques**

- [1] BOUHADJEB K., *Investigation sur les pathologies potentielles des ouvrages d'art situés à l'ouest algérien, Thèse de Magister*, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem 2009.
- [2] MAILVAGANAM N.P, *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press, Boca Raton, FL 1992.
- [3] MEHTA, P.K., AND GERWICK, B.C. *Cracking–corrosion interaction in concrete exposed to marine environment*, Concrete International, 1982.
- [4] MEHTA, P.K. *Performance of concrete in marine environment*, ACI SP-65, pp. 1-20, 1980
- [5] EMMONS, P.H. *Concrete repair and maintenance illustrated*, R.S.Means Company, Kingston, 295 p., 1994.
- [6] MEHTA, P.K. ET GERWICK, B.C., *Concrete structures, properties and materials*, Concrete International, 1982.
- [7] FRANÇOIS.R, ARLEGUI.G, MASO.J.C, *Durabilité du béton armé*, Rapport de synthèse L.M.D.C. INSA Toulouse-UPS Toulouse France 1994.
- [8] LCPC, *Défauts d'aspect des parements en béton*, techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées.
- [9] TAHENNI T. *Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute*, Thèse Magister en Génie Civil, USTHB, 2006.
- [10] BARON J., *Les fissurations spontanées et accidentelles du béton non armé et armé*, Le béton hydraulique, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982.
- [11] GRIMALDI G. et al, *Visualisation des fissures des bétons par la méthode du ressuage*, bulletin de liaison des LPC n° 129, p. 51-55, janvier-février 1984.
- [12] Bouillette J.-P. *Protection des constructions en acier contre la corrosion*. Paris, Techniques de l'ingénieur, vol. 4, n° C 2 505, 1983.
- [13] Cresson R., Gudin T. et Tache G. *Corrosion et protection des métaux dans le bâtiment*. Paris, Centre d'assistance technique et de documentation, 1998.
- [14] Neville A.M. *Propriété des bétons*. Paris, Éditions Eyrolles, 2000.
- [15] BOUILLETTE J.P. *Protection des constructions en acier contre la corrosion*. C 2505, traité Construction 1983.

- [16] DERRIEN F. *La corrosion des matériaux métalliques dans le bâtiment*, Edition Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1990
- [17] WOOD J., *Désordres provoqués par la réaction alcali-granulats dans les ouvrages en béton armé*, Annales ITBTP, no 469, p. 85-99, nov. 1988.
- [18] LASSOUED R., OUCHENANE K. ET OUCHENANE M, *Influence de l'enrobage de béton sur la corrosion des armatures et effet de la corrosion sur l'adhérence*, Colloque National : Pathologie des Constructions, Université M'entourai Constantine - 25 et 26 Novembre 2008.
- [19] MEZHOUD BILEL, (2011). « *Synthèses des inhibiteurs contre la corrosion des aciers*».
- [20] BOUILLETTE J.P. *Protection des constructions en acier contre la corrosion*. C 2505, traité Construction 1983.
- [21] DERRIEN F. *La corrosion des matériaux métalliques dans le bâtiment*, Edition Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1990