

N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignements Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

FACULTE DE GENIE CIVIL



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

EN GENIE CIVIL

Spécialité : Géotechnique

Par

Mme Nassima. KERBOUA

Epouse OUHDADOU

Thème

**CONTRIBUTION A LA MESURE DE LA CORROSION DES ACIERS DANS
LE BETON ARME.**

Soutenu le : **12 Mai 2007, devant le jury suivant :**

BRAHMA	Professeur à l'université de Blida	Président
KHARCHI	Professeur à l'U.S.T.H.B	Directrice de thèse
OUDJIT	Chargé de recherche à l'U.S.T.H.B	Examineur
HANNANI	Maître de conférence à l'U.S.T.H.B (chimie)	Examineur
BOUTAMINE	Chargé de recherche à l'U.S.T.H.B	Invité

Sommaire

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

Chapitre I

Phénomène de la corrosion des aciers dans le béton armé

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de la corrosion.....	3
I.3 Aspect morphologique des corrosions.....	3
I.4 Mécanisme de corrosion des armatures.....	4
I.5 Facteurs influant sur la corrosion des armatures.....	6
I.6 Progression de la corrosion des armatures.....	15
I.7 conséquences de la corrosion sur la performance des structures.....	15
I.8 Effet de la corrosion des armatures sur leur adhérence.....	17
I.9 Produits de corrosion.....	18
I.10 Méthode de caractérisation des produits de corrosion.....	19
I.11 Méthodes de protection contre la corrosion.....	23

Chapitre II

Méthodes de mesure de la corrosion des aciers

II.1 Introduction.....	33
II.3 Méthodes soniques.....	34
II.4 Les méthodes radioactives (rayonnement X ou gamma).....	36
II.5 La thermographie infrarouge.....	37
II.6 Les méthodes électriques (méthodes électrochimiques).....	39
II.7 Les méthodes magnétiques.....	49
II.8 Les méthodes électromagnétiques (RADAR).....	49

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 Introduction.....	52
III.2 Matériaux utilisés.....	52
III.3 Les éprouvettes d'essais.....	53
III.4 Essais sur le béton.....	55
III.5 Analyse de la corrosion.....	56
III.6 Résultats et interprétations.....	61

Conclusion générale.....	72
--------------------------	----

Liste des figures

Chapitre I

Phénomène de la corrosion des aciers dans le béton armé

Figure I.1: Type de corrosion dans le béton.....	4
Figure I.2 : Schéma illustrant le processus de corrosion des aciers.....	5
Figure I.3 : Volume relatif du fer et ses produits de corrosion	6
Figure I.4 : Coupe théorique d'un mur en béton	9
Figure I.5 : Diagramme de Pourbaix pour le fer.....	10
Figure I.6 : Circonstances de corrosion et de non corrosion d'acier en fonction de l'alcalinité et de la teneur en chlorure.....	12
Figure I.7 : Modèle conceptuel de la corrosion des aciers dans le béton.....	15
Figure I.8 : Conséquences de la corrosion sur la performance des structures	16
Figure I.9: Organigramme pour la stratégie d'investigation des structures corrodées en béton armé.....	17
Figure I.10 : Interaction électrons matières	19
Figure I.11 : Schéma de principe du microscope électronique à balayage.....	20
Figure I.12: Dispositif expérimental de l'analyse par diffraction de rayons X.....	22
Figure I.13 : Protection cathodique par courant imposé	27
Figure I.14 : Schéma de la protection cathodique.....	28
Figure I.15 : Relevé de potentiel des zones protégées et non protégées.....	29
Figure I.16 : Profil des chlorures	29

Chapitre II

Méthodes de mesure de la corrosion des aciers

Figure II.1: Principe de la méthode impact-echo.....	35
Figure II.2: Principe de la tomographie sonique.....	35
Figure II.3 : Principe de la radiographie	36
Figure II.4: Principe de la thermographie infrarouge	37
Figure II.5: Principe de la mesure de la vitesse de corrosion	40
Figure II.6 : Principe de mesure du potentiel d'électrode.....	42
Figure II.7: Principe de la méthode des 4 points.....	45
Figure II.8 : Méthode du disque.....	46
Figure II.9: Electrode de travail pour la mesure de résistivité.....	47
Figure II.10: La propagation d'une onde RADAR dans un milieu multi couche.....	49
Figure II.11: cartes binaires de réflectivité et du potentiel de corrosion.....	51

Chapitre III

Etude expérimentale

Figure III.1: Courbe granulométrique des différentes classes de granulats.....	52
Figure III.2 : Eprouvette (7x.7x28) cm ³ mise en place des Barres et entaille.	53
Figure III.3: Eprouvette d'essai	54
Figure III.4: Mesure de l'absorption capillaire	55
Figure III.5: Synoptique de la chaîne de radioscopie.....	57
Figure III.6 : Eprouvette en béton armé de (7x7x28) testée par le radioscope.	58
Figure III.7: Principe de la mesure de potentiel d'électrode.....	59

Figure III.8: Dispositif permettant de mesurer le potentiel d'électrode des armatures dans le béton immergé.....	59
Figure III.9: Taux de corrosion à 4 mois et 7 mois pour les éprouvettes.....	61
Figure III.10 : Eprouvette non corrodée.....	61
Figure III.11: Eprouvette corrodée après immersion de 04mois dans la solution Nacl 4N.....	62
Figure III.13: Positions de mesure.....	63
Figure III.14 : Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr de la première barre pour la position gauche	64
Figure III.15: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr de la première barre pour la position médiane	64
Figure III.16: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr de la première barre pour la position droite	65
Figure III.17 : Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr de la deuxième barre pour la position gauche.....	65
Figure III.18: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr de la deuxième barre pour la position médiane	66
Figure III.19: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr de la deuxième barre pour la position droite.....	66
Figure III.20: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr.....	67
Figure III.21: Variation du potentiel au cours du temps	69

Liste des tableaux

Chapitre I

Phénomène de la corrosion des aciers dans le béton armé

Tableau I.1 : Volume de produit de corrosion.....	18
Tableau I.2 : Interventions préconisées pour la réparation et la reconstruction des ouvrages.....	24

Chapitre II

Méthodes de mesure de la corrosion des aciers

Tableau II.1: Les niveaux de risque de corrosion à partir des valeurs de R_p	41
Tableau II.2: Probabilité de corrosion des armatures.....	43
Tableau II.3: Interprétation de résistivité du béton avec les niveaux de risque de corrosion	44

Chapitre III

Etude expérimentale

Tableau III.1: Composition chimique du ciment.....	52
Tableau III.2: Résultats d'analyses spectrométriques.....	53

REMERCIEMENT

*Avant tout je remercie **le Dieu tout puissant** de m'avoir donné le courage et la volonté pour mener à terme ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements et reconnaissances à ma Directrice de recherche Madame **KHARCHI FATTOUM** Professeur à la faculté de génie civil de m'avoir encadrer et de m'avoir guider lors nos rencontres fructueuses sur le sujet et surtout pour le soutien constant qu'elle m'a accordé.*

Qu'elle trouve ici l'expression de mon plus profond respect.

*Je remercie Monsieur **HANNANI** Maître de conférence à l'U.S.T.H.B faculté de chimie pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté pour l'élaboration de la partie expérimentale .Je le remercie également d'avoir accepter d'examiner ce mémoire.*

*Je remercie Monsieur **BRAHMA**, Professeur à l'université de Blida pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être président de jury.*

*Je remercie Monsieur **OUDJIT** Chargé de recherche à l'USTHB, pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de thèse.*

*Je remercie Melle **BOUTAMINE** pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant l'invitation à ce de jury.*

*Merci à **BRAHIM**.*

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, les choix économiques des sociétés industrielles s'orientent vers la sauvegarde et la réhabilitation des ouvrages en service plutôt que vers la destruction et la reconstruction de nouvelles infrastructures. Il apparaît donc important d'évaluer l'état de santé des ouvrages dans une perspective de développement durable et d'économie d'énergie.

En génie civil, la dégradation des structures en béton armé, telles que les ponts et viaducs, a très souvent pour origine la corrosion des aciers. Celle-ci se manifeste par l'apparition de traces de rouille sur la surface du béton, la présence de délaminage et parfois même l'éclatement du béton de recouvrement.

Compte tenu de l'impact socio-économique de ces ouvrages, une surveillance est nécessaire dès que des signes de vieillissement apparaissent.

La présente étude consiste à évaluer la corrosion des aciers dans le béton armé. Plusieurs recherches avancées ont été faites dans ce but. Pour cela nous avons établi une recherche bibliographique approfondie suivie d'une courte contribution expérimentale.

- L'étude bibliographique consiste à exposer les différentes recherches relatives au phénomène de la corrosion des aciers ainsi que les différentes méthodes de mesure de celle-ci.

- La partie expérimentale consiste à étudier la corrosion des aciers d'une éprouvette immergée dans une solution chlorurée à forte concentration par les deux méthodes suivantes :

1- La radioscopie.

2- La mesure du potentiel d'électrode.

Le mémoire synthétisant notre recherche est organisé en trois chapitres qui sont :

Chapitre I : Phénomène de la corrosion des aciers dans le béton armé.

Chapitre II : Méthodes de mesure de la corrosion des aciers.

Chapitre III : Etude expérimentale.

Chapitre I

PHENOMENE DE LA CORROSION **DES ACIERS** **DANS LE BETON ARME**

I.1 Introduction

Le béton armé, longtemps considéré comme un matériau idéal dans lequel les armatures étaient à l'abri de la corrosion, génère aujourd'hui des coûts de réparation énormes précisément à cause de la corrosion des aciers provoquée par la pénétration de chlorure ou la carbonatation du béton. [1], [2].

L'état de corrosion se traduit au cours du temps par la diminution du diamètre effectif des aciers et la formation de la rouille. Cette dernière occupe un espace bien supérieur à celui de l'acier original, provoquant l'éclatement du béton et à terme la destruction des ouvrages.

I.2 Définition de la corrosion

La corrosion est définie comme étant la destruction d'un matériau par réaction chimique ou électrochimique avec son milieu environnant.

Cela signifie que la corrosion suppose un système matériau- milieu environnant susceptible d'entrer en réaction [3].

I.3 Aspect morphologique des corrosions

D'une manière générale l'examen à l'œil nu, à la loupe ou au microscope, permet d'identifier quatre types de corrosion [3].

I.3.1 Corrosion uniforme

C'est une corrosion qui se développe sur toute la surface du métal et à une vitesse presque identique en tous ses points. Le métal corrodé peut, soit passer en solution, soit rester au voisinage de la surface sous forme de divers produits de corrosion. Les propriétés mécaniques intrinsèques du métal (limite élastique, charge à la rupture, allongement, etc..) ne sont pas modifiées.

I.3.2 Corrosion par piqûres et crevasses

Il s'agit de corrosion localisée. Certaines parties du métal restent inaltérées, tandis qu'en certains de ses points on observe une progression très rapide de la corrosion. Bien que la quantité de métal passée en solution soit relativement faible, ce type de corrosion est dangereux : il peut aboutir en effet à la perforation du métal.

I.3.3 Corrosion inter granulaire

Elle se caractérise par la dissolution préférentielle des joints de grains du métal. Pratiquement invisible à l'œil nu, elle conduit à la décohésion du métal et en modifie considérablement les caractéristiques mécaniques, en particulier l'allongement et la charge à la rupture.

I.3.4 Corrosion transgranulaire

Ce type de corrosion est caractéristique des corrosions sous contraintes. Il se manifeste par la progression de fines fissures (où le métal est dissous) perpendiculairement aux contraintes principales de tension. Cette corrosion est pratiquement invisible à l'œil nu ; elle affecte très dangereusement les propriétés mécaniques du métal et peut se développer de manière extrêmement rapide.

Ces quatre types de corrosion peuvent coexister dans une même installation.

On peut considérer que pour le même matériau la vitesse et l'importance de la dégradation augmentent lorsque l'on passe de la corrosion uniforme à la corrosion par piqûres puis à la corrosion intergranulaire et en fin à la corrosion transgranulaire.

Dans le béton armé, la carbonatation induit une corrosion uniforme ; par contre c'est une corrosion par piqûre dans le cas de la pénétration des chlorures (figure I.1).

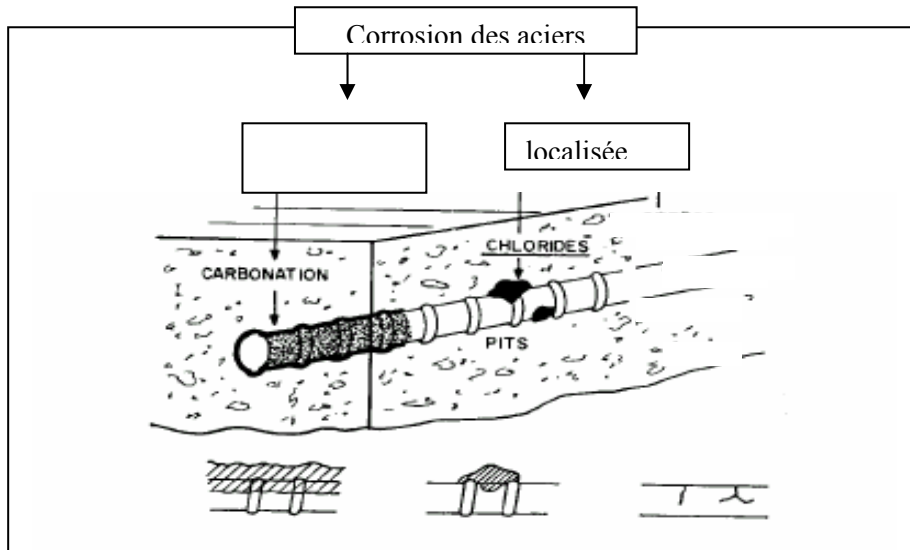


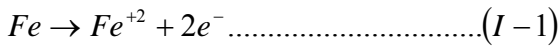
Figure I.1: Type de corrosion dans le béton : uniforme (carbonatation), localisée (chlorure)

I.4 Mécanisme de corrosion des armatures

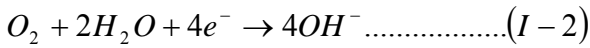
La corrosion des armatures est la conséquence d'un phénomène électrochimique qui consiste en une réaction d'oxydo-réduction, entre la zone anodique et une zone cathodique des aciers d'armature. Le processus de corrosion peut être divisé en processus électrochimique primaire et processus électrochimique secondaire [4].

I.4.1 Processus électrochimiques primaire :

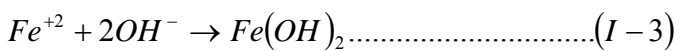
Pour l'acier dans le béton, le film passif est dégradé par les ions chlores ou l'abaissement du pH par la carbonatation ; le fer Fe à l'anode est oxydé pour former les ions ferreux (Fe²⁺)



Tandis que dans la zone cathodique, l'oxygène présent dans le béton entourant les aciers d'armature réagit avec les électrons pour former des ions hydroxyles (OH⁻).



Les ions ferreux Fe²⁺ réagissent avec les ions hydroxyle (OH⁻) pour produire un précipité blanc d'hydroxyde de fer Fe(OH)₂



Le processus de corrosion des aciers est présenté dans la figure I.2[1]

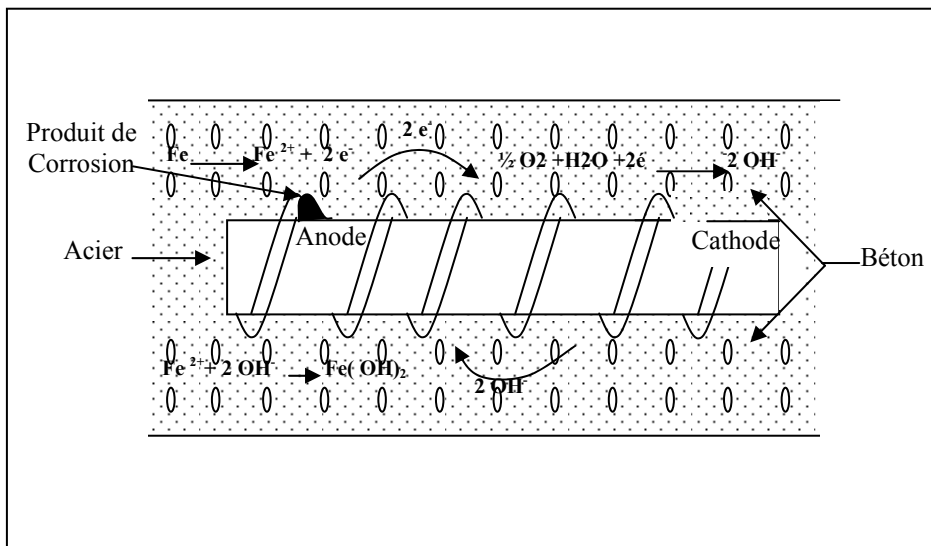
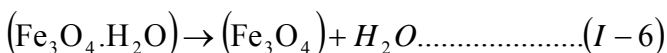
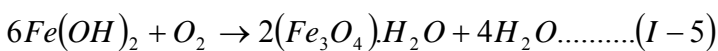
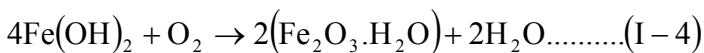


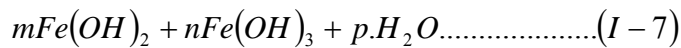
Figure I.2 : Schéma illustrant le processus de corrosion des aciers[1].

I.4.2 Processus secondaire

Fe (OH)₂ est converti en oxyde ferrique hydraté (Fe₂O₃. H₂O), connu sous le nom de rouille rouge-brune et la magnétite noir (Fe₃O₄) précédé par la formation de la magnétite hydratée (Fe₃O₄.H₂O)



La composition de la rouille dans le fer est exprimée par cette formule générale :



Où les valeurs de m, n et p varient considérablement selon les conditions telles que le pH de la solution, l'oxygène et l'humidité.

Le volume de la rouille est beaucoup plus grand (environ 4 à 6 fois) que celui du fer, comme représenté sur la figure (I.3)

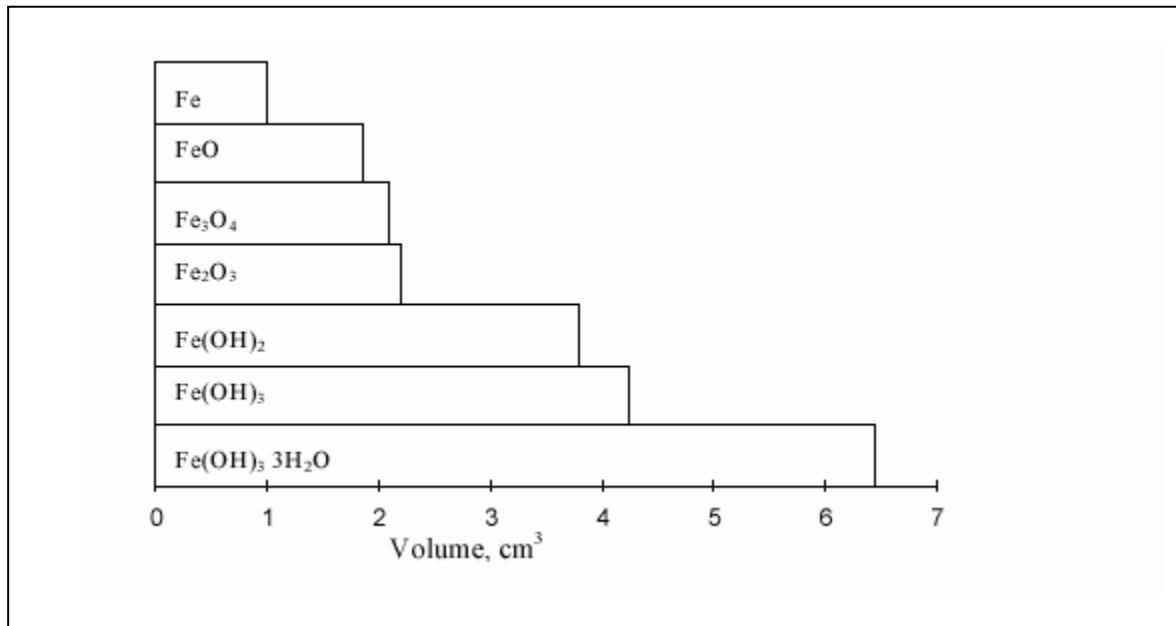


Figure I.3 : Volume relatif du fer et ses produits de corrosion[5].

I.5 Facteurs influant sur la corrosion des armatures

Les facteurs influents sur la corrosion des armatures dans le béton sont :

I.5.1 L'humidité

Les réactions de corrosion (dissolution métallique ou passivation) ne se produisent qu'en présence d'une solution qui ici contenue dans les pores du ciment durci. Cette solution peut s'évaporer puis rentrer dans le béton dans les zones proches de la surface. Par contre, à cœur (à une profondeur supérieur à 35mm en général), le béton reste saturé d'eau[6].

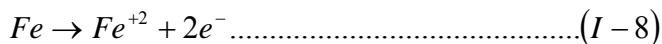
Par ailleurs, la composition de cette solution dépend fortement des agents qui ont pu entrer dans le béton et l'altérer. La pénétration des gaz (dioxyde de carbone, etc.) est plus rapide si le béton n'est pas saturé de liquide (eau). Ainsi, l'humidité du béton influe de deux façons sur la corrosion ou la passivation des armatures. En premier lieu, si l'humidité du béton est faible, la pénétration

de certains gaz est facilitée. Par contre, la corrosion des armatures ne se produit qu'en présence de liquide.

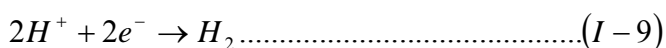
I.5.2 Influence de l'oxygène

La corrosion du fer en milieu aqueux résulte d'un processus électrochimique au cours duquel deux réactions se produisent à la même vitesse [7]. Par exemple en milieu acide :

Sur les sites anodiques :



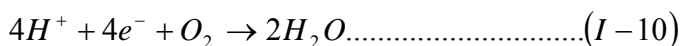
Sur les sites cathodiques :



En milieu neutre ou basique l'hydrogène formé reste absorbé sur les micro cathodes au lieu de se dégager, la réaction devient très lente : en eau désaérée (pH différent de 7) le taux de corrosion est très faible.

Si, par contre, l'eau est aérée*, le taux de corrosion peut atteindre 0.5 mm/an.

L'oxygène joue en quelque sorte comme dépolarisant. Il intervient par exemple en milieu acide selon la réaction :

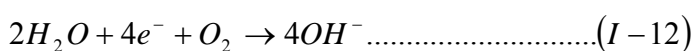


On dit qu'une eau est aérée si la concentration en oxygène est supérieure à 4 mg par litre.

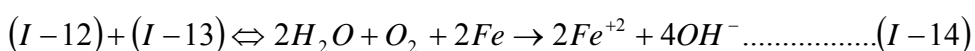
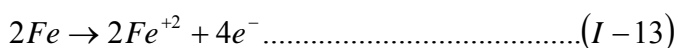
Or en milieu aqueux on a toujours :



Soit en additionnant les deux réactions précédentes :

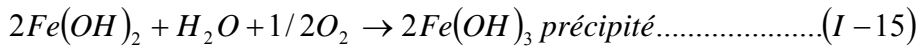


Cette réaction reste valable en milieu neutre ou basique pour lesquels se produit aussi la même réaction de dissolution anodique :



L'hydroxyde ferreux, produit de corrosion, se dissout dans l'eau si le pH est convenable (ou si la saturation est atteinte), il précipite sur le fer et donne Fe(OH)₂.

L'oxygène dissout transforme alors l'hydroxyde ferreux en hydroxyde ferrique Fe(OH)₃ qui lui, est insoluble sur une large étendue de pH :



Selon la vitesse d'oxydation, on obtient en surface des oxydes de fer plus ou moins hydratés et des structures cristallographiques différentes. La rouille comporte donc souvent plusieurs constituants, en particuliers :

- la goethite $\alpha FeOOH$ (ou $\alpha Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$).
- la lépidocrocite $\gamma FeOOH$ (ou $\gamma Fe_2O_3 \cdot H_2O$)
- la magnétite Fe_3O_4 (ou $Fe_3O_4 \cdot H_2O$).

Les sels ferreux qui se forment initialement sur la surface sont peu adhérents, la rouille peut se détacher facilement, et l'attaque du métal se développer.

L'oxygène dissous dans un liquide aqueux joue un rôle primordial dans la réaction cathodique (I-12) de la corrosion des aciers [6].

Ainsi, plus la teneur en oxygène est élevée, plus grande est la vitesse de cette réaction, laquelle vitesse égale à celle de la dissolution du métal.

Parallèlement, plus la teneur en oxygène est élevée, plus le potentiel mixte du métal se rapproche de la valeur correspondant à la réduction de l'oxygène. En d'autres termes, ce potentiel mixte se déplace vers les valeurs plus positives [7].

Par ailleurs, l'oxygène a aussi un autre effet dans la corrosion des matériaux à base de fer en présence de chlorure ou de carbonate. En effet, dans ces cas, les produits intermédiaires de corrosion ne sont pas stables. Ils se transforment en produits non passivants et cause la dissolution des chlorures.

I.5.3 Influence de la température

Les réactions chimiques ou électrochimiques sont accélérées lorsque la température s'élève. Par ailleurs, une élévation de température augmente la solubilité des gaz (oxygène, etc) et des sels dans l'eau. Pour une concentration en oxygène donnée, la vitesse de corrosion double approximativement pour chaque augmentation de 30° de température [8].

I.5.4 La carbonatation

La carbonatation est un phénomène chimique présent dans l'épiderme du béton tout au long de sa vie. La combinaison de l'hydrate de chaux (contenu dans le ciment) et de l'acide carbonique de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, le pH du béton baisse et la corrosion des aciers commence figure I.4 [9]. A partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton, il n'y a plus d'échange gazeux grâce aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment. Le pH reste stable à une valeur d'environ 11. La corrosion ne se manifeste pas. Compte tenu de l'absence d'échanges

gazeux, les bétons immergés ne carbonatent pas. Il est à remarquer que des manifestations de carbonatation peuvent survenir sur des faces intérieures de béton lors de climatisation et d'humidification de l'air ambiant. Par conséquent les armatures métalliques incorporées au béton à une distance inférieure à 25mm de la surface se trouveront, dans les conditions habituelles de construction, soumises à la corrosion. Lors de sa formation, la rouille foisonne et fait éclater l'épiderme du béton déplaçant du même coup le front de carbonatation.

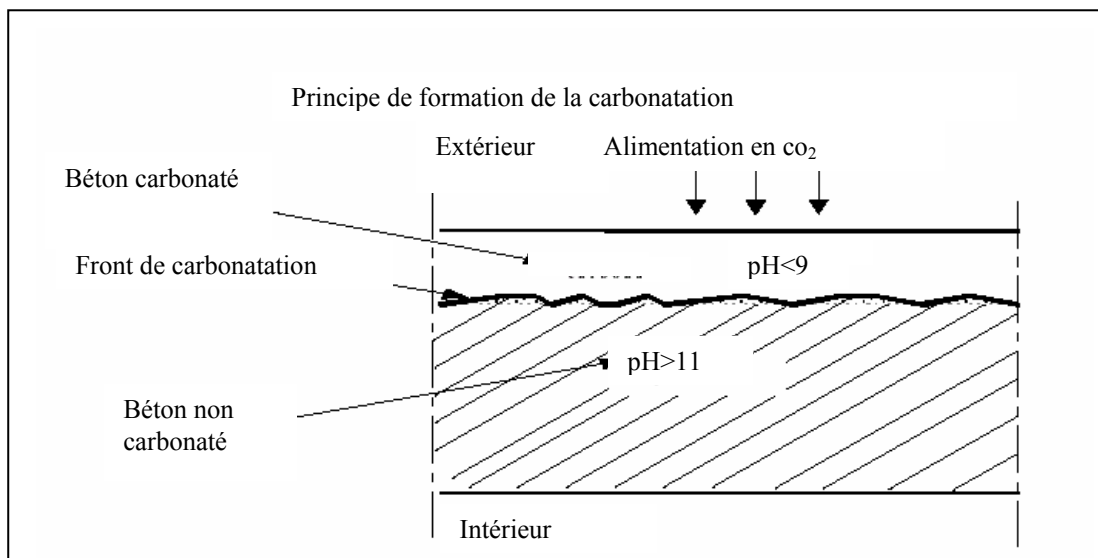


Figure I.4 : Coupe théorique d'un mur en béton [9].

I.5.5 La pénétration des chlorures

Le béton à base de ciment portland contient des pores qui renferment une solution interstitielle en équilibre chimique avec les divers constituants du ciment hydraté, dont l'hydroxyle de calcium. C'est pourquoi, son pH est supérieur à 12, lorsque le béton est sain.

Les aciers enrobés dans un béton sain se recouvrent d'un produit protecteur et, en règle générale, ils ne se corrodent que si la solution interstitielle a disparu (cas des grandes fissures qui atteignent les armatures) ou ne correspond plus à un béton sain. Ainsi, sous l'action des chlorures qui peuvent pénétrer dans ces pores et réagir avec la solution interstitielle et les constituants du ciment. Ces réactions peuvent laisser le béton apparemment intact alors que la solution interstitielle est modifiée. Il en résulte un abaissement du pH du béton. C'est cet abaissement de pH qui modifie la qualité protectrice des produits formés sur l'armature et provoque la corrosion de celle-ci.

La figure I.5 illustre les conditions de pH et de potentiel qui correspondent à un acier passif dans un béton alcalin aéré contenant peu ou pas de chlorures, à un acier qui se corrode dans un béton

carbonaté et à un acier qui se corrode dans un béton trop riche en chlorure (1). Des pH voisins de 3 ont été mesurés à la surface d'aciers corrodés dans les mortiers chlorurés (2)

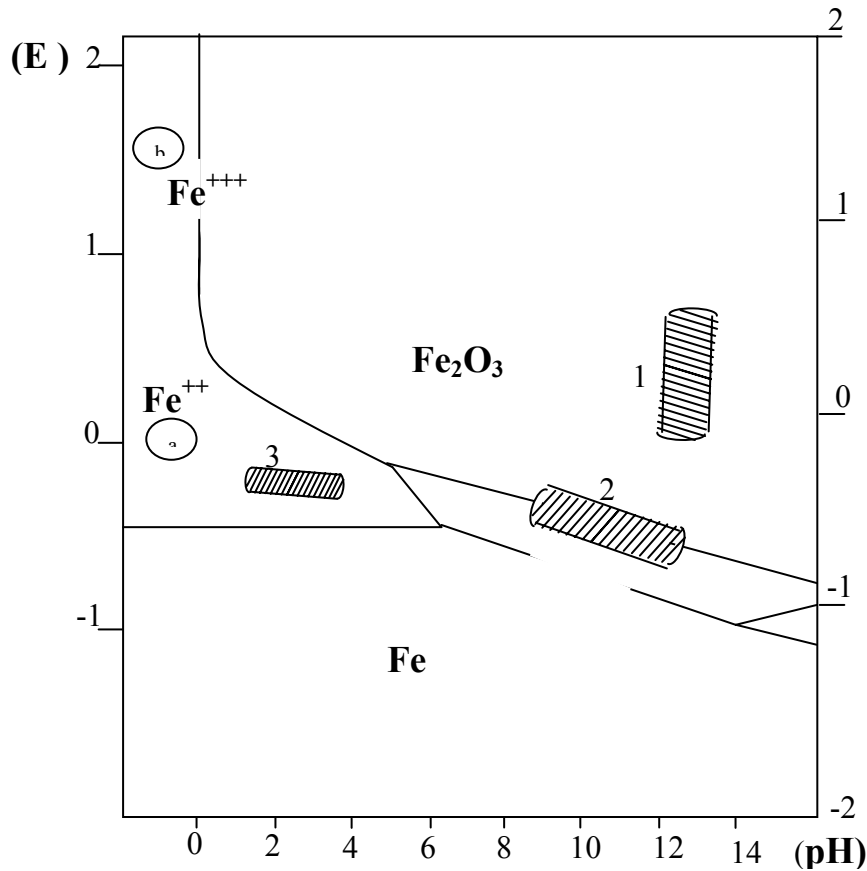


Figure I.5 : Diagramme de Pourbaix pour le fer

- 1 : acier passif dans un béton aéré
- 2 : acier actif dans un béton carbonaté
- 3 : acier actif dans un béton chloruré

Autre cas de dégradation, les chlorures peuvent pénétrer dans le béton sous forme d'embruns marins ou de sels de déverglaçage. Ils ne modifient guère le pH du béton et restent en majorité sous forme d'ions dans ce matériau. En revanche, ils diminuent l'étanchéité des produits formés sur les armatures et favorisent leur corrosion[6].

En présence de chlorures le processus de corrosion est comme suit :

- Aux points de la surface des armatures où la concentration en Cl^- atteint 2g, la couche de passivation est affaiblie et le potentiel s'abaisse ; des piles galvaniques de corrosion se forment entre ces petites zones qui sont anodiques et les zones passivées (très étendues surtout en cette phase de début) qui sont cathodiques. Du fait de ce rapport entre les surfaces anodiques et cathodiques, la densité du courant de corrosion à l'anode est assez grande.

-Les ions Fe^{2+} émis par les anodes vont rencontrer l'oxygène plus ou moins près de la surface du métal et former des oxydes et hydroxydes (rouille) insoluble dans un milieu de pH 12, qui vont recouvrir les zones anodiques de l'armature. Cet écran de plus en plus épais devient de moins en moins alcalin et de moins en moins perméable à l'air (l'oxygène), mais non aux ions chlore. Les analyses confirment cette évolution et montrent que, dans et sous la rouille, les ions chlores s'accumulent, que le pH diminue et que les strates de rouille sont formés vers l'extérieur par des oxydes riches en oxygène, bruns (composés ferriques) [3].

Les chlorures dans le béton proviennent soit des constituants qui interviennent lors du gâchage du béton (agrégats, sable, additifs), soit de la contamination par le milieu environnant.

Il existe plusieurs types de chlorures dans le béton :

- Des chlorures insolubles.
- Des chlorures liés sous forme de sels soluble (sels de Friedel et autre) provenant des éléments introduits dans le béton lors de son gachage.
- Des chlorures libres provenant en partie des éléments ajoutés à la prise et en partie des contaminations ultérieures.

Les chlorures qui interviennent dans la corrosion d'un ouvrage sont ceux dissous dans l'eau des pores, c'est à dire les chlorures libres et la partie soluble des chlorures de sel de Friedel, dans les conditions de mouillage de l'ouvrage.

Ces chlorures provoquent la corrosion des aciers lorsqu'ils atteignent un niveau critique, selon [10] cette teneur est généralement entre 0.2 et 0.5% par rapport au poids de ciment.

Sa valeur augmente s'il y a une augmentation des hydroxydes $[OH^-]$, ainsi du degré de saturation et une diminution du rapport E/C [11].

Les principaux résultats de la pénétration des ions chlores sont les suivants : [12, 13]

- Les armatures dans le béton restent protégées par le produit de leur réaction avec le ciment, lorsque le rapport des concentrations en chlorures $[Cl^-]$ et hydroxyle $[OH^-]$ vérifie la relation $[Cl^-] < 0.6 [OH^-]$.

Lorsque cette relation n'est pas vérifiée, les armatures peuvent de dépassiver localement, la zone des réactions cathodiques (formation de OH^-) continuant de recouvrir ces aciers d'un produit protecteur.

- Le risque de corrosion, en présence d'une quantité donnée de chlorures dissous dans l'eau interstitielle, sera beaucoup plus grand pour un béton fortement carbonaté ou pauvre en ciment que pour un béton fortement alcalin. Ces résultats se présentent sous la forme d'un digramme teneur en chlorure/ alcalinité qui définit des zones de corrosion et des zones de non corrosion. Ce digramme a pu être confirmé par un grand nombre de cas réels étudiés depuis plus de 35 ans (figure I.6).

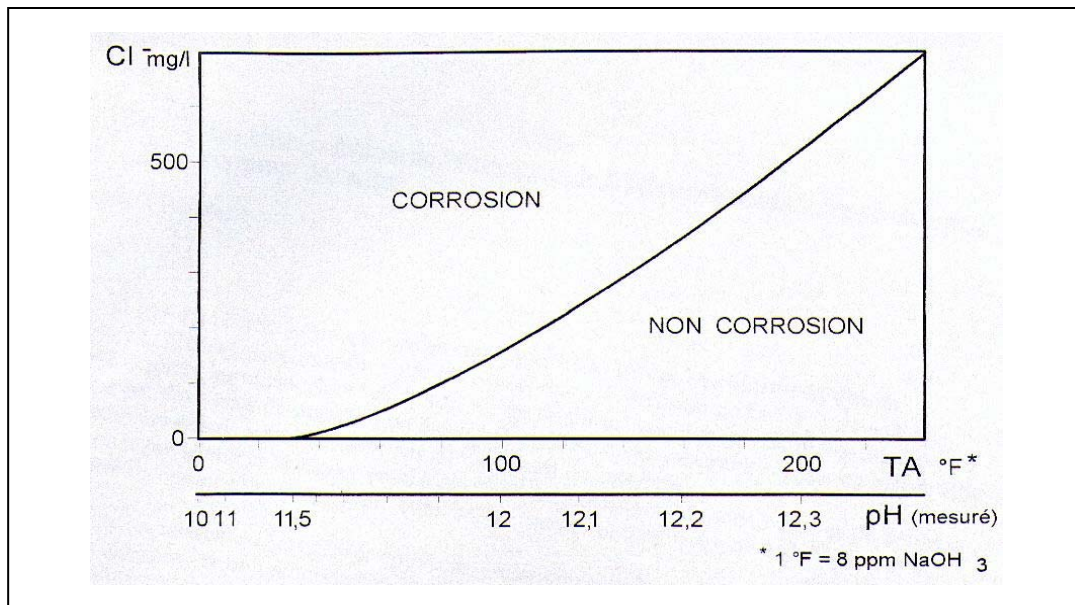


Figure I.6 : Circonstances de corrosion et de non corrosion d'acier en fonction de l'alcalinité et de la teneur en chlorure[13]

[10] a obtenu le profil de teneur en chlorures pour des bétons exposés à des climats différents.

Notons que le profil de la teneur en chlorure se détermine à l'aide de carottes de béton, dans lesquelles des tranches de faible épaisseur (de l'ordre du millimètre) sont découpées pour permettre le dosage de ces chlorures.

D'après ce qui a été dit au paravent la pénétration des ions chlore est probablement le phénomène le plus dévaster pour les structures en béton armé. A fin de minimiser ces dégâts, plusieurs recherches ont été entamées dans ce but. Parmi ces dernières, le travail de [14] où il a ajouté de la pouzzolane naturelle finement broyée au béton à haute performance (BHP), ses résultats d'essais montrent que les BHP de pouzzolane sont dotés d'une imperméabilité élevée vis-à-vis de l'absorption d'eau et des ions chlore.

I.5.6 Influence des organismes vivants

Les principaux organismes affectant la corrosion sont les algues, les champignons, et les bactéries. Ces organismes vivants se nourrissent d'éléments du milieu et rejettent des produits qui peuvent influencer sur la corrosion de la manière suivante [7] :

- En modifiant les réactions cathodiques ou anodiques,
- En influant sur le film protecteur de la surface,
- En créant des conditions corrosives,
- En produisant des dépôts.

Les algues : ce sont des plantes microscopiques qui possèdent de la chlorophylle et qui, comme les végétaux supérieurs, peuvent vivre grâce au CO_2 de l'air et aux radiations solaires. Elles peuvent décomposer l'eau en libérant de l'oxygène, ce qui accélère la corrosion. Leur développement conduit à la formation de dépôts qui diminuent l'échange thermique, augmentent les pertes de charge et provoquent la corrosion.

Les champignons : ce sont des micro organismes sans chlorophylle, qui se développent sur des organismes vivants ou non, se produisant par spores. Ils se nourrissent à partir du milieu par des mécanismes d'oxydation ou fermentation. Dans les mécanismes d'oxydation, les acides tels que les acides citrique, oxalique, gluconique se forment. La présence de tels acides contribue à la corrosion du métal.

Les bactéries : ce sont des organismes unicellulaires qui se reproduisent par scission mais dont le développement est très variable suivant l'espèce et fonction du milieu (pH, température, pression partielle d'oxygène, etc.). Il existe deux groupes de bactéries : celles qui réclament de l'oxygène dans leur métabolisme (bactéries aérobie) et celle qui ne peuvent vivre qu'en l'absence, ou avec très peu d'oxygène (bactéries anaérobies). Quelques bactéries anaérobies utilisent l'hydrogène moléculaire dans leur métabolisme et de ce fait enlèvent l'hydrogène de la surface du métal. D'autres détruiront le film protecteur ou se nourriront des inhibiteurs de corrosion utilisés et rendront le traitement prévu inefficace

I.5.7 Composition et dosage du ciment

Le ciment protège l'acier dans le béton en le maintenant très alcalin avec un pH supérieur à 13 par la présence de cavité $(\text{OH})_2$. Si le pH est au-dessous de 11 l'acier se dépassive. Selon [1] il est important de maintenir un dosage minimum de ciment pour la durabilité des ouvrages, il a recommandé un dosage de 350 à 375 kg/m^3 pour les bétons exposés aux milieux marins.

I.5.8 Les impuretés dans les agrégats

Les sables et les graviers peuvent contenir de chlorures ce qui va favoriser la corrosion, pour cela il faut les laver.

I.5.9 Les impuretés dans l'eau de gâchage

Même l'eau peut contenir une quantité assez considérable de chlorures.

I.5.10 Les adjuvants

L'ajout du chlorure de calcium dans le béton, comme un adjuvant pour accélérer l'hydratation du ciment est une raison pour la quelle il existe des chlorures dans le béton même dans les conditions normales.

Depuis longtemps, il est interdit d'utiliser des ciments avec une teneur en chlorure supérieur à 0.1%, de même , il ne faut utiliser que des adjuvants exempts de chlorures, et la teneur en chlorure de l'eau de gâchage de doit pas dépasser 500 mg cl/l [15].

I.5.11 Influence du rapport E/C

Le rapport E/C contrôle principalement la résistance, la durabilité et la perméabilité du béton. [16] à montrer que la corrosion est plus avancée pour des rapports E/C plus élevés.

L'augmentation de ce rapport induit aussi l'augmentation de :

- La profondeur de pénétration des ions chlore [17]
- La profondeur de carbonatation [18]
- Le coefficient de diffusion de l'oxygène [19]

[20] a trouvé que la perméabilité augmente de 100 fois si le rapport E/C varie de 0.35 à 0.45.

[21] a observé que le temps d'initiation à la corrosion des armatures pour un échantillon de rapport E/C=0.4 est 2.15 à 1.77 fois plus élevé qu'un échantillon de E/C=0.55.

I.5.12 Effet de l'enrobage

L'enrobage de béton autour d'une armature joue deux rôles dans la possibilité de corrosion de cet acier. En premier lieu, il agit comme une barrière mécanique qui freine voire arrête la pénétration des corps susceptibles de corroder les armatures.

En suite, se sont les propriétés de la solution interstitielle au contact de l'acier qui indiquent les possibilités de corrosion ou de passivation de ce métal.

I.6 Progression de la corrosion des armatures

La corrosion des aciers dans le béton évolue en fonction du temps. Dans tout les cas il existe deux étapes, elles sont schématisées sur la figure I.7: une première, appelée phase d'initiation, qui correspond au temps nécessaire à l'apparition de corrosion depuis la mise en œuvre de l'ouvrage ; la seconde est définie par la durée de la période de propagation de cette corrosion qui conduira à la ruine totale de l'ouvrage [6].

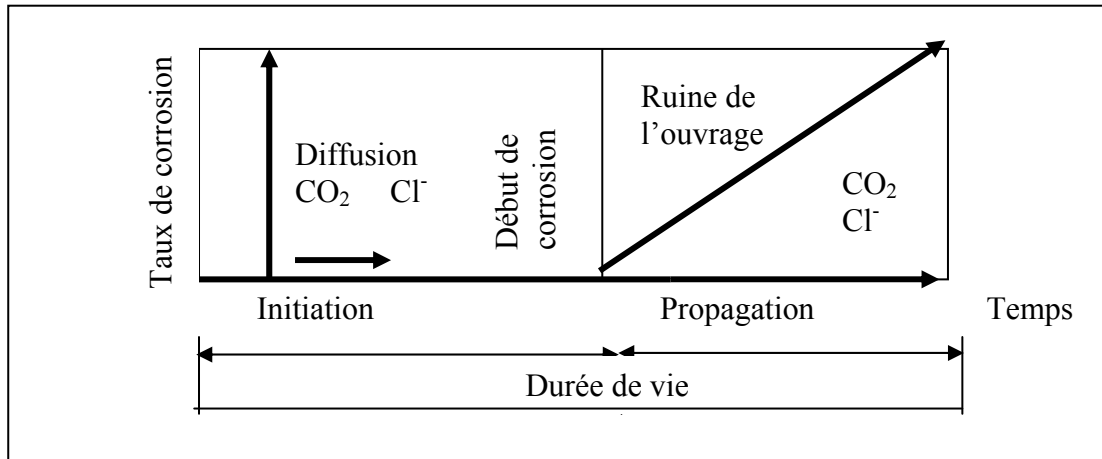


Figure I.7 : Modèle conceptuel de la corrosion des aciers dans le béton [6].

La détection d'une corrosion des aciers sur un ouvrage en béton armé intervient bien souvent au cours de la phase de propagation, au moment où les destructions sont visibles (couleur brune due à la rouille, gonflement et rupture du béton d'enrobage), c'est à dire tardivement. Il devient alors très difficile de réparer tant sur le plan technique que financier.

I.7 Conséquences de la corrosion sur la performance des structures

La première conséquence de la corrosion des armatures est la réduction de la section d'acier, qui conduit à la réduction de la capacité portante de la structure figure I.8 [5] , La rouille qui est le résultat de la corrosion à un volume 2 à 4 fois plus grand que l'acier, ce qui va provoquer des fissures dans le béton.

La corrosion peut également réduire l'allongement de l'acier, en affectant la ductilité de la structure.

D'autre part, l'adhérence acier-béton est affectée par plusieurs mécanismes :

- La production de rouille engendre une expansion interne et donc des contraintes supplémentaires, produisant la fissuration du béton.
- Changement des propriétés de l'adhérence acier-béton.

En conséquence, la réduction de la capacité des structures est basée sur les trois phénomènes :

- Réduction de la section des aciers,
- Adhérence acier –béton faible,
- Fissuration du béton.

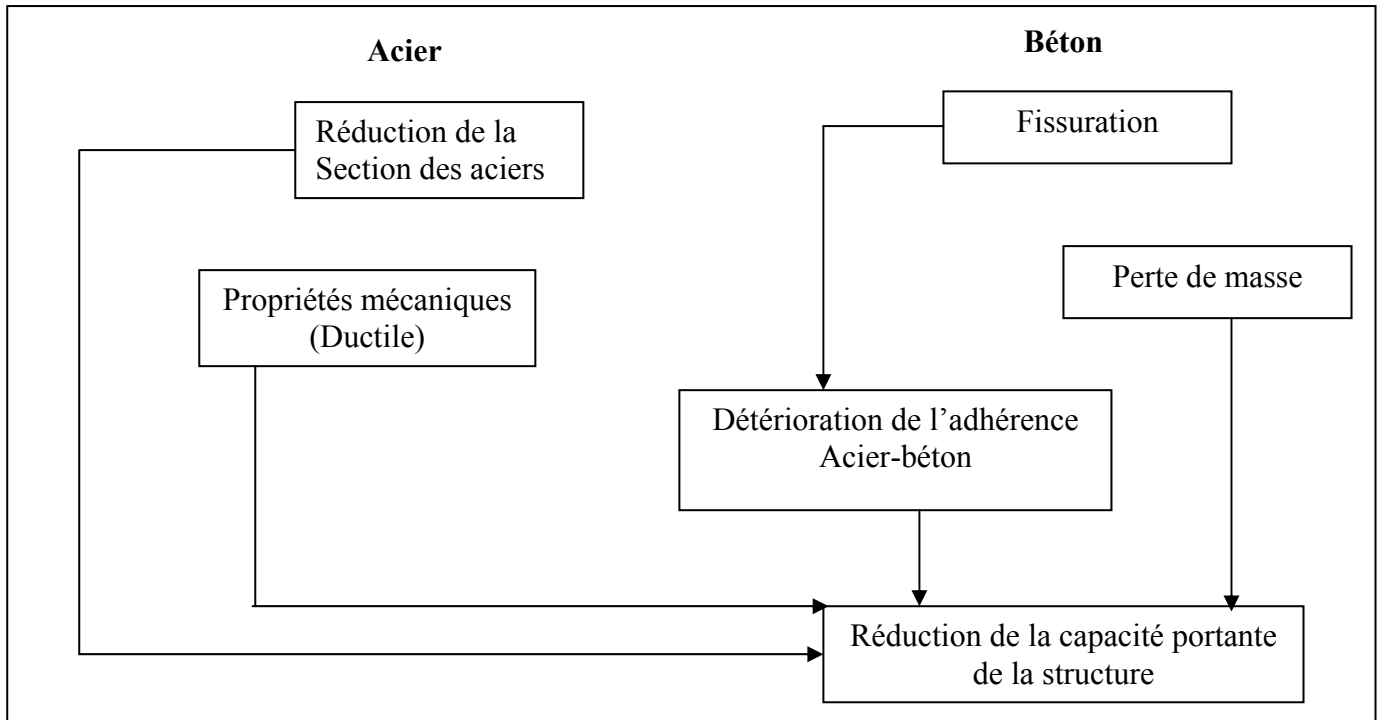


Figure I.8 : Conséquences de la corrosion sur la performance des structures [4]

L'état de conservation de ces structures, est évalué à partir des investigations telle que des inspections visuelles. Ces investigations ont pour but d'établir un diagnostic qui permet d'évaluer le niveau de service d'un ouvrage et de prévoir l'évolution probable des désordres [22].

Un organigramme pour l'investigation des structures corrodées en béton armé est proposé par Pullar- Strecker [1], figure (I.9).

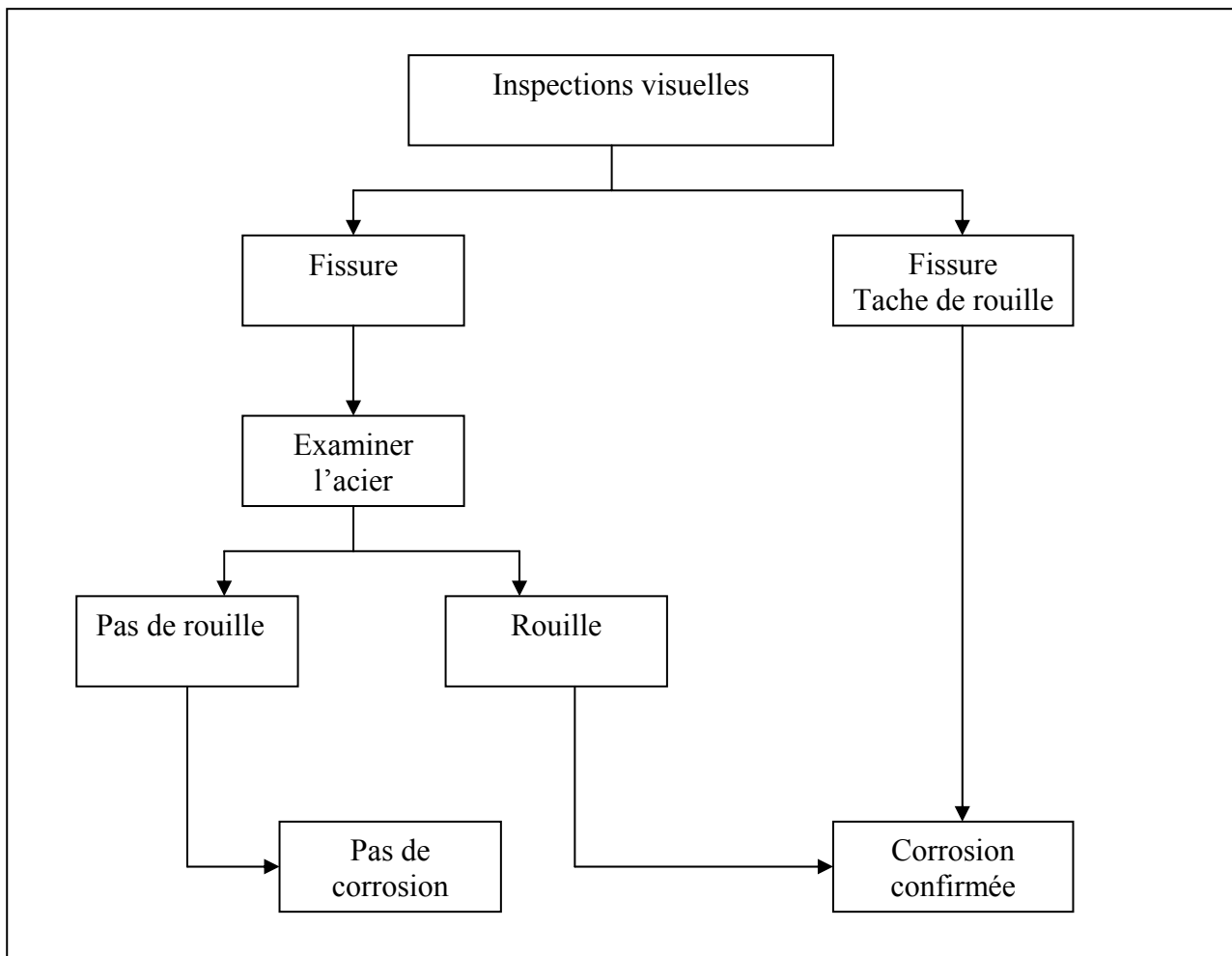


Figure I.9: Organigramme pour la stratégie d'investigation des structures corrodées en béton armé [23].

I.8 Effet de la corrosion des armatures sur leur adhérence

Le principal mécanisme de dégradation des structures en béton armé est la corrosion des armatures.

C'est dans la phase de propagation que les performances mécaniques des structures en béton armé attaquées par la corrosion se dégradent. La section d'acier de renfort sain diminue proportionnellement le taux de corrosion. La production de rouille engendre une expansion interne et donc des contraintes dans le béton. L'insertion de rouille entre les armatures d'acier et le béton, et ces contraintes supplémentaires dans le béton confinant les armatures induisent une diminution de l'adhérence acier-béton [2] .

D'après [23] l'enrobage de béton est fissuré lorsque la dissolution moyenne de l'armature atteint une valeur critique qui dépend des caractéristiques du béton et qui est souvent comprise entre 0.05 et 1mm.

[22] ont montré le rôle essentiel de liaison acier-béton sur le processus de corrosion des armatures. Ils ont comparé l'état de corrosion de deux armatures d'une même poutre en béton armé, la première est avec une bonne qualité de liaison acier-béton et sur l'autre ils ont provoqué un endommagement préalable de la liaison acier-béton. Pour la première il y a absence de corrosion mais la deuxième a été fortement corrodée.

Même [24] a travaillé sur ce thème. Lui il a pris des éprouvettes corrodées, il a réalisé une série d'essais afin de préciser l'effet de la perte d'adhérence sur le comportement en flexion des structures en béton armé corrodé. La perte d'adhérence a été réalisée par des gaines en plastique placées autour des armatures.

Il a trouvé que le comportement est fortement influencé par la dégradation de l'adhérence, qui s'explique par la diminution de la contribution du béton tendu entre les fissures. Cette diminution entraîne une augmentation de la déformation de traction dans les armatures, d'où résulte une augmentation de la courbure et une diminution de la raideur globale de la poutre en flexion. La perte de ductilité des poutres corrodées localement peut s'expliquer par le fait qu'une concentration de contrainte apparaît au point de corrosion et provoque une plastification précoce de l'armature corrodée entraînant localement une augmentation de la déformation plastique. De ce fait, la rupture de l'armature corrodée intervient prématurément.

I.9 Produits de corrosion

La corrosion des aciers dans les structures en béton armé mène à la formation des produits de corrosion. Ils peuvent s'accumuler autour des barres d'acier. La formation de ces oxydes peut réduire la porosité du béton et couvrir les aciers. La production de grandes quantités de produits de corrosion donne naissance à des fissures dans le béton, donc il est intéressant d'étudier les différents types de produit de rouille.[25] a étudié ce problème et pour plusieurs produits de corrosion il a obtenu les volumes correspond à $1 \text{ cm}^3 \text{ Fe}$, représenté dans le tableau I.1.

Produit de corrosion	couleur	Volume, cm^3
Fe_3O_4	Noir	2.1
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Blanc	3.8
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Marron	4.2
$\text{Fe}(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$	jaune	6.4

Tableau I.1 : Volume de produit de corrosion [25]

I.10 Méthode de caractérisation des produits de corrosion

I.10.1 Microscopie électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage MEB peut fournir rapidement des informations sur la morphologie d'un objet solide. Sa grande commodité d'utilisation, son grandissement de l'ordre de 100'000 fois et l'étendue de sa profondeur de champ font du MEB un outil indispensable dans l'exploration du monde microscopique [26].

Le principe général du microscope électronique à balayage consiste à focaliser, à l'aide d'une sonde électronique, un faisceau très fin d'électrons (appelés électrons primaires) sur une aire réduite de la surface de l'échantillon, ainsi l'aire totale qu'on désire explorer est balayée point par point par le faisceau électronique.

L'interaction électrons-matière donne lieu à divers rayonnements spécifiques (électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons transmis, électrons Auger et rayons X) qui transportent des informations sur l'objet dont ils sont issus, comme il est représenté dans la figure I.10.

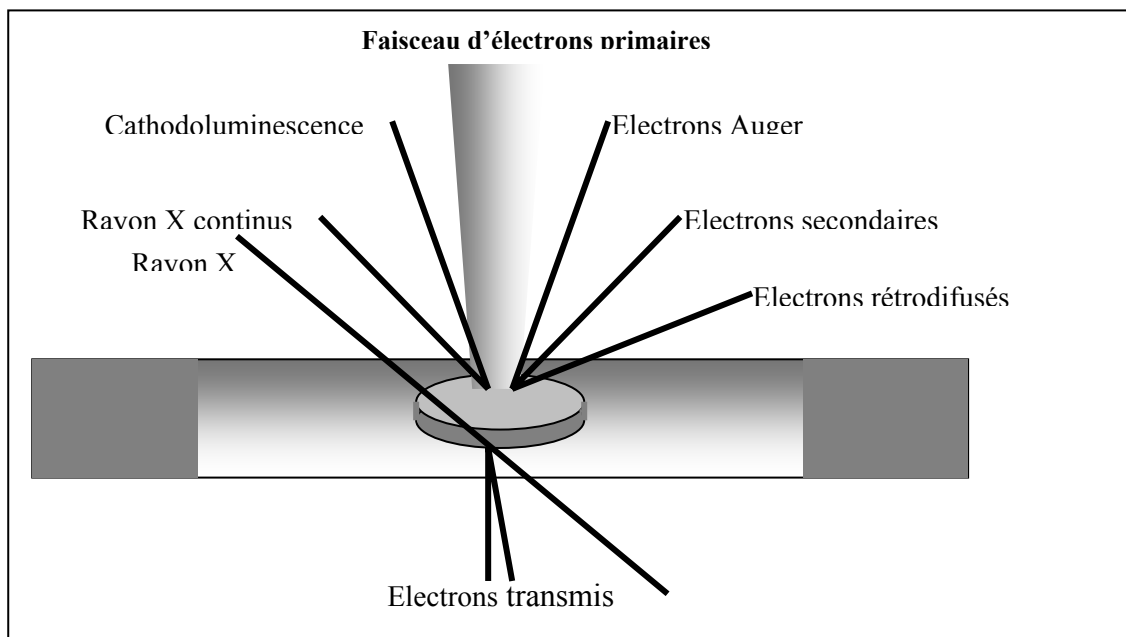


Figure I.10 : Interaction électrons matières [27]

Les électrons dits "secondaires" sont de faible énergie (inférieure à 50 électrons-volts) provenant de couches peu profondes de l'échantillon (environ une dizaine de nanomètres). Les électrons secondaires fournissent des renseignements sur la topographie[27].

Les électrons dits "rétrodiffusés" sont d'énergie cinétique élevée (supérieure à 50 électrons-volts) issus d'une profondeur d'émission de l'ordre de 10 à 100 nanomètres. Les électrons rétrodiffusés fournissent des renseignements sur la composition chimique de l'échantillon et des images en contraste de numéro atomique.

Les électrons Auger donnent des renseignements sur les premières couches atomiques de la surface.

Chacun de ces rayonnements peut être capté et transformé en signal électrique par le détecteur approprié. Le signal électrique d'un détecteur sélectionné, après amplification, sert à moduler le faisceau d'un tube à écran dont le balayage est synchrone avec celui de l'objet, l'image est obtenue après balayage complet de l'écran. Ce mode de formation de l'image (pixel par pixel) est très favorable à l'enregistrement, la numérisation et le traitement de l'information.

Le schéma de principe de l'appareil est illustré sur la figure I.11

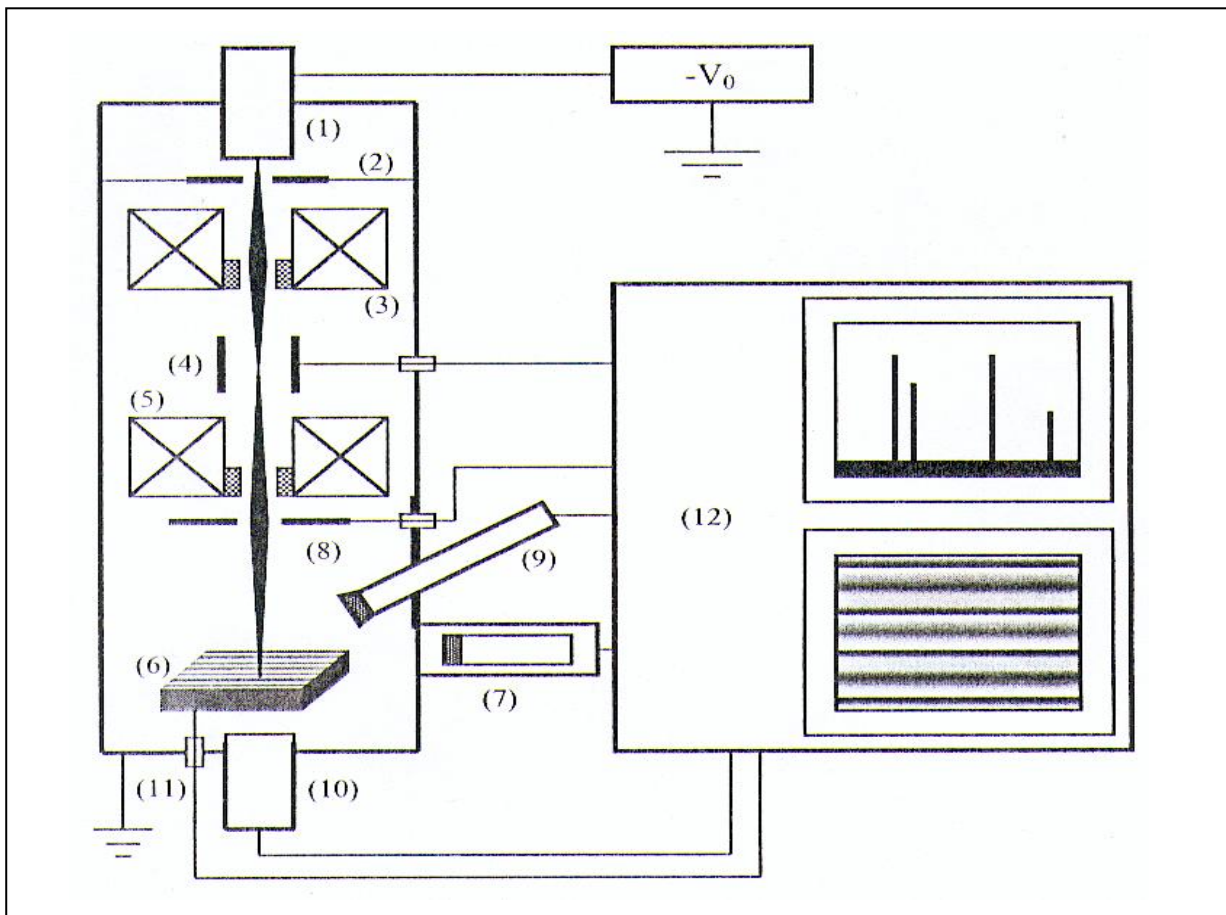


Figure I.11 : Schéma de principe du microscope électronique à balayage[26].

- | | |
|---|---|
| (1) canon à électrons à la tension ($-v_0$) | (2) anode à la masse. |
| (3) condenseur. | (4) système de déflection -balayage. |
| (5) objectif. | (6) préparation sur porte objet goniométrique. |
| (7) détecteur d'électrons à scintillateur. | (8) détecteur d'électrons rétrodiffusés |
| (9) spectromètre de rayon X à dispersion d'énergie. | (10) détecteur d'électrons transmis. |
| (11) mesure du courant absorbé. | (12) électronique de commande, d'exploitation et de visualisation des images et spectres. |

En combinant au microscope électronique à balayage un détecteur spécifique, on obtient des renseignements supplémentaires sur le matériau analysé [27].

Le microscope électronique à balayage couplé avec un système de microanalyse par dispersion d'énergie (M.E.B/EDS) est un outil d'investigation fréquemment utilisé lors d'études ou d'expertises de matériaux. Il permet de fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. Cette technique d'analyse s'applique au domaine de la métallurgie mécanique, de l'électronique, des polymères, de l'agroalimentaire, du médical, de la géologie...

On l'utilise dans le cadre :

- D'études de comportement, de modification ou de transformation de matériaux (fatigue, usure, rupture, vieillissement, pénétration d'impuretés, nature des charges...);
- D'analyses de couches minces (nature et épaisseur);
- D'études de corrosion;
- D'observation et d'analyse de tous matériaux d'ordre minéral, végétal, animal, synthétiques, composites, métalliques et polymères.

I.10.2 Diffraction des rayons X

Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques de longueur d'onde allant de 0.1 à 10 Å; ceux utilisés en radiocristallographie ont des longueurs d'onde de même ordre de grandeur que les distances inter atomique dans les cristaux métallique; c'est à dire, au voisinage de 1 Å. Lorsque le rayonnement X rencontre un cristal, il subit en partie un phénomène d'absorption par le matériau; l'autre partie est réémise sous forme d'un rayonnement X de même longueur d'onde mais dans une direction différente de celle du rayon incident, ce dernier a donc subi une diffraction par le cristal.

Les diagrammes de poudre sont effectués à l'aide d'un diffractomètre. Ce diffractomètre se compose d'un goniomètre monté verticalement sur un générateur de rayons X et des suprastructures nécessaires à la mesure (figure I.12). [28] Le goniomètre positionne l'échantillon qui subit une rotation à vitesse angulaire constante. Le rayonnement issu du tube à rayons X est diffracté par l'échantillon puis capté par un détecteur. Ce détecteur raccordé à l'électronique de mesure tourne autour de l'échantillon à une vitesse angulaire double de celle de l'échantillon. Le diffractomètre, piloté par un ordinateur, permet l'acquisition des résultats et leur représentation graphique (position angulaire et intensité des pics) à l'aide d'un enregistreur à tracé continu. L'intensité du rayonnement diffracté est mesurée par un détecteur couplé à une

électronique de mesure. Un goniomètre indique la position angulaire 2θ . Toutes les références des structures cristallines sont disponibles dans les fiches ASTM (*American Society for Testing Materials*).

L'échantillon à analyser se présente sous forme de poudre fine. Cette poudre est déposée sur une lame de verre et étalée uniformément en une couche mince, pour obtenir une épaisseur inférieure à 0,1mm.

Interprétée, les diffractogrammes des rayons X permet de déduire la nature du corps étudié ainsi que sa structure cristalline.

Dans le cas de la corrosion du béton armé, on prend le béton au voisinage de l'armature corrodée qu'on réduit en poudre et à partir des diagrammes on constate la présence ou l'absence des produits de fer de la poudre par rapport à celle des silices.

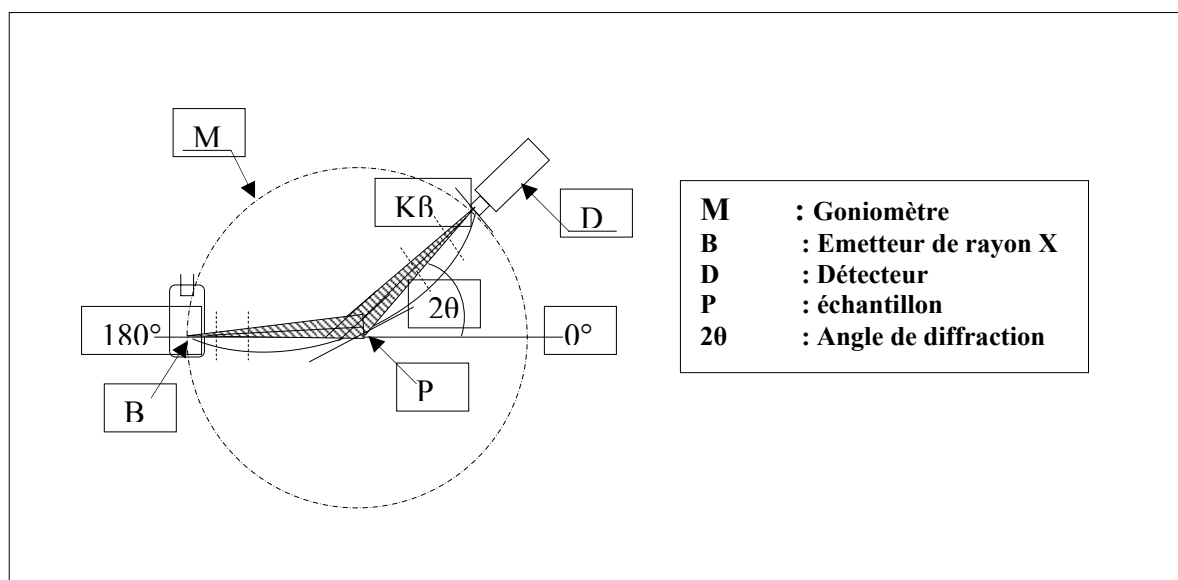


Figure I.12: Dispositif expérimental de l'analyse par diffraction de rayons X [28].

I.10.3 spectroscopie d'absorption infrarouge

Lorsque les produits de corrosion sont formés de cristaux très petits (de l'ordre de 10^{-7} m), ou lorsqu'ils sont amorphes, ils peuvent être identifiés par diverses spectrométries.

La spectrométrie infrarouge permet de caractériser les liaisons entre les atomes constitutifs du corps. Elle est parfois utilisée pour les produits de corrosion[6].

L'infrarouge analytique regroupe plusieurs méthodes d'identification et de dosage non destructif fondées sur l'étude de l'absorption (ou la réflexion), par l'échantillon, des radiations électromagnétiques comprises entre 1 et 1 000 μm . Cette bande spectrale est elle même divisée en infrarouge proche (de 100 000 à 4000 cm^{-1}), en moyen infrarouge (4000-400 cm^{-1}) et en

infrarouge lointain (au delà de 400 cm^{-1}). La partie la plus riche en informations et la plus accessible d'un point de vue expérimental est celle du moyen infrarouge. Les absorptions dans ce domaine, qui constituent une sorte d'empreinte digitale des composés examinés, permettent de déduire la nature des liaisons et la présence des différents groupements fonctionnels[28].

Les bandes d'absorption situées dans le domaine spectral de l'infrarouge proviennent de l'interaction de la composante électrique des radiations électromagnétiques incidentes avec les dipôles électriques des liaisons non symétriques.

L'infrarouge s'intéresse aux excitations des niveaux de vibrations des liaisons entre les différentes molécules. Dès ses origines, l'infrarouge a servi comme méthode semi-empirique d'analyse structurale. Il existe une corrélation entre les positions des maxima d'absorption de certaines bandes et les fonctions organiques, ou les particularités des phosphates dans notre cas. De ce fait nous pourrions avoir des informations sur les déformations des liaisons et le squelette du composé étudié. Les bandes d'absorption sont nombreuses et diffèrent avec chaque composé. Les spectromètres infrarouges représentent, en fonction de la longueur d'onde, le rapport en chaque point des intensités transmises avec ou sans échantillon. Ce rapport, appelé transmittance T , peut être remplacé par son pourcentage (%T) ou par l'absorbance $A = \log(1/T)$. Enfin, dans le domaine du moyen infrarouge, il est très fréquent d'exprimer les longueurs d'onde sous forme de nombre d'onde (en cm^{-1}).

L'échantillon à analyser se présente sous forme de poudre. Les spectres d'absorption infrarouge sont enregistrés à l'aide d'un spectromètre Nicol et type 5 SXC à transformée de Fourier dans la gamme de nombres d'onde comprise entre 400 et 3600 cm^{-1} .

I.10.4 Caractérisation des produits de corrosion par des méthodes Electrochimiques

Les produits formés à l'interface entre le solide et le liquide peuvent être caractérisés par des méthodes électrochimiques. Il s'agit d'appliquer au métal une faible polarisation qui modifie son potentiel d'électrode. Si la polarisation se fait en courant alternatif de fréquence f , le courant de polarisation $i(t)$ entraîne une variation $\Delta E(t)$ du potentiel, pour un métal dont l'interface a une aire égale à l'unité.

Notant que la spectroscopie d'impédance électrochimique est très utilisée dans l'étude de la corrosion.

I.11 Méthodes de protection contre la corrosion

Plusieurs ouvrages présentent des dommages à la corrosion des armatures. L'utilisation de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques a permis de diminuer la dégradation du béton,

mais la corrosion des armatures est encore une source majeure de problèmes. Les défauts se manifestent principalement par la présence de traces de rouille et par des éclatements de béton. Ils affectent surtout les structures qui datent de 25 ou 30 ans [29]

I-11-1 Méthodes de prévention

Afin d'apporter des solutions à ces problèmes, une série de mesures liées à la réfection et à la reconstruction d'ouvrages en béton est préconisée. Les principales mesures sont présentées au tableau I.2 [29].

Design	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation du recouvrement des aciers : 60mm pour les dalles. • Élimination de certains joints d'expansion. • Amélioration de la finition de surface, du profil et du drainage.
Matériaux (acier)	<ul style="list-style-type: none"> • Acier galvanisé au niveau des dalles.
Matériaux (béton)	<ul style="list-style-type: none"> • Béton avec ajout cimentaire : fumée de silice, cendres volantes. • Béton à hautes performances (BHP). • Béton latex. • Béton projeté.
Protection du béton	<ul style="list-style-type: none"> • Étanchéité des dalles de pont. • Imperméabilisant à béton : silane et siloxane. • Enduit de surface.

Tableau I.2 : Interventions préconisées pour la réfection et la reconstruction des ouvrages [29]

Les modifications apportées au design consistent principalement à protéger les ouvrages contre l'eau et les sels. Ce choix se traduit par une augmentation du recouvrement des aciers d'armature, par l'élimination de joints d'expansion sur certaines structures, et par l'utilisation de finisseurs pour l'obtention d'un meilleur profil des dalles et d'un recouvrement uniforme des aciers. L'amélioration du drainage de la surface et une adhérence supérieure de la membrane d'étanchéité sont aussi des objectifs visés. Quant aux matériaux utilisés, l'utilisation accrue d'aciers galvanisés, de béton à hautes performances, de béton latex, d'ajouts cimentaires, de membranes d'étanchéité, d'imperméabilisants et d'enduits de surface a pour but de protéger les armatures de la corrosion en prévenant la pénétration d'eau et de chlorure dans le béton.

Les méthodes de prévention énumérées précédemment s'appliquent surtout à l'occasion de la réalisation d'une construction neuve ou de la reconstruction d'une partie d'ouvrage. Dans le cas

où une réfection partielle devait être effectuée sur un ouvrage contenant des aciers corrodés et du béton fortement contaminé par le sel, le choix de la méthode était limité.

I-11-2 Les méthodes curatives : Les plus souvent, il s'agit d'enlever tout le béton qui n'est plus protecteur ou qui est déjà endommagé, de nettoyer et traiter les armatures ainsi découvertes et de reconstituer le profil initial au moyen de mortier de réparation spécialement formulé pour cet usage. Il faut insister sur le fait qu'il est nécessaire d'enlever tout le béton contaminé et non seulement les parties décollées.

En effet, la corrosion est un phénomène électrochimique, ce qui veut dire que l'on trouve sur l'acier en corrosion une juxtaposition de zones anodiques où a lieu la dissolution du fer (les zones dégradées), et les zones cathodiques où a lieu une réduction de l'oxygène et qui restent intacts même si une certaine contamination est présente. Si on se contente de réparer les zones dégradées visibles, sans enlever également tout le béton contaminé avoisinant, on crée artificiellement une pile électrochimique : la zone réparée devient protégée de la corrosion et donc cathodique alors que la zone avoisinante toujours contaminée deviendra anodique et subira une accélération de la corrosion.

C'est ce qui explique que 2 à 3 ans après des réparations, on constate souvent une reprise des dégradations nécessitant une nouvelle campagne de traitement.

D'autres méthodes ont pour but de contrôler la corrosion des armatures depuis la surface du béton : méthodes électrochimiques et inhibiteur de corrosion.

I-11-3 Méthodes électrochimiques :

a) Protection cathodique

La protection cathodique contrôle la corrosion par imposition d'un courant continu permanent qui annule le courant de corrosion. L'installation et son opération sont permanents[30].

*** Principe de la protection cathodique**

L'acier dans le milieu naturel a tendance à se corroder car le potentiel mixte qui s'établit lorsque l'acier est plongé dans l'eau est supérieur au potentiel d'oxydation de l'acier.

Le moyen d'empêcher cette corrosion est de modifier artificiellement la pile de corrosion. Si l'on impose au système une tension mixte inférieure au potentiel de l'acier, la corrosion n'a pas lieu ou est réduite de façon significative.

C'est le principe de la protection cathodique. Deux solutions sont possibles :

- Soit l'on rajoute au système un métal moins noble que l'acier. C'est celui-ci qui va se corroder à la place de l'acier. Il faut que la tension de l'anode sacrificielle soit faible afin de « tirer » le potentiel du système suffisamment bas pour placer l'acier à l'état de cathode.
- Soit l'on impose une tension entre l'acier et un autre métal qui va jouer le rôle d'anode. La tension imposée doit être suffisante pour placer l'acier dans son domaine de protection[31].

1- Protection cathodique par anodes sacrificielles

La protection par anode sacrificielle se fait lorsque des courants relativement petits sont nécessaires. En effet les potentiels des anodes sacrificielles se situent entre -1100 et -1700 mV / cuivre sulfate de cuivre, ce qui n'autorise qu'une faible différence de potentiel avec l'acier (et donc un faible courant de protection).

Les anodes sacrificielles employées pour protéger la structure sont soit en zinc soit en magnésium. Elles sont emballées dans un sac ou un carton contenant du backfill (gypse, bentonite et sulfate de soude) afin d'empêcher la passivation du métal et de diminuer la résistivité de l'électrolyte en contact avec l'anode.

Idéalement, les anodes doivent être installées le plus loin possible de la structure à protéger.

Dans la pratique, les excavations limitent le plus souvent l'éloignement entre 50cm et 2m pour l'implantation des anodes. C'est une des raisons pour lesquelles la quantité d'anode est surdimensionnée par rapport à la durée de vie théorique (problème de distribution de courant lié à la proximité des anodes par rapport à la structure). Le magnésium est le métal le plus utilisé dans les anodes sacrificielles car c'est celle qui a le potentiel le plus électronégatif (-1700 mV pour le haut potentiel). Son utilisation est courante dans les sols plus résistants.

A l'opposé, le zinc est plutôt employé dans des sols peu résistifs (potentiel de -1100 mV).

Néanmoins, le choix entre le zinc et le magnésium dépend de nombreux autres facteurs :

- La qualité du revêtement (en fonction de la résistivité on choisira l'un ou l'autre)
- La durée de vie souhaitée (10 ans pour le mag, 15 pour le zinc).
- Le coût (mag plus cher que le zinc).
- Le taux de régulation (le zinc régule mieux).
- Problème d'encombrement (densité du zinc supérieure).

2- Protection cathodique par courant imposé

La protection cathodique par courant imposé permet d'atteindre les mêmes résultats en employant une source externe de courant.

L'avantage d'un système de protection cathodique par courant imposé c'est qu'il permet de suivre la demande de courant et d'apporter le courant suffisant et nécessaire à la structure pour la protéger.

Dans pratiquement toutes les conditions (revêtement, résistivité etc...) on peut dimensionner une installation par courant imposé qui satisfera au besoin.

Par contre le coût d'une protection par courant imposé est largement supérieur à celui par anodes sacrificielles.

Le système se compose des éléments principaux suivants figure I.13:

- Le redresseur : cette unité transforme le 220 Volts alternatif en courant continu de faible tension (<50 V) et l'envoie vers les anodes.
- Les anodes : il existe des anodes composées de toutes sortes de matériaux, graphite, fer silice, fer, niobium/platine, polymère conducteur, etc... Les anodes émettent du courant vers la structure à protéger. Elles sont calculées pour une durée de vie de 20 à 50 ans.

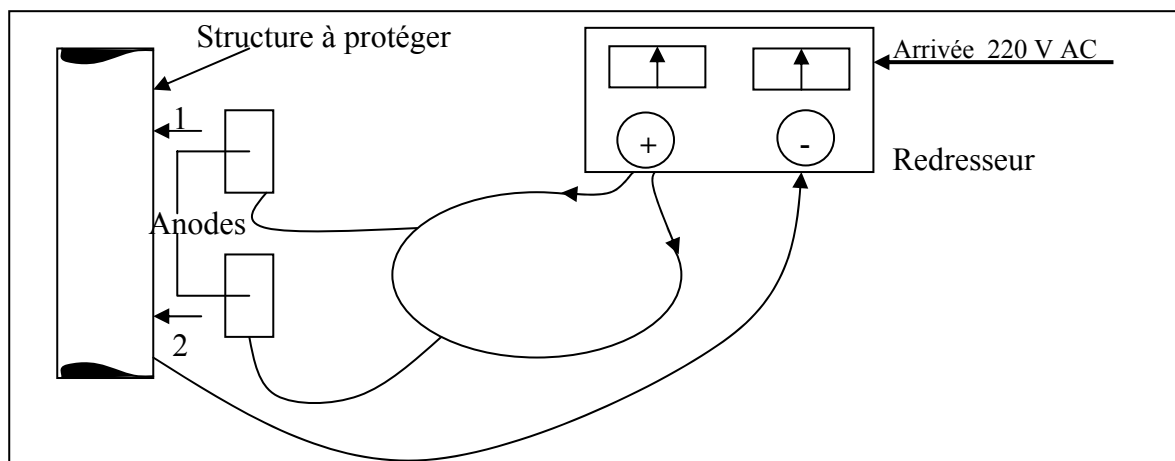


Figure I.13 : Protection cathodique par courant imposé [31].

* Exemple d'application de la protection cathodique

Le pont Taschereau au Québec est un ouvrage à poutres métalliques composé de 17 travées d'une longueur totale de 425,2m et d'une chaussée carrossable de 8,84m. L'ouvrage a été construit en 1964. Une inspection réalisée en 1988 a permis de constater que l'ouvrage nécessitait la réfection des joints d'expansion, la réparation partielle de la dalle et l'imperméabilisation du tablier. En 1989, lors la réfection des travaux, un système de protection cathodique a été installé sur trois dalles de 191 m^2 , soit une superficie totale de 573 m^2 [32].

Le principe de fonctionnement de la protection cathodique est illustré à la figure I.14.

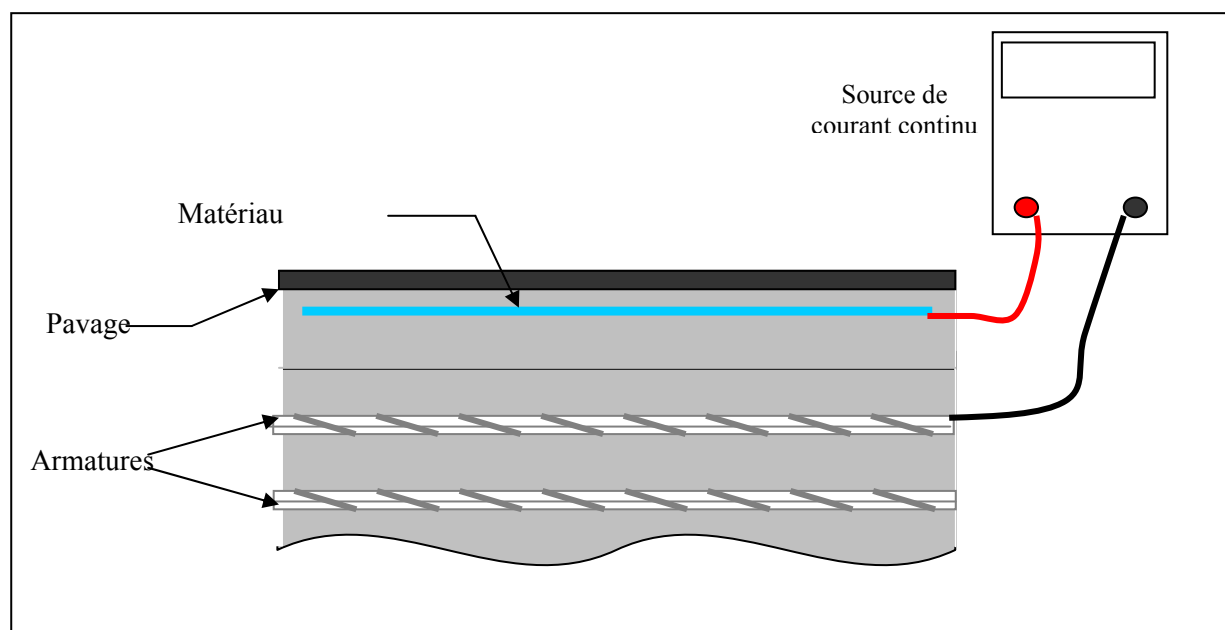


Figure I.14 : Schéma de la protection cathodique [32]

Le système a été conçu de manière à diviser la dalle en six zones distinctes afin que le matériau anodique soit alimenté séparément. Une électrode de référence en contact avec l'acier d'armature est installée dans chacune des zones.

Le matériau anodique est un treillis de platine posé sur la surface de béton de la dalle. Le treillis est ancré à la dalle au moyen d'ancrages en plastique et recouvert d'un béton au latex d'une épaisseur de 25mm. Cette chape est recouverte du revêtement en béton bitumineux, et aucune imperméabilisation n'est faite sur les dalles protégées.

Un redresseur de courant permet d'alimenter les deux circuits et de procurer une densité de courant de l'ordre de 14 mA/m^2 et une dépolarisation de 100 mV, ce qui assure une protection des aciers d'armature contre la corrosion.

L'efficacité du système à prévenir la corrosion des aciers d'armature dans le béton des dalles a été évaluée. La démolition de la dalle a permis d'effectuer des mesures de relevé de potentiel et de déterminer des profils de pénétration des chlorures sur les trois dalles protégées ainsi que sur les deux dalles adjacentes non protégées. L'effet réel de la protection cathodique sur la dégradation des aciers a pu ainsi être observé.

Le résultat du relevé de potentiel est illustré à la (figure I.15).

L'application de la protection cathodique a eu un effet protecteur important des aciers contre la corrosion. La corrosion est présente sur 12 % des surfaces protégées des dalles (parties jaunes et vertes des trois travées centrales) et sur 99 % des surfaces non protégées (parties rouges et noires des travées aux deux extrémités).

L'observation des profils de chlore démontre également que l'application de la protection cathodique diminue la concentration de chlorure dans les aciers (figure I.16).

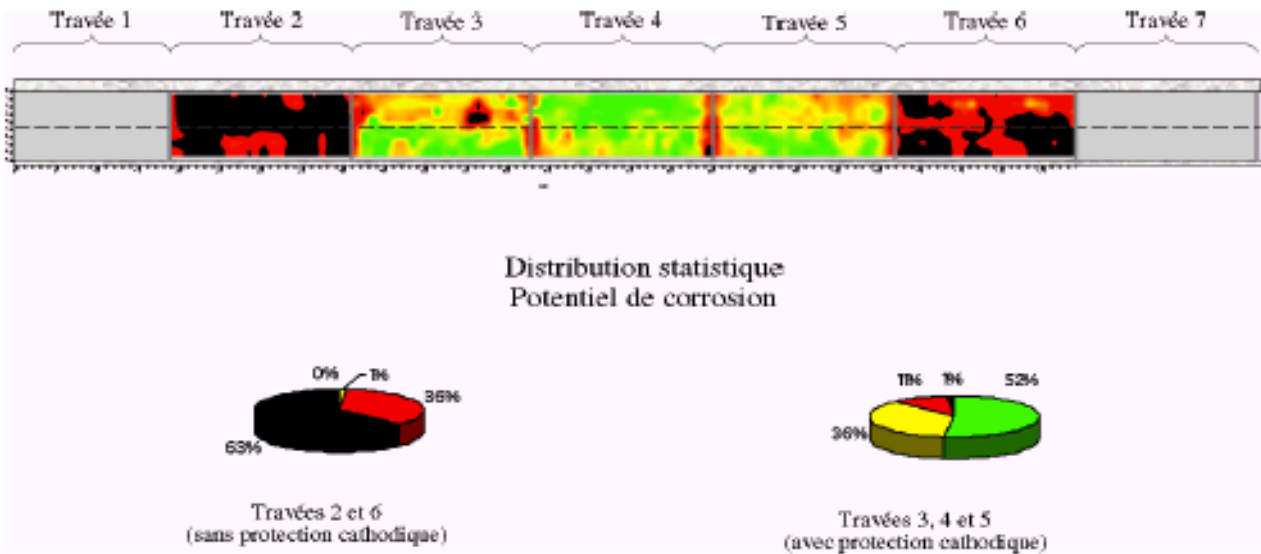


Figure I.15 : Relevé de potentiel des zones protégées et non protégées[32]

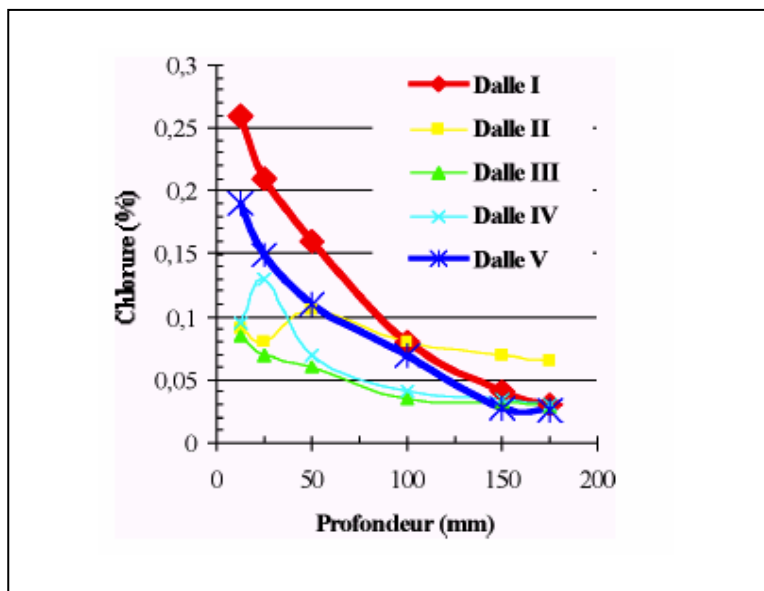


Figure I.16 : Profil des chlorures [32]

En conclusion, la protection cathodique s'est avérée efficace pour protéger les dalles de béton contre la corrosion des aciers d'armature des dalles de béton. L'observation d'une nette réduction des dommages aux dalles et une diminution de la concentration des ions Cl^- dans les aciers.

Ce type de protection s'avère donc efficace, mais son coût et le suivi nécessaire en limitent l'usage à des ouvrages particuliers.

b) Inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur est une substance qui, ajoutée en petite concentration à un environnement, provoque une diminution significative de la vitesse de corrosion d'un métal situé dans cet environnement. Les inhibiteurs de corrosion étant des produits relativement nouveaux, on en retrouve assez peu sur le marché.

Dans beaucoup de système, l'utilisation d'un inhibiteur pour contrôler la corrosion est la méthode la plus économique. Bien que leur utilisation dans le domaine du béton armé soit récente, essentiellement du fait que la prise de conscience des phénomènes de corrosion des armatures est elle-même récente, il n'y a aucune raison pour que cette technique n'apporte pas dans ce domaine une réponse économique aux problèmes de dégradation des ouvrages dus à la corrosion des armatures.

Il existe de nombreuses classes d'inhibiteurs en fonction de leur type d'action et de leur composition. La classification suivante est plus spécifiquement adaptée au béton armé [6].

- Inhibiteur d'adsorption

Ces produits représentent la famille d'inhibiteurs la plus nombreuse. Ce sont en général des composés organiques qui s'adsorbent sur la surface de l'acier pour former un film protecteur. Ces produits sont très utilisés en milieu acide mais fonctionnent beaucoup moins bien en milieu neutre et surtout basique, ce qui est le cas du béton.

- Passivateurs oxydants

Ce sont en général des produits inorganiques (nitrique, chromates, ..) qui renforcent le film de passivation de l'acier pour oxydation du fer ferreux en fer ferrique. Ils fonctionnent avec ou sans oxygène, par leur propre réduction. Ces inhibiteurs sont utilisés comme additifs au béton frais dans lequel leur dosage peut être contrôlé, mais sont mal adaptés à l'utilisation sur des ouvrages existants lors de leur assainissement.

- Passivateurs non oxydants

Ces inhibiteurs sont aussi inorganiques, renforcent le film de passivation en utilisant l'action de l'oxygène dans l'oxydation du fer. Il fonctionne donc seulement en présence d'oxygène. Ils

ne sont pas utilisés par les réactions d'inhibition, et se sont particulièrement adaptés au traitement des bétons anciens.

* Exemple d'étude de la performance des inhibiteurs de corrosion

[33] a réalisé des essais sur les inhibiteurs du type « adjuvant » (produits utilisés comme adjuvant à béton) et sur les inhibiteurs du type « migrateur » (produits qui s'appliquent sur une surface de béton durcie et qui pénètrent jusqu'aux aciers).

L'essai consiste à mesurer l'évolution du potentiel de corrosion et du courant de corrosion en fonction des cycles de mouillage et de séchage de la surface du béton avec la solution saline. Chaque cycle a une durée de 4 semaines, soit 2 semaines avec la solution saline suivie de 2 semaines à l'air ambiant. L'acier d'armature est recouvert de 19 mm d'un béton dosé à 356 kg/m^3 de ciment avec un rapport E/C = 0,5. Pour compléter l'évaluation de la performance des inhibiteurs, l'essai de polarisation linéaire a aussi été réalisé. Il consiste à mesurer la résistance de polarisation et le taux de corrosion.

Après deux ans, les essais de potentiel de corrosion Cu /CuSO₄, de courant de corrosion et de polarisation linéaire démontrent que quelques adjuvants inhibiteurs donnent des performances acceptables.

En ce qui concerne les inhibiteurs du type migrateur, seul un semble avoir un effet positif sur la corrosion des aciers.

Si on considère que la corrosion des aciers commence lorsque le potentiel est inférieur à -350 mv, l'utilisation des inhibiteurs de corrosion retarde l'apparition du phénomène. Pour le béton témoin, la corrosion débute après 35 semaines, alors qu'elle est retardée à 85 semaines lorsque l'inhibiteur type adjuvant est utilisé. Cependant, après une période de plus de 80 semaines, les courbes de courant et de potentiel de corrosion des aciers tendent à s'approcher de celles du béton témoin.

En conclusion

- L'utilisation des inhibiteurs de corrosion n'empêche pas l'apparition de la corrosion, elle la retarde.
- Tous ces adjuvants ont des effets secondaires aléatoires sur les propriétés du béton comme le temps de prise, la teneur en air ou le développement des résistances.
- Tous les inhibiteurs du type migrateur se sont avérés sans effet sur la corrosion des aciers.
- Le béton haute performance (BHP) s'est révélé le plus efficace à prévenir la corrosion des aciers.

c) Réduction de la pénétration des chlorures

Dans ce contexte, une étude de laboratoire a été faite et a montré que l'utilisation d'ajouts cimentaires est un moyen efficace pour réduire la pénétration des chlorures et lutter contre la corrosion des aciers d'armature[34].

La pénétration des chlorures a été mesurée sur une période de 3 à 8 mois dans différents mélanges de béton ($0,35 < E/C < 0,65$) fabriqués avec trois types de liants cimentaires (CSA Type 10, CSA Type 10E-F et CSA Type 20E-F/SF).

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'ajouts cimentaires dans des mélanges de béton hydratés permet généralement de réduire sensiblement la cinétique de pénétration des chlorures.

Chapitre II

METHODES DE MESURE DE LA CORROSION

II.1 Introduction

La collecte des informations est l'étape nécessaire à l'établissement d'un diagnostic des ouvrages. On peut avoir recours à des méthodes destructives ou à des méthodes non destructives qui sont adaptées aux conditions de mesures sur site.

Les méthodes non destructives sont généralement employées pour le contrôle des constructions. L'évaluation des méthodes non destructives est importante de point de vue technique et économique. Comparées aux méthodes destructives, les techniques de contrôle non destructives fournissent des informations sur les propriétés du matériau sans détériorer la microstructure.

Le choix de la méthode repose sur la caractéristique à rechercher, la possibilité d'application de la méthode et l'importance de la construction à étudier, sans oublier la disponibilité des moyens financiers avec un personnel conforme.

Les méthodes de mesure utilisées pour détecter la corrosion sont les suivantes :

- Les inspections visuelles,
- Les méthodes soniques,
- Les méthodes radioactives,
- Thermographie infrarouge,
- Les méthodes électriques (électrochimiques),
- Les méthodes magnétiques,
- Les méthodes électromagnétiques.

II.2 Les inspections visuelles

La plus simple et la plus immédiate des méthodes. C'est une méthode primaire pour détecter la corrosion. Elle exige une bonne vision, un éclairage et connaître quoi chercher. La technologie est aussi venue soutenir cette méthode, en offrant des capteurs complémentaires de l'œil (caméras et appareils numériques), des moyens d'enregistrement (pour un suivi dans le temps) ainsi que des procédés d'analyse d'image pour l'interprétation[35].

L'examen visuel de l'état de la structure inclut l'appréciation des changements d'aspect du béton et les surfaces des aciers, la présence des défauts due à la corrosion. Les résultats de l'examen visuel sont enregistrés sous forme d'aperçus des défauts sur les sections de construction.

L'ampleur des dommages est documentée dans un format prescrit pour fournir leur identification sur la structure. Habituellement dans les méthodes visuelles, une marque conventionnelle pour chaque type de défaut ou des dommages est adaptée.

Les inspections visuelles sont généralement suivies par des inspections destructives pour compléter l'étude. Divers essais et analyses peuvent être conduits sur les échantillons prélevés dans les zones saines et dégradées, dont entre autres :

- Essais de compression ou de traction pour évaluer la qualité de béton,
- Analyse chimique pour déterminer la présence de chlorures pouvant indiquer la corrosion des aciers,
- Analyses pétrographiques pour déterminer la présence de produit de la réaction alcali-granulats ou de d'autres réactions agressives.

II.3 Méthodes soniques

Il s'agit de méthodes non destructives, une onde est émise sur la surface de la structure (généralement par un choc mécanique) et sa réponse est analysée soit de façon temporelle soit par le biais d'une analyse fréquentielle.

Les techniques disponibles dans ces méthodes sont :

- 1- impact-écho,
- 2 - tomographie sonique,
- 3 - C-Scan imaging.

La fréquence de cette onde est comprise entre 1kHz et 1MHz avec une vitesse de 4500 m/s et une longueur d'onde λ comprise entre 4.5m et 4.5mm [36], [37].

II.3.1 Technique impact-écho

Cette méthode est basée sur la propagation d'ondes de contraintes générées par un impact. Ainsi, un impact mécanique génère des pulsations (ondes de compression et cisaillement) qui se propagent dans le matériau sous la forme d'un train d'onde hémisphérique aussi appelées ondes de front. Ces dernières sont reflétées en forme d'écho par les interfaces internes ou les bornes du spécimen. Ces échos vont produire des déplacements à la surface qui sont captés par un récepteur et enregistrés sur un oscilloscope numérique (figure II.1) [38]. Par la suite, on transforme cette onde du domaine du temps au domaine de fréquence à l'aide des transformations Fourier discrète. Il devient alors possible en fréquences dominantes de l'onde de compression servant à calculer la profondeur des anomalies.

L'installation de capteur permet de surveiller l'arrivée des ondes renvoyées

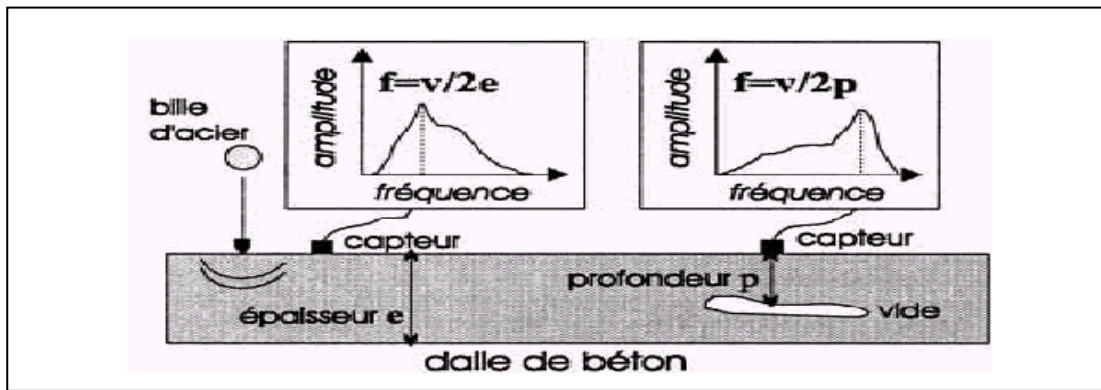


Figure II.1: Principe de la méthode impact-echo[38]

II.3.2 Tomographie sonore

Cette technique d'imagerie consiste à mesurer l'atténuation d'un faisceau incident qui se déplace dans le trajet droit à travers un objet.

Le faisceau incident est partiellement absorbé et dissipé dans l'objet avec la radiation transmutée, dans une ligne droite au détecteur (figure II.2). Elle offre des possibilités intéressantes pour évaluer l'état des structures en béton.

La quantité d'atténuation est relative au nombre atomique des phases distribuées dans l'objet et ainsi que leur distribution de densité. L'accès aux deux faces est exigé.

La tomographie est incapable de détecter les fissures dans les aciers, elle est capable de détecter la perte dans les aciers due à la corrosion.

La variation de la température ayant rapport aux propriétés de la surface et les conditions climatiques complique l'interprétation des données retrouvées[38]

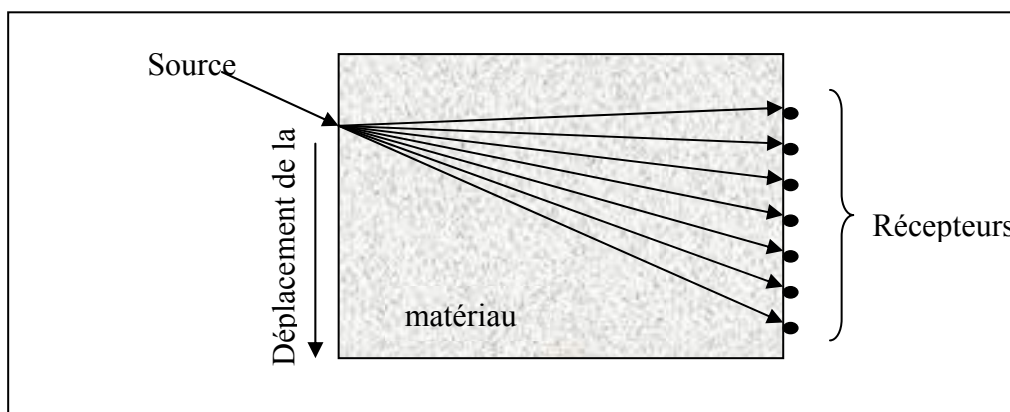


Figure II.2: Principe de la tomographie sonore[38]

II.3.3 C-Scan imaging

Elle a été proposée par [36] pour la détection de la corrosion. Cette méthode est très utile pour déterminer la taille, la forme et l'endroit des défauts dans le matériau. Les échantillons à examiner sont submergés dans l'eau, un faisceau acoustique est appliqué ; il sera reçu par un

deuxième capteur de réception. L'échantillon et les aciers sont scannés alors que le faisceau est déplacé dans les deux sens.

Les centres de profondeur du capteur utilisé sont très petits et par conséquent permettent l'observation des modèles corrosifs ou les vides dans différentes couches en ajustant le capteur vers le haut ou vers le bas dans la direction longitudinale d'axe. Le capteur est attaché à un ordinateur.

II.4 Les méthodes radioactives (rayonnement X ou gamma)

Dans cette méthode la surface à ausculter est exposée à un rayonnement gamma, qui après avoir traversé le matériau impressionne un film photographique. La radiographie implique l'utilisation d'une source de radiation forte pour produire des rayons X des particules bêta ou gamma, un rayon de radiation est passé à travers la substance et détecté sur l'autre côté (figure II.3). La radiographie nécessite d'avoir accès à deux faces (transmission) [38]

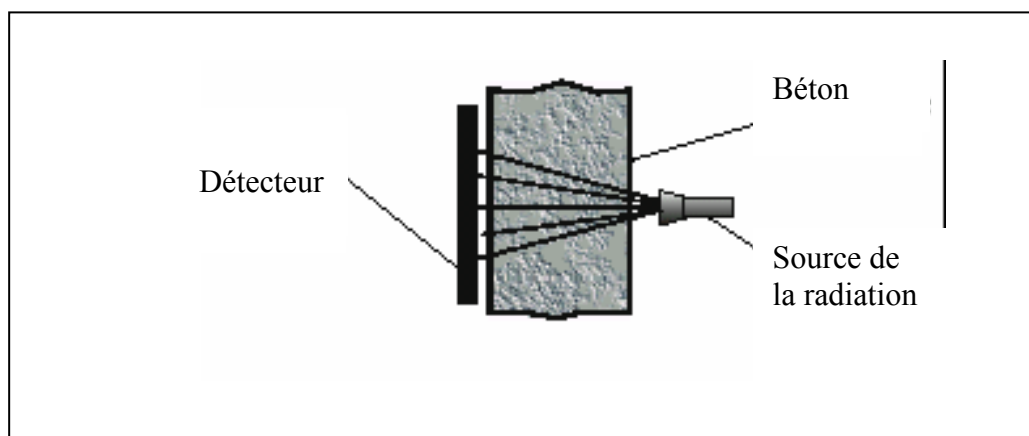


Figure II.3 : Principe de la radiographie[38]

L'absorption différentielle des particules radioactives permet la détection des changements dans les caractéristiques de la matière. La radiographie est adéquate pour repérer les vides, les caniveaux. Elle permet de détecter les armatures sous des enrobages épais et elle permet aussi de localiser les armatures et détecter les ruptures franches d'aciers de diamètre important.

Maintenant pour la radiographie, in situ on utilise un dispositif portatif de rayon X pour produire des faisceaux de rayon X avec une force de 7.5 Mev (Méga- électron -volt). Avec une telle énergie élevée, les rayons X peuvent pénétrer le béton et les aciers épais et indique les défauts à l'intérieur des structures en béton par des images de haute qualité de rayon X[36].

Le dispositif de détection est facile à transporter. Même les films radiographiques ont été la méthode primaire pour capturer les images de l'objet ; cependant, il y a plusieurs méthodes d'enregistrement d'image.

Les dispositifs de collection d'image peuvent être configurés dans les systèmes de balayage automatisés et programmables. Les données d'image peuvent être augmentées, stockées et recherchées[39].

Mais la radiographie est limitée de nos jours aux cas très spéciaux. Indépendamment du coût, un autre agent important limite cette méthode est le danger provoqué par les rayons X pour les personnes, animaux et environnement.

II.5 La thermographie infrarouge

La technologie infrarouge repose sur la constatation suivante [40]: tout objet possédant une température supérieure au zéro absolu émet de l'énergie sous forme de rayonnement.

La prise d'images thermiques, également connue sous le nom de thermographie, est devenue l'un des outils de diagnostic les plus précieux pour la maintenance prédictive. Elle est utilisée préférentiellement au cours des vingt dernières années [41] et qui est appliquée pour la caractérisation de la corrosion. C'est une technique nouvelle en génie civil, la méthode d'auscultation par thermographie infrarouge semble constituer une des techniques de contrôle non-destructif les plus attractives. Les mesures sont réalisées de façon rapide, sans contact, avec une durée de mise en œuvre réduite et, généralement, un appareillage de faible encombrement d'une grande maniabilité (figure II.4) [42].

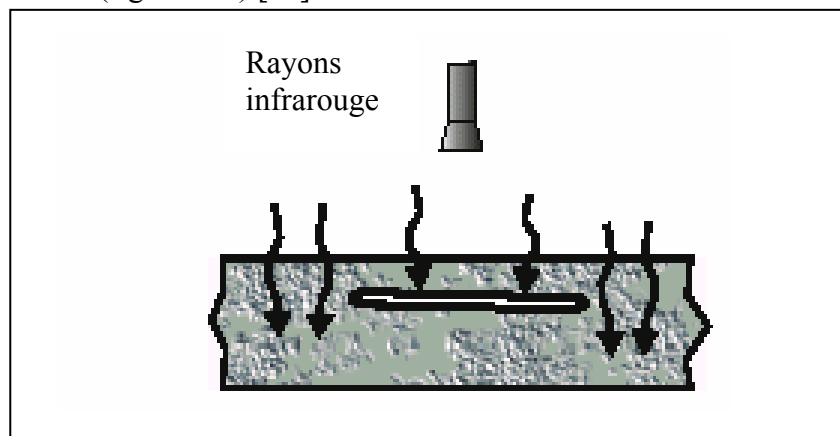


Figure II.4: Principe de la thermographie infrarouge[38]

Quel que soit le principe (thermographie active dans le cas d'une excitation naturelle, ou passive pour une sollicitation artificielle) et le type d'appareillage (radiomètre, scanner, caméra infrarouge), le but est de restituer sous la forme d'une image une cartographie de la luminance de

la scène thermique observée. La caméra infrarouge présente l'avantage de proposer une image thermique instantanée du site.

Trois types d'appareils à infrarouge peuvent être utilisés en maintenance prédictive :

1- Les thermomètres à infrarouge :

Ils sont conçus pour mesurer la température réelle de surface en un point unique, relativement petit, d'une installation, cette méthode offre des possibilités limitées.

2- Les scanners linéaires :

Ils effectuent un relevé de température suivant une ligne particulière, et donc en une seule dimension. Bien que cette méthode ouvre un champ de vision un peu plus étendu, elle est toutefois, elle aussi, limitée.

3- Les imageurs :

Ils analysent la totalité des émissions infrarouges issues de l'échangeur. Le plus souvent, il s'agit de caméras infrarouges.

Cependant, la mesure de la température de surface par la méthode infrarouge est compliquée de par l'existence de trois types d'énergie détectable :

- L'énergie émise par l'objet lui-même ;
- L'énergie réfléchie par l'objet ;
- L'énergie transmise.

Seule l'énergie émise doit être prise en compte, alors que les énergies transmise et réfléchie distordent le signal.

Outre le problème lié à ces énergies, l'utilisateur de techniques thermographiques doit tenir compte de l'atmosphère existante entre l'objet considéré et l'instrument de mesure.

En effet, les particules contenues dans l'écoulement gazeux des installations industrielles peuvent fausser les mesures.

En détectant des anomalies souvent invisibles à l'oeil nu, la thermographie permet d'entreprendre des actions correctives avant l'apparition de coûteuses pannes de système. Les imageurs infrarouges portables scannent l'équipement et les structures, puis convertissent instantanément les images thermiques en images visibles pour une analyse quantitative de la température.

Les caméras infrarouges sont en mesure d'effectuer des inspections pendant que les systèmes électriques sont sous charge. La thermographie étant une méthode de diagnostic sans contact, un thermographe peut rapidement visualiser une pièce d'équipement particulière à une distance sûre, quitter la zone dangereuse, retourner dans son bureau et analyser les données sans jamais devoir s'exposer au moindre danger.

La thermographie infrarouge a été développée par [43] en proposant un algorithme pour la détection des variations d'épaisseur dues à la corrosion, basé sur l'étude de la dérivée temporelle de la température superficielle. La forme des zones qui ont subi une perte de matière par corrosion est évaluée grâce à un algorithme développé pour un modèle thermique 1-D.

Un modèle théorique de transfert de chaleur a été utilisé pour la résolution du problème thermique direct et pour la simulation de l'expérience au moyen d'un modèle numérique 3-D.

II.6 Les méthodes électriques (méthodes électrochimiques)

Elles reposent sur la mesure des intensités des courants, et des différences de potentiel au sein du matériau, dues soit à des réactions électrochimiques dans le matériau, soit à des sollicitations artificielles.

Les techniques disponibles dans ces méthodes sont [5] :

- Résistance de polarisation R_p ,
- La mesure du potentiel d'électrode,
- Résistivité électrique,
- Impédance électrochimique.

II.6.1 Définition des méthodes

Les trois premières techniques sont les plus couramment utilisés, ils seront largement détaillés.

a) Résistance de polarisation

Cette technique électrochimique capable de mesurer le taux de corrosion instantané. Elle quantifie la perte de métal par unité de surface. Cette méthode est basée sur l'observation de la linéarité des courbes de polarisation autour du potentiel E_{corr} , la pente $\Delta E / \Delta I$ (ΔE : variation du potentiel, ΔI : variation du courant) exprime la valeur de la résistance de polarisation R_p si l'incrément tend vers 0, ainsi $R_p = (\Delta E / \Delta I)_{\Delta E \rightarrow 0}$ [5]

La relation entre R_p et le courant de corrosion I_{corr} est donnée par l'expression :

$$I_{corr} = B/R_p.A \dots \dots \dots \text{II-1}$$

Avec A : surface du métal

B : constante qui dépend de la pente de Tafel des courbes de polarisation.

$$B = B_a.B_c / 2.0303 (B_a+B_c) \dots \dots \dots \text{II-2}$$

B est compris entre 13 et 52 mv. Pour les aciers noués dans le béton, $B = 26\text{mv}$ quand la corrosion des aciers est active, et la valeur de B est de 52mv quand ils sont passifs.

La résistance de polarisation (R_p) est une caractéristique essentielle pour connaître le processus de la corrosion [44]. La décroissance de R_p correspond à la dépassivation de la surface et l'amorçage du phénomène de corrosion. Dans un second temps, la croissance de R_p est liée à la croissance des produits de corrosion à la surface du matériau. La stabilisation de R_p est due à la stabilisation de la cinétique de corrosion.

La mesure est effectuée à partir de la surface du parement, il est nécessaire de se connecter en un point au réseau d'armature ausculté (Figure II.5). Elle dépend de l'épaisseur et de la résistivité du béton d'enrobage, elle est d'ailleurs parfois couplée à des mesures de la résistance du béton d'enrobage. L'influence de l'humidité ou de la température du parement est aussi source de biais.

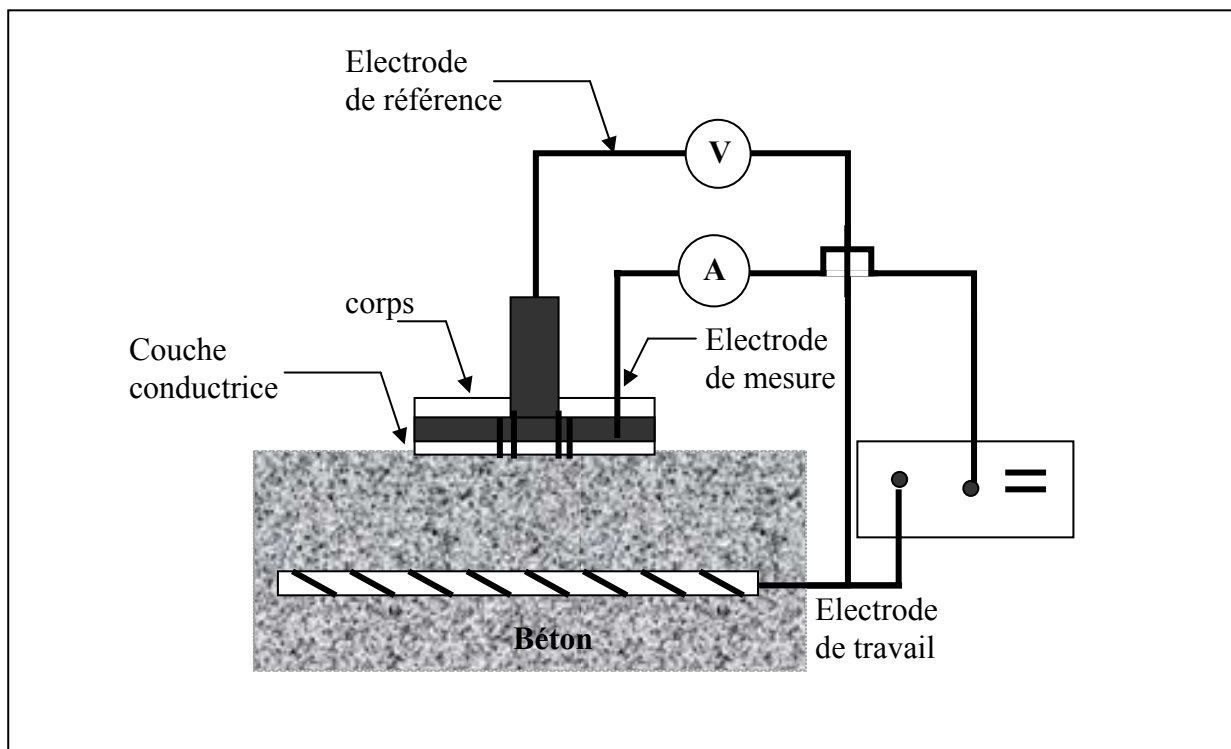


Figure II.5: Principe de la mesure de la vitesse de corrosion[35]

On mesure la résistance de polarisation du système acier-béton, suite à une sollicitation électrique, puis en la rapportant à l'aire de métal polarisée (estimée), on en déduit, par proportionnalité, la vitesse de corrosion de l'armature.

Le résultat final s'exprime en terme de vitesse de corrosion, en millimètre d'acier perdu par an (mm/an). On obtient une valeur ponctuelle de l'intensité de corrosion en surface de l'armature. Le tableau II.1 nous donne les niveaux de risque de corrosion à partir des valeurs de R_p .

Courant de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Vitesse de corrosion (mm/an)	Niveau de corrosion
< 0.1	0.001	Négligeable
0.1 à 0.5	0.001 à 0.005	Faible
0.5 à 1.0	0.005 à 0.01	Modéré
> 1	> 0.01	Elevé

Tableau II.1: Les niveaux de risque de corrosion à partir des valeurs de R_p [35].

*** Procédure de mesure du taux de corrosion :**

- Localisation de la grille des armatures et marquer la sur la surface du béton,
- Choix des endroits de mesure.
- Enregistrement de l'épaisseur d'enrobage et le diamètre des barres dans ces endroits,
- Le raccordement à la surface de l'armature.
- Mesure du potentiel de corrosion.
- L'application du courant électrique et l'enregistrement de la réponse afin d'obtenir le rapport $\Delta E / \Delta I$
- Tracer le potentiel en fonction du courant par unité de surface de la barre et déterminer la pente pour la meilleure ligne droite. C'est la résistance de polarisation.
- Calcule de I_{corr} à partir de R_p

La répétition de la mesure dans le même endroit est recommandée.

*** Paramètres influençant le courant de corrosion :**

Teneur en humidité : l'eau qui existe dans les pores du béton est le paramètre le plus approprié influençant le courant de corrosion.

Température : elle a un effet opposé sur le taux de corrosion. Quand la température augmente l'eau s'évapore donc le taux de corrosion augmente.

Teneur en chlorure : les chlorures agissent non seulement en dépassivant l'acier, mais augment également le taux de corrosion.

La méthode ne peut pas être simplement appliquée pour la dimension réelle de la structure, puisque la surface polarisée est inconnue, on a besoin d'une méthodologie spécifique pour des mesures sur site.

b) Mesure du potentiel d'électrode

C'est la méthode la plus utilisée pour détecter les zones de corrosion des armatures est la mesure de potentiel d'électrode. Il s'agit de mesurer la différence de potentiel qui existe entre l'armature et une référence placée sur le parement, à l'aplomb de cette armature. Cette méthode s'applique à des aciers au carbone, non alliés et non revêtus.

Lorsqu'une armature se corrodé, il apparaît une zone de dissolution dite anodique. Celle-ci est due à la dégradation de la couche protectrice formée par le béton sain. Cette dépassivation est due soit à des chlorures, soit à une carbonatation. La dissolution provoque formation d'électrons qui sont consommés dans les zones dites cathodiques (sans dissolution). Les courants électriques provoqués par les réactions anodiques et cathodiques, sont de signes contraires et sont égaux en valeur absolue.

Une électrode de référence est placée à divers endroits sur le parement figure II.6.

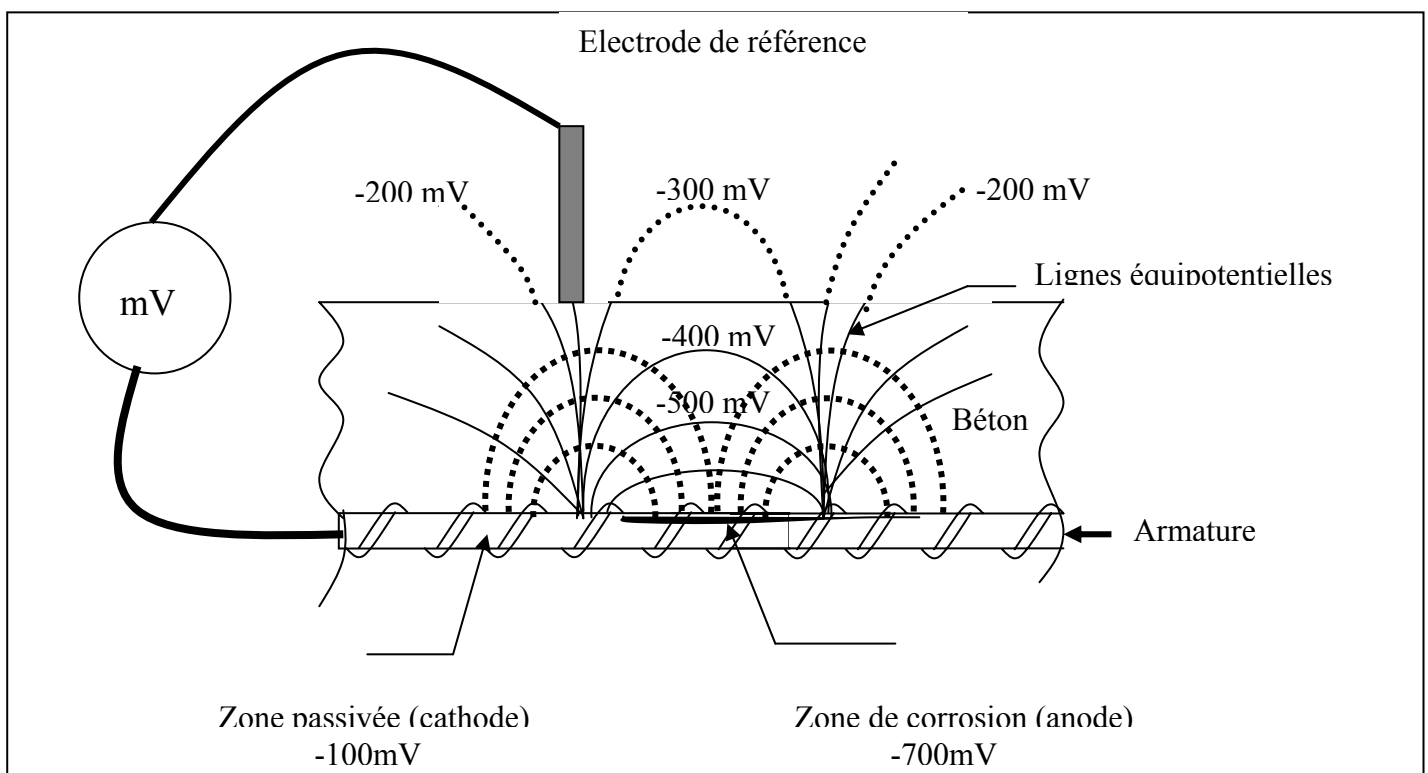


Figure II.6 : Principe de mesure du potentiel d'électrode [35]

Les résultats sont rendus généralement sous forme de cartes de potentiel de la surface auscultée. On définit alors des seuils représentatifs d'une probabilité de corrosion. La technique nécessite toutefois un branchement à l'armature qui est alors localement mise à nue.

Elle peut donc parfois être considérée comme une technique semi-destructive. Le tableau suivant nous donne les probabilités de corrosion selon les valeurs du potentiel de corrosion.

Potentiel de corrosion Cu/CuSO4 [mV]	Probabilité de corrosion
> -200	< 10%
-200 à -350	50 % (corrosion incertaine)
-350 à -500	50% à 90%
<-500	> 90%

Tableau II.2: Probabilité de corrosion des armatures [35]

Dans l'exécution pratique les erreurs peuvent affecter l'évaluation de l'état de corrosion. L'erreur la plus connue est le mauvais contact électrique du voltmètre et l'armature.

c) Résistivité électrique

Les mesures de résistivité sont utilisées en génie civil pour la caractérisation de l'état des armatures.

La résistivité est la caractéristique spécifique d'une substance à s'opposer à la conduction du courant à travers elle. La résistivité (ρ) s'exprime en ohm mètre ($\Omega \cdot m$) dans le système international (S.I.) [35].

La résistivité d'un matériau est définie comme la résistance électrique entre les deux faces opposées d'un cube unitaire. Contrairement à la résistance c'est donc une grandeur constante du matériau. Si la résistance électrique d'un cylindre de section S et de longueur L est R , alors la résistivité est calculée par la relation suivante :

$$\rho = R S / L \quad \text{II-3}$$

On détermine généralement la valeur de la résistance électrique R en faisant le rapport de la différence de potentiel mesurée entre les deux surfaces opposées (V en volts (V)) sur l'intensité du courant (I en ampère (A)) traversant le matériau, il s'agit de la loi d'Ohm

$$R = \Delta V / I \quad \text{II-4}$$

Cette technique est présentée comme une alternative aux méthodes existantes pour la caractérisation de la corrosion des armatures. Elle est actuellement couplée avec les mesures de vitesse de corrosion afin de les préciser en évaluant le biais lié à la résistance du béton d'enrobage. En dehors de cette application spécifique, la technique présente plusieurs inconvénients : d'une part la nécessité de se connecter au réseau d'armatures, d'autre part sa sensibilité à l'épaisseur de béton sondé par la mesure. Ce dernier point est certainement le plus préjudiciable étant donné l'influence sur la mesure des variations de l'enrobage (pas toujours maîtrisées), ou bien la position de l'électrode de surface vis-à-vis de la position des aciers dans la structure.

La mesure de résistivité électrique est utilisée pour cartographier les zones de corrosion probable, de la même manière que la technique du potentiel de corrosion. La différence de principe repose sur le fait que le potentiel de corrosion sert à mesurer les effets d'une corrosion active, alors que la résistivité mesure les facteurs favorisant la corrosion. On note que le potentiel de corrosion est généralement préféré, cette technique fait maintenant l'objet de recommandations précises sur les modes opératoires, et la validité des résultats. Il apparaît toutefois que la méthode présente de nombreuses limites, et que si elle est totalement maîtrisée en Laboratoire, le passage à l'ouvrage reste encore parfois problématique ou pour le moins entouré de réserves. Différents auteurs se sont essayés de déterminer des seuils de résistivité représentatifs de la corrosion probable, les valeurs des seuils étant significativement différents pour des dispositifs de mesures identiques (Tableau II.3). Outre ces désaccords sur la représentativité de la résistivité électrique des bétons, il semble illusoire de définir des seuils de résistivité significatifs d'un quelconque phénomène. En effet, la mesure de résistivité électrique est fonction de l'humidité du matériau, de sa température, de la qualité des contacts, mais aussi de la nature du béton ou encore de son âge [35].

Résistivité électrique [kΩcm]	Niveau de risque de corrosion
> 20	Faible
10-20	Faible à modéré
5-10	Fort
< 5	Très fort

Tableau II.3: Interprétation de résistivité du béton avec les niveaux de risque de corrosion [34]

La méthode de résistivité électrique est employée pour détecter les zones humides dans le béton donc cette mesure fournit des informations sur le risque de corrosion.

Deux méthodes de mesure peuvent être utilisées[5]

*** La méthode des quatre points**

Elle n'a pas besoin d'un contact direct avec l'armature. La résistivité du béton peut être mesurée directement sur la surface de la structure. Elle a été appliquée au béton récemment.

Cette méthode utilise quatre électrodes équidistantes en contact avec la surface du béton voir figure II.7.

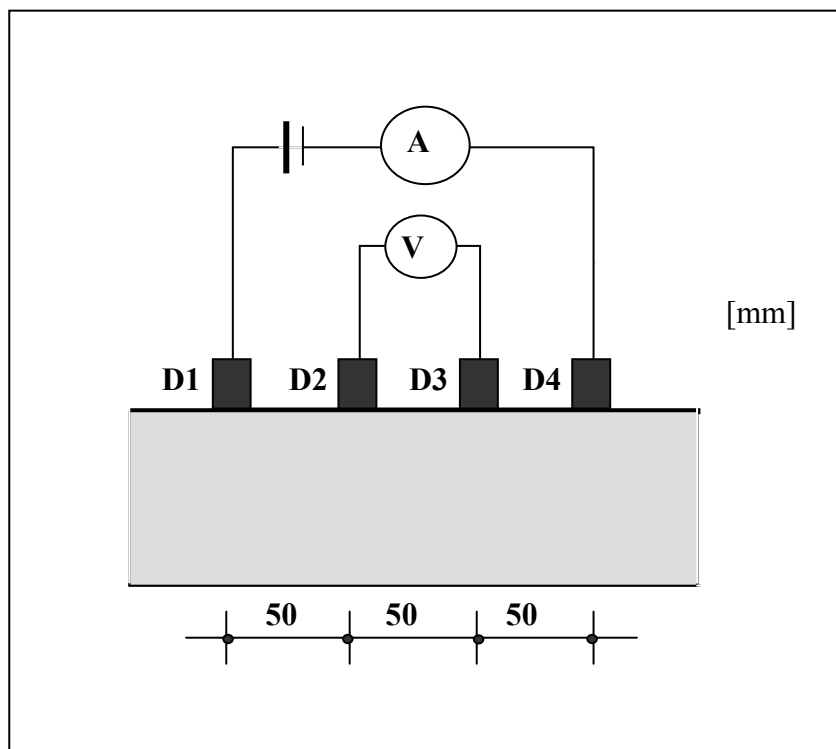


Figure II.7: Principe de la méthode des 4 points[5]

La résistivité est calculée comme suit :

$$\rho_{\text{béton}} = 2 \pi a R_{\text{mesurée}} \quad \text{II- 5}$$

Avec : $\rho_{\text{béton}}$ est la résistivité du béton (Ωm).

$R_{\text{mesurée}}$ est la résistivité des quartes électrodes mesuré.

a est la distance entre les électrodes.

* Méthode du disque

La mesure est basée sur l'estimation de la chute ohmique pour la résistance entre le disque placé sur la surface et l'armature (figure II.8)

La résistivité est calculée avec cette expression :

$$\rho = 2 R_e \Phi \quad \text{II-6}$$

Avec Φ est le diamètre du disque.

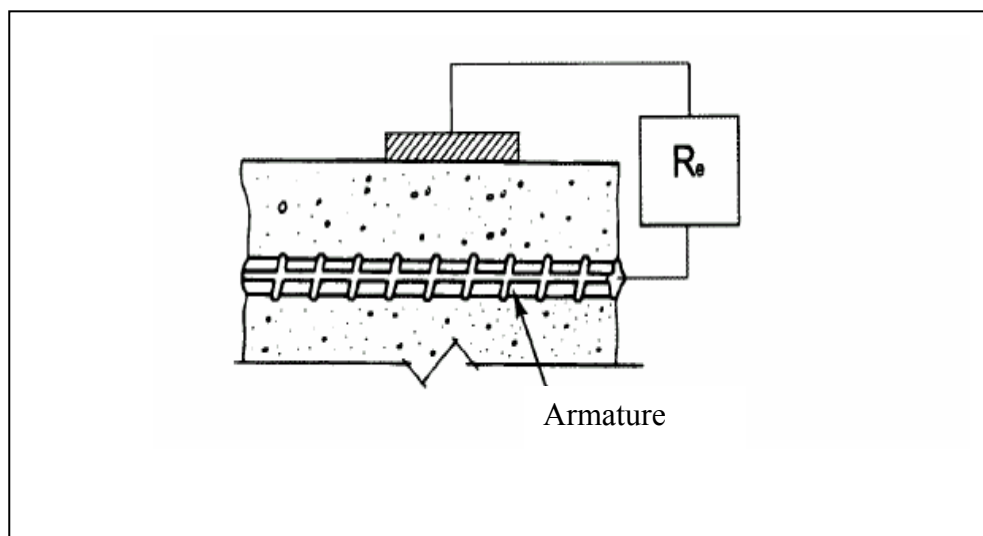


Figure II.8 : Méthode du disque[5]

Les facteurs qui influent sur la résistivité sont : l'humidité, la température, la teneur en chlorure, la carbonatation, type de ciment, la porosité et le type d'agrégat.

II.6.2 Opération pratique

* Choix de l'endroit de mesure

Avant de commencer, il est nécessaire de choisir le nombre et l'endroit de point où les taux de corrosion seront mesurés. Le nombre de points dépendra du :

- temps disponible, l'accès, la taille de la structure
- but de l'inspection.

En ce qui concerne la durée de chaque mesure, chaque lecture peut prendre de moins de 1 minute à environ 5 minutes dépendant des conditions de corrosion et la méthode de mesure.

Il faut prendre toujours le plus grand nombre possible de lectures dans différents endroits de la structure, choisis concernant plusieurs degrés d'agressivité pour remplir les manques de mesures au cours du temps.

II.6.3 Type de technique électrochimique

* Technique non permanentes

On utilise des équipements portatifs avec des sondes appliquées sur la surface externe du béton. L'accès électrique à l'armature est nécessaire.

Comme il a été mentionné trois techniques sont généralement utilisées :

- La mesure du courant de corrosion instantané I_{corr}
- Le potentiel de corrosion E_{corr} et la résistivité électrique ρ

Rappelons que I_{corr} représente la quantité du métal qui se transforme en oxyde par unité du temps, E_{corr} qui est un caractère qualitatif qui peut nous localiser les zones corrodées et la résistivité électrique ρ nous indique le degré de saturation du béton donc l'identification du risque de corrosion car dans le béton sec la corrosion n'évolue pas.

Les trois paramètres sont intéressants pour l'interprétation. Bien que I_{corr} est important pour l'évaluation à long terme.

Sondes électrochimiques incorporées

Tel que le titre l'indique, se sont des sondes enfoncées dans le béton à différentes profondeurs par rapport à la surface du béton à fin de permettre le contrôle continu du béton.

Les sondes incorporées doivent résister à l'alcalinité du béton à long terme et aux conditions défavorables d'humidité et de température. Mn /Omn électrodes pour la mesure du potentiel de corrosion sont durables.

Concernant la mesure de résistivité un petit disque en acier inoxydable ayant à son centre une électrode de référence, convient en utilisant l'acier comme électrode de travail voir figure II.9

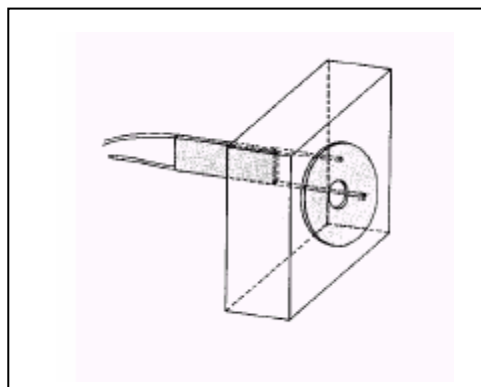


Figure II.9: Electrode de travail pour la mesure de résistivité[5]

Pour la mesure de R_p (I_{corr}), on utilise le même disque que pour la résistivité. On place aussi d'autres électrodes de référence afin de mesurer l'atténuation du signal.

La mesure de la profondeur de carbonatation et la teneur en chlorures peut être faite en plaçant de petites barres en acier en parallèle sur la surface du béton. L'agent agressif atteint ces barres, elles se dépassivent. La dépassivation peut être surveillée en enregistrant leurs E_{corr} et I_{corr} .

En conclusion, les sondes incorporées peuvent être utilisées pour surveiller l'évolution de plusieurs paramètres liés à la durabilité de l'armature.

La seule précaution à prendre concerne le mortier utilisé pour attacher la sonde ; il doit être de la même nature que le béton de la structure. Il faut utiliser le même ciment et le même rapport E/C. Un sable silisieux peut être approprié comme agrégat. En absence de cette possibilité, on recommande d'utiliser un mortier de rapport ciment/sable de 1 / 3 et un E/C = 0.4.

II.6.4 Les méthodes d'impédance électrochimique

On applique à une électrode de travail maintenue à son potentiel de corrosion par le potentiostat une petite amplitude sinusoïdale (quelque millivolt) dans une gamme de fréquence étendue. La réponse à chaque fréquence est un signal sinusoïdal avec une amplitude différente (mesuré ΔI en réponse sinusoïdal) et le déphasage relative au signal d'entrée [45,46].

Le rapport $\Delta E/\Delta I = Z$ (impédance)

$$Z = R_e + [R_t / (1 + j \omega C R_t)] \quad \text{II-7}$$

Avec : R_e : résistance ohmique d'électrolyte

C : capacité de l'électrode

ω : fréquence angulaire ($\omega = 2\pi f$)

j : partie imaginaire de $(-1)^{1/2}$

R_t : résistance de transfert assumée pour être équivalent à la résistance R_p

R_e est obtenue dans la gamme de haute fréquence tandis que $R_e + R_t$ est obtenue dans les basses fréquences.

Par la formule de Stern-Geary, l'intensité de corrosion peut être calculée à partir de la valeur de R_t .

Les données d'impédance sont obtenues pour le béton sur une gamme de fréquence qui dépend de la taille de l'échantillon et le taux de corrosion.

II.7 Les méthodes magnétiques

Cette méthode est développée en Allemagne. On génère un champ magnétique à basse fréquence à la surface du béton. On quantifie la modification du champ magnétique due à la présence des armatures. La perturbation magnétique dépend de plusieurs facteurs les plus importants : la force du champ magnétique induit et appliqué, la taille du défaut et la distance entre le détecteur et la barre.

Les méthodes magnétiques sont capables de détecter la corrosion et les fissures dans les armatures. Les défauts envisagés sont soit : perte de masse, piqûre de corrosion, entaille ou l'orientation des défauts n'a pas d'influence sur les résultats. On peut l'utiliser pour des épaisseurs du béton jusqu'à 18 centimètres. Les résultats sont interprétés par un personnel expérimenté. L'emplacement des armatures est nécessaire pour appliquer cette technique[46].

II.8 Les méthodes électromagnétiques (RADAR)

On génère une onde électromagnétique haute fréquence (1GHz) à la surface du matériau et on analyse sa réflexion ou son atténuation. Quand les impulsions électromagnétiques transmises atteignent l'interface entre deux matières avec des propriétés électromagnétiques différentes, une partie de l'impulsion est renvoyée et le reste est transféré dans de nouveaux matériaux. La réfraction dépend des propriétés du matériau et l'angle d'incidence.

Le radar est capable de repérer la position et la profondeur des armatures, les vides.

La figure II.10 montre la propagation d'une onde RADAR dans un milieu multi couche [47].

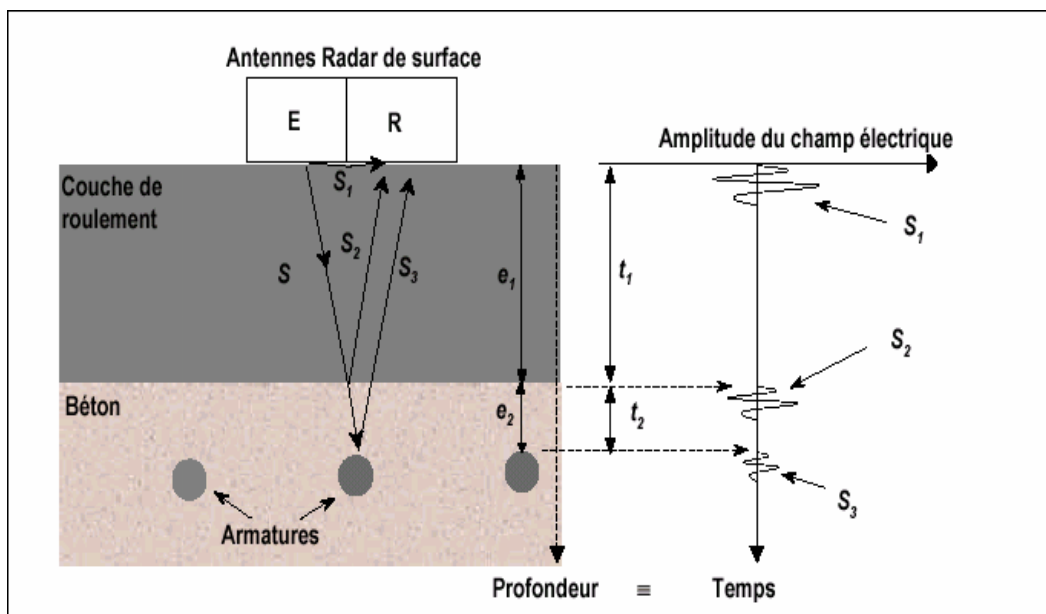


Figure II.10: La propagation d'une onde RADAR dans un milieu multi couche[47].

* La fiabilité du radar

La fiabilité de l'auscultation par radar repose sur deux facteurs importants : la qualité des relevés, le traitement des relevés et de l'analyse. La qualité des relevés dépend à la fois de la capacité de l'équipement radar utilisé à mettre en évidence les discontinuités recherchées (interfaces) dans un milieu donné et de l'ajustement des paramètres d'acquisition effectué par l'opérateur. La fiabilité de l'auscultation dépend étroitement de la qualité initiale des relevés, et cela quel que soit le type de traitement de ces relevés[48].

Le traitement des données consiste à utiliser des outils de traitement du signal pour en extraire l'information recherchée. L'approche utilisée pour le traitement des données doit d'abord être établie, puis justifiée en posant la question suivante : quel est le paramètre des relevés radar le plus sensible aux discontinuités recherchées, et pourquoi? La fiabilité du traitement est donc fonction de l'approche adoptée.

Enfin, l'expérience de l'opérateur en matière d'ondes électromagnétiques, d'équipements radar, de procédés de traitement du signal et de travaux sur site est importante.

Plusieurs travaux ont porté sur les deux principaux facteurs dont dépend la fiabilité de l'auscultation par radar, qui ont été mentionnés précédemment. Ainsi, afin de déterminer quel est l'équipement radar qui offre la meilleure qualité de données et qui est le mieux adapté au problème à résoudre, une étude comparative des différents équipements radar les plus utilisés au monde pour l'évaluation de l'état des dalles des tabliers de ponts a été réalisée[47].

Le radar travaille sur des fréquences de quelques centaines de Mhz à Ghz (le choix de la fréquence dépend des dimensions de l'ouvrage). En traversant le sol, une partie de l'énergie est adsorbée, une autre partie est réfléchiée soit sur des obstacles (points durs), soit sur des interfaces entre deux milieux de caractéristiques électriques différentes ; le pouvoir de pénétration et la vitesse de propagation varient suivant les milieux.

Cette méthode exige un traitement informatique qui la rend bien plus coûteuse.

La fréquence f est comprise entre **500 MHz et 2.5 GHz**.

Domaines fréquentiels - longueurs d'ondes

$f_0=1.5\text{GHz}$

- **béton sec** : $\lambda =12 \text{ cm}$

- **béton saturé** : $\lambda =8 \text{ cm}$

$f_0 = 0.9 \text{ GHz}$

- **béton sec** : $\lambda = 20 \text{ cm}$

- **béton saturé** : $\lambda =13 \text{ cm}$

Les développements récents dans le matériel et les logiciels ont contribué à la disponibilité des systèmes radar qui peuvent fournir des informations à trois dimensions sur le béton armé et permet de localiser les armatures.

Des résultats comparatifs entre la méthode radar et la mesure du potentiel d'électrode en été présentés sous forme de cartes binaires figure II.11

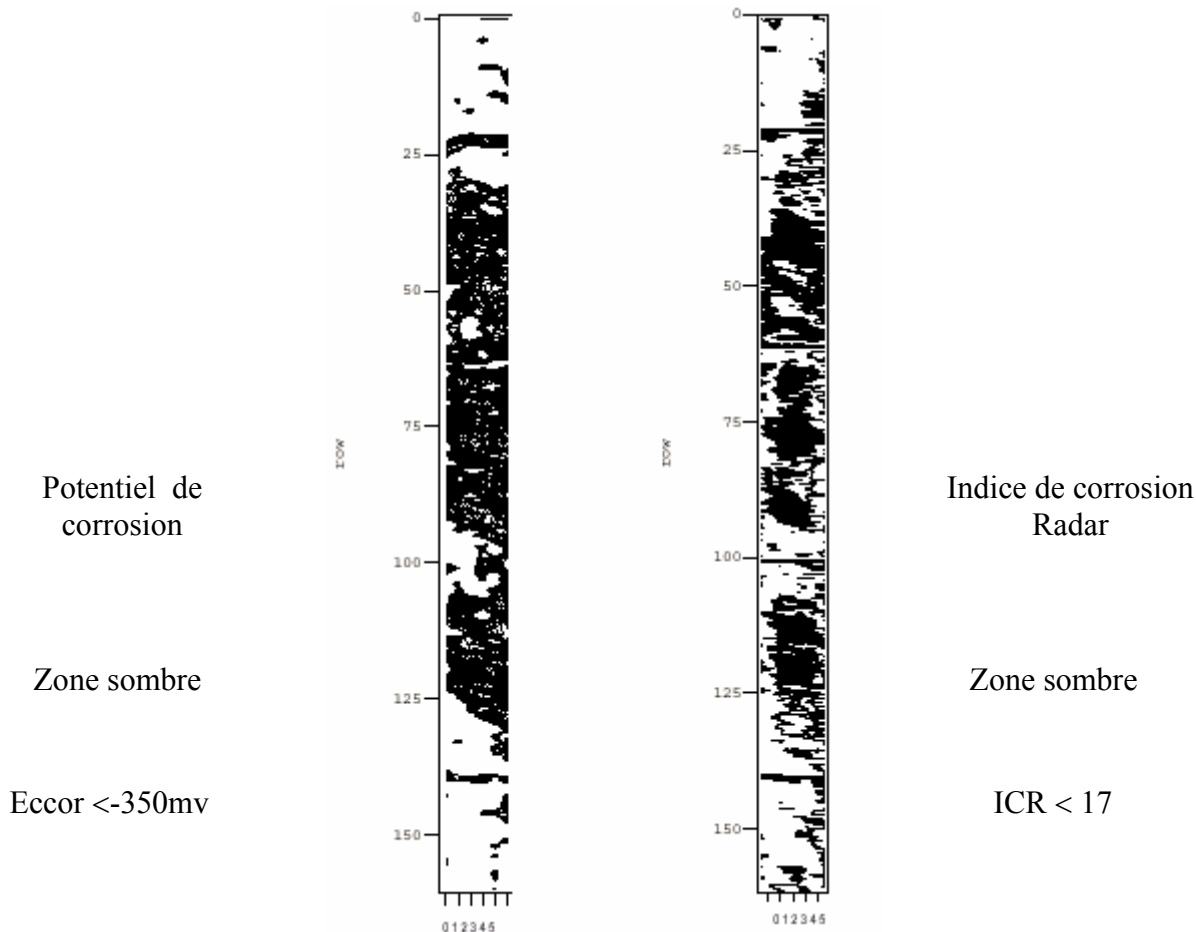


Figure II.11: cartes binaires de réflectivité et du potentiel de corrosion[47]

Les zone noires correspondent aux valeurs de potentiel inférieur à -350 mv et un indice de corrosion radar ICR inférieur à 17 où il existe une forte probabilité de corrosion.

Notant que ICR: Indice de corrosion radar. Renseigne sur la probabilité de corrosion : un indice proche de zéro indique une très grande probabilité de corrosion, alors qu'un indice élevé correspond à une probabilité très faible ou nulle. L'analyse du résultat obtenu indique clairement que l'ICR et le potentiel de corrosion évoluent dans le même sens. En effet, une diminution du potentiel de corrosion (augmentation de la probabilité de corrosion) se traduit par une diminution de l'ICR, et vice versa.

Chapitre III

ETUDE EXPERIMENTALE

III.1 Introduction

Dans cette partie expérimentale nous analysons la corrosion par deux techniques :

- La première est celle du radioscope utilisée et développée par [49,50]
- La deuxième est celle de la mesure du potentiel d'électrode.

III.2 Matériaux utilisés

Nous avons essayé autant que possible de garder les mêmes conditions expérimentales que [49] afin qu'il y ait une continuité dans la recherche.

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un CPJ 45 provenant de la cimenterie de Mefteh.

Les résultats de l'analyse de ce ciment sont illustrés dans le tableau suivant :

Element	SiO ₂	AlO ₃	FeO ₃	CaO	MgO	CAO(libre)	SO ₃	P.F	Insoluble
%pondérale	19.48	5.06	3.72	61.95	0.85	1.63	1.1	3.44	1.26

Tableau III.1: Composition chimique du ciment.

III.2.2 Granulats

Nous avons utilisé un sable de rivière et un gravier concassé de classe 3/8.

***Analyse granulométrique:** (NF P18-560)

Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

La courbe granulométrique de chaque famille de granulats est représentée sur la figure III.1

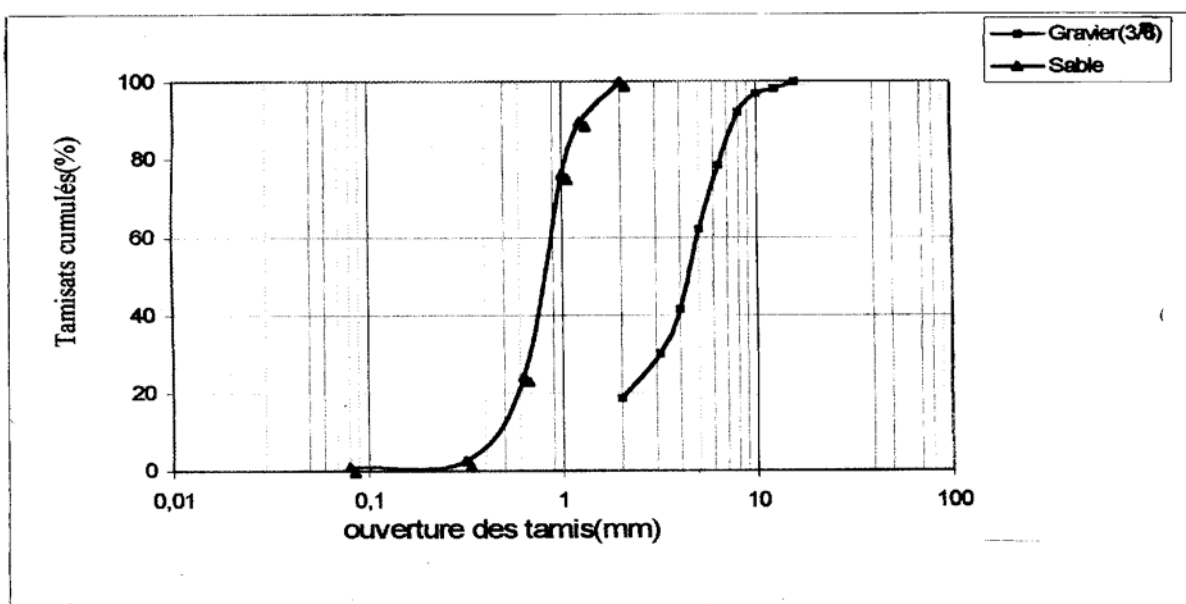


Figure III.1: Courbe granulométrique des différentes classes de granulats

III.2.3 Acier

L'acier utilisé provient du complexe de d'EL-HADJAR. Le tableau résume l'analyse spectrométrique des aciers.

Produits moyen	Fe%	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	MO%	Cu%
φ 06mm	0.2	0.11	0.60	0.06	0.013	0.012	-	-	-	-

Tableau III.2: Résultats d'analyses spectrométriques.

III.2.4 Eau

L'eau utilisée est une potable de robinet.

III.3 Les éprouvettes d'essais

III.3.1 Conception des éprouvettes

Nous avons utilisé des éprouvettes prismatiques $(7.7.28) \text{ cm}^3$ armées avec deux barres de $\Phi 6$, menu d'une entaille artificielle de 4mm allant jusqu'à l'armature pour accélérer le phénomène de corrosion (figure III.2)



Figure III.2 : Epreuve $(7.7.28) \text{ cm}^3$ mise en place des Barres et entaille.

D'après l'étude de [51] sur des éprouvettes en béton armé chargées en flexion dans une enceinte de brouillard salin. Avec un enrobage de 4cm, il a fallu pas moins de 7 ans avant de voir se développer une fissuration secondaire le long des aciers longitudinaux issue des produits de corrosion.

Même la réalisation des fissures réelles est impossible pour des raisons de manutention. Notons que pour avoir une fissure de 1mm, il est nécessaire d'appliquer une charge de 179,66KN.

Nous avons utilisé des éprouvettes en béton usuel dont la composition a été déterminée par la méthode de Dreux- Gorisse [52, 53]

- Dosage de ciment 400 kg/m³.
- Un rapport eau /ciment de 0.5.
- Un pourcentage respectif de sable et de gravillons a utilisé pour le mélange: 38% de sable qui correspond à 614.5Kg/m³ et 62% de gravillons qui correspond à 1040.05Kg/m³.

Ces constituants sont introduit dans la cuve : les granulats, liant, sable qui sont malaxés à sec pendant 1 minute, puis on ajoute l'eau et on malaxe pendant 2 minutes.

L'entaille est réalisée dès la mise en place du béton à l'aide d'une plaque en aluminium fixée en haut du moule.

Les moules remplis, la vibration du béton est effectuée à l'aide d'une table vibrante.

Après 24 heures on démoule les éprouvettes (figure III.3)



Figure III.3: Epreuve d'essai

III.3.2 Conservation des éprouvettes

Le phénomène de corrosion est un phénomène très lent pour cela nous avons choisi d'accélérer le processus en immergeant l'éprouvette entaillée de 4mm dans la solution 4N.

Ce sont les conditions extrêmes cités dans [49].

La solution est composée d'eau dans laquelle on fait dissoudre du sel NaCl avec une concentration de 4N, le 1N représente la normalité qui est la concentration de NaCl donnée en g/l simulée à celle qui se trouve dans la méditerranée, et qui a pour valeur 27.2 g/l [49,54].

4N représente la concentration en NaCl 4 fois plus que la normalité 1N.

III.4 Essais sur le béton

III.4.1 Résistance à la compression

Le béton étudié a une résistance à la compression égale à 35 MPa à 28 jours.

III.4.2 Mesure de l'absorption capillaire

La perméabilité ou propriété d'un corps à se laisser traverser par un fluide. Elle est souvent considérée comme un critère de durabilité[55]. Les fluides peuvent être l'air, l'oxygène, l'azote, l'eau ou les solutions salines.

La perméabilité du béton dépend principalement de la perméabilité de la pâte de ciment. Cette dernière est liée à la structure des pores.

La perméabilité du béton détermine sa capacité de permettre la pénétration des sels agressifs, de l'oxygène et du dioxyde de carbone, et l'atteinte aux armatures. La pénétration de ces sels favorise la corrosion de ces dernières.

L'essai d'absorption capillaire est réalisé sur une éprouvette de 7x7x28, la mesure se déroule comme suit [56]:

- Scier une face de l'éprouvette et imperméabiliser les autres faces à l'aide de résine d'époxy ou de paraffine.
- Poser l'éprouvette, dans un bac de sable saturé, sur sa face sciée (voir figure III.4).
- Mesurer ensuite en fonction du temps l'accroissement du poids de l'éprouvette due à la montée capillaire.

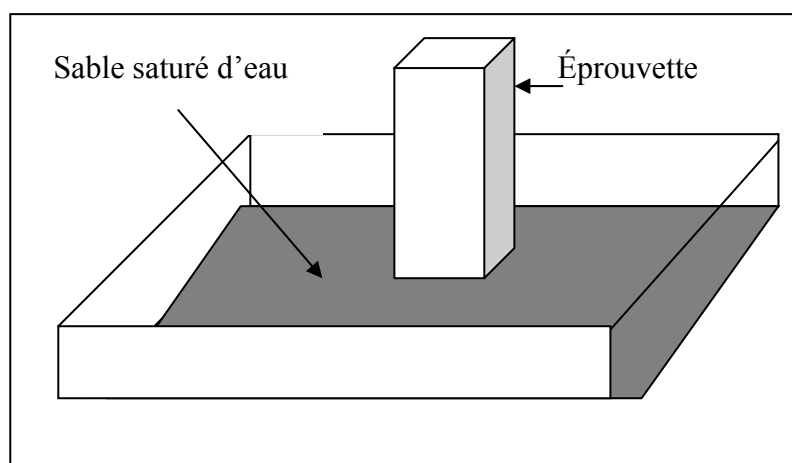


Figure III.4: Mesure de l'absorption capillaire

L'absorption d'eau est estimée à 72 heures par l'expression suivante:

$$AC = \frac{100 P}{S \sqrt{t}} \quad \text{III.1}$$

Ou: P : poids d'eau absorbée en g.

S : surface de la face sciée en cm².

t : temps en heures (t=72 heure).

Le résultat de mesure a donné une valeur 11.06%, qui correspond à un béton peu perméable.

III.5 Analyse de la corrosion

A travers notre étude bibliographique, il existe plusieurs techniques pour analyser la corrosion. Celles choisies à cause de leur disponibilité pour notre recherche soit la radioscopie et la mesure du potentiel d'électrode.

III.5.1 Mesure par radioscopie

La corrosion est généralement quantifiée par la perte de masse du métal étudié qui conduit dans le cas du béton armé à une diminution du diamètre de la barre. Vu la disponibilité d'un radioscope du laboratoire de traitement d'image au centre de recherche et de contrôle de Chéraga. Nous avons choisi ce dernier pour mesurer cette perte de masse.

Le radioscope est un système de contrôle à rayon X pour des échantillons de l'industrie Il est fortement utilisé dans le contrôle de soudage, en industrie électronique, en industrie automobile et en aéronautique. Cet équipement se présente en deux unités, la première est la chambre à rayonnement et l'ensemble de support de la pièce, la deuxième est l'unité de commande que le PC d'acquisition et le traitement de l'image.

L'analyse avec l'unité se base sur le spectre continue du faisceau de rayon X issu d'un générateur avec un cible en Tungstène. La tension d'acquisition du tube générateur peut être variée de 10 à 160KN.

La chaîne de radioscopie se compose d'un (figure III.5) :

- Générateur de rayons X,
- Détecteur et convertisseur de rayonnement,
- Le système de mouvement de l'échantillon
- Le système d'acquisition et de traitement d'image.

On dépose l'échantillon à tester sur un support qui admet plusieurs mouvements (translations, rotations et inclinaisons), pour l'examen en temps réel des images par transmission des

rayonnements X à travers cet échantillon. Avec les mouvements possibles, il est facile de choisir des positions convenables qui donnent les détails des images et on peut aller loin dans une analyse d'une région précise sur l'échantillon.

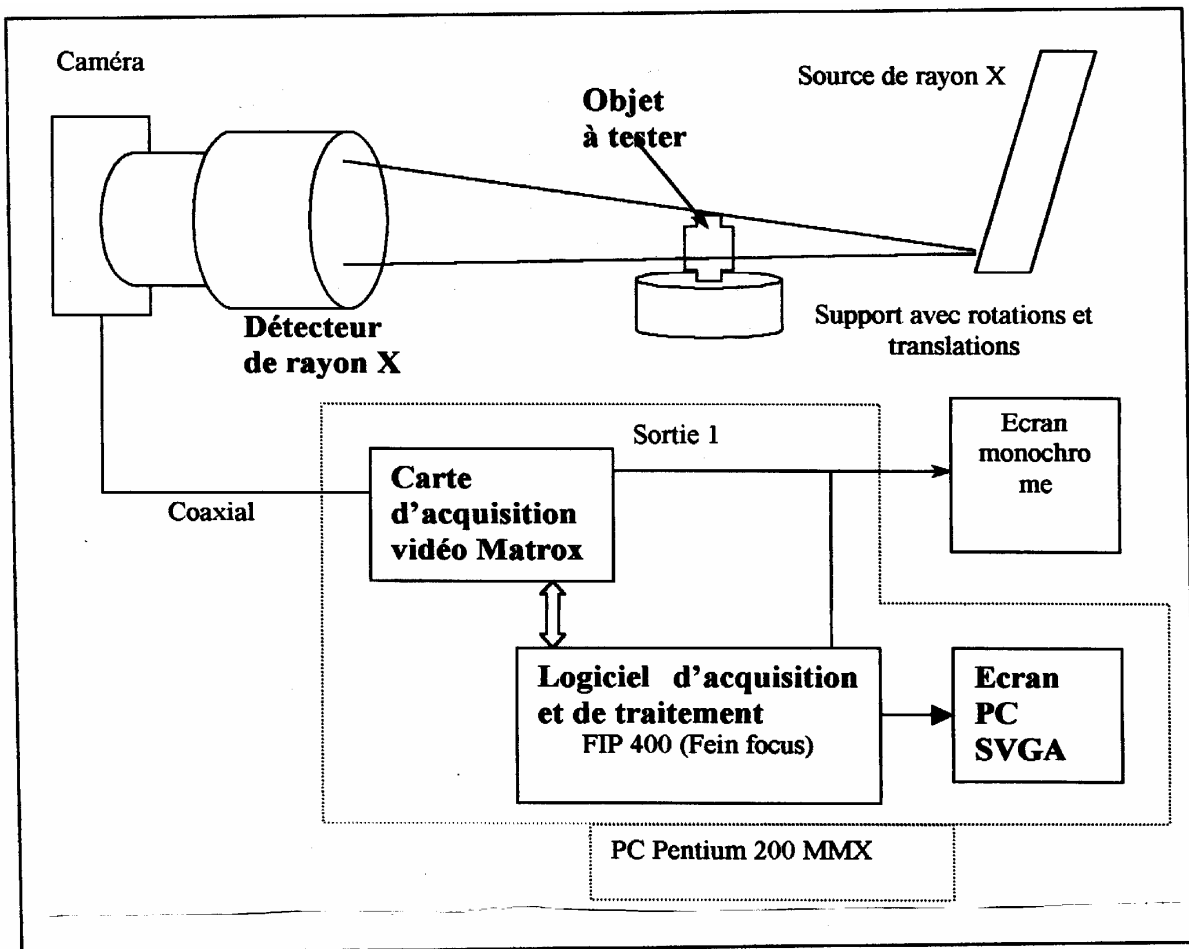


Figure III.5: Synoptique de la chaîne de radioscopie

Le détecteur est formé par la surface de détection qui est en césium iodide sur quelques millimètres d'épaisseur. Cette couche permet de convertir l'énergie des rayonnements X incidents en une lumière visible. Une caméra connectée à la sortie des photons pour convertir le signal en signal vidéo, ce signal est injecté dans l'entrée vidéo de la carte d'acquisition de PC pour la sauvegarde et le traitement, en parallèle l'image peut être visualisée sur un écran monochrome pour le travail en temps réel. Ces étapes sont gérées par le logiciel du constructeur qui pilote l'acquisition, le traitement et le transfert des images. L'appareil à rayon X à micro foyer est complet pour le test des modules de formes géométriques diverses des éprouvettes en béton armé (figure III.6).

Le résultat de cette technique est des images qui présentent la perte de diamètre des barres d'aciers.

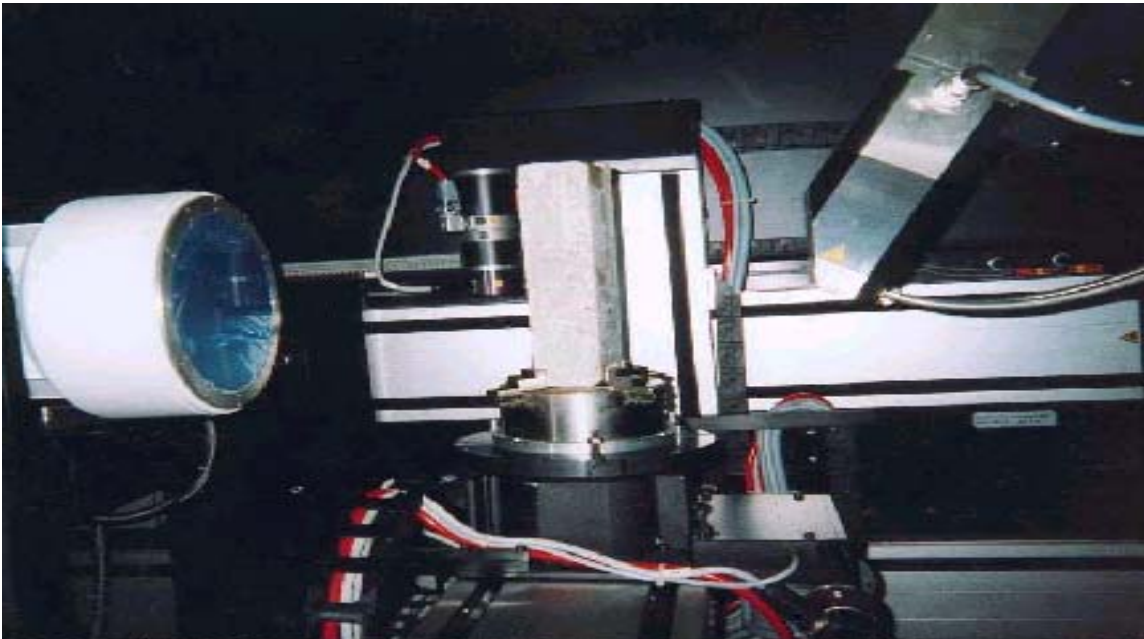


Figure III.6 : Epreuve en béton armé de (7x7x28) testée par le radioscope.

La deuxième technique est la mesure du potentiel d'électrode.

III.5.2 La mesure du potentiel d'électrode

Nous avons réalisé nos essais au laboratoire de corrosion de faculté de Chimie de l'USTHB . La mesure du potentiel d'armature, ou potentiel de corrosion fait maintenant partie des techniques usuelles proposées pour la caractérisation de l'endommagement des ouvrages en béton armé. Elle permet d'évaluer l'état de corrosion des armatures en acier présentes dans le béton.

Le principe de la méthode repose sur la mesure des variations du potentiel électrique qui s'établit à l'interface armature-béton (Figure III.7). La corrosion est plus forte pour les valeurs très négatives du potentiel de corrosion (< -350). Ce potentiel électrochimique, né de la différence de nature électrique entre l'acier et le béton, fluctue en fonction de paramètres divers (gradient d'humidité, de pH au sein du béton, ...), et peut être révélateur d'une activité de corrosion de l'acier.

On effectue donc la mesure des variations de ce potentiel entre l'armature et une électrode de référence déplacée sur la surface du parement ausculté. Il s'agit d'une mesure « passive ».

La mesure est fonction de l'activité de corrosion de l'armature, mais aussi de l'épaisseur et de la résistivité du béton d'enrobage. La nature électrochimique de la technique la rend très sensible à l'humidité et à la température du parement.

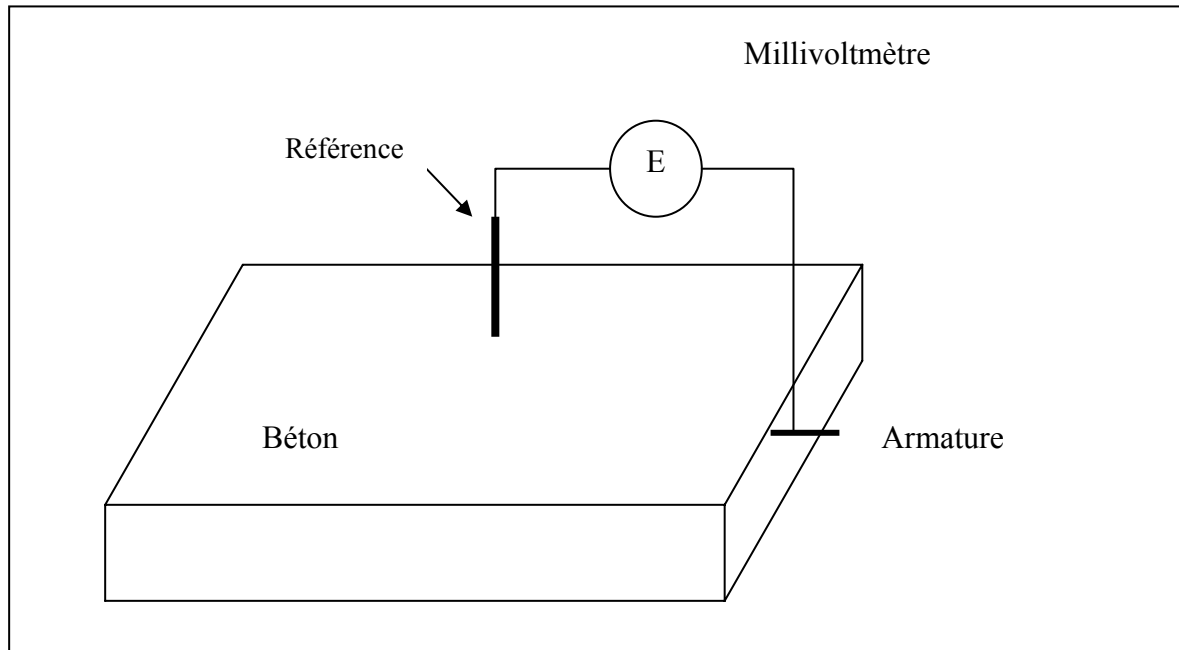


Figure III.7: Principe de la mesure de potentiel d'électrode [6].

Si le béton est immergé, la résistance électrique du béton est très faible. Il n'est plus possible de mesurer des variations de potentiel électrochimique en plaçant une référence simplement à la surface du béton. Cette difficulté a été résolue en utilisant un appareil présenté dans la figure III.8 qui permet de chasser l'eau du béton qui se trouve ainsi dans des conditions atmosphériques.

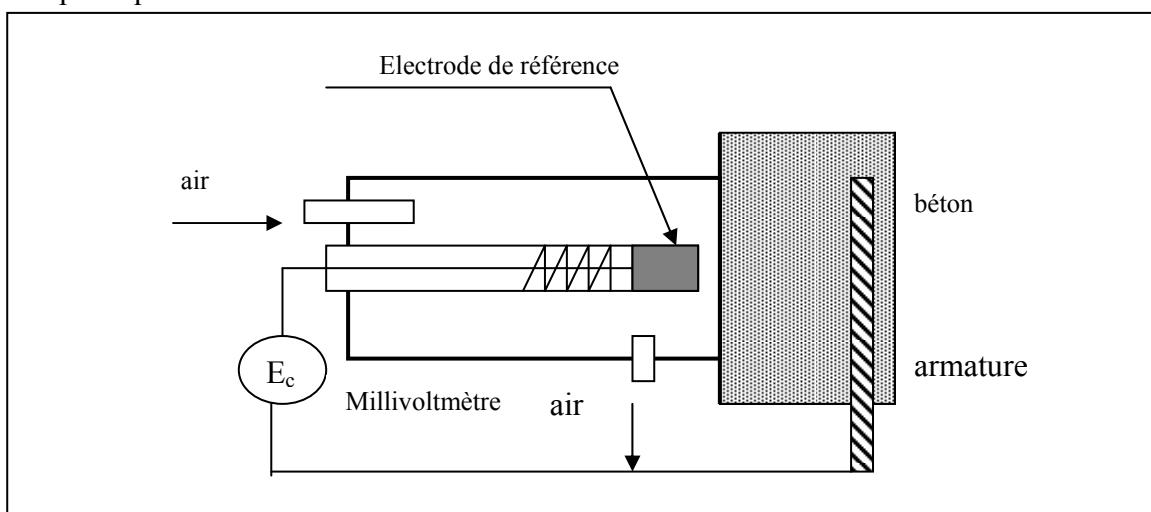


Figure III.8: Dispositif permettant de mesurer le potentiel d'électrode des armatures dans le béton immergé [6].

* Mise en œuvre et appareillage

Une armature est mise à nu et connectée à un fil qui est relié à un millivoltmètre dont l'autre borne est reliée à une électrode de référence qui est mise sur le béton.

La connexion de l'armature doit être soignée au niveau du contact (éliminer la rouille et les salissures).

La jonction entre la référence et le béton doit être assez humide. Si le béton est très sec, il est humecté. Une éponge (ou tissu) imbibée d'eau parfois alcaline est mise entre l'électrode de référence et le béton.

Le millivoltmètre doit être portable et permettre de mesurer des potentiels dans la gamme ± 2 volts. Son impédance d'entrée doit être suffisamment élevée (par rapport à la résistance électrique entre l'armature et la référence). En général, une impédance de $10 \text{ M}\Omega$ suffit.

Une électrode de référence doit avoir un potentiel stable dans le temps. Elle doit être peu sensible aux variations de température et des caractéristiques du béton (pH), sans polluer celui-ci. Les électrodes de référence les plus utilisées sont les suivantes :

- La référence dite au calomel saturé est constituée de mercure (Hg), de chlorure mercureux (Hg_2Cl_2) et une solution saturée de chlorure de potassium (KCl). Cette électrode a une enveloppe en verre, ce qui la rend fragile. Elle est surtout utilisée en laboratoire. Par rapport à la référence (dite normal) à l'hydrogène, son potentiel est de $+0.241 \text{ V}_{\text{ENH}}$ (à 25°C) ;

- La référence à l'argent (Ag)-chlorure d'argent (AgCl) dans une solution saturée de chlorure de potassium est très utilisée. Son potentiel par rapport à la référence à l'hydrogène est de $+0.199 \text{ V}_{\text{ENH}}$ (à 25°C) ;

- La référence au cuivre (Cu)-sulfate de cuivre (CuSO_4) en solution saturée est la plus pratique. Son potentiel par rapport à la référence à l'hydrogène est de $+0.318 \text{ V}_{\text{ENH}}$ (à 25°C).

L'électrode Cu / CuSO_4 est la plus utilisée pour la détection de la corrosion dans les structures en béton armé. D'après la norme ASTM C876 [57] des mesures du potentiel E déterminent l'activité de corrosion. Si

- ✓ $0 < E < -250 \text{ mv}$ faible probabilité de corrosion.
- ✓ $-250 < E < -350 \text{ mv}$ amorce de corrosion probable.
- ✓ $-350 < E < -600 \text{ mv}$ forte probabilité de corrosion.

III.6 Résultats et interprétations

III.6.1 Mesure par radioscope

Les résultats obtenus par radioscopie ont montré que l'éprouvette est franchement corrodées à l'endroit de l'entaille, il a été observé une nette diminution de diamètre de l'armature et un endommagement de la liaison acier – béton dans les régions voisines de l'entaille.

Nous avons calculé le taux de corrosion C% avec :

$$C\% = (\Phi_f - \Phi_i) / \Phi_i \quad \text{III-1}$$

Avec Φ_f : diamètre après corrosion.

Φ_i : diamètre initial de la barre = 06mm.

Le taux de corrosion est de 8.5% pour une période d'immersion de 4 mois et il est de 9.5% à 7 mois de conservation (figure III.9).

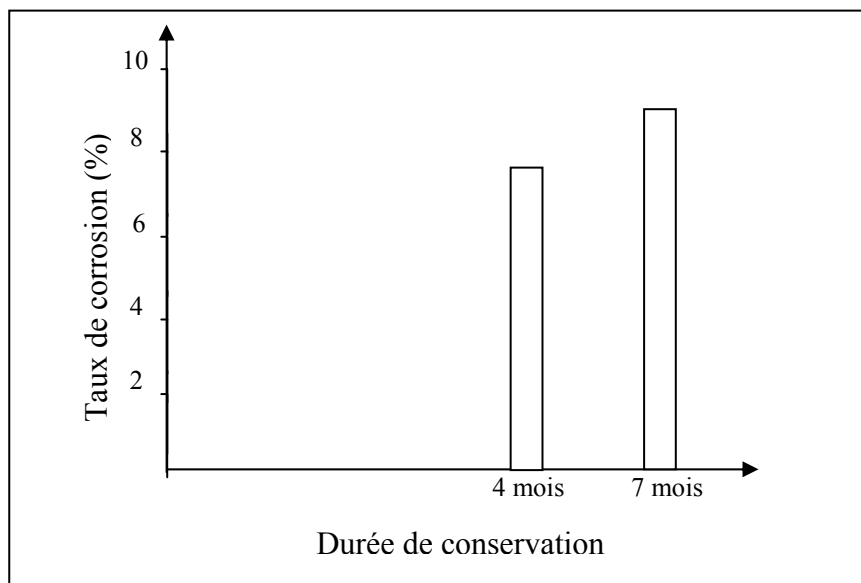


Figure III.9: Taux de corrosion à 4 mois et 7 mois pour les éprouvettes

Les images présentées ci-après sont celles prise pour une éprouvette entaillée de 4mm avant amorce de la corrosion et après quatre mois d'immersion dans une solution de 4N.

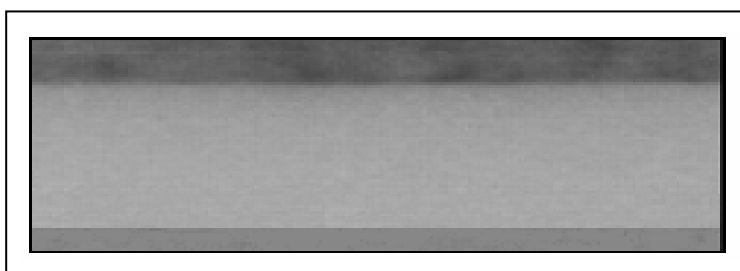


Figure III.10 : Eprouvette non corrodée.

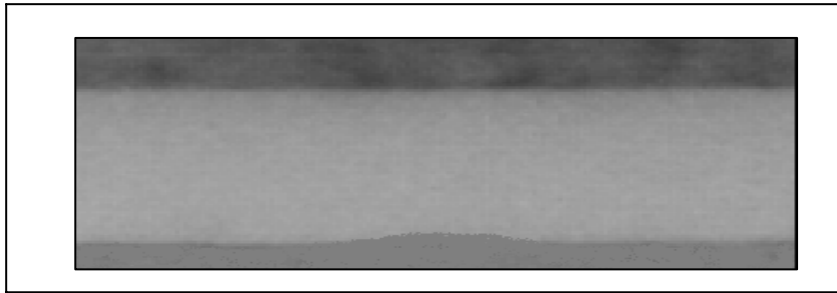


Figure III.11: Epreuve corrodée après immersion de 04mois dans la solution Nacl 4N.

III.6.2 Mesures du potentiel d'électrode

Les prises de mesures des relevés de potentiels s'effectuent selon les étapes suivantes :

- Identifier les points de lectures sur l'éprouvette,
- Connecter la borne positive du millivoltmètre à mémoire par le biais d'un fil conducteur à l'armature,
- Connecter la borne négative du millivoltmètre à mémoire à l'électrode de référence,
- Mettre une éponge au bout de l'électrode,
- Mouiller la surface du béton,
- Humidifier l'éponge,
- Poser l'électrode sur la surface du béton,
- Lire le potentiel affiché sur le millivoltmètre à mémoire,
- S'assurer que la valeur est stable et sauvegarder la lecture.

La figure ci-dessous schématise le montage du millivoltmètre afin d'effectuer un relevé de potentiel de corrosion. La borne négative du millivoltmètre est connectée à l'armature et la borne positive à l'électrode posée sur la surface de l'éprouvette.

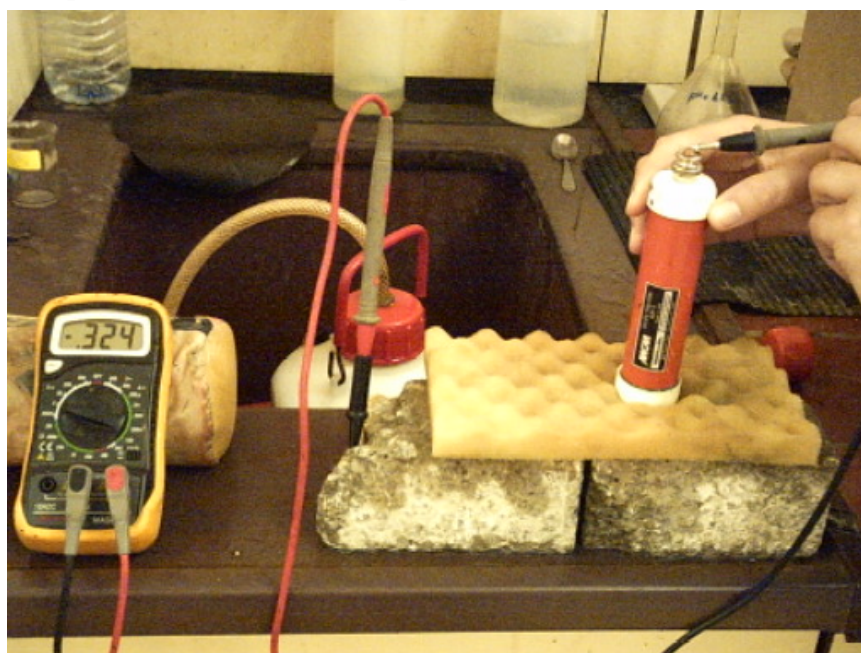


Figure III.12: Dispositif expérimental

En déplaçant l'électrode de référence Cu/CuSO₄ le long de l'éprouvette, le millivoltmètre affiche les valeurs du potentiel d'électrode.

Les mesures ont été prises comme suit :

- pour chaque barre (1^{ère} et 2^{ème} barre)
- pour les trois positions (figure III.13) :
 - position à gauche de l'entaille (g)
 - position milieu de l'entaille (m)
 - position à droite de l'entaille (d)

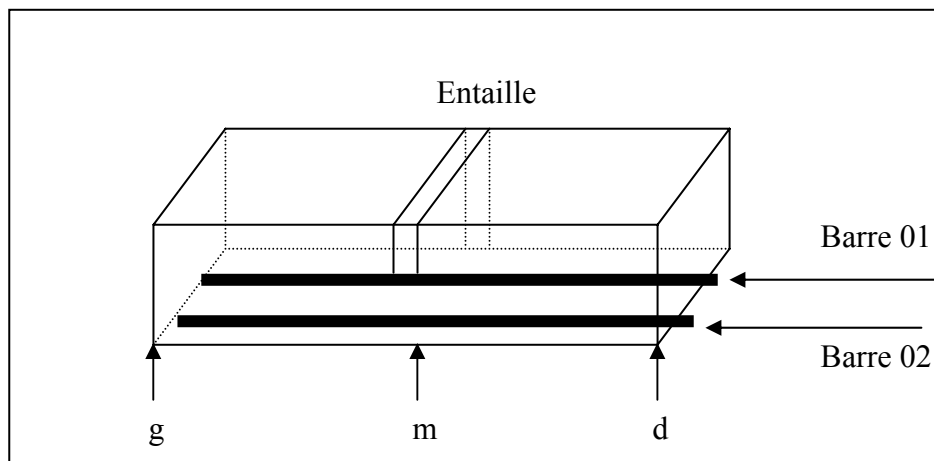


Figure III.13: Positions de mesure.

Nous avons pris des mesures sur une période de 4 mois un intervalle de 15 jours et nous avons pris les mesures à 7 mois.

L'intervalle de 15 jours était un choix au début pour prendre des mesures rapprochées vu l'évolution rapide du phénomène si il est initié.

Sur les figures ci- après nous avons exprimé les valeurs de potentiel de corrosion (E_{corr}) dans la première et la deuxième barres respectivement dans les trois positions en fonction du temps.

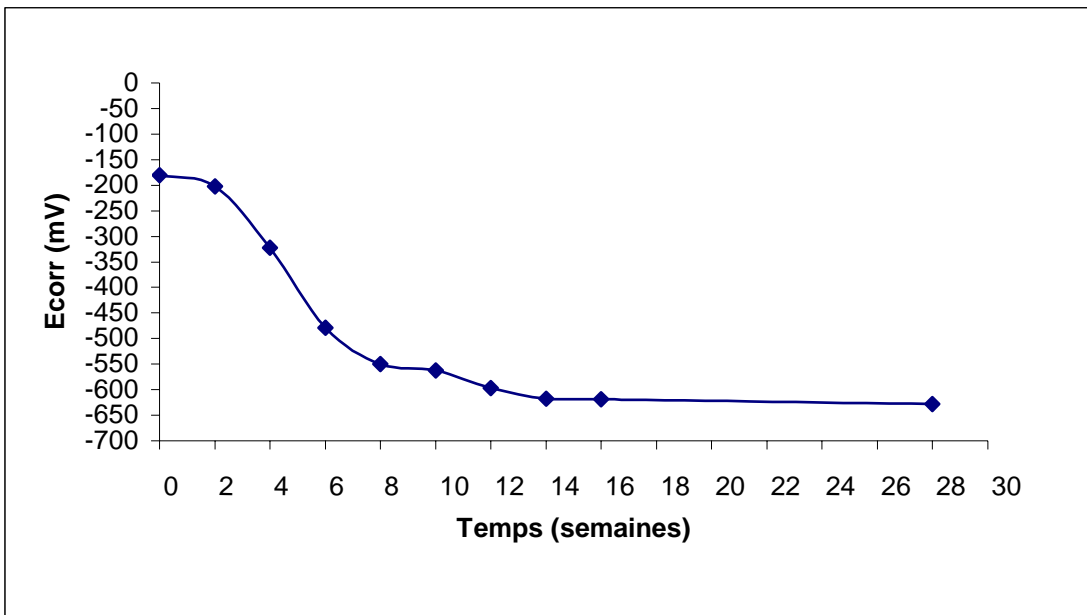


Figure III.14 : Evolution des valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} de la première barre pour la position gauche

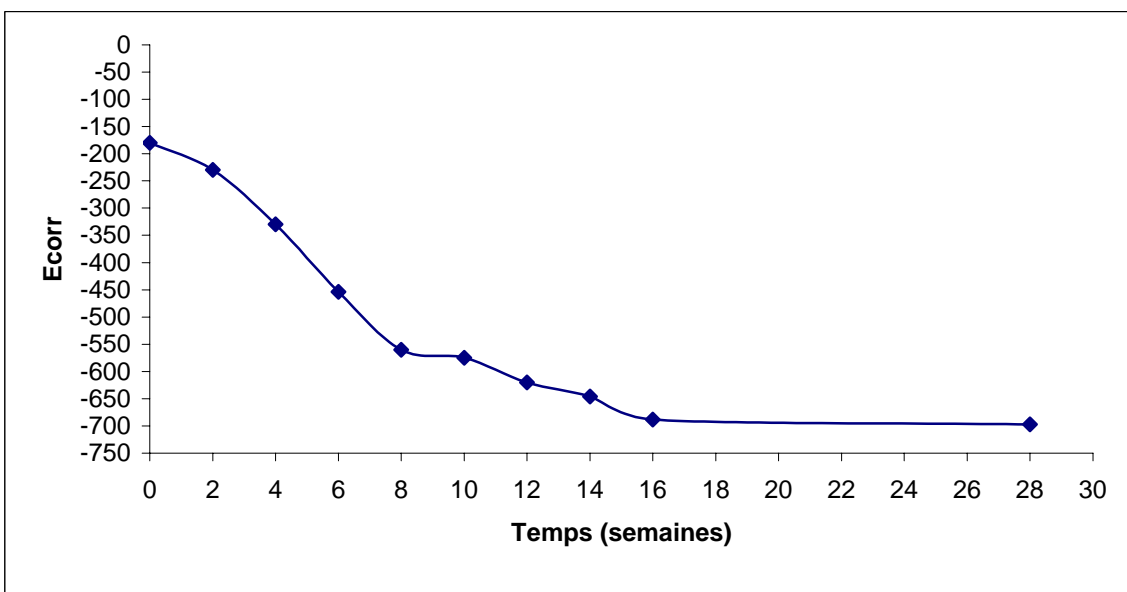


Figure III.15: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} de la première barre pour la position médiane

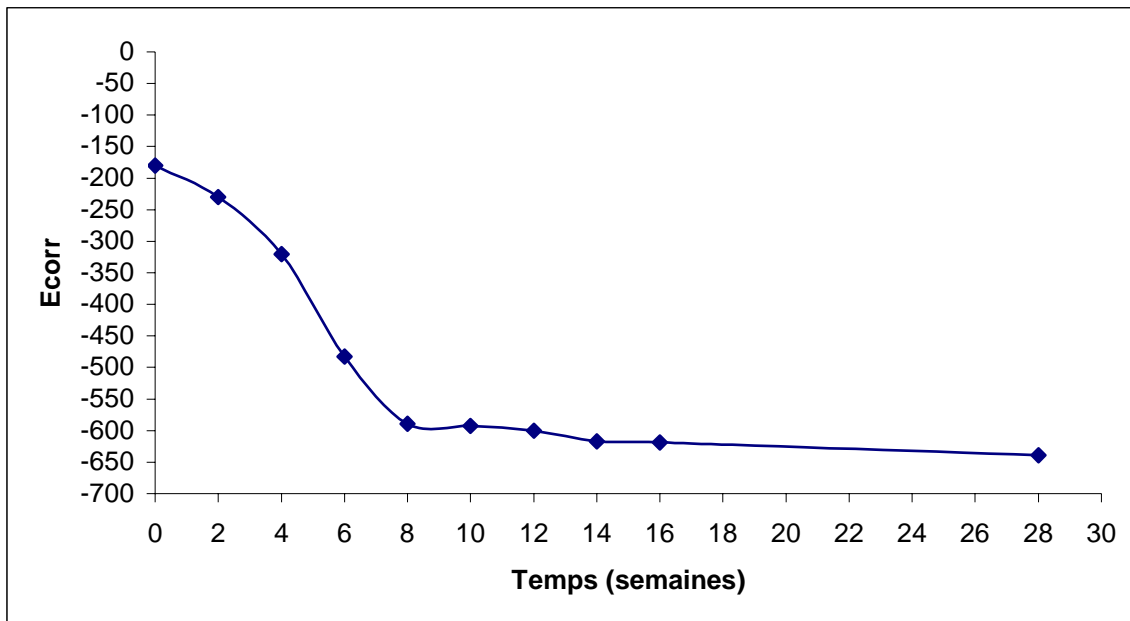


Figure III.16: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} de la première barre pour la position droite

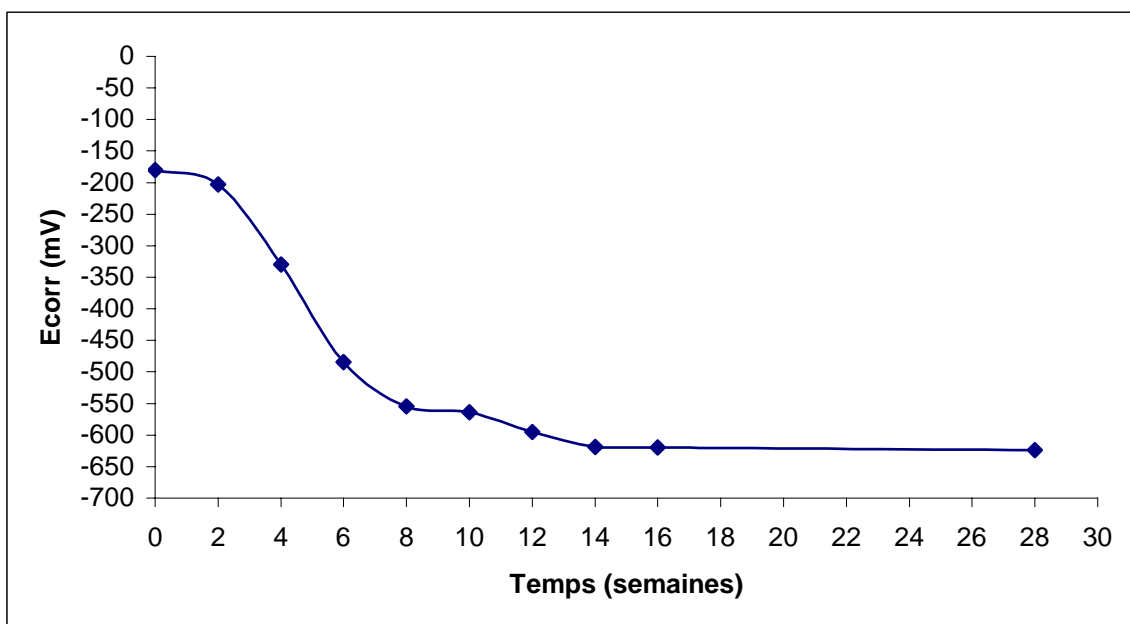


Figure III.17 : Evolution des valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} de la deuxième barre pour la position gauche

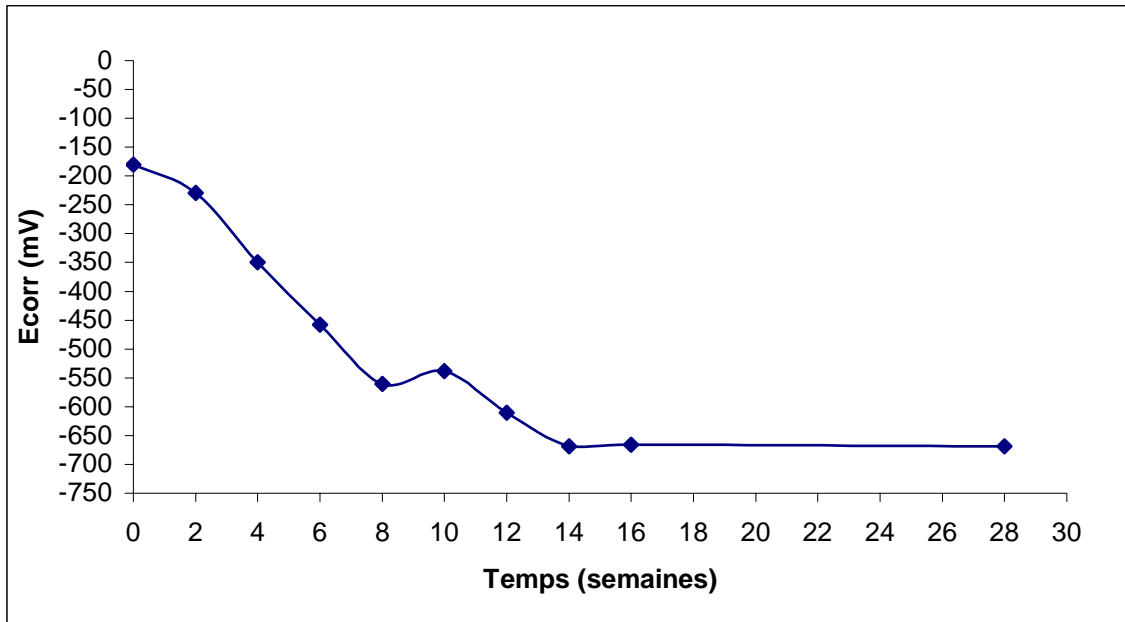


Figure III.18: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} de la deuxième barre pour la position médiane

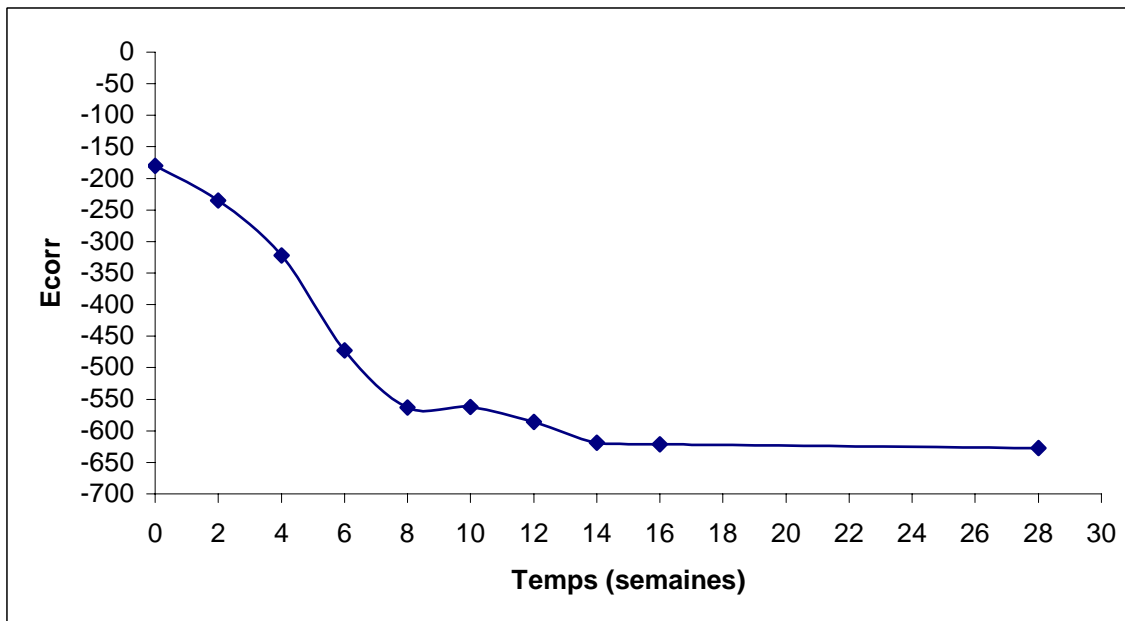


Figure III.19: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} de la deuxième barre pour la position droite.

III.6.3 Interprétation des résultats

Les valeurs du potentiel mesuré indiquent que l'amorce de la corrosion c'est produit après un mois de l'immersion de l'éprouvette dans la solution NaCl 4N, durant le 1^{er} mois, l'acier était à l'état passif.

Les potentiels deviennent de plus en plus négatifs, ceci traduit une évolution de la corrosion des aciers au cours du temps.

Le potentiel de corrosion atteint environ la valeur -670mV pendant les quatre mois d'immersion. Sur les figures présentées, nous remarquons que le potentiel augmente sensiblement jusqu'à l'âge de 8 semaines. Au delà de 8 semaine même si logiquement la corrosion continue à évoluer le potentiel semble se stabiliser ou au moins augmente à une très faible vitesse cela concorde avec les résultats de la littérature [58] qui ont pris des éprouvettes prismatiques $4.4.16\text{ cm}^3$ avec un ciment portland dosé à 400kg/m^3 immergées dans une solution 0.5M de Nacl et d'autres dans de l'eau distillée pendant trois ans. Ils ont trouvé que la valeur du potentiel atteint -550 mV durant une année et elle se stabilise pendant les deux années qui suivent.

Si on se réfère aux limites proposées par la norme ASTM C876, la corrosion dans notre cas est initiée selon les points de mesures entre 15 jours et 1 mois.

La position du point de mesure ne semble pas avoir un grand effet sur le résultat obtenu. En effet les trois résultats sont très rapprochés cela est très clair sur la figure suivante vu la petite distance entre les points de mesure. Dans notre cas Cette méthode nous donne une valeur moyenne vu la petite longueur de l'éprouvette par rapport à son application sur les structures en béton armé telle que les tabliers de ponts.

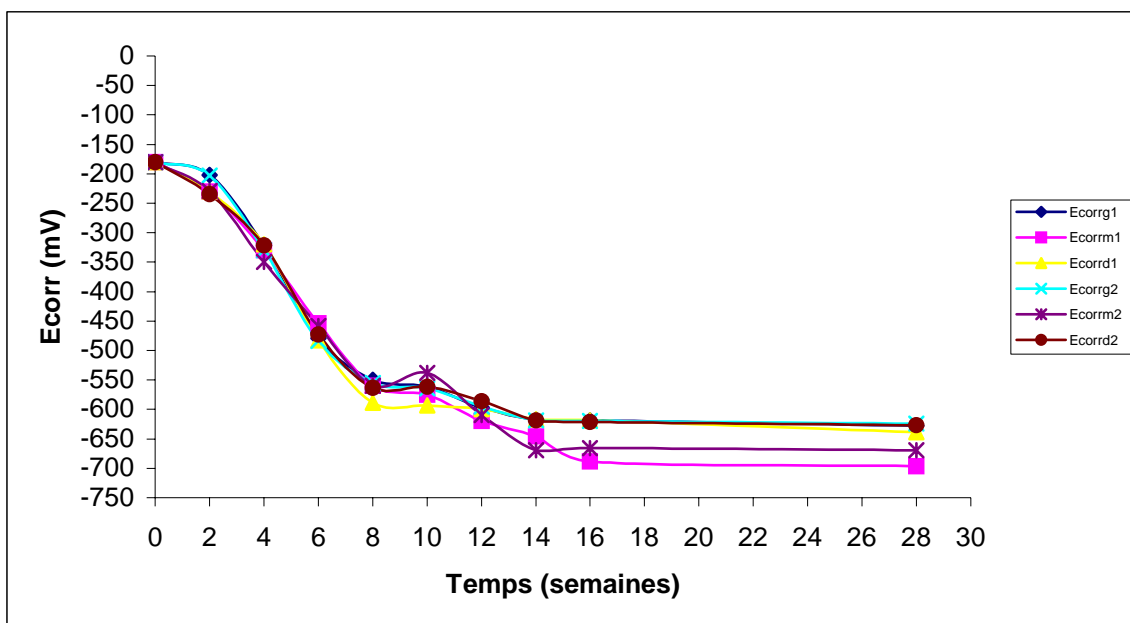


Figure III.20: Evolution des valeurs de potentiel de corrosion Ecorr

Même pour les deux barres les valeurs des potentiels sont proches, puisqu'elles sont de même nature et dans les mêmes conditions de conservation donc elles subissent les mêmes chutes de potentiel.

Nos résultats montrent que les valeurs du potentiel deviennent plus négatives :

Selon la littérature, le potentiel dépend de :

*** Le milieu électrolyte [3]**

Le milieu électrolyte a une grande influence sur le potentiel pris par le métal. A titre d'exemple le fer atteint les potentiels suivants dans les milieux indiqués ci-dessous :

Milieu	potentiel
NaCl 3%	-0.6 à -0.7V
H ₂ SO ₄ 0.1N	-0.45V
KCl 0.1N	-0.34 à 0.42V
NaCO ₃	+0.3V

[58] a trouvé que le potentiel est très négatif pour les éprouvettes dans la solution NaCl, le potentiel est de -550 mv au bout d'une année, et il est moins négatif pour les éprouvettes dans l'eau distillée, le potentiel est de -150 mv

Par conséquent le potentiel dans le milieu NaCl 0.4M est environ 3.5 fois plus grand que celui dans de l'eau distillée. L'utilisation de la solution NaCl comme milieu de conservation favorise la corrosion.

* De plus dans le même milieu, le potentiel dépendra également de la **concentration de l'électrolyte**.

Dans notre travail la valeur du potentiel atteint -0.690V pour une solution NaCl 4N , par contre [59] ont trouvé que pour des éprouvettes dans une solution à concentration NaCl 1N, la valeur du potentiel mesuré en utilisant un voltmètre à haute impédance et une électrode de référence cuivre/sulfate de cuivre atteint -0.3v.

*** l'effet du temps**

L'évolution du potentiel en fonction du temps permet d'établir l'activité électrochimique d'armatures.

Dans [3] on trouve une présentation de plusieurs allures de la courbe potentiel – temps (figure III.21).

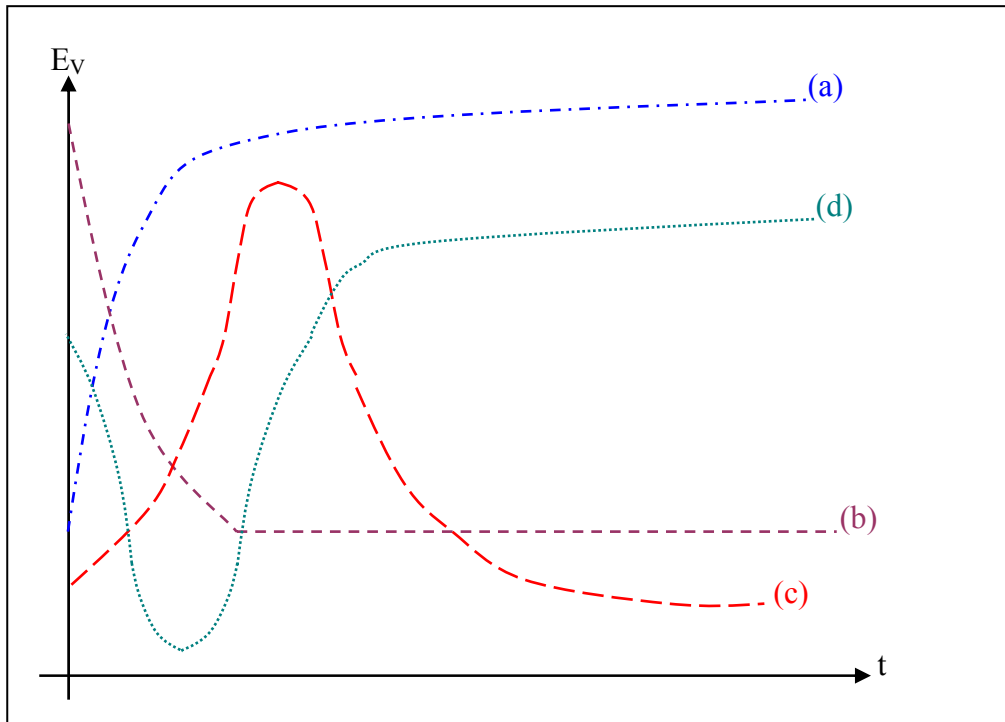


Figure III.21: Variation du potentiel au cours du temps

Courbe a : cette courbe est caractéristique d'un métal actif qui se corrode très rapidement à l'immersion mais qui se passive ensuite.

Courbe b : le potentiel du métal diminue au cours du temps. Le métal, initialement passif parce qu'il est recouvert d'une couche protectrice, devient actif après la dissolution du produit protecteur superficiel.

Courbe c : il s'agit là encore d'un métal qui a tendance à se passiver dans son milieu, mais la couche de passivation formée est instable et se détruit après un certain temps de croissance.

Courbe d : le métal d'abord attaqué se passive plus ou moins après avoir été mis à nu.

Notre cas correspond au cas **b**

Le potentiel de corrosion dépend d'autres facteurs :

*** Nature du béton**

[60] a montré que le potentiel reste stable dans le temps pour un béton à haute performance donc l'utilisation du béton ordinaire favorise la corrosion des aciers par contre l'utilisation des bétons à haute performance augmente considérablement la protection des aciers contre la corrosion.

*** Le rapport E/C**

Le rapport E/C influence sur le potentiel de corrosion, [61] ont pris un béton ordinaire pour les valeurs différentes de E/C : 0.7, 0.5, 0.46, dans un milieu marin. Ils ont mesuré le potentiel, après

une période de 6 mois la valeur du potentiel pour $E/C = 0.7$ est 3 fois plus grand que celui de $E/C = 0.5$ et 0.46 .

La valeur du potentiel est de -350 mv à 22 mois pour $E/C = 0.5$ et il atteint cette valeur au bout de 9 mois pour $E/C = 0.7$ et il est toujours inférieur à -350 mv pour $E/C = 0.46$

La valeur du potentiel augmente avec l'augmentation du rapport E/C .

Même la qualité des armatures et leurs conditions de stockage influe sur leur comportement électrochimique.

Les travaux du programme européen " Marine Science and Technology" MAST [62] , réalisés en collaboration avec des laboratoires ouverts sur différentes mers, ont en effet clairement démontré que l'élévation du potentiel de corrosion est indépendante de la situation géographique, de la saison, de la composition et de la microstructure de l'alliage. Le potentiel atteint est de l'ordre de $0,3$ à $0,4$ V après 30 jours d'immersion.

Cette étude confirme les observations de [63] qui ont été les premiers à relier l'élévation du potentiel de corrosion et établissement d'un biofilm.. Il a été constaté que le temps précédant l'augmentation du potentiel (temps d'incubation) et la vitesse d'augmentation de celui-ci sont influencés par la vitesse de circulation de l'eau, la saison, la température...

Selon les résultats comparatifs du programme MAST, le temps d'incubation varie de 1 à 15 jours suivant le site d'exposition, ce qui semble s'expliquer par les différences de température, de salinité, de matières organiques des eaux tests. Il a été montré que la température du milieu est un paramètre important : au-delà de certaines températures (33°C ou 40°C), l'augmentation du potentiel de corrosion ne se produit pas, probablement parce que les bactéries n'ont pas d'influence à température élevée sur la corrosion du matériau, sans pour autant que cela empêche la formation d'un biofilm. En revanche, [64] ont montré que des bactéries pouvaient stimuler la corrosion à des températures supérieures à 80°C . Dans le cas d'une eau de mer dont la température est proche de zéro, [65] ont constaté que l'augmentation du potentiel de corrosion est très modérée puisqu'il ne s'élève jamais au dessus de 100 mV/ECS, quelle que soit la nuance de l'alliage. La température de l'eau a une influence sur la concentration en oxygène dissous : en effet, plus elle est élevée et plus la teneur en O_2 est faible, ce qui peut avoir des répercussions sur le pouvoir oxydant du milieu et par conséquent sur l'évolution de la couche d'oxydes des aciers.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présente une contribution à l'étude de la corrosion des aciers dans le béton armé en présence de chlorures.

Nous avons accès notre travail sur la recherche bibliographique afin de mettre en évidence le phénomène de la corrosion ainsi que les méthodes de mesure. Nous l'avons suivi par une étude expérimentale permettant l'évaluation de la corrosion.

Nous avons présenté dans cette recherche bibliographique, en premier lieu le phénomène de la corrosion des aciers dans le béton armé par sa définition, ses formes, le processus électrochimique d'évaluation et les facteurs qui l'influence. Nous avons également analysé la corrosion dans les armatures avec ses conséquences sur la performance des structures et son effet sur l'adhérence acier- béton. Nous nous sommes aussi intéressée aux produits de corrosion, leurs méthodes de caractérisation et les méthodes de protection.

Dans la deuxième partie de la recherche bibliographique nous avons présenté les méthodes de mesure de la corrosion des armatures pour lesquelles nous avons détaillé les définitions, le domaine d'application, les avantages et les limitations.

Notre étude expérimentale a consisté à mesurer la corrosion sur des éprouvettes entaillées et immergées dans de l'eau salée à 4N- N correspond au taux de salinité de la méditerranée- par la technique de la radioscopie et la mesure du potentiel d'électrode.

Nous avons pu observer une diminution de diamètre de la barre d'acier, avec un taux de corrosion de 8.5 % et 9.5 % respectivement à 4 et 7 mois. Par contre par la méthode de mesure du potentiel d'électrode nous avons trouvé que la corrosion est initiée avant 1 mois et le potentiel de corrosion évolue au cours du temps et on constate après 8 semaine une stabilisation des valeurs du potentiel de corrosion. Ce dernier atteint la valeur -690mv mesuré par un millivoltmètre à haute impédance et une électrode de référence Cuivre/sulfate de cuivre à 4 mois, selon la norme ASTM C876 cette mesure indique une forte corrosion.

Nous avons même présenté les paramètres qui influent sur le potentiel de corrosion notons : le milieu électrolyte et sa concentration, le temps, ainsi que la nature du béton et le rapport E/C.

En comparant les deux résultats nous pouvons dire que pendant que la méthode de mesure du potentiel indique l'amorce de la cor

rosion, celle de la radioscopie met en évidence et de façon nette la diminution du diamètre corrodé, ainsi donc les deux méthodes sont complémentaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Shamsad Ahmed** : « Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction ». Cement and Concrete Composite 2003, N° 25.
- [2] **Mickel Dekoster, François Bodin** : « Aide à l'évolution de la durée de service des structures en béton armé corrodé ». XXI Rencotres Universitaires de Génie Civil, Pôle Sciences et Technologie - Bâtiment d'Orbigny - Université La Rochelle 2003.
- [3] **C.Basalo**: « Les canalisations d'eau et de gaz, corrosion, dégradation et protection ». Travaux de commission Française. Technique et documentation -Lavoisier- 1993.
- [4] **Youping Lieu** : «Modelling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures». Review of corrosion of steel in concrete n°2, October 1996 . <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-44541620119653540/unrestricted/etd.pdf>
- [5] Electrochemical techniques to detect corrosion in concrete structures in nuclear installations. <http://www.nea.fr/html/nsd/docs/2002/csni-r2002-7.pdf>
- [6] **A Raharinaivo, G Arligrine** : « La corrosion et la protection des aciers dans le béton ». Collection du laboratoire central des ponts et chaussées, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées (LCPC) 1998.
- [7] **Palle Tuoft-Christebesen** : «What happens with reinforced concret structures when the reinforcement corrodes ? yamaguchi, japan, 2001
- [8] « La corrosion des métaux dans la construction », Collège international des sciences de la construction ». Edition 1976.
- [9] **C.Girard** : « **La carbonatation du béton armé** ». <http://st-div.web.cern.ch/st-div/workshop/ST98WS/technology/CGIRARD.pdf>
- [10] **P Casto, O.T De Rincon** : « Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to topical marine environments ». Cement and Concrete Research CCR 2001, N° 23.
- [11] **M.D.A Thomas, J.D Mattems** : « Performance of pfa concrete in a marine environment- 10 year results ». Cement and Concrete Composite 2003.
- [12] **Nurnberger, Willibald** : « Corrosion of stainless steel reinforcement in cracked concrete », Otto-graf-journal vol 10 1999, N° 25.

- [13] **J Kissel, A Pourbaix** : « Les effets combinés de l'alcalinité et de la teneur en chlorure des bétons sur la corrosion de l'acier». Centre Belge d'étude de la corrosion, Rapports techniques vol 165,1996.
- [14] **A Talah** : « Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu chlorhydrique». Thèse de magister, USTHB 2005.
- [15] **J.F.Bosich** : « Prévention de la corrosion ». 2^{ème} Edition mise à jour. Technique et documentation. Entreprise Moderne d'Édition Paris 1977.
- [16] **S.M Trépanier, B.B Hope** : « Corrosion inhibitors in concrete , Effect on time to chloride induced corrosion initiation and subsequent corrosion rates of steel in mortar». CCR2001.
- [17] **Jaegerman C** : « Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to mediterranean sea climate». (CCR) 1990.
- [18] **Lewis RK** : « Carbonatation of concrete and its prediction». CCR 1987.
- [19] **Kobayshi K, Suttoh K** : « Oxygen diffusivity of various cementitious materials». CCR 1991, N° 21.
- [20] **Goto S, Roy DM** : « The effect of w/c ration and curing temperature and the permeability of hardened cement paste». CCR 1991, 575.
- [21] **Al-Saadam SS, Rasheeduzzafat** : « Mix disign consideration for durable concrete in the Arabian Gulf environment». Cement Concrete Composite 1992, N° 17.
- [22] **R Ffrançois, A Castel** : « Prédiction de la durée de vie du béton armé». <http://gc1.insa-tlse/insage/perso/raoul/gr2-2001.html>.
- [23] **G Grimaldi, A Raharinaivo** : « Vers une strategie de réparation du béton armé dégradé». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 1999.
- [24] **M Dekoster** : « Appoche expérimental et par éléments finis du comportement en flexion des structures en béton armé corrodé». XXI Rencontres Universitaires de Génie Civil, Pôle Sciences et Technologie - Bâtiment d'Orbigny -Université La Rochelle, 2003.
- [25] **Palle Thoft-Christensen:stochastic** : «Modelling of the diffusion coefficient for concrete». IFIP Working Conference, Osaka, Japan, March 2002
<http://www.civil.auc.dk/i6/publ/japan2002.pdf>
- [26] **S.Laradj** : «corrosion acide d'un acier au carbone ; efficacité inhibitrice du benzotriazole». Mémoire de magister, Université de Blida, 2002
- [27] Microscopie électronique à balayage et expertise .
<http://www.casimir.org/pdf/58buzon.pdf>

- [28] Caractérisation structurale : diffraction des rayons X et spectrométrie d'absorption infrarouge. <http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/10/81/tel-00001081-00/tel-00001081.pdf>
- [29] **D.Vezina** : «Etat de la recherche sur la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton». Bulletin d'information technique, LCPC vol .3, n°11, novembre 1998.
- [30] **A.Hanani ,A.Merati** : «Réhabilitation du béton par la technique de protection cathodique». CETEDUB 1, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Mai 2004.
- [31] **J.V ittonato** : «Différence entre protection par anodes sacrificielles et par courant imposé». http://www.korozja.pl/3_02_02.pdf
- [32] **D.Vezina** : «Protection cathodique par courant imposé ». Bulletin d'information technique, LCPC vol .8, n°2, février 2003.
- [33] **D.Vezina** : «Performance des inhibiteurs de corrosion». Bulletin d'information technique, LCPC vol .2, n°71, juillet 1997.
- [34] **Y.Maltais, M.Gendreau** : «Influence des ajouts cimentaires sur la pénétration des chlorures dans les ouvrages en béton armé». <http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/m>
- [35] **J.F Lataste**: « Evaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivité électrique». Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 13 décembre 2002
- [36] **Shiprakash Iyer** : «Ultrasonic imaging- A novel way to investigate corrosion status in post-tensioned concrete members». J.Indian Inst.Sci- décembre 2002, 197-217.
- [37] **J.P Balaysac** : « Le control non destructif appliqué aux ouvrages en béton». Colloque le pont Toulouse 17 à 18 octobre 2001.
- [38] **M.G.Ali, A.R.Maddocks** : «Evaluation of corrosion of prestressing steel in concrete using non-destructive technique»
[http://www.ghd.com.au/aptrixpublishing.nsf/AttachmentsByTitle/PP+EvaluationofCorrosion+PDF/\\$FILE/NDTPaper+for+CIA.pdf](http://www.ghd.com.au/aptrixpublishing.nsf/AttachmentsByTitle/PP+EvaluationofCorrosion+PDF/$FILE/NDTPaper+for+CIA.pdf)
- [39]**Boyd D.Howard** : «Corrosion detection devices»
<http://sti.srs.gov/fulltext/ms2003881/ms2003881.pdf>
- [40] **Laetita Perez** : « Développement, étude de performances et intégration de sonde thermique» .Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métier (centre de Bordeaux), 18 décembre 2003
- [41] Thermographie infrarouge pour la maintenance prédictive.
<http://www.flirthermography.com/images/PDF-FR/Newsletter%203%20FR.pdf>

- [42] **Naar, Jean-François Lataste** : « Contribution à l'évolution de l'état de santé d'un ouvrage par technique non destructive : thermographie infrarouge ». XXI Rencontres Universitaires de Génie Civil Pôle Sciences et Technologie - Bâtiment d'Orbigny -Université La Rochelle 2003.
- [43] **Ermano Grinzato** : « Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modelling ». Revue général thermique, volume 37, issue 08, septembre 1998, pp 669-679.
- [44] **F.Bellenger** : « Rôle des microstructures dans la corrosion d'alliages d'aluminium ». Matériaux 2002 , pp 1-4
http://www.ademe.fr/recherche/manifestations/materiaux_2002/Site/file/pdf/CM05023.PDF
- [45] **M Pourbaix** : « Analyse des problèmes posés par la corrosion localisée, Etude de leur impact industriel et propositions d'action ». Centre Belge d'étude de la corrosion, Rapports techniques vol 152 1986.
- [46] **M.Lemistre** : « Détection de la corrosion et des critiques dans les structures aéronautiques par imagnéto-optique ». <http://www.elec.unice.fr/pages/rtp26/AS-58/ASCND-Onera1.pdf>
- [47] **J Balayssac, S Laurens** : « Utilisation du radar pour la détection des zones à risques de corrosion dans le béton armé ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 2002.
- [48] **J.Rhazi, G.Ballivy** : « Auscultation des dalles de structures par radar ». Innovation transport, juin 2001, n°16 .
<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/ministere/recherche/innovation/innovation10.pdf>
- [49] **A Baddaoui** : « Corrosion des aciers dans le béton armé ». Mémoire de magister USTHB 2003.
- [50] **F.Kharchi, A.Baddaoui** « Reinforced concrete in arid and aggressive conditions ». CANMET/ACI International conference Thessaloniki-Grèce 1,7 Juin 2003.
- [51] **François, R., Arliguie, A.** « Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete ». Materials and Structures, 51, n°2, pp 143-150.
- [52] **Georges Dreux, Jean Festa** : « Nouveau guide du béton et ses constituants ». Edition Eyrolles, Paris 1995.
- [53] **R Dupain, R Lanchon** : « Granulats, sols, cements et bétons, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » .
- [54] **SK Kanshik, S Islam** : « Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to a marine environment ». Cement Concrete Composite 1995, N° 17.
- [55] **Meziane Al-Hadj** : « performance du ciment à base de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf ». Mémoire de magister, Université de Blida .Octobre 2002.
- [56] **F.Gorisse** : « Essai et contrôle des béton ». Edition Eyrolles. Paris 1995.

- [57] Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel Concrete (C 876) .1987
- [58] **L.Dhouibi,E.Triki,A.Raharinaivo** : « The application of électrochimical impedance spectroscopy to determine the long-trm effectiveness of corrosion inhibitors for steel in concrete». CCC2001, N° 09
- [59] **W.Moris,M.Vazquez** : « Amigrating corrosion inhibitor evaluated in concrete containing various contents of admixed chlorides ».CCR2002 ,N° 32,(p259-267)
- [60] **D.Vézina,André F.Bossé** : « Durabilité des bétons à hautes performances (BHP) ».Bulletin d'information technique Vol 1 n°3 Novemre 1995.
- [61] **MA.Pech- Caml, P.Castro** : « Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to topical marine atmosphere».CCR2002 ,N° 32, (p491-498)
- [62] **Nathalie LE BOZEC** : «Réaction de réduction de l'oxygène sur les aciers inoxydables en eau de mer naturelle. Influence du biofilm sur les processus de corrosion». Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, janvier 2000
- [63] **Mollica A.; Trevis A.** « The 4th International Congress on Marine Corrosion and Fouling». Juans-les-Pins, Antibes, France, 1976, pp 351.
- [64] **Little B.; Walch M.; Wagner P.; Gerchakov S.M.** : « 6th Int. Congr. on Marine Corrosion and Fouling» Athène, Grèce, 1984; Vol. Marine Biology, pp 511.
- [65] **Alabiso G.; Scotto V.; Mollica A.; Montini U.; Marcenaro G:** «Corrosion of Stainless Steel - Mechanisms and Experiences».EFC, Ed.: Trondheim, Norvège, 1995.