

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

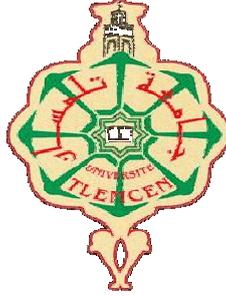
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلكايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

De MASTER en GENIE CIVIL

Spécialité : Structures

Présenté par:

MERABET Sihem

ABDELDJELIL Rahima

**Application de l'émission acoustique dans le contrôle
de la corrosion dans le béton :
Avantages et inconvénients**

Soutenu le 03 Juillet 2021, devant le jury composé de :

MrS.MA..BOUKLI
HACENE

Professeur

Univ.. Tlemcen

Président

Mr B. TOUIL

MCB

Univ. Saida

Examineur

M^{me}L. SAIL

Professeur

Univ. Tlemcen

Encadrante

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu** tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier Professeur **SAIL LATIFA**, pour son encadrement, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.*

Nous expédions nos remerciements aigües à tout le cadre professoral et administratif de la faculté de Technologie, département de Génie Civil pour leurs soutiens et leurs savoirs et patience durant toutes ses années de notre formation.

*Nous tenons aussi a remercié tous les membres du jury Professeur **BOUKLI HACENE Sidi Mohammed el Amine** et Dr **TOUIL Brahim** qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner notre travail.*

Enfin nous adressons nos vifs remerciements à nos familles et à toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

Dédicaces

Je remercie tout d'abord **DIEU**, le tout puissant, pour tous ses
Biens, la faveur de création du néant vers l'existence.

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce travail a ceux qui, quels que
Soient les termes embrassés, je n'arrivais jamais à leurs exprimer mon amour sincère.

- A la femme qui a souffre sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse ; mon adorable mère YAHYAOUI Fatima.
 - A l'homme de ma vie, mon précieux offre du dieu; mon chère père ABDELDJELIL Ahmed.
- A ma chère sœur ABDELDJELIL Meriem et ces anges Rayan et Riheb, mes frères ABDELDJELIL Amine et Radwane, mon époux BOUIZEM El Habib,
Sans oublier mon prince BOUIZEM MED AMINE.
- A mon binôme MERABET Sihem pour l'encouragement et pour l'ambiance tout le long cursus universitaire et sa famille MERABET.

RAHIMA.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon père, en signe de reconnaissance et d'amour que je te porte pour tous tes soutiens et tes sacrifices dont ils font part de mon égard,

A ma mère m'a raison d'être, pour te remercier pour tes sentiments pour ton amour et pour l'affection dont tu m'as toujours entouré,

A mon mari pour ton grand soutien, ton indulgence qui ont élucidé mon chemin, aucun mot ne pourra décrire vos abnégations et acharnement pour vos soutiens durant toutes mes études,

A ma chère binôme RAHIMA, d'avoir été une travailleuse dont tu m'as donné tous le courage et l'assurance tous ces mois,

A toute ma famille, tous mes proches,

Je vous remercie.

SIHEM.

Résumé

Evaluer l'état de la corrosion, est un moyen de protection et de préservation de la résistance et durabilité des structures en béton armé, car la détection précoce de la maladie sert à éviter les dommages avec le moins de pertes matérielles possibles.

Dans ce travail de recherche; on a présenté des généralités sur la corrosion, des causes, des conséquences ainsi que les méthodes de protection des structures contre ce phénomène soit par des méthodes préventives ou réparatives.

Nous avons aussi mentionné les différentes techniques d'évaluation de la corrosion dans les structures, on s'est intéressé aux moyens de détection de la corrosion et plus précisément, l'application de la technique de l'émission acoustique dans les structures en béton armé dans le cadre du contrôle de l'évolution de la corrosion avec ses avantages et inconvénients.

Mots clés : Avantages et inconvénients, Corrosion, Emission acoustique Méthodes non destructives.

Abstract

Assessing the state of corrosion is a means of protecting and preserving the strength and durability of reinforced concrete structures, since early detection of the disease serves to prevent damage with the least possible material loss.

In this research; we presented generalities on corrosion, its causes and consequences, as well as the methods of protecting structures against this phenomenon, either by preventive or repair methods.

We also mentioned the different techniques for evaluating corrosion in buildings; we were interested in the means of detecting corrosion and more precisely, the application of the technique of acoustic emission in reinforced concrete structures within the framework of the control of the evolution of corrosion with its advantages and disadvantages.

Keywords: Acoustic emission, Advantages and disadvantages, Corrosion, Non-destructive methods

ملخص

تقييم حالة التآكل هو وسيلة لحماية والحفاظ على قوة ومتانة الهياكل الخرسانية المسلحة، حيث يعمل الاكتشاف المبكر على منع الضرر بأقل قدر ممكن من الخسائر المادية .

في هذا العمل البحثي؛ قدمنا عموميات حول التآكل وأسبابه ونتائجه، وكذلك طرق حماية الهياكل من هذه الظاهرة، سواء من خلال الطرق الوقائية أو الإصلاحية.

كما ذكرنا التقنيات المختلفة لتقييم التآكل في الهياكل، حيث ركزنا على وسائل الكشف عن التآكل وبشكل أدق تطبيق تقنية الانبعاث الصوتي في الهياكل الخرسانية المسلحة في إطار التحكم في تطور التآكل مع ذكر المزايا و العيوب.

الكلمات المفتاحية: التآكل ، الانبعاث الصوتي ، الطرق غير المدمرة، المزايا و العيوب .

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure I.1 : Etat d'ouvrages dégradés par la corrosion des armatures	5
Figure I.2 : Répartition des pathologies affectant les ouvrages en béton armé.....	6
Figure I.3 : Etat d'une armature en acier dans un béton poreux.....	7
Figure I.4 : Epaufrures de béton d'enrobage: armature apparentes.....	9
Figure I.5 : Ouvrages en béton armé affectés par la corrosion.....	10
Figure I.6 : Apparition de fissures sur le parement extérieur.....	10
Figure I.7 : Organigramme de la corrosion	11
Figure I.8 : Traitement des armatures contre la corrosion.....	12
Figure I.9 : Revêtement anticorrosion pour béton	13
Figure I.10 : Procédé de galvanisation	14
Figure I.11 : revêtements par dépôt électrolytique.....	14
Figure I.12 : Caractéristiques d'un inhibiteur de corrosion	17
Figure I.13 : Mécanisme d'action électrochimique	19
Figure I.14 : Application de l'inhibiteur migrateur	21

Chapitre 2

Figure II.1 : Organigramme des méthodes de mesure non destructives.....	26
Figure II.2 : Mesure de potentiel à l'aide d'une roue d'électrodes.....	27
Figure II.3 : Mesure du potentiel demi-cellule	28
Figure II.4 : Appareille de mesure par impulsions galvanostatique.....	29
Figure II.5 : Schéma des mesures ultrasoniques	30
Figure II.6 : Radar à pénétration de sol (GPR)	32
Figure II.7 : Image 3D du GPR d'une dalle de béton	32
Figure II.8 : Caméra infrarouge	33

Figure II.9: Méthodes à ondes élastiques: (a) la vitesse d'impulsion ultrasonore; (b) écho d'impact; et (c) émission acoustique	35
Figure II.10 : Contrôle de qualité des soudures par l'émission acoustique.....	36
Figure II.11 : Organigramme décrivant les mesures gravimétriques.....	37
Figure II.12 : Modèle d'un système de mesure électrochimique.....	42
 Chapitre 3	
Figure III.1 : Schéma d'un système de contrôle par émission acoustique (EA) in situ d'un équipement industriel.....	51
Figure III.2 : Exemple de salve d'émission acoustique (observée lors du dépôt de carbone sur un guide d'onde en alumine à 650 °C).....	53
Figure III. 3 : Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites.....	55
Figure III. 4 : Schéma explicatif de la rupture d'une mine de crayon à la surface d'un échantillon	56
Figure III.5: Sources d'EA dues aux mécanismes de corrosion	57
Figure III.6 : Courbes de dispersion des vitesses de phase dans un tube d'acier de section cylindrique immergé dans l'eau	58
Figure III.7 : Modes de propagation des ondes guidées dans une poutre de section rectangulaire (3x3,7 mm). (a) mode de flexion F1,1. (b) mode longitudinal L0,1. (c) mode de torsion T0,1	59
Figure III.8 : Descripteurs couramment utilisés en EA. (a) Descripteurs temporels. (b) Descripteurs fréquentiels.....	60
Figure III.9: (a) l'ensemble du dispositif expérimental ; (b) les échantillons soumis à l'essai de corrosion; (c) Système de test SAMOS-48 EA, intégré au système d'acquisition et d'analyse des données.....	63
Figure III.10: Principe de l'analyseur d'EA (a) Schéma de principe (b) Forme d'onde EA typique avec divers paramètres de signal (c) Différents modes de défaillance (d) Analyseur d'EA type DS5-16	64

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Composition du milieu synthétique du béton	39
Tableau 2 : Avantages et inconvénients de la méthode gravimétrique	41
Tableau 3 : Avantages et inconvénients de la technique de l'EA.....	66

Liste des abréviations

Abréviations	Désignations
PCCI	Protection cathodique par courant imposé
ISO	International Organization for standardization
NACE	National association of corrosion Engineers
ECN	Bruit Electro Chimique
RMS	Moyenne Quadratique
GPR	Radar a pénétration de sol
IRT	La thermographie infrarouge
EA	Emission acoustique
WE	Electrode de travail
CE	Contre-Electrode
RE	Electrode de référence
OCP	Office chérifien des phosphates

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations	x
Introduction générale	1
Chapitre I : Notions sur le phénomène de corrosion	4
1. Introduction :.....	5
2. Définition de la corrosion des armatures :.....	6
3. Les facettes de la corrosion des armatures :.....	6
3.1. Dans le cas de la carbonatation :	7
3.2. Dans le cas des chlorures :.....	9
4. La corrosion des armatures dans le béton et ses conséquences :.....	10
5. Procédés pour éviter ou stopper la corrosion des armatures dans le béton:	12
5.1. Le système préventif :	12
5.1.1. Les revêtements courants :	12
5.1.2. Les revêtements Chimiques :.....	13
5.1.3. La Protection Cathodique :.....	15
5.1.4. Les Inhibiteurs de corrosion :.....	16
5.2. Le système réparateur :.....	22
6. Conclusion :	22
Chapitre II : Procédés d'estimation de la corrosion des armatures	24
1. Introduction :.....	25
2. Contrôle de la corrosion des armatures dans les structures en béton armé: Mesures non destructives :.....	25
3. Mesures non destructives :	27
3.1. Méthodes électrochimiques :.....	27
3.2. Méthodes d'impulsion galvanostatique :.....	29
3.3. Bruit électrochimique :.....	30
3.4. Méthode électromagnétique :	31
3.5. Thermographie infrarouge :.....	33
3.6. Méthodes de détection optique :.....	34

3.7.	Méthodes à ondes élastiques :	34
a.	Vitesse d'impulsion ultrasonique :	34
b.	L'écho d'impact	34
c.	L'émission acoustique :	35
4.	Méthodes d'évaluation de la corrosion	36
4.1.	Les Méthodes statiques : mesure gravimétriques :	36
4.1.1.	Procédé de la méthode de perte de masse :	38
4.1.2.	Les avantages et les inconvénients de la méthode Gravimétrique :	41
4.2.	Les Méthodes électrochimiques :	42
4.2.1.	Mesure du potentiel de corrosion :	43
4.2.2.	Mesure du potentiel à circuit ouvert :	43
4.2.3.	Méthodes stationnaires: (courbes de polarisation linéaire)	44
4.2.4.	Méthodes transitoires: La spectroscopie d'impédance électrochimique	44
5.	Conclusion :	45
Chapitre III : Application de l'émission acoustique pour la détection de la corrosion		46
1.	Définition :	47
2.	Historique :	48
3.	Facteurs favorisant la propagation des signaux :	49
3.1.	Facteurs favorisant les signaux de grande Amplitude :	49
3.2.	Facteurs favorisant les signaux à faible Amplitude :	49
4.	Types de signaux de l'émission acoustique :	52
4.1.	L'émission continue :	52
4.2.	L'émission discontinue :	52
5.	Paramètres de l'émission acoustique :	53
6.	Source d'émission acoustique :	54
6.1.	Source d'origine mécanique :	54
6.2.	Sources artificielles :	55
6.3.	Sources dues à la corrosion :	57
7.	Propagation de l'émission acoustique :	58
7.1.	Propagation dans une poutre :	58
7.2.	Approche phénoménologique de l'émission acoustique :	60
7.3.	Conception du guide d'onde :	61
8.	Application de l'émission acoustique dans le béton armé : suivi de la corrosion	62
9.	Analyse des signaux acoustiques :	65

10. Avantages et inconvénients de la technique d'émission acoustique :	66
11. Conclusion :	67
Conclusion générale	68
Références Bibliographiques	71

Introduction générale

Le béton armé est l'un des piliers les plus importants sur lesquels reposent la science du génie civil, et pour la résistance des structures en béton armé, elle doit être bien étudiée afin d'éviter les risques d'endommagements de ces structures.

L'un des plus importants dangers qui menace les ouvrages en béton armé, le problème de la corrosion des armatures, présente la source de dégradation du béton et donc la détérioration de ces structures.

En effet, dans la plupart des pays industrialisés, le coût total de la corrosion est estimé entre 2 et 4% du P.N.B (Produit Nationale Brut), mais sur le coût total présente environ 20 à 25% des pertes qui peuvent être économisés par une meilleure connaissance des causes de la corrosion et une meilleure application des techniques de protection [1].

Le béton assure la circonférence complète des armatures (armatures dans un milieu alcalin), le protégeant ainsi de la corrosion, mais dans plusieurs cas, la caractéristique de pH élevé change en raison d'enrobage insuffisant, alors soit la pénétration des chlorures, soit le contact entre le CO₂ atmosphérique avec les armatures qui vont causer une diminution de la résistance des ouvrages.

Ce qui induit généralement des endommagements nécessitant des traitements qui seront soit par des méthodes préventives avant l'attaque de la corrosion, soit des méthodes de réparation après l'évaluation de cette corrosion dans la structure.

Les méthodes de détection de la corrosion sont nécessaires pour évaluer l'état des structures en service et agir à temps avant le déclenchement de la corrosion; ces mesures non destructives seront discutées dans ce mémoire.

Dans cette partie, on va citer plusieurs techniques d'évaluation de la corrosion par l'auscultation directes des structures; parmi ces techniques on va aborder en détail la méthode de l'émission acoustique.

L'émission acoustique (EA) est considérée comme une bonne alternative complémentaire à la vitesse d'impulsion ultrasonique et écho d'impact. Cette pratique va être traitée dans ce projet de recherche.

Ce mémoire est scindé sur trois chapitres :

Dans le 1^{er} chapitre, nous discutons des généralités sur la corrosion des armatures, ses causes et ses conséquences ainsi que les procédés préventifs et réparatifs de lutte contre cette pathologie.

Dans le 2^{ème} chapitre, on présentera les méthodes d'évaluation de la corrosion (les méthodes statiques et les mesures transitoires) ainsi qu'aux techniques non destructives de détection de la corrosion.

Le 3^{ème} chapitre sera consacré à la technique de l'émission acoustique, ses applications dans le domaine de détection de la corrosion en abordant des travaux de la littérature.

Notre travail sera clôturé par une conclusion générale avec des perspectives d'étude.

Chapitre I :
***Notions sur le phénomène
de corrosion***

Introduction :

Malgré l'évolution des connaissances d'urbanisme et des techniques de construction, le béton résiste très bien à la compression, mais il résiste mal à la traction. C'est pour lui faire acquérir cette résistance spécifique que l'idée vient de lui ajouter des barres d'acier. Le béton armé conjugue ainsi la résistance à la compression du béton et à la traction de l'acier.

Extrêmement répandu, le béton armé offre plusieurs avantages, et devient le matériau le plus utilisé dans le monde. Bien que ce matériau souffre de plusieurs pathologies dont la plus sévère et couteuse qui est la corrosion de ses armatures. On estime en effet à 70% les pathologies du béton liées à cette problématique.

La durabilité des ouvrages en béton passe donc par la maîtrise de la corrosion.



[1]

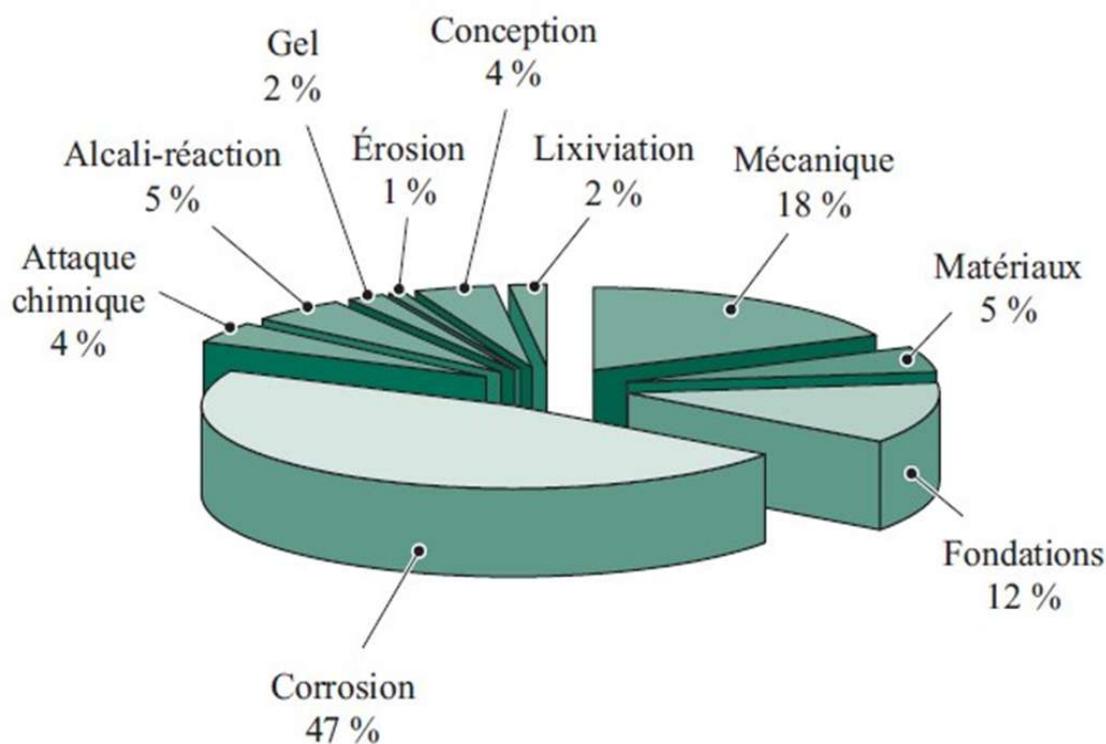
[2]

Figure I.1 : Etat d'ouvrages dégradés par la corrosion des armatures

Figure I.1 illustre un exemple de structures en béton armé dégradées par la corrosion des armatures, d'où on constate l'éclatement de l'enrobage du béton et chute de blocs du béton qui jouent négativement sur la capacité portante de l'ouvrage, on constate en outre des armatures apparentes sur les piles de pont sujettes aux agressions climatiques.

La réfection des structures en béton armé nécessite un budget énorme qui dépasse dans certaines conditions le cout d'une structure neuve.

Figure I.2, représente une répartition des différentes pathologies affectant les structures en béton armé dont la corrosion des armatures représente le grand pourcentage qui est de 47%.



[3]

Figure I.2: Répartition des pathologies affectant les ouvrages en béton armé

2. Définition de la corrosion des armatures :

La corrosion des armatures est un paramètre fondamental de la durabilité des bétons dans les ouvrages, c'est un phénomène chimique d'oxydation altérant la surface des armatures d'acier, soit à une trop grande porosité du béton, soit à un enrobage insuffisant.

3. Les facettes de la corrosion des armatures :

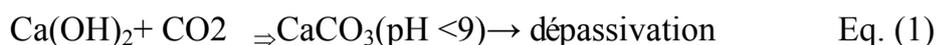
La corrosion des armatures du béton peut être initiée par deux processus qui peuvent altérer la protection normalement assurée par le béton :

- ✓ **La carbonatation du béton d'enrobage** au contact du CO₂ atmosphérique.
- ✓ **la pénétration des chlorures : du milieu environnant**

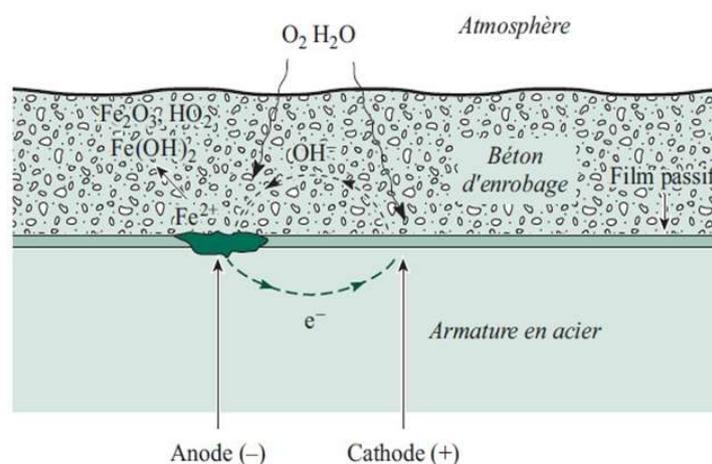
3.1 Dans le cas de la carbonatation :

Quand son front atteint les armatures, le métal est dépassivé par la diminution du pH aux environs de 9, diminution due à la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO₂ atmosphérique.

-Armature protégées dans le béton (pH ~13) → passivation



La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO₂) est un phénomène naturel qui se produit lorsque plusieurs paramètres sont réunis, à citer l'humidité relative entre 60 et 80%. Le gaz carbonique a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le Ca(OH)₂, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO₃.



[4]

Figure I.3: Etat d'une armature en acier dans un béton poreux

Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures (Fig.I.3).

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur.

Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte.

Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant.

Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. En conséquent la porosité du béton est un paramètre déterminant qui régit l'évolution du front de carbonatation.

Le béton carbonaté a un $\text{pH} < 9$

L'indicateur de phénolphtaléine est un moyen pratique de mesurer la profondeur de carbonatation

Les Balcons, éléments verticaux et terrasses : Ce sont les Eléments les plus sensibles des bâtiments suite à leur faible épaisseur et par conséquent la difficulté à maintenir des enrobages suffisants ce qui provoque des épaufrures du béton et armatures apparentes (Fig.I.4).



[5]

[6]

Figure I.4 : Epaufrures de béton d'enrobage: armature apparentes

3.2 Dans le cas des chlorures :

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). La dépassivation est initiée lorsqu'une teneur critique en chlorures arrive au niveau des armatures. Le seuil critique est généralement admis pour un rapport de concentration Cl^-/OH^- compris entre 0,6 et 1 soit une teneur en chlorures de 0,4% par rapport à la masse du ciment [7].

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion et migrer à l'intérieur du béton, traverser la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des réactions électrochimiques qui donnent la corrosion :

- par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction initiée par piqûres sur la surface de l'acier
- ensuite, généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend essentiellement des paramètres intrinsèques du béton et surtout sa porosité. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

La figure I.5 montre un des cas de structures en béton armé situées en zone côtière dégradées par le phénomène de corrosion.



Figure I.5 : Ouvrage en béton armé affecté par la corrosion [8]

4. La corrosion des armatures dans le béton et ses conséquences :

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée sur le béton d'enrobage ce qui engendre des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements localisés, formations de fissures, formations d'épaufrures, apparitions en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu des armatures) entraînant une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton. (Fig.I.5),

En règle générale, dans des milieux peu agressifs les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, homogénéité, résistance) préconisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée de service de l'ouvrage. Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et donc poreux, ou des milieux très agressifs, risquent de provoquer une dégradation de l'armature. (Fig.I.6)



Figure I.6 : Apparition de fissures sur le parement extérieur [9]

L'organigramme suivant décrit les étapes de développement de la corrosion

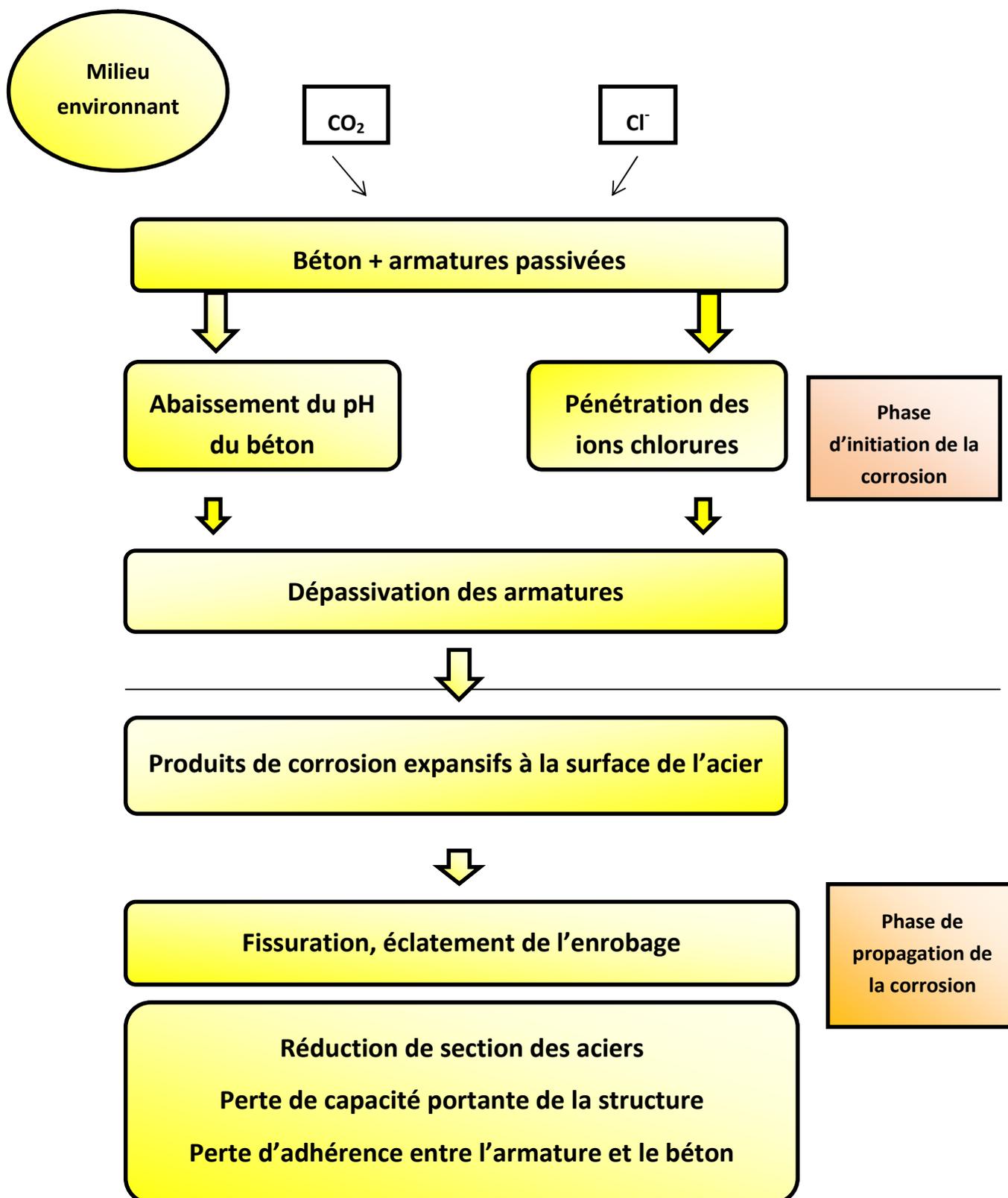


Figure I.7 : Organigramme de la corrosion

5. Procédés pour éviter ou stopper la corrosion des armatures dans le béton

Pour lutter contre la corrosion des armatures dans le béton, il y'a différents procédés qu'on peut les répartir suivant plusieurs critères :

- soit par des éléments ajoutés au béton par adjuvantation,
- ou bien par revêtement et traitement des armatures,

Leur efficacité est liée au type d'application, le temps de mis en œuvre, la nature du procédé utilisé.

5.1 Le système préventif :

Ce mode préventif consiste à créer sur la surface de l'armature à protéger une couche protectrice imperméable et inaltérable afin d'isoler le métal du milieu environnant.

Alors il faut préparer cette surface par:

- dégraissage
- décapage
- polissage.

Et pour cela on distingue les protections suivantes :

5.1.1 Les revêtements courants :

Peintures et vernis: Réalisés soit en impressions en couche primaire réalisant la base d'accrochage de la peinture soit en couche de finition qui définit ainsi la couche protectrice, elle peut être réalisée soit sur l'armature (Fig.I.8) ou bien sur le béton (Fig.I.9)



[10]

Figure I.8: Traitement des armatures contre la corrosion



[11]

Figure I.9: Revêtement anticorrosion pour béton

5.1.2 Les revêtements Chimiques :

Ils font appel à une réaction chimique pour créer à la surface de la pièce une couche protectrice imperméable et parfaitement adhérente. Cette protection réalise une excellente base pour les injections de béton, on distingue parmi les revêtements chimiques:

✓ ***La phosphatation (pour métaux ferreux) :***

Par bain antirouille : les pièces sont immergées dans un bain d'acide phosphorique + bioxyde de manganèse (durée 2h), on obtient une couche protectrice noire, verdâtre.

✓ ***Les revêtements par voie thermique (Métallisation) :***

Cette méthode consiste à réaliser un dépôt à l'aide de métaux protecteurs soit par :

- ***Etamage*** : Consiste à l'immersion des pièces dans un bain d'étain liquide à 250°C.
- ***Galvanisation*** : consiste à l'immersion des pièces dans un bain de zinc liquide à une température d'environ 450°C, on ajoute un corps réducteur pour protéger le zinc contre l'oxydation (Fig.I.10).



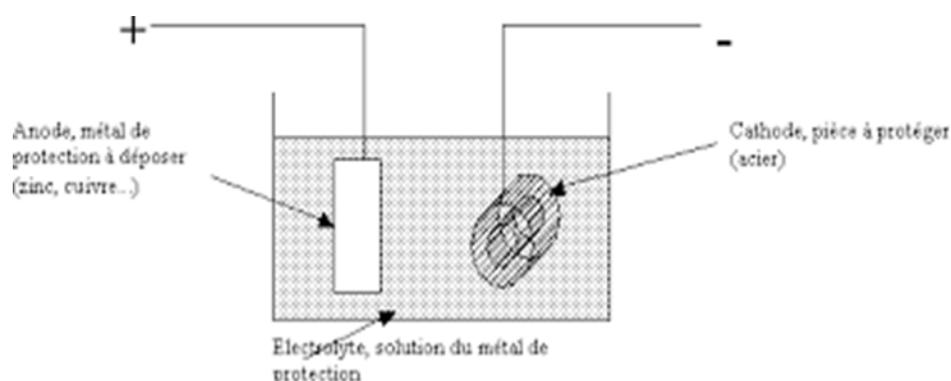
[12]

Figure I.10: Procédé de galvanisation

✓ *Les revêtements par dépôt électrolytique:*

Le métal à déposer est placé à l'anode(+), le métal à recouvrir est placé à la cathode(-), le bac contient une solution de sels du métal à déposer. Sous l'effet du passage du courant il y a un déséquilibre de l'électrolyte qui se dépose à la cathode, puis épuisé, se recharge à l'anode (Fig.10).

Ainsi, l'anode se dissout et vient recouvrir la pièce à protéger (acier) du métal protecteur (cuivre, nickel, chrome, argent, zinc, cadmium...).



[13]

Figure I.11: revêtements par dépôt électrolytique

5.1.3 La Protection Cathodique :

Afin d'éviter la destruction des pièces électrochimiquement négatives (corrosion électrochimique), on monte une pièce encore plus électrochimiquement négative de façon à dévier l'effet de pile, cette cathode se détériorera à la place des pièces à protéger.

Exemples: protection des coques et hélice de bateaux, des câbles sous-marins, des réservoirs (électrode en magnésium) [14].

Il est tout d'abord important d'effectuer des travaux préalables avant l'application de la protection cathodique. En effet, il est nécessaire d'éliminer le béton dégradé ainsi que les bétons de réparations antérieurs, car ils peuvent présenter une résistivité différente.

Il faut aussi enlever la rouille non adhérente sur les armatures ainsi que de rétablir une continuité électrique des aciers. Enfin, il est nécessaire de reconstituer l'enrobage tout en veillant à avoir une distance millimètres entre l'armature et le parement extérieur.

Les étapes de la mise en œuvre de la protection cathodique sont les suivantes :

- Forer des trous dans le parement en béton afin de mettre à nu des armatures et les connecter au réseau électrique
- Les anodes sont soit plaquées à la surface du parement soit enfouies dans le béton, il est nécessaire de les enrober avec du mortier
- Installer des capteurs afin de pouvoir suivre l'efficacité de l'installation
- Vérifier la continuité
- Mettre en service l'installation

a-Protection cathodique par courant imposé (PCCI)

Comme son nom l'indique, elle consiste à imposer un courant électrique continu à l'aide d'un générateur électrique ayant le pôle négatif relié aux armatures jouant le rôle de la cathode et le pôle positif relié à l'anode.

Les anodes de PCCI peuvent être plaquées à la surface du béton soit noyées dans le béton. [15]

b-Protection cathodique par anodes sacrificielles

Le principe consiste à utiliser un métal qui possède un potentiel inférieur à l'acier. Une fois le couplage réalisé, les électrons seront débités par l'anode vers le réseau d'armature pour assurer sa protection.

Les anodes utilisées pour ce type de protection sont appelées des anodes galvaniques ou sacrificielles. Ces anodes sont apparues au début des années 1890 pour les structures marines puis elles ont été utilisées pour la protection cathodique des structures en béton armé.

Les anodes les plus couramment utilisées sont constituées de zinc. Des raccordements métalliques permanents peuvent être assurés directement entre l'anode et l'acier, sauf si un système de suivi nécessitant la coupure du courant est installé. [16]

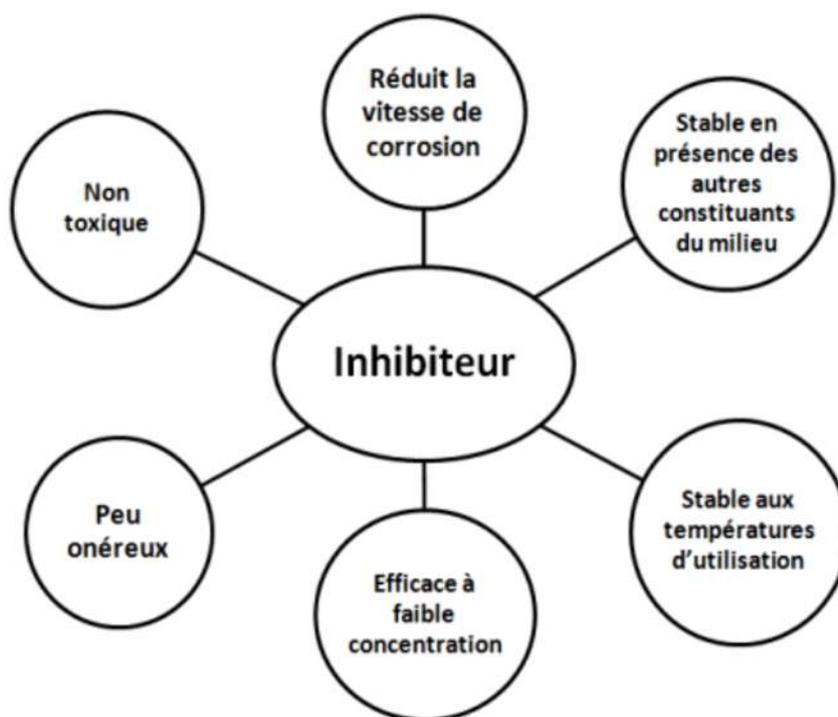
5.1.4 Les Inhibiteurs de corrosion :

C'est une nouvelle alternative qui a été initiée depuis ces dernières décennies et qui consiste à intégrer une faible concentration de produit chimique ou vert à la masse du béton frais ou par imprégnation sur paroi de béton durci.

a-Définition des inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte original contre la corrosion des métaux. Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur de corrosion est une "substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif".

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique. Celle retenue par l'association américaine "National Association of Corrosion Engineers (NACE) " est la suivante : un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration [17].



[18]

Figure I.12 : Caractéristiques d'un inhibiteur de corrosion

b-Classe des inhibiteurs de corrosion

Il existe plusieurs possibilités de classement des inhibiteurs, celles-ci se distinguent les unes des autres de diverses manières, car Il n'existe pas de critères uniques pour classer les inhibiteurs. Les classements possibles différencient les inhibiteurs selon :

- Leur nature chimique : minérale ou organique.
- Leur mode d'action : adsorption chimique ou électrostatique, formation de composés insolubles, formation d'une couche protectrice à la surface du métal.
- Leur influence sur les réactions de corrosion : inhibiteurs anodiques, inhibiteurs cathodiques ou inhibiteurs mixtes.
- Leurs méthodes d'application.

b-1La nature chimique de l'inhibiteur

1.Les inhibiteurs organiques :

L'utilisation de molécules organiques est actuellement préférée à celle d'inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement. Les inhibiteurs

organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière [19];

Ils possèdent au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel que l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre. Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont [20]:

- la radicale amine (-NH₂),
- le radical mercapto (-SH)
- le radical hydroxyle (- OH),
- le radical carboxyle (-COOH).

2. Les inhibiteurs minéraux :

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution assurant ainsi les phénomènes d'inhibition (anions ou cations).

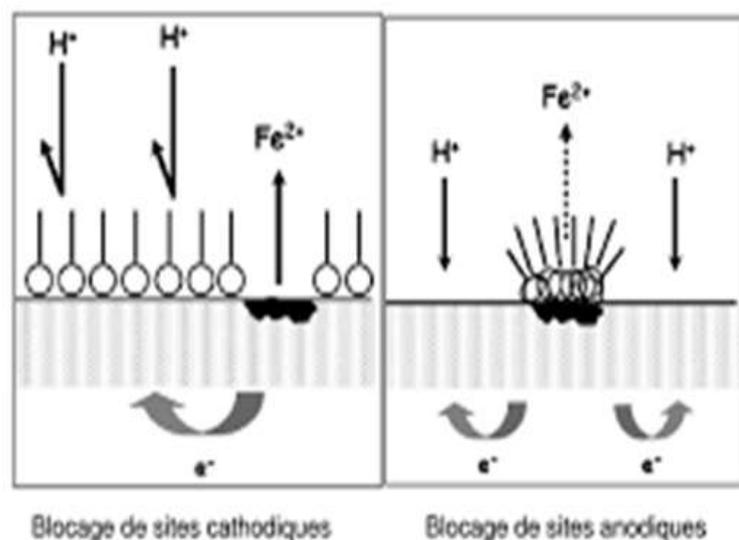
Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo anions de type X_{04n}⁻ tels les chromates, molybdates, phosphates, silicates,... Les cations sont essentiellement Ca²⁺ et Zn²⁺ et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle OH⁻.

Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement [20].

b-2 Les mécanismes d'action électrochimique

Dans la classification relative au mécanisme d'action électrochimique, on peut distinguer les inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes (regroupant alors les deux premières propriétés).

L'inhibiteur de corrosion forme une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit les sites cathodiques (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton en milieu acide), voir les deux (Fig.I.13).



[21]

Figure I.13: Mécanisme d'action électrochimique

1. Les inhibiteurs anodiques :

Ces inhibiteurs protègent le métal par passivation et formation d'un film insoluble dans les zones de surface anodiques par adsorption sur le métal comme les chromates, les nitrites, les molybdates, alkali phosphates, silicates et carbonates. Certains de ces inhibiteurs comme les nitrites, peuvent provoquer une corrosion accélérée s'ils sont utilisés en concentrations insuffisantes [22].

Ils agissent sur la dissolution de l'acier et ils réduisent le taux de la corrosion par une augmentation dans le potentiel de corrosion de l'acier. Aussi, ils ont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Si ce blocage n'est que partiel, il peut entraîner localement une augmentation de la densité de courant sur ces surfaces. Il peut en outre conduire à un processus de corrosion localisée, plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif au droit de l'acier. L'inhibiteur anodique le plus utilisé est le nitrite de calcium (Ca(NO₂)₂).

Les nitrites de Sodium, benzoate du sodium et chromate du sodium peuvent aussi être utilisés [23].

2. Les inhibiteurs cathodiques :

Ils sont généralement moins effectifs et moins dangereux que les inhibiteurs anodiques, ils agissent sur la réaction de l'oxygène sur la surface de l'acier par formation d'un film insoluble ou adsorbé sur les zones cathodiques; ils induisent une augmentation de la surtension cathodique, et réduisent donc le courant de corrosion [22].

Si ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils ne présentent pas par contre le danger de corrosion localisée. Ces inhibiteurs précipitent souvent des sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions OH⁻ sur les cathodes.

Les inhibiteurs cathodiques les plus communément utilisés sont l'hydroxyde de sodium et carbonate de sodium qui sont supposées augmenter le pH près de l'acier et réduisent le transport de l'oxygène en couvrant la surface de l'acier. Le zinc, magnésium, manganèse et Nickel sont aussi utilisés [24].

3. Les inhibiteurs mixtes :

Ils ont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques. Ils agissent sur la partie anodique et les emplacements cathodiques et réduisent le taux de corrosion sans un changement considérable du potentiel de corrosion, généralement par adsorption sur la surface de l'acier et par conséquent l'inhibiteur de corrosion forme une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit les sites cathodiques (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton en milieu acide).

Les inhibiteurs mixtes les plus utilisés sont ceux qui forment un groupe hydrophobe avec les groupes polaires tels que N, S, OH.

Le polymère organique composé tel que l'amine et aminoalcool(AMA) est aussi utilisé [25].

c- Les Types d'inhibiteurs de corrosion

Pendant ces dernières années, l'utilisation des inhibiteurs de corrosion en vue d'améliorer la performance des structures en béton a considérablement augmenté.

En effet cette méthode est de plus en plus préférée aux autres moyens de protection car elle présente un bon compromis entre efficacité et coût modéré. Les inhibiteurs de corrosion peuvent être employés soit par mesure préventive, soit par mesure curative. Les inhibiteurs de corrosion peuvent être également utilisés comme un moyen de prétraitement des armatures.

c-1 Inhibiteurs adjuvés

Ce sont des inhibiteurs qui peuvent être ajoutés au béton frais ou à l'eau de gâchage par adjuvantage « adjuvant au béton », utilisé généralement comme mortier de réparation. Parmi les inhibiteurs utilisés en tant qu'adjuvants et ajoutés lors du malaxage du béton frais (mode préventif) il y a les nitrites, les chromates, les phosphates, les amines et les esters d'acides gras.

c-2 Inhibiteurs migrateurs

Les inhibiteurs migrateurs en les appliquant à la surface du béton durci comme un traitement de consolidation et d'imperméabilisation pour protéger le béton (mode curatif). Les aminoalcools et monofluorophosphate, sont connus pour leur emploi en tant qu'inhibiteurs migrateurs. (Fig.I.14)



Figure I.14: Application de l'inhibiteur migrateur [26]

En outre, des solutions préventives complémentaires existent également pour renforcer la durabilité des structures en béton armé. :

- L'optimisation de la compacité du béton permet d'atteindre des performances élevées vis-à-vis des risques de corrosion.
- Les dispositions constructives de l'Eurocode 2 en termes d'enrobage des armatures prennent en compte l'utilisation des aciers inoxydables et permettrait non seulement une amélioration de la sécurité et de l'esthétique durable des ouvrages. [27]

5.2 Le système réparateur :

Pour réparer des structures en béton armé montrant des éclatements dus à la corrosion, il est habituel de dégager les armatures sur une épaisseur d'environ 10 cm. La surface est ensuite reconstituée par un mortier spécial ou un béton projeté.

Cette méthode est toutefois coûteuse, très intrusive, les réparations montrent le plus souvent une importante fissuration après quelques mois, suite aux tensions générées par les retraits du mortier de réparation.

Ces fissures peuvent permettre une recontamination rapide du béton par les sels de déverglaçage. En outre, la contamination des zones avoisinantes les réparations peut être suffisante pour permettre la poursuite des phénomènes de corrosion des armatures.

D'où une étude préalable et un diagnostic adapté sont nécessaires pour réussir cette phase de réparation. Bien que les moyens de prévention peuvent être appliqués après décapage des zones contaminées par les corrosions telles que les inhibiteurs de corrosion migrateurs déjà présentés

6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de la corrosion et ses principales causes.

Puisque les structures en béton armé sont au contact d'un milieu naturel : atmosphère, eaux ou sols. Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs. Mais les agents qui sont à l'origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures. Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton.

La corrosion des armatures des structures en béton est un énorme problème économique pour le monde entier.

Comparativement, la corrosion due aux chlorures est plus dangereuse que celle due à la carbonatation à cause de son développement rapide et le risque de rupture soudaine pour le cas des environnements sévères.

Chapitre II :
*Procédés d'estimation de la corrosion
des armatures*

1. Introduction :

Dans ce chapitre, on cite les méthodes d'évaluation de la corrosion qui se divisent en deux catégories : les méthodes statiques ou stables et les méthodes transitoires.

Les dites méthodes de mesure de la corrosion nous informent sur son état d'avancement et sa vitesse de progression. Cet état de fait ou cette situation nous indique la procédure à suivre afin de minimiser au mieux les dégâts, les méfaits et les conséquences provoqués par cette maladie ou encore pathologie qu'est la corrosion. On donnera une vision d'ensemble sur ces méthodes dans ce qui suit.

2. Contrôle de la corrosion des armatures dans les structures en béton armé par Mesures non destructives :

L'usure des armatures a été identifiée comme le facteur prédominant à l'origine de la dégradation prématurée à grande échelle de la construction en béton dans le monde, en particulier des structures trouvées dans l'environnement marin côtier. La principale cause de corrosion des barres d'armature est l'entrée d'ions chlorure et dioxyde de carbone sur la surface de l'acier. Après le début du processus de corrosion, les produits de corrosion (oxydes et hydroxydes de fer) précipitent généralement dans une zone limitée du béton autour de l'acier.

Leur formation dans cet espace limité crée des pressions prolongées qui provoquent la fissuration et la dégradation de l'enrobage du béton. Ceci, à son tour, conduit à une détérioration progressive du béton. En conséquence, les coûts de réparation représentent aujourd'hui une grande partie des dépenses actuelles d'infrastructure.

Le contrôle de la qualité, l'entretien et la planification de la restauration de ces structures nécessitent également des inspections non destructives et des techniques de surveillance qui détectent la corrosion à un stade précoce.

La surveillance de la corrosion des armatures dans les structures en béton armé est difficile à détecter dans les premiers stades, par contre, il est trop tard lorsque nous voyons des signes de corrosion à la surface, et la détection de la corrosion dans les structures en béton nécessite des connaissances appropriées, des outils d'examen appropriés et de l'expérience.

De nombreux ingénieurs en structure demandent quelles sont les meilleures pratiques pour étudier la corrosion. Certains veulent savoir par où commencer la recherche.

D'autres s'intéressent à l'exactitude et à la précision des méthodes d'essais disponibles, et d'autres veulent savoir si les résultats de cette enquête sont utiles du point de vue de l'ingénierie structurelle.

Actuellement, différentes méthodes ont été mises en œuvre pour la surveillance de la corrosion dans les structures en béton armé.

Les méthodes qu'on va aborder dans ce chapitre sont présentées dans l'organigramme suivant :

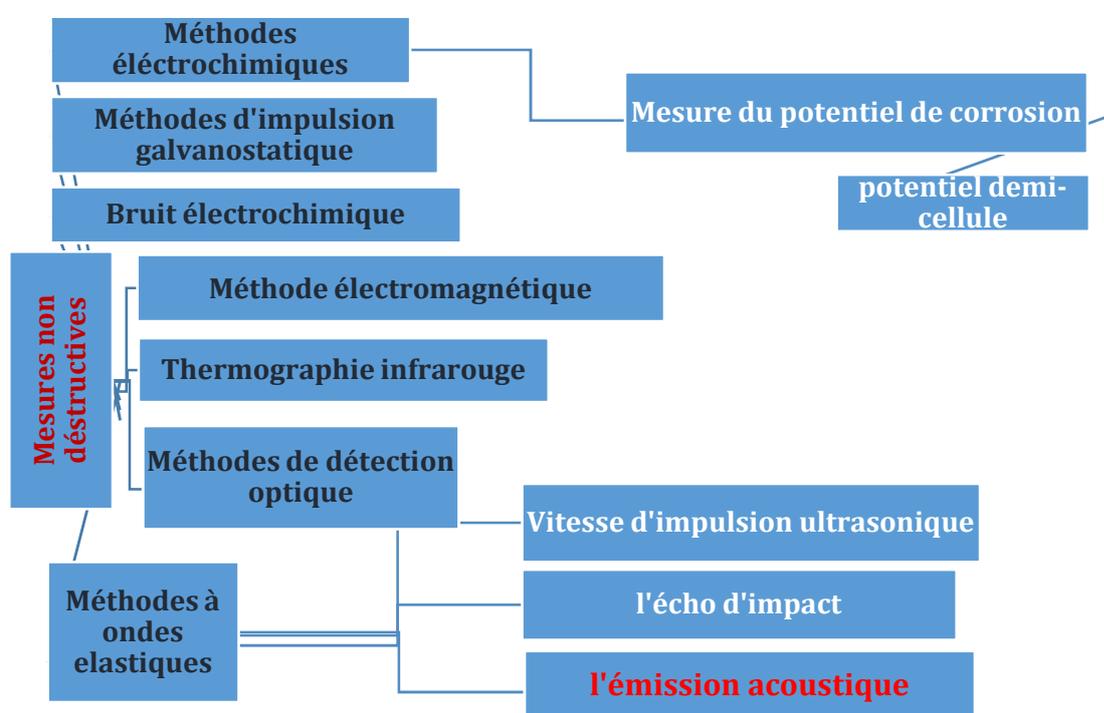


Figure II.1 : Organigramme des méthodes de mesure non destructives

Les agents de dégradation du béton sont nombreux, l'environnement agressif et l'âge avancé du béton peuvent avoir un effet fatal sur la performance du béton. Les méthodes non destructives peuvent détecter le début des dégradations et l'état de la structure. Ces méthodes se résument dans ce qui suit:

2.1 Méthodes électrochimiques :

L'électrochimie est l'étude des techniques utilisant la simulation électrique pour analyser la réactivité chimique d'un système en analysant les mécanismes d'oxydation et de réduction dans une réaction [28].

a-Mesure du potentiel de corrosion

Cette méthode décrite par les standards américaines ASTM C 876 est largement utilisée suite à sa simplicité.

Le potentiel de corrosion du métal est mesuré par rapport à une électrode de référence qui a un potentiel stable et invariable; il représente le potentiel résultant de l'interaction d'un ou de plusieurs systèmes électrochimiques.

D'après les recommandations Rilem [29], ces mesures du potentiel ont l'un des objectifs suivants :

- Localiser les armatures corrodées lors d'une inspection et auscultation d'une structure en béton armé.
- Contrôler l'état de corrosion des armatures après réparation pour évaluer l'efficacité des travaux, notamment l'application d'un inhibiteur de corrosion.
- Déterminer les positions des analyses destructives ultérieures (carottages pour doser les chlorures, etc., servant à obtenir des renseignements sur l'état de la structure et les causes de dégradation.

Le potentiel de corrosion est enregistré à partir d'une roue électrode (Fig. II.2)



[30]

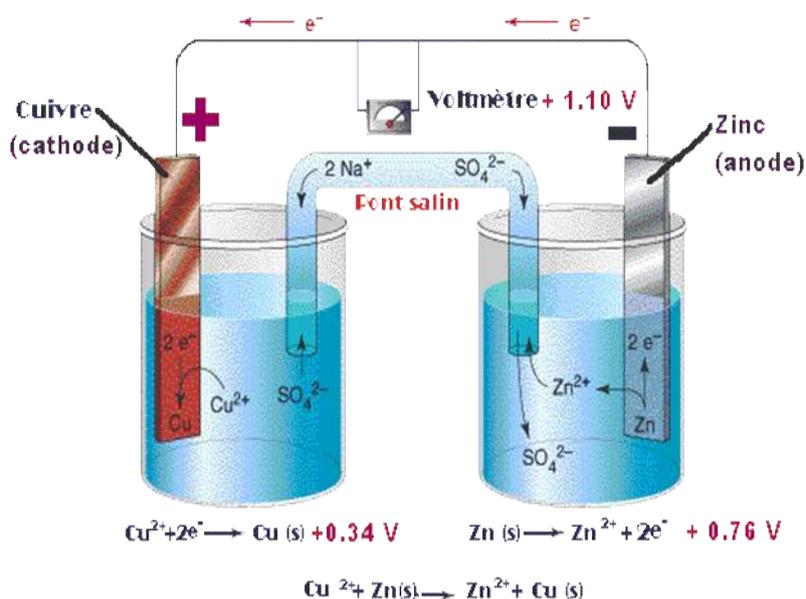
Figure II.2 : Mesure de potentiel à l'aide d'une roue d'électrodes

Il s'agit de mesurer, à l'aide d'un voltmètre à haute impédance (10 M Ω au minimum), la différence de potentiel entre l'armature du béton (la connexion

nécessite un forage ponctuel pour se connecter à une armature dans le béton) et une électrode de référence placée sur le parement de béton.

b-Potentiel demi-cellule :

Cette technique est utilisée pour déterminer la probabilité de corrosion dans les barres d'armatures dans les structures en béton armé, selon la norme ASTM C876-15. Fig.II.3 présente une expérience de mesure du potentiel demi-cellule :



[31]

Figure II.3: Mesure du potentiel demi-cellule

Fig.II.3 représente une cellule composée de deux demi cellules connectées ensemble. Chaque demi-cellule est représentée par une électrode dans une solution (électrolyte). Une électrode a une tendance plus élevée à se corroder que l'autre, cette électrode (anode) s'oxydara et à son tour donnera des électrons.

- ❖ Il y aura un échange d'ions pour maintenir le système en équilibre et équilibrer les charges dans les électrolytes. Le voltmètre mesurera la différence de potentiel (tension) entre les deux électrodes, ce qui indique la vitesse de dissolution de l'anode.

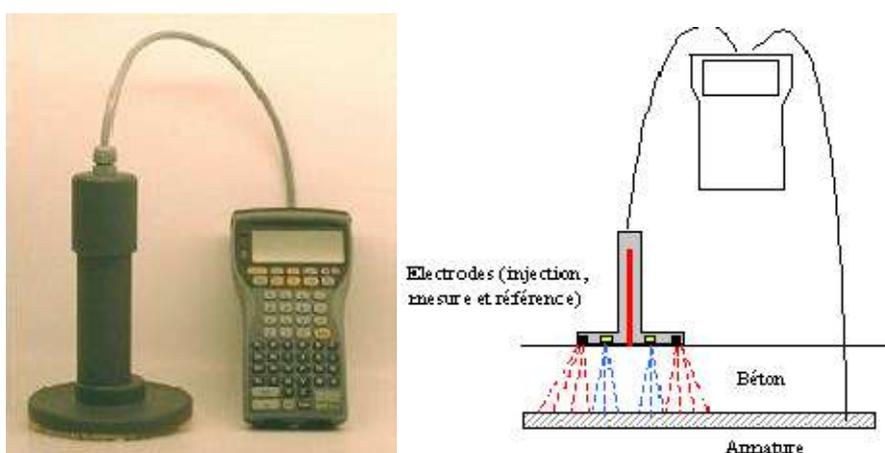
- ❖ Pour les applications en béton armé et l'interprétation des résultats du potentiel de corrosion, une électrode de référence avec un potentiel connu est nécessaire en la plaçant sur la surface du béton.

2.2 Méthodes d'impulsion galvanostatique :

Les méthodes traditionnelles pour évaluer la corrosion des armatures sont basées sur des techniques électrochimiques telles que la mesure du potentiel spontané pour détecter les zones de corrosion active et la mesure de la résistance de polarisation pour estimer la vitesse de corrosion.

Récemment mise au point, une nouvelle technique non destructive de polarisation, dite méthode par impulsions galvanostatiques, permet la réalisation rapide de mesures de vitesse de corrosion (10 à 30 secondes par mesure). Cette méthode est basée sur l'analyse de la courbe des variations de potentiel des aciers sous l'influence d'impulsions électriques de faible intensité, émises dans le béton dans un volume déterminé (voir Fig.II.4). [32]

La mesure simultanée du potentiel d'électrode, de la résistance électrique du béton et des variations de potentiel provoqué par l'injection de ces impulsions permet, par calcul, de déterminer la résistance de polarisation. Cette dernière peut être convertie en vitesse de corrosion par une relation déduite des lois de Faraday. La vitesse de corrosion, exprimée en micromètres par an, traduit la perte de section des aciers soumis à la corrosion et, par conséquent, permet d'aborder les questions de durabilité d'une structure.



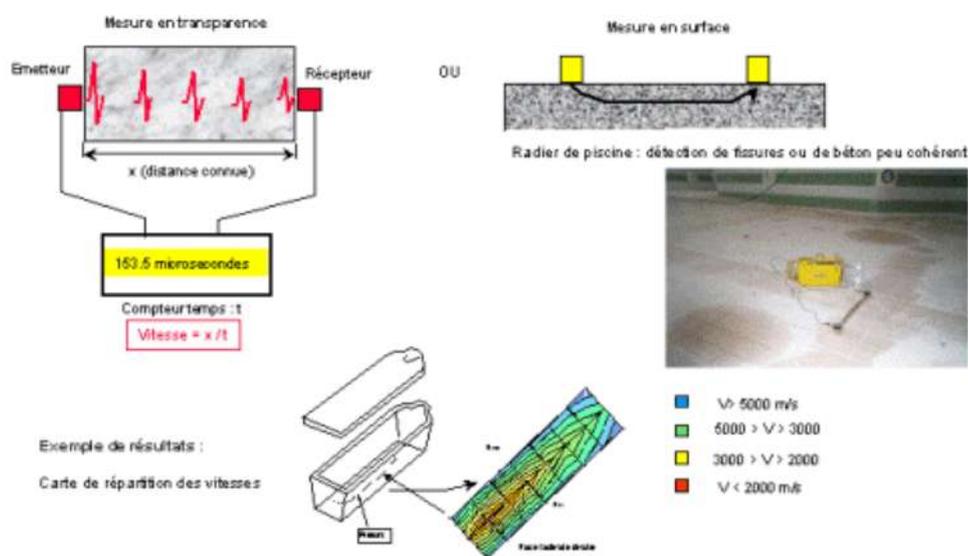
[32]

Figure II.4 : Appareille de mesure par impulsions galvanostatique

Les mesures de la caractérisation de la dureté de surface d'un béton et leur exploitation sont réalisées selon un mode opératoire précis basé sur des normes référentielles. Les mesures de vitesse de propagation du son (ondes soniques ou ultrasoniques, voir Fig. II.5) à travers un matériau ont pour objet d'évaluer la qualité dynamique (densité, module dynamique) d'un béton, d'une pierre ou d'une maçonnerie.

Ces méthodes sont sollicitées par les chercheurs pour les utiliser dans le but de détecter la corrosion dans des structures en béton armé d'une façon non destructive.

[32]



[32]

Figure II.5: Schéma des mesures ultrasoniques

2.3 Bruit électrochimique :

Le bruit électrochimique (ECN) est un terme général donné aux fluctuations de courant et de potentiel. Lorsqu'elle est associée à la corrosion, elle est causée par des impulsions aléatoires de courant générées par une rupture soudaine de la membrane, la propagation de fissures, des événements discrets impliquant la dissolution du métal et la décharge d'hydrogène avec formation et détachement de bulles de gaz. La technique de mesure du bruit électrochimique n'utilise aucun signal externe appliqué pour collecter des données expérimentales [33]

La technologie ECN mesure les perturbations du signal qui représentent des fluctuations de faible niveau du potentiel d'usure entre deux électrodes nominalement identiques qui peuvent être utilisées pour la détermination mécanique du type et de la vitesse d'usure. Les fluctuations sont généralement de faible amplitude, inférieures à 1 mV et une valeur RMS filtrée à faible bande passante. Le bruit est cohérent avec le signal de bruit de fréquence de faible niveau mais a une amplitude beaucoup plus faible en ce qui concerne l'usure générale

La principale source de bruit peut être attribuée à des phénomènes stochastiques aléatoires. Ils comprennent l'absorption/absorption partielle des courants, le revêtement de surface, la fissuration par érosion et les processus d'érosion mécanique. Une caractéristique commune des spectres de Poisson $1/f$ est qu'ils diffèrent du bruit gaussien "blanc" dans lequel la précision augmente comme la racine carrée du temps de mesure

Cette technique prend en compte les interactions qui se produisent à l'interface métal-solution et suggère deux courants circulant sur chaque électrode en raison des interactions anodique et cathodique. Auparavant considéré comme une source de biais et d'erreurs qui compromettaient les mesures électrochimiques, il est désormais considéré comme une riche source d'informations.

Cette technique est largement utilisée dans le monde de l'ingénierie de la corrosion comme méthode utile pour surveiller la corrosion.

En effet, l'imposition d'une perturbation du potentiel ou du courant peut altérer le processus de corrosion étudié. Cette simple « écoute » du système a été largement utilisée depuis les années 1970 pour étudier les phénomènes de corrosion, que ce soit en laboratoire ou pour de la surveillance sur site.

L'utilisation de cette technique se heurte cependant à deux problèmes, l'un dû aux difficultés de mesure de ces signaux aléatoires de faible amplitude et l'autre lié à la complexité de l'interprétation des résultats. Le lecteur qui désire approfondir les fondements de cette technique. [34]

2.4 Méthodes électromagnétiques:

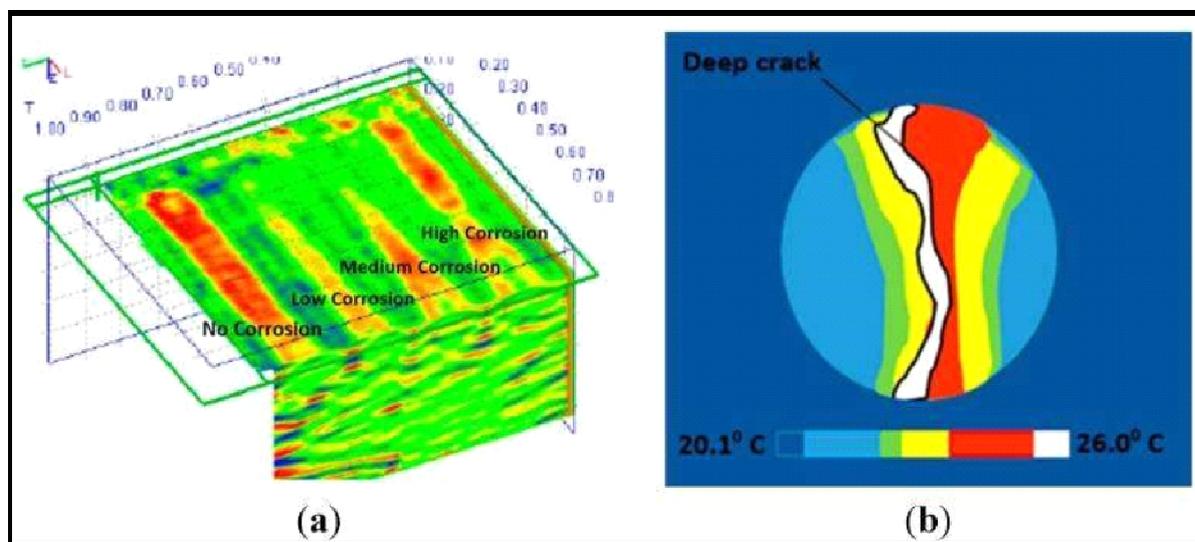
Parmi les méthodes non destructives de surveillance de la corrosion on a le radar à pénétration de sol (GPR) (Fig.II.6), qui repose sur la propagation d'une onde

électromagnétique dans une structure en béton armé, et malgré sa capacité, le GPR ne présente qu'une évaluation qualitative des dommages dus à la corrosion.



[35]

Figure II.6: Radar à pénétration de sol (GPR)



[36]

Figure II.7: Image 3D du GPR d'une dalle de béton

La figure II.7, nous montre une image 3D des données GPR dans une dalle en béton armé avec quatre degrés de corrosion différents (aucune corrosion, faible corrosion,

corrosion moyenne et forte corrosion de gauche à droite), ce qui engendre la fissuration du béton.[36]

2.5 Thermographie infrarouge :

La thermographie infrarouge (IRT) est reconnue capable de détecter la corrosion dans les structures en béton armé, elle repose sur les perturbations résultantes des caractéristiques de translation de chaleur des matériaux en béton.

La distribution anormale de la température est résultante :

- Des fissures
- D'une réaction des agrégats alcalins
- De la corrosion et d'autre forme de détérioration

La nouvelle génération de caméras IR, l'IRT devient une technique plus précise, sécurisé et bénéficiaire pour la surveillance de la corrosion dans les structures en béton armé. Elle est mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge (Fig.II.8)

La méthode GPR, l'exécution de l'IRT est ainsi qualitative, ce que veut dire qu'un degré plus élevé de corrosion de l'acier exerce une distribution thermique plus forte sur la surface du béton, qui présenterait des vitesses de chauffage plus rapides, et alors augmenter la température des matériaux en béton. [36]



[37]

Figure II.8 : Caméra infrarouge

2.6 Méthodes de détection optique :

Parmi les méthodes non destructives qui sont appliquées lors de la corrosion, la technologie de détection optique, la formation de produits de corrosion augmente le volume et le diamètre des barres puisque il est moins dense que l'acier. L'amplitude de la corrosion est évaluée quantitativement par le changement de la longueur d'onde.

Cette méthode ne peut effectuer qu'une inspection localisée de la corrosion de l'acier dans les structures en béton armé [36].

2.7 Méthodes à ondes élastiques :

Les méthodes par ondes élastiques sont importantes pendant l'estimation des propriétés mécaniques et de la caractérisation inhomogène due à la corrosion de l'acier dans les structures en béton armé.

Il existe trois principales méthodes basées sur les vagues pour la surveillance de la corrosion dans les structures en béton armé, à savoir, la vitesse d'impulsion ultrasonore, l'écho d'impact et l'émission acoustique.

a-Vitesse d'impulsion ultrasonique :

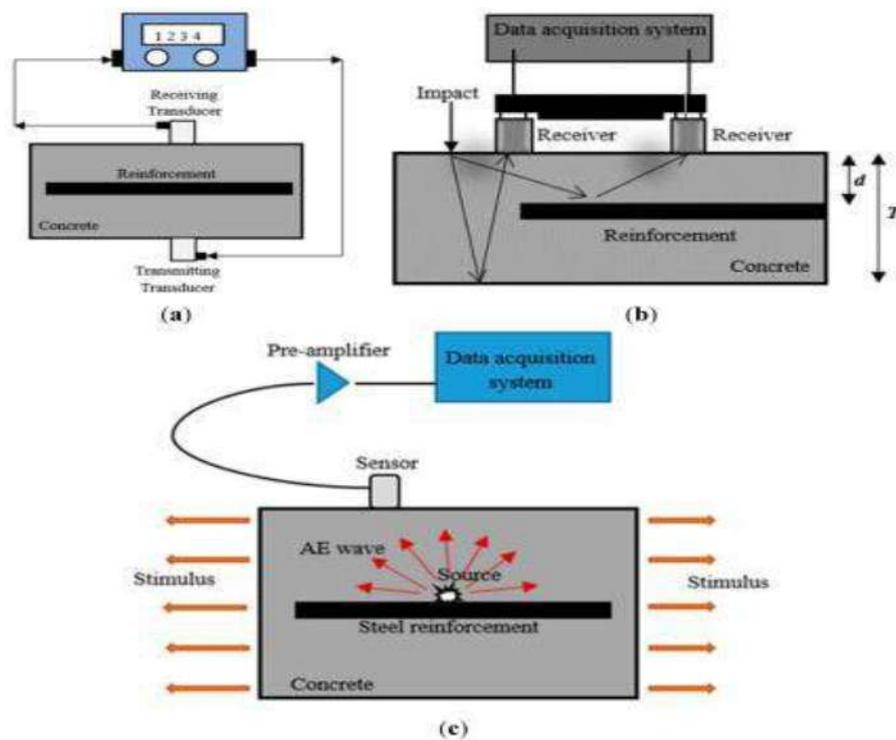
La figure II.9 présente le principe de la méthode de vitesse d'impulsion ultrasonique; les ondes ultrasonores peuvent parcourir de longues distances le long des barres d'armature, car il a été démontré qu'elles sont sensibles aux conditions d'interface entre les barres d'armature et le béton.

La fissuration due à la corrosion de l'acier entraîne une atténuation des vagues et une diminution de vitesse d'impulsion ultrasonique.

b- L'écho d'impact

La méthode d'écho d'impact (ondes de contrainte) ; son principe est d'utiliser un impact mécanique pour détecter la corrosion dans les éléments structuraux et des capteurs placés sur la surface du béton pour la surveillance de déplacement.

L'impulsion est exprimée par l'arrivée des renvois de l'impulsion de la fissure et d'autres défauts internes à l'étude, comme montré dans la figure suivante:



[36]

Figure II.9: Méthodes à ondes élastiques: (a) la vitesse d'impulsion ultrasonore; (b) écho d'impact; et (c) émission acoustique

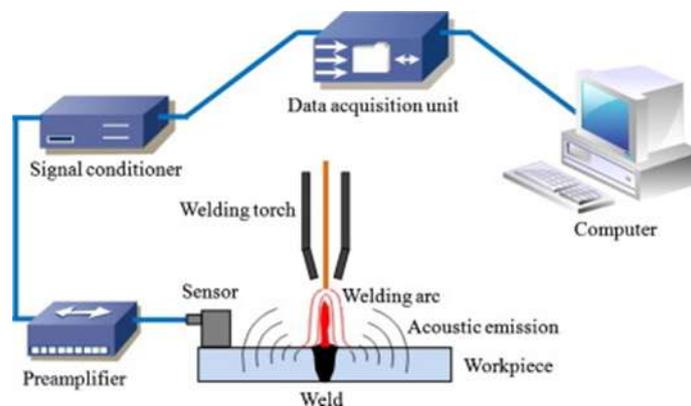
Dans une première étude menée par Liang et Su [38], la méthode d'écho d'impact a certainement été en mesure de détecter le développement de microfissures dues à la corrosion dans des blocs en béton armé.

Dans une autre étude, Samarkova et al [39] ont indiqué que les fréquences dominantes du signal de réponse sont les principaux critères utilisés pour détecter l'apparition et la position de la corrosion de l'acier dans les structures en béton armé

c- L'émission acoustique :

L'émission acoustique (EA) est considérée comme une méthode complémentaire à la vitesse d'impulsion ultrasonique et écho d'impact. La technique EA est une méthode de mesure non destructive unique, non invasive et passive. EA est une classe de phénomènes par lesquels les ondes élastiques transitoires (plage de fréquences ultrasonores) provenant d'une source localisée dans un matériau et la conversion des

ondes en signaux électriques via des capteurs piézoélectriques couplés (Fig.II.10) [40].



[41]

Figure II.10: Contrôle de qualité des soudures par l'émission acoustique

La technique d'émission acoustique est souvent capable de détecter la corrosion aux premiers stades, de sorte qu'un avertissement précoce peut être donné pour permettre des travaux de réparation avant que l'élément structurel en béton armé ne soit gravement endommagé et que la fonctionnalité ne soit perdue en raison de la corrosion de l'acier [36].

Cette partie de l'émission acoustique qui fait l'objet du présent travail sera développé dans le chapitre suivant.

3. Méthodes d'évaluation de la corrosion

Parmi les méthodes d'évaluation de la corrosion des armatures, on distingue :

3.1 Les Méthodes statiques : mesure gravimétriques :

Les méthodes statiques sont des essais d'évaluation de la corrosion de l'acier, se basant sur les mesures de perte de masse.

Le principe de la méthode statique est de mesurer la perte de poids subit par une surface (prise comme un échantillon), pendant un temps d'immersion déterminé dans une solution corrosive maintenue à température constante

C'est la première approche de l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un métal dans une solution électrolytique.

Fig.II.11 représente un organigramme simplifié des mesures gravimétriques.

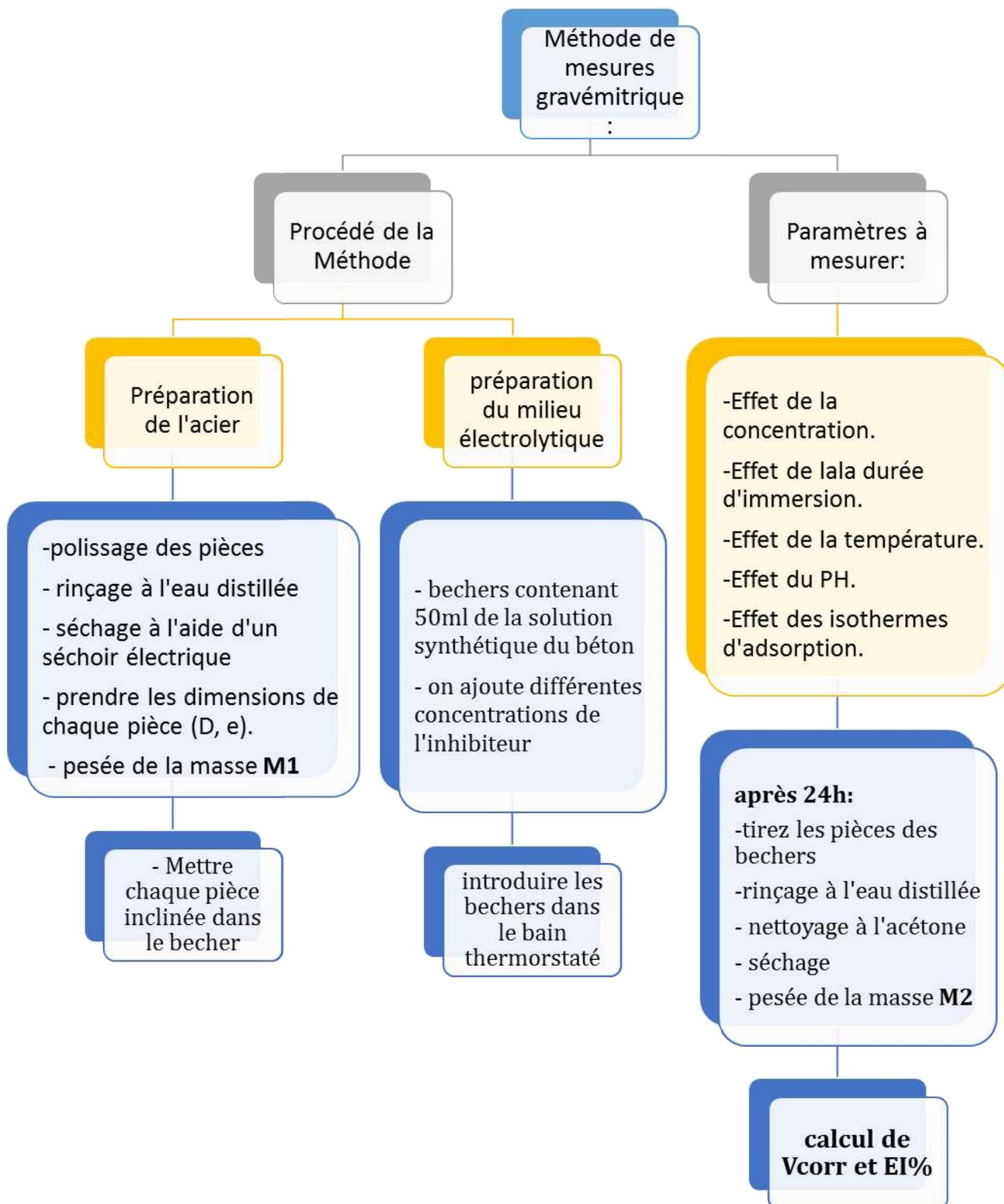


Figure II.11: Organigramme décrivant les mesures gravimétriques

Procédé de la méthode de perte de masse :

a) La préparation de l'acier :

Dans l'essai de perte de masse on procède d'abord à la préparation des échantillons d'acier :

- Polissage des pièces à l'aide d'une polisseuse avec du papier abrasif de granulométrie allant de 80 jusqu'à 1000 grades pour que leurs surfaces soient parfaitement lisses.
- Rinçage des pièces dans l'eau distillée,
- Dégraissage à l'acétone
- Séchage des pièces à l'aide d'un séchoir électrique
- Mesure du diamètre et épaisseur de chaque pièce pour déterminer la surface apparente.
- Pesée des pièces à l'aide d'une balance analytique à haute précision. [46]

b) La préparation du milieu d'étude :

Généralement, l'étude de l'évaluation de la corrosion par les mesures de perte de masse se fait sur des solutions qui simulent le béton.

On procède d'abord par la Préparation de la solution synthétique du béton, puis on immerge l'acier dans cette solution pour suivre les effets et réactions qui se déroulent à l'interface métal/solution.

D'après des recherches antérieures [42], les pores du béton contiennent un mélange d'hydroxydes de sodium et de potassium, ces ions proviennent des oxydes alcalins, tels que Na_2O et K_2O qui existent dans le ciment portland et les ions de sulfate sont dus à l'ajout du gypse pendant la production du ciment, ou bien par les agrégats contaminés, ou encore l'eau de gâchage., ainsi que l'élément le plus important responsable de la forte alcalinité du béton qui est l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ils contiennent aussi des ions supplémentaires différents selon le type de ciment tels que Ca^{2+} , Na^+ et K^+ et anions tels OH^- et SO_4^{2-} .

Les quantités nécessaires pour la préparation d'un litre de la solution synthétique du béton contaminé par NaCl sont données par le Tableau 1 suivant :

Tableau 1 : Composition du milieu synthétique du béton [43]

Produit	Quantité
l'eau distillée	1 litre
Le chlorure de sodium NaCl	30 g
L'hydroxyde de calcium Ca(OH) ₂	2 g
L'hydroxyde de sodium NaOH	0.4 g
L'hydroxyde de potassium KOH	0.56 g
L'hydroxyde CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.27 g

c) Matériel utilisé :

Le matériel nécessaire pour effectuer l'essai de perte de masse consiste:

- Une polisseuse : L'échantillon d'acier subit un polissage de la surface avec le papier abrasif de granulométrie de plus en plus fine jusqu'à avoir une surface parfaitement lisse.
- Une balance analytique (précision à 10⁻⁴)
- Un pH mètre qui sert à indiquer le pH de la solution testé au début et à la fin de l'essai.
- Un bain thermostat : offre un contrôle précis de la température.
- Pied à coulisse : Mesure les dimensions d'une pièce (son diamètre extérieur ou son épaisseur) grâce aux becs extérieurs.
- Des béchers de contenance 50ml.
- L'acétone pour nettoyer les pièces de la corrosion.
- Un séchoir électrique et du papier absorbant pour sécher les pièces.

d) Mode opératoire :

Au début de l'essai

- Préparation des solutions alcalines avec différentes concentrations en inhibiteur, pour chaque concentration trois essais sont réalisés pour assurer la répétabilité des résultats.
- Relevé du pH des solutions à t initial
- Numérotez les pièces suivant les solutions correspondantes.

- Poser la pièce de façon inclinée dans le béccher pour qu'elle soit en contact avec la solution électrolytique.
- Fermeture hermétique des bécchers.
- Mise en place des bécchers dans le bain thermostat après avoir régler la température de l'essai.

A la fin de l'essai

- Verser de l'eau distillée dans des boîtes de pétrie numérotées,
- Tirer les bécchers du thermostat,
- Rincer la pièce à l'eau distillée,
- Brosser avec de l'acétone,
- Mesurer le pH de la solution,
- Sécher les pièces à l'aide d'un séchoir électrique,
- Peser chaque pièce soit : M2.
- Calcul de la Perte de masse,
- Calcul des vitesses de corrosion et efficacités inhibitrices,

La vitesse de corrosion est déterminée après 24 heures d'immersion à température constante égale à 25° C. Elle est calculée par la formule suivante :

$$V = \Delta M / S \cdot t \text{ (mg/h.cm}^2\text{)} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

$$\Delta M = M1 - M2 \quad \text{Eq. (2.2)}$$

D'ou:

- ΔM représente la différence entre la masse initiale M1 et la masse finale M2 après un temps t égal à 24h.
- S est la surface du métal exposée à la solution d'étude.

Cette valeur de la vitesse de corrosion est la moyenne de trois essais effectués dans les mêmes conditions pour chaque concentration.

La valeur de l'efficacité inhibitrice est donnée par la formule suivante :

$$EI_G(\%) = \frac{V - V_{inhib}}{V} \cdot 100 \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Les avantages et les inconvénients de la méthode Gravimétrique :

Les avantages et les inconvénients de la méthode gravimétrique se résument dans Tableau 2 :

Tableau 2 : Avantages et inconvénients de la méthode gravimétrique

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
simplicité de la mise en œuvre et matériels simple	probabilité d'erreurs de la vitesse de corrosion à cause d'appareillage utilisé ou d'utilisateurs
Mesures directes de la vitesse de corrosion et par conséquent l'efficacité du produit testé	L'adhérence des produits de corrosion nécessite un décapage qui peut provoquer une attaque du métal
La méthode statique ne nécessite pas plusieurs hypothèses	La méthode statique ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion.

La méthode de perte de masse est la méthode qui exprime au mieux le phénomène de la corrosion tel qu'il est dans l'état réel. Elle reste une méthode de base et de référence.

Alors pour assurer la validité des résultats obtenus, il est souhaitable de compléter les essais statiques par des mesures électrochimiques indirectes: stationnaire et transitoire.

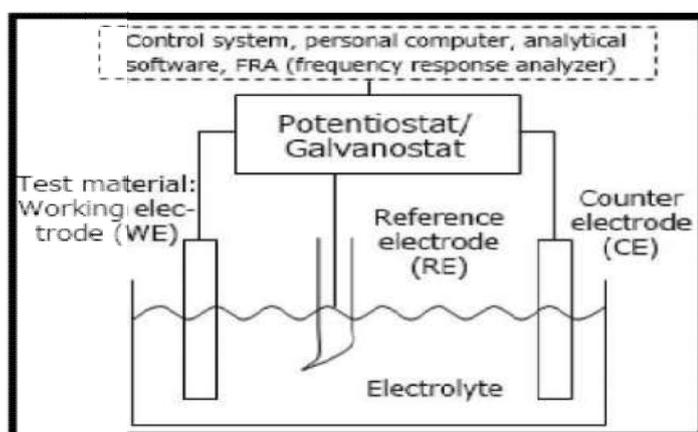
3.2 Les Méthodes électrochimiques :

L'électrochimie est l'étude des techniques utilisant la simulation électrique pour analyser la réactivité chimique d'un système en analysant les mécanismes d'oxydation et de réduction dans une réaction [47].

Si un échantillon de métal (fer, acier ...) est immergé dans une solution aqueuse, une réaction d'oxydo-réduction se produira à la surface de l'échantillon en raison de l'oxygène et/ou des ions dissous dans la solution, et par conséquent, son potentiel électrique est déterminé.

Les mesures électrochimiques sont effectuées dans une cellule électrochimique, qui contient trois électrodes:

- Electrode de travail (WE), qui est l'échantillon testé,
- D'une contre-électrode(CE) pour le passage d'un courant et
- D'une électrode de référence (RE), qui sert d'étalon. Ces trois électrodes sont immergées dans une solution d'essai (électrolyte).



[48]

Figure II.12: Modèle d'un système de mesure électrochimique

La cellule électrochimique est reliée à un Potentiostat/Galvanostat piloté par un ordinateur pour l'acquisition et traitement des données (Fig.II.12).

3.2.1 Mesure du potentiel de corrosion :

Cette technique consiste à mesurer le potentiel de l'électrode de travail en fonction du temps d'immersion. Elle indique le type d'inhibiteur (anodique ou cathodique) suivant le sens de déviation du potentiel par rapport au potentiel mesuré en absence d'inhibiteur. Si l'inhibiteur est à caractère mixte, aucune indication n'est donnée par la faible variation de potentiel [49].

3.2.2 Mesure du potentiel à circuit ouvert :

Le potentiel à circuit ouvert c'est le potentiel du milieu électrolytique. On peut accéder à sa valeur en suivant l'évolution du potentiel en fonction du temps.

Le potentiel à circuit ouvert est la plus simple des techniques électrochimiques. Cette technique est utilisée pour atteindre l'équilibre électrochimique d'un système particulier, la distinction de potentiel est mesurée entre l'électrode de travail et l'électrode de référence jusqu'à l'obtention du régime permanent.

Le suivi du potentiel à circuit ouvert permet d'enregistrer les modifications à l'interface entre l'électrode de travail et le milieu corrosif.

Cette méthode affiche l'OCP de l'échantillon dans le temps. Il est aussi appelé "Potentiel Libre". [45]

Le suivi du potentiel en fonction du temps, permet aussi de déterminer le temps de stabilisation et/ou équilibre et de montrer les aptitudes de l'échantillon à la « réactivité » ou à la « passivité ». Ce potentiel est caractéristique du métal et dépend des conditions expérimentales, en particulier de la nature du milieu, de sa concentration et de sa température [50].

Cette méthode ne fournit pas d'information au sujet du taux de corrosion, par conséquent, elle est habituellement utilisée avec une autre méthode de contrôle. Les valeurs du potentiel sont interprétées suivant la norme ASTM C 876 «Méthode d'essai standard du potentiel demi-cellule de l'armature en acier non traitée enfoncée dans le béton» [51].

3.2.3 Méthodes stationnaires: (courbes de polarisation linéaire)

Une réaction électrochimique se déroulant à la surface d'une électrode est gouvernée par la surtension appliquée, qui est l'écart entre le potentiel électrode/solution. L'intensité du courant qui traverse ce matériau est fonction du potentiel E , représentée par une courbe $I = f(E)$, qui est la somme des courants des réactions électrochimiques se produisant à la surface de l'électrode.

Les courbes de polarisation sont déterminées en appliquant un potentiel entre une électrode de travail et une électrode de référence. Un courant stationnaire s'établit après un certain temps de (quelques minutes à quelques heures). Il est mesuré entre l'électrode de travail et une contre électrode (ou électrode auxiliaire) [52].

D'un point de vue cinétique, deux modes de contrôle sont distingués selon l'étape réactionnelle:

- Le transport de charges à l'interface métal/électrolyte (activation),
- Le transport de masse de l'espèce électro active ou du produit de réaction [53].

Le tracé des courbes de polarisation est délicat car l'état stationnaire est dans la plupart des cas, assez lent à s'établir surtout dans le domaine anodique. Ce tracé renseigne sur la cinétique de l'étape la plus lente du processus global de corrosion qui se compose de différentes réactions élémentaires (transfert de charge, transfert de matière, adsorption des espèces sur l'électrode, etc.). Etant donné que la vitesse de la réaction globale est déterminée par celle de l'étape la plus lente, le tracé des courbes de polarisation peut être exploité pour ces mesures [54].

3.2.4 Méthodes transitoires: La spectroscopie d'impédance électrochimique

En plus des techniques stationnaires qui permettent d'étudier les processus les plus simples, les techniques non stationnaires sont nécessaires pour analyser des systèmes électrochimiques plus complexes. L'utilisation de ces dernières repose sur des principes analogues à ceux qui justifient l'emploi des méthodes de relaxation en cinétique chimique à l'équilibre. Cette méthode d'analyse de systèmes électrochimiques par des mesures impédancimétriques a été introduite en 1960 par Sluyters [55].

Elle consiste à analyser la réponse du système en fonction de la fréquence du signal alternatif d'excitation [64].

Les méthodes non stationnaires peuvent être classées en deux catégories à savoir les méthodes de perturbation de grande amplitude (voltamétrie cyclique) et les méthodes de faible amplitude (Impédancimétrie électrochimique). [57].

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes techniques d'évaluation de la corrosion des armatures, parmi celles qui seront présentées dans le chapitre suivant, la méthode non destructive l'Émission Acoustique (EA).

L'émission acoustique est un phénomène utilisée pour détecter un grand nombre de dégradations affectant les matériaux et structures.

A cet effet, le chapitre suivant traitera l'application de l'émission acoustique dans le contrôle de la corrosion d'armatures dans le béton.

Chapitre III :

Application de l'émission acoustique pour la détection de la corrosion

1. Définition :

Par définition, l'Émission Acoustique (EA) est le phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à des sollicitations (Norme AFNOR NFA 09350). Le dégagement irréversible d'énergie dans le matériau décrit une source importante d'ondes élastiques transitoires.

Le domaine fréquentiel de ces ondes couvre le domaine des ultrasons [10-1000 kHz] ; Ces ondes sont caractérisées par des courtes durées (quelques milli secondes) [58].

Cette technique est non directionnelle, les sources émissives se propagent dans toutes les directions. La détection n'a lieu qu'au moment du relâchement des contraintes générant les signaux d'émission acoustique [59].



On peut détecter par l'émission acoustique un grand nombre de dégradations affectant les matériaux et structures:

- Propagation de fissures
- Déformation plastique
- Corrosion
- Fuites

La principale limitation du contrôle non destructif par émission acoustique provient du fait qu'il s'agit d'une technique passive qui n'est sensible qu'aux processus qui sont actifs lors du contrôle.

En industrie, l'émission acoustique présente un nombre d'avantages parmi lesquels :

- La possibilité de faire une évaluation globale de l'intégrité d'une structure;
- La possibilité de vérifier des structures en service en minimisant l'interruption de production;

- La rapidité du contrôle.

2. Historique :

Les premières recherches concernant l'émission acoustique ont été exécutées au début du 20ème siècle, quand les chercheurs ont remis la présence des sons audibles qui accompagnent la déformation des matériaux.

- ✓ En 1916, Czochralski a mentionné la présence du fameux cri de l'étain lors du maillage de celui-ci, ce phénomène était mentionné depuis longtemps par Geber dans son ouvrage 'The sum of perfection or of the perfectmagistrey'.
- ✓ Le premier système d'instrumentation mis en place pour découvrir les signaux acoustiques a été réalisé par Kishinouye en 1933 lors de ses essais réalisés sur des échantillons en bois.
- ✓ En 1936, Ehrenfest et Yoffe ont mis en place des systèmes de détection de l'activité acoustique présente lors des transformations martensitiques dans les aciers [60].
- ✓ En 1950, Kaiser [61] a marqué l'histoire du contrôle par émission acoustique avec ses travaux de thèse. L'effet Kaiser est décrit par l'absence d'EA lorsqu'un matériau ou une structure portée à un niveau de sollicitation noté P1 puis déchargée n'émet pas tant que la sollicitation appliquée lors d'une deuxième mise en charge, reste inférieure à la valeur maximale précédemment atteinte P1. On appelle P2 le niveau de sollicitation à l'apparition de l'émission acoustique lors de la deuxième mise en charge.

Dans le cas où la structure est endommagée alors $P2 < P1$. On peut ainsi définir le rapport de Felicity ($Rf = P2 / P1$).

- ✓ En 1957, Tatro [62] a évoqué la nécessité d'établir l'origine physique des signaux acoustiques et de développer des systèmes de contrôle par émission acoustique pour des applications industrielles. L'un de premiers systèmes de contrôle a été appliqué par Dunegan en 1963 [63].

Dans le but de surveiller des équipements opérant sous pression. L'évolution de l'industrie des semi-conducteurs, a permis de concevoir des systèmes de contrôles plus faciles à déplacer et à mettre en place ce qui a créé une forte croissance du nombre d'applications industrielles impliquant l'EA [64].

✓ Les travaux de Touya menés en 1979 [65] ont révélé que l'activité acoustique qui peut être générée lors de la déformation d'un matériau est influencée par plusieurs facteurs, qui sont détaillés dans la partie qui suit l'historique. Selon Touya dans le cas où le matériau étudié est caractérisé par une grande épaisseur ou soumis à des importantes vitesses de sollicitation ; les salves générées possèdent des fortes amplitudes.

Par contre si le matériau est caractérisé par une faible limite d'élasticité ou une faible épaisseur ou soumis à des faibles vitesses de sollicitation les signaux générés sont de faible amplitude.

3. Facteurs favorisant la propagation des signaux :

3.1 Facteurs favorisant les signaux de grande Amplitude :

Parmi les Facteurs favorisant les signaux de grande Amplitude :

- Forte limite d'élasticité.
- Transformation martensitique.
- Anisotropie.
- Hétérogénéité.
- Épaisseur importante.
- Taille de grain élevé.
- Tendance à former des macles.
- Rupture par clivage.
- Propagation de fissure.
- Température basse.
- Vitesse de sollicitation élevée.
- Grande déformation.

3.2 Facteurs favorisant les signaux à faible Amplitude :

Parmi les Facteurs favorisant les signaux à faible Amplitude :

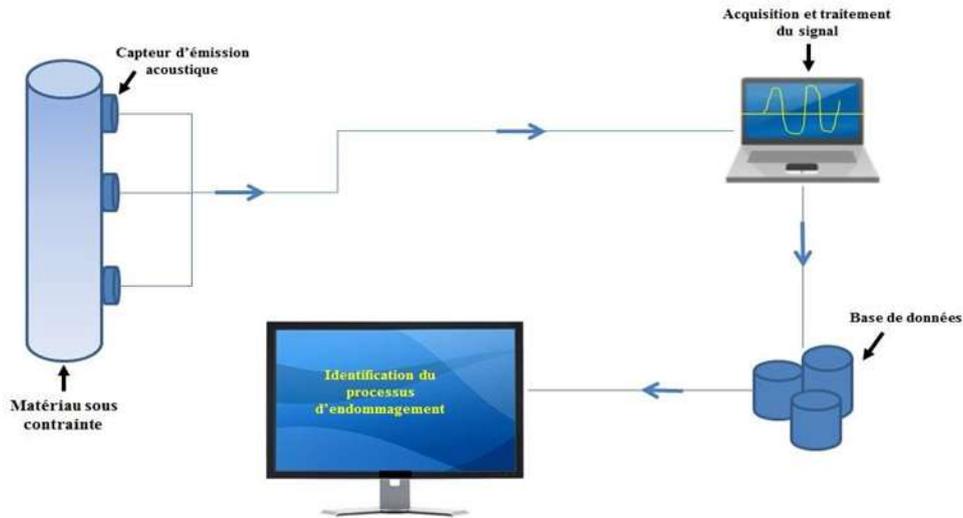
- Faible limite d'élasticité.
- Transformation par phase de diffusion.

- Isotropie.
- Homogénéité.
- Épaisseur faible.
- Structure à grains
- Maclage très difficile.
- Déformation par cisaillement.
- Déformation plastique uniforme.
- Température élevée.
- Vitesse de sollicitation faible.
- Petite déformation.

Tous ces phénomènes ont en commun de mettre en jeu des déplacements de la matière à différentes échelles de temps ainsi que l'élaboration ou la modification de contraintes mécaniques locales susceptibles de provoquer des ondes élastiques transitoires, sources de l'émission acoustique.

Ces ondes vont s'émettre ensuite dans le matériau et à sa surface, où elles peuvent être détectées et enregistrées par des capteurs piézoélectriques qui ont pour rôle de transformer les ondes mécaniques en signaux électriques (Fig.III.1).

Les signaux sont amplifiés puis traités au moyen de système d'acquisition pour créer des bases de données. Correctement analysée, cette émission acoustique peut être utilisée à la fois pour mieux comprendre les dégradations des matériaux et pour effectuer un suivi intelligent des systèmes soumis à des températures élevées [66].



[67]

Figure III.1 : Schéma d'un système de contrôle par émission acoustique (EA) in situ d'un équipement industriel

Dans le cas de la corrosion à haute température et en la défaillance de sollicitations mécaniques, les contraintes d'origine interne sont des bases d'émission d'ondes élastiques transitoires dans une gamme de fréquence allant de quelques kHz à 1 MHz.

Ces ondes circulent dans le matériau suite à un changement brutal du champ de contraintes ou de déformations correspondantes. Toujours les variations de température sont à l'origine de déformations thermiques (dilatations) qui peuvent être génératrices de contraintes mécaniques (déformations de croissance, déformations d'épitaxie, ...).

Lorsque le niveau de contraintes mécaniques dépasse une certaine limite, des endommagements peuvent se provoquer dans les matériaux. Aussi, des endommagements majeurs surviennent souvent pendant le refroidissement des matériaux.

Comme les signaux d'émission acoustique se situent dans la gamme des hautes fréquences, on peut potentiellement détecter, les différencier des signaux liés au bruit instrumental résultant des interventions humaines ou liés à d'autres vibrations mécaniques [68].

L'EA est une technique de contrôle non destructif qui a d'autres avantages, elle est adaptable sous diverses conditions environnementales sans imposer des infrastructures lourdes. Aussi, la mise en place de cette dernière reste moins cher (capteurs, chaîne d'acquisition). L'avantage principal de cette technique est qu'elle autorise d'évaluer l'endommagement des matériaux opérant en temps in-situ.

4. Types de signaux de l'émission acoustique :

Il existe deux types de signaux d'émission acoustique, l'émission continue et l'émission discontinue :

4.1 L'émission continue :

Elle est formée de signaux qui sont issus d'une grande quantité de sources actives en même temps et qui se trouvent très rapprochés les uns des autres à titre d'exemple les mouvements des dislocations dans un métal [69].

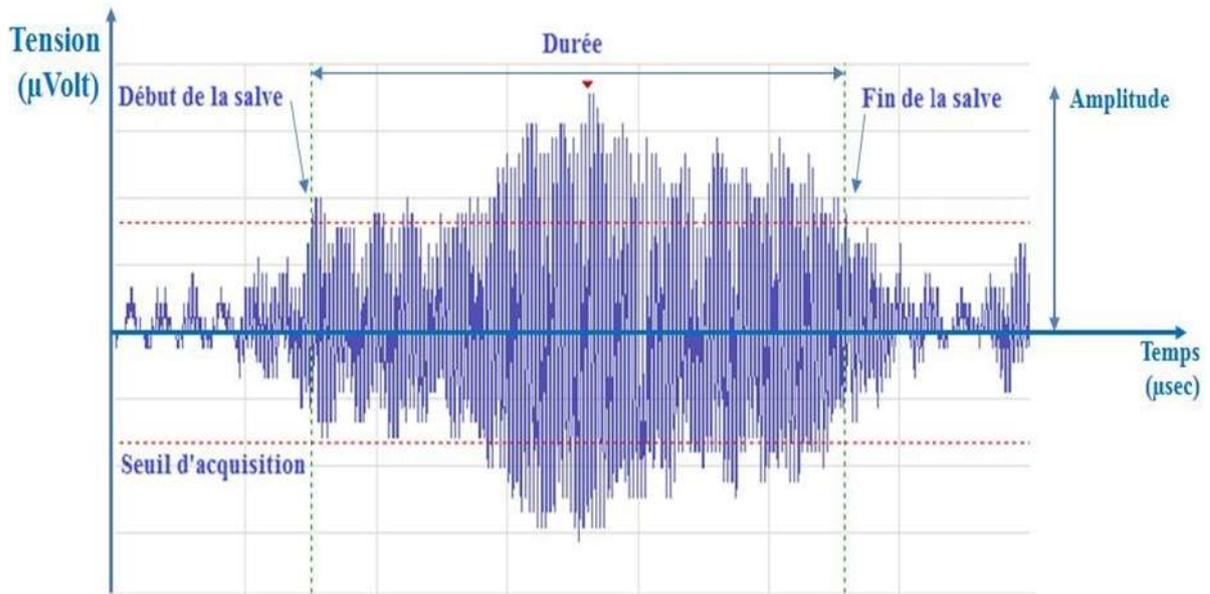
4.2 L'émission discontinue :

L'émission discontinue ou l'émission par Salves qui postule sous forme des angles transitoires, elle correspond à des phénomènes tels que les fissures, la microfissuration, l'écaillage,...

Dans ce cas, nous supposons que chaque salve (signal) accueilli correspond à un événement physique dans le matériau et que la forme de la salve est directement assemblée aux caractéristiques de cet événement.

Il est possible d'utiliser les paramètres qui caractérisent ces salves pour déterminer les différents mécanismes d'endommagement. Les principaux paramètres exploitables sont montrés sur la Figure III.2.

La majorité de ces paramètres sont déterminés par rapport au seuil (ceci est généralement fixé à une valeur légèrement supérieure au bruit de fond) d'acquisition en dessous duquel aucun signal ne sera sauvegardé par le système d'acquisition.



[67]

Figure III.2 : Exemple de salve d'émission acoustique (observée lors du dépôt de carbone sur un guide d'onde en alumine à 650 °C)

5. Paramètres de l'émission acoustique :

Les paramètres décrivant l'EA sont :

- a. L'amplitude : elle correspond à l'amplitude de la crête maximale, son unité est le décibel (dB).
- b. PreampGain : est la valeur du gain des préamplificateurs des transducteurs d'EA (fixée à 60 dB dans notre étude).
- c. La durée : elle correspond au temps entre le premier et le dernier dépassement de seuil d'acquisition, elle est notée T (unité : microseconde (μs)).
- d. Le nombre de coups : il correspond au nombre de franchissements de seuil sur la durée du signal.
- e. L'énergie absolue : elle est définie par,
$$E_{\text{abs}}(T) = \int |A^2| dt$$
- f. Le temps de montée : c'est le temps qui sépare le premier dépassement de seuil, de l'amplitude maximale du signal (unité : microseconde (μs)).
- g. Le nombre de coups au pic : il correspond au nombre de franchissements de seuil par le signal entre le premier dépassement de seuil et l'amplitude maximale.

h. La fréquence moyenne : c'est le nombre de coups d'une salve divisé par sa durée (Unité : kHz).

i. Seuil d'acquisition : Ce paramètre permet de s'affranchir du bruit instrumental. Il est réglable selon le dispositif et l'environnement expérimental.

Il existe aussi d'autres indicateurs comme le nombre de salves enregistrées au cours du temps ou l'énergie cumulée de ces salves d'émission acoustique.

En se référant à l'ensemble des résultats de la littérature, les microfissurations dans la couche d'oxyde génèrent des salves de faible amplitude qui dépendent du type d'oxyde considéré. Les fissures perpendiculaires à la surface de l'oxyde ainsi que le décollement de l'interface métal-oxyde génèrent des salves de haute amplitude [70],[71].

6. Sources d'émission acoustique :

L'EA résultant des mécanismes de différentes natures, on peut les classer en deux catégories :

-Sources d'origine mécanique

- Sources artificielles

-Sources dues à la corrosion

6.1 Source d'origine mécanique :

Un matériau est sollicité mécaniquement, les mécanismes d'endommagement résultant par cette sollicitation génèrent de l'EA. D'un matériau à l'autre ces mécanismes diffèrent.

Les actions à l'origine d'une EA dans les métaux sont :

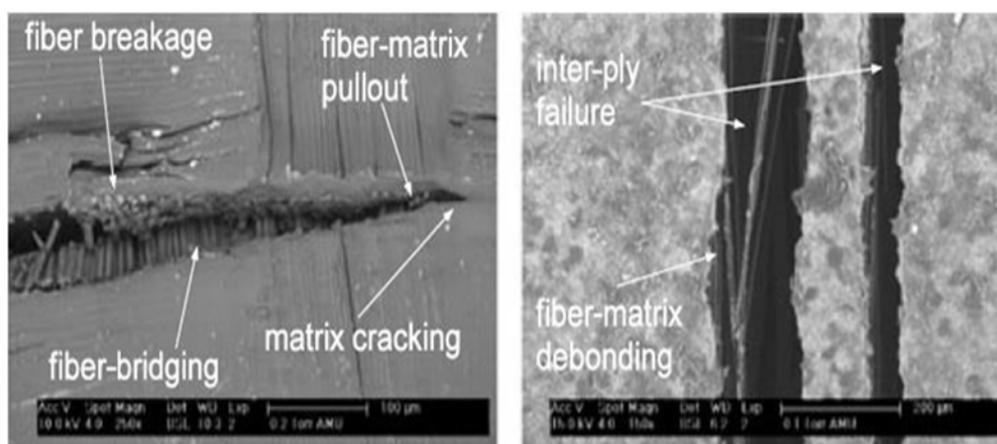
- les mouvements coopératifs de dislocation [72] Le mouvement d'une seule dislocation ne génère pas une onde détectable en revanche le mouvement coordonné de plusieurs dislocations est détectable
- la conception et l'avancement de fissures
- l'adhérence ou la rupture d'inclusions
- les changements de phase, l'échange martensitique
- les phénomènes de différenciation et glissement

Dans les bétons, les bases mécanismes d'endommagement sont la microfissuration et la croissance de fissures déjà existantes.

Les fissures peuvent être détectées :

- Dans les grains (gravier par exemple),
- Dans la matrice (ciment)
- Dans l'interface grains/matrice, une région plus poreuse [73].
- Dans les matériaux composites (à matrice organique ou à matrice céramique) on trouve d'autres mécanismes d'endommagement [74], (Figure III.3) :

- La fissuration matricielle
- La rupture ou l'arrachement de fibres
- La décohésion
- Le délaminage



[74]

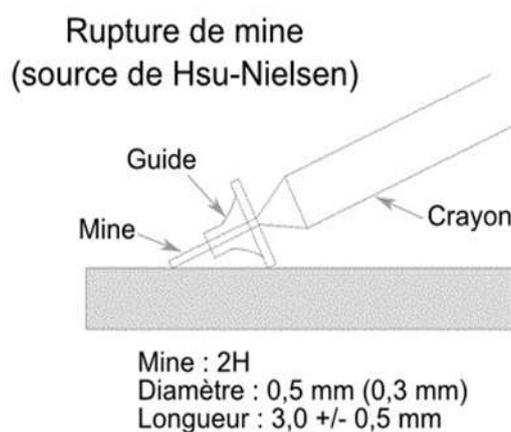
Figure III.3: Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites

6.2 Sources artificielles :

Les sources artificielles sont souvent exploitées pour l'évaluation des capteurs ou l'affirmation du montage lors d'expérimentations. Parmi les sources artificielles on trouve :

- la rupture d'une mine de crayon

- la rupture d'un capillaire en verre
- le jet de gaz
- le lâcher de bille
- le signal généré par un émetteur



[75]

Figure III.4: Schéma explicatif de la rupture d'une mine de crayon à la surface d'un échantillon.

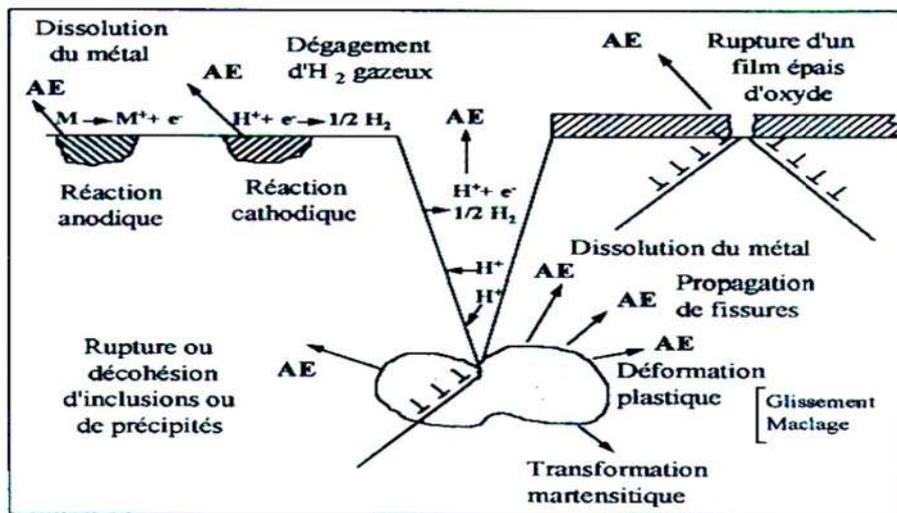
La rupture d'une mine de crayon est la plus utilisée. Le principe de cette source repose à casser à la surface d'un échantillon, une mine H2 dont le diamètre et la longueur sont normalisés (Figure III.4). A pour but :

- de générer un signal très énergétique pouvant être apparenté à un signal d'EA.
- pour vérifier le bon fonctionnement des capteurs d'EA aussi que leur couplage avec le matériau. Il permet ainsi de vérifier la bonne localisation des sources lorsque plusieurs capteurs sont présents.

6.3 Sources dues à la corrosion :

Il existe plusieurs types de corrosion :

- La corrosion généralisée : est caractérisée par une attaque de la surface du matériau par le milieu qui se fait sensiblement à la même vitesse en tout point de la surface.[76]
- La corrosion cavernueuse : et par piqure sont des corrosions localisées. [77]
- la corrosion sous contrainte : se manifeste par de la fissuration due à l'action conjuguée d'un milieu corrosif parfois peu agressif et d'une sollicitation mécanique.[78]



[79]

Figure III.5: Sources d'EA dues aux mécanismes de corrosion

La corrosion a été détectée presque dans la plupart des cas, par EA dans des matériaux métalliques (Fig.III.5).

Les signaux d'EA sont surtout générés par l'apparition ou la croissance de fissures convenable au phénomène de corrosion.

Dans certains cas, la formation de bulles d'hydrogène à la surface du matériau autorisé aussi d'expliquer l'origine des ondes. La rupture ou la décohésion de précipités ou d'inclusions peuvent aussi produire de l'EA.

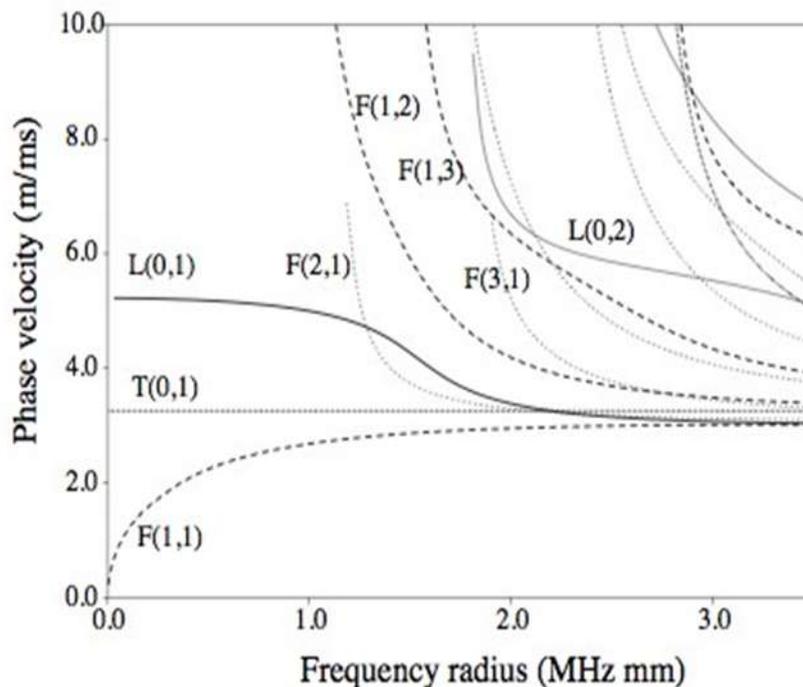
Certains travaux ont aussi évoqué un changement des contraintes en surface [80]. Le phénomène de corrosion peut aussi générer de l'EA dans les bétons armés, la corrosion des armatures métalliques entraîne leur gonflement et donc l'apparition de fissures à l'origine d'une EA dans le béton environnant.

7. Propagation de l'émission acoustique :

Dans le domaine de la corrosion des armatures en béton armé, ce qui nous intéresse est la propagation de l'EA dans les éléments structuraux en béton armé.

7.1 Propagation dans une poutre :

Les dimensions en épaisseur et latérale de la pièce dans une poutre sont de l'ordre de la longueur d'onde. Pareille ce milieu de propagation est dispersif et aussi les ondes se propagent sous la forme de modes (Figure III.6).



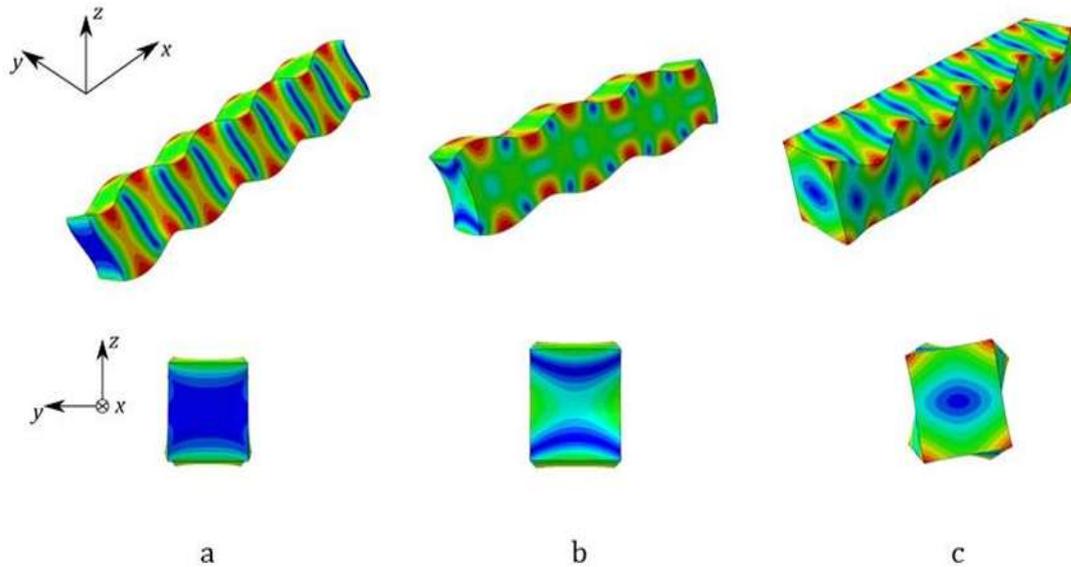
[81]

Figure III.6 : Courbes de dispersion des vitesses de phase dans un tube d'acier de section cylindrique immergé dans l'eau

Dans une poutre existe trois familles de modes sont distinguées:

- les modes de torsion ($T0,$)
- les modes longitudinaux ($L0,$)
- les modes de flexion ($Fm,$)

Les déplacements produits par les modes de chaque famille sont montrés sur la Figure III.7.



[82]

Figure III.7 : Modes de propagation des ondes guidées dans une poutre de section rectangulaire (3x3,7 mm). (a) mode de flexion F1,1. (b) mode longitudinal L0,1. (c) mode de torsion T0,1.

Les couleurs, allant du bleu (petit déplacement), au rouge (grand déplacement), représentent l'amplitude des déplacements.

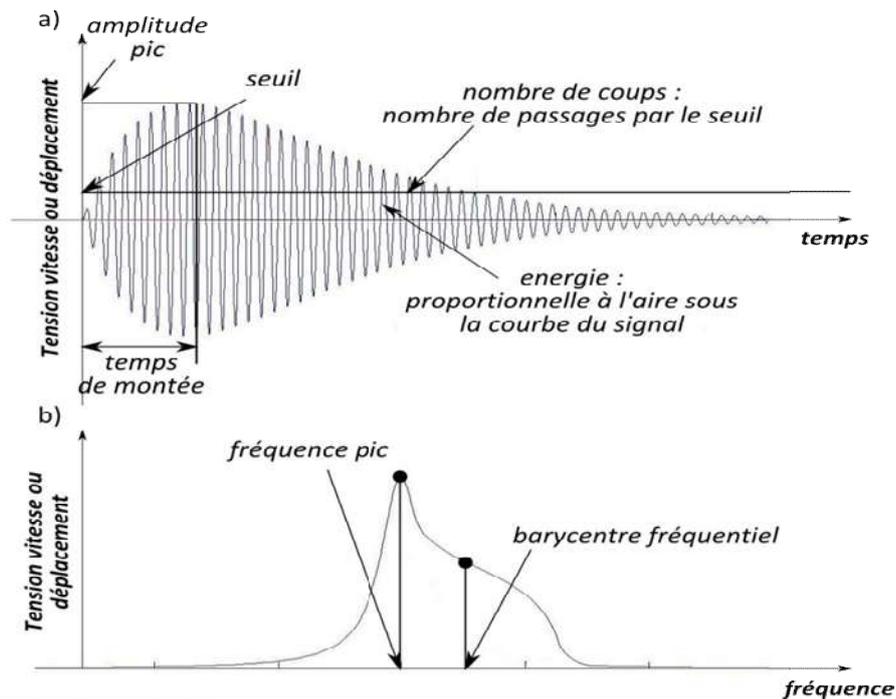
L'index m est appelé ordre circonférentiel, il spécifie l'ordre de symétrie de la déformation (engendrée par l'onde) par rapport à l'axe de la poutre. L'index n est utilisé pour différencier les modes d'une même famille.

Les déformations des modes symétriques dans une plaque et des modes longitudinaux dans une poutre sont similaires. De même, les déformations des modes antisymétriques dans une plaque et des modes de flexion dans une poutre sont similaires.[82]

7.2 Approche phénoménologique de l'émission acoustique :

L'objectif de cette analyse des signaux d'EA est d'associer un signal à un mécanisme source. En EA phénoménologique, la démarche d'identification des sources d'EA repose sur une hypothèse fondamentale: chaque signal d'EA enregistré possède des propriétés liées aux caractéristiques de la source l'ayant créé.

Des descripteurs (Figure III.8) sont calculés sur la forme temporelle et sur le spectre fréquentiel (calculé par transformée de Fourier) des signaux sont mesurés [82]



[82]

Figure III.8 : Descripteurs couramment utilisés en EA. (a) Descripteurs temporels. (b) Descripteurs fréquentiels.

Sur la base de la valeur de descripteur calculée, le signal dans le mécanisme source est assemblé. Il y'a deux démarches pour se faire, dans le contexte de l'étude de l'endommagement des matériaux:

- l'analyse mono-paramètre
- l'analyse statistique multi-paramètre.

7.3 Conception du guide d'onde :

Le guide d'onde construit pour les besoins d'étude de suivi par émission acoustique couplée à la thermogravimétrie de la corrosion d'alliages métalliques à haute température doit répondre à un certain nombre de critères.

Le résumé du guide d'onde est décrit ci-après:

- circulation des ondes élastiques
- Lors de la transmission des ondes une faible perte en énergie et en amplitude
- Préservation des formes des ondes d'émission acoustique
- Inertie chimique à l'opposition des atmosphères corrosives (réduction, carburation)
- Stabilité thermique à haute température
- Facile à obtenir et à moduler
 - La vitesse de propagation des ondes élastiques optimisée.
 - Application en un minimum de pièces pour minimiser le nombre d'interfaces entre l'échantillon et les capteurs d'émission acoustique et minimiser les pertes en énergie lors du passage des ondes d'une interface à l'autre.
 - Inertie chimique et thermique du guide d'onde ci-contre de l'atmosphère et des échantillons dans le domaine des hautes températures dessous des atmosphères corrosives.
 - Géométrie doit être compatible avec les dimensions internes des fours de la balance.
 - Amélioration de la surface de contact (entre le guide d'onde et les capteurs d'émission acoustique d'une part et entre l'échantillon (source d'émission acoustique) et le guide d'onde d'une autre part), a l'effet de récupérer la majorité des signaux d'EA. Aussi l'échantillon doit être maintenu et fixé sur le guide d'onde sans engendrer des contraintes importantes sur l'échantillon.
 - Infériorisation de la masse du guide d'onde pour ne pas perturber la mesure de masse.

8. Application de l'émission acoustique dans le béton armé : suivi de la corrosion

La technique d'émission acoustique (AE) a été utilisée dans plusieurs travaux de la littérature pour corrélérer les effets dus à la corrosion le long de la barre d'armature.

L'émission acoustique (EA) a été appliquée avec succès à la détection des dommages du béton. Un certain nombre d'études ont également montré que l'utilisation des techniques basées sur l'EA pour surveiller la corrosion des barres d'armature est faisable et efficace.

L'émission acoustique offre les caractéristiques dynamiques et en temps réel qui sont sensibles à défauts; elle peut détecter rapidement et avec précision l'énergie transitoire générée par les défauts internes du matériau et ainsi déterminer les emplacements des dommages.

Les appareils d'émission acoustique sont capables de surveiller les fissures induites par la corrosion en détectant l'énergie libérée dans le béton.

Jomdecha et al. [83] ont étudié différents types de corrosion par un système d'émission acoustique.

Jirarungsatian et al. [84] ont étudié les piqûres et la corrosion uniforme en utilisant la technologie d'émission acoustique.

Kawasaki et al. [85] ont mis en évidence la mécanique de la corrosion du béton armé par émission acoustique,

Calabrese et al. [86] ont identifié des mécanismes de corrosion en surveillant les émissions acoustiques sur une poutre en béton précontraint.

Elfergani et al. [87] ont évalué le niveau d'endommagement par corrosion du béton précontraint avec un analyseur d'émission acoustique,

Xu et al. [Xu, 2011] ont utilisé des émissions acoustiques pour étudier la corrosion par piqûres de l'acier inoxydable 304.

Elbatanouny et al. [88] ont évalué le béton précontraint par les émissions acoustiques,

Wu et al. [89] ont analysé les paramètres énergétiques d'émission acoustique de la corrosion par piqûres sur des aciers inoxydables 304.

Patil et al. [90] ont utilisé un appareil d'émission acoustique pour détecter la corrosion des dalles en béton armé en service.

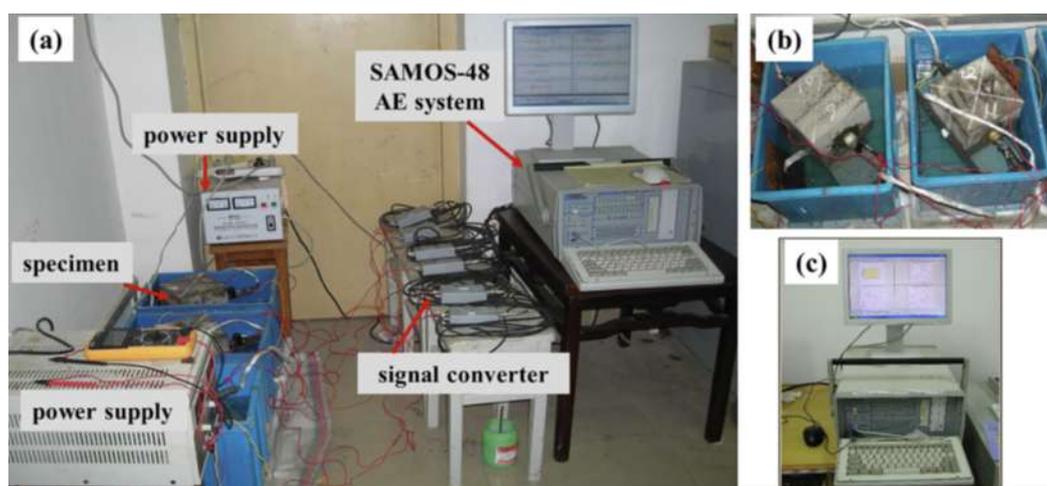
Janeliukstis et al. [91] ont également rapporté des décalages de fréquence de crête d'émission acoustique dans le béton précontraint des traverses de chemin de fer.

La technologie d'émission acoustique (EA) est utilisée pour détecter la corrosion des barres d'acier.

L'émission acoustique est le rayonnement d'ondes acoustiques dans un solide qui subit des changements irréversibles à la suite d'une déformation plastique ou de la formation de fissures.

Dans ce processus, à chaque source d'événement, l'énergie de contrainte localisée est rapidement libérée et se propage sous forme d'onde élastique. La détection d'émission acoustique permet de localiser la source de rayonnement et de surveiller les caractéristiques de la source telles que la croissance des fissures.

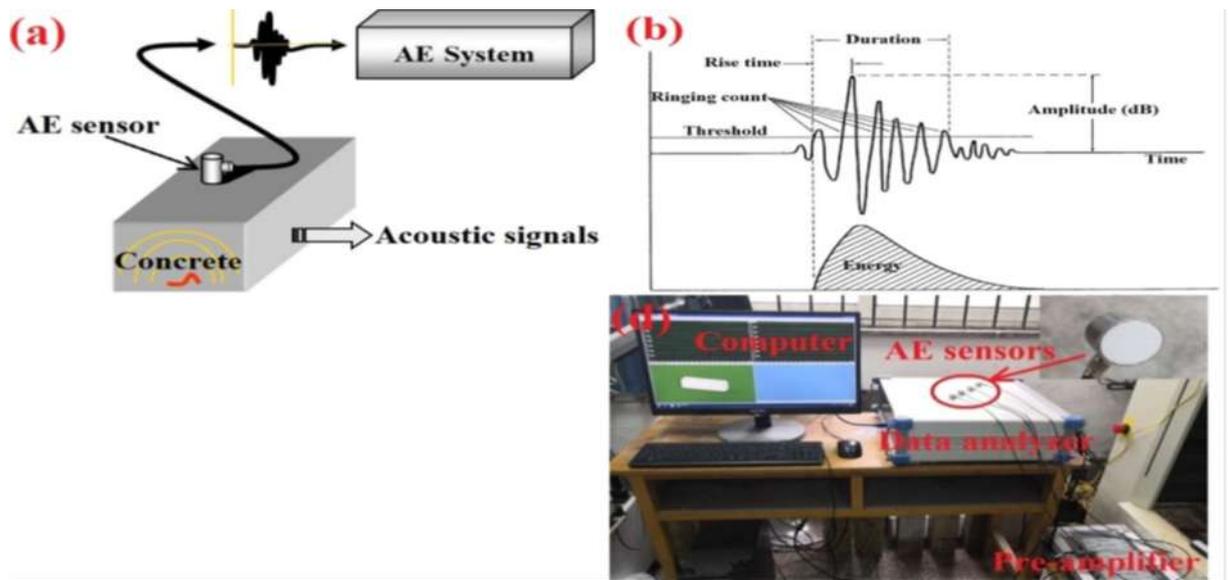
Ai-Ping et al [92] ont étudié les signaux d'EA par un système de test SAMOS-48 AE pendant la corrosion accélérée. Les capteurs AE ont été placés sur la rainure créée aux deux extrémités de la barre d'acier (Fig.III.9).



[92]

Figure III.9: (a) l'ensemble du dispositif expérimental ; (b) les échantillons soumis à l'essai de corrosion; (c) Système de test SAMOS-48 EA, intégré au système d'acquisition et d'analyse des données.

Ainsi, les résultats de cette étude ont montré l'apparition de fissures qui se produit tout au long du processus, de l'accumulation d'énergie à sa libération, et lorsque des fissures dans le béton sont initiées, les signaux acoustiques seront collectés par des capteurs AE, transférés à l'analyseur, puis affichés sur l'écran de l'ordinateur. Cependant, il existe toujours un débat sur le fait que la valeur seuil exacte est encore incertaine, qui est montré dans la Fig. III.10



[92]

Figure III.10: Principe de l'analyseur d'EA (a) Schéma de principe (b) Forme d'onde EA typique avec divers paramètres de signal (c) Différents modes de défaillance (d) Analyseur d'EA type DS5-16

La technique d'émission acoustique a été utilisée pour surveiller la corrosion dans une série d'essais de corrosion contrôlés et accélérés. Une forte corrélation entre le taux de corrosion et le nombre d'événements AE a été établie. [92]

D'après l'expérience réalisée comme mentionné ci-dessus, qui est un analyseur d'émission acoustique sous corrosion accélérée, les principales conclusions sont les suivantes :

- Les deux signaux des capteurs électromagnétiques et de l'analyseur d'émission acoustique indiquent que les étriers subissent une corrosion induite par le chlorure plus tôt que la barre renforcée longitudinale en raison de leur

emplacement, ce qui déclenchera plus rapidement des fissures induites par la corrosion.

- Un capteur électromagnétique a été développé pour surveiller les sources de corrosion sur la base d'une réponse électromagnétique et un appareil d'émission acoustique a été utilisé pour détecter respectivement les fissures provoquées par la corrosion. De plus, l'application combinée de ces deux appareils de surveillance différents peut évaluer l'ensemble du processus de corrosion.

Plusieurs facteurs favorisent l'intensité de l'EA [93]: résistance à la rupture élevée, grande vitesse de déformation, anisotropie de la structure, hétérogénéité, forte épaisseur, présence de défauts évolutifs, basses températures, matériaux fragiles...

Un inconvénient de la technique d'EA est le manque de reproductibilité à cause de la nature des signaux sources qui est due à la formation aléatoire et parfois soudaine de la fissure.

La nature des signaux étant dépendante des hétérogénéités, le béton hétérogène ne donne pas des résultats d'EA répétables;

Un second inconvénient est la présence de bruit dans le milieu environnant ; ce qui peut empêcher la détection des signaux acoustiques très faibles et rend difficile l'interprétation des résultats.

L'élimination et la réduction du bruit constitue une étape très importante et très difficile pour le bon traitement des données [94].

9. Analyse des signaux acoustiques :

Les systèmes d'acquisition disponibles ont tous la possibilité de collecter les données, soit sur une base paramétrique, soit sur la forme des signaux.

L'analyse peut être classée en deux catégories : qualitative et quantitative. L'analyse qualitative permet de suivre l'évolution de l'endommagement en fonction de l'évolution de l'activité acoustique avec le temps.

Parmi les analyses quantitatives, on peut trouver les analyses d'intensité de l'endommagement [95] qui permettent d'évaluer les signaux structuraux des d'EA enregistrées durant le processus d'endommagement sur l'intégrité de l'échantillon

étudié. Un autre critère d'analyse quantitative, basé sur l'effet Kaiser, est proposé par Ohtsu et al. [96] en calculant deux nouveaux paramètres d'EA : « Calm ratio » et « Load ratio ».

D'autres propositions comme l'analyse « b-value » et l'analyse statistique multi variables sont aussi très intéressantes. [94]

La nature de la source d'endommagement et le mode de fissuration peuvent être déterminés à partir des formes d'ondes détectées.

Cette technique est connue sous le nom d'analyse du tenseur des moments et montre bien la capacité quantitative de la technique d'EA. Les sources de l'activité acoustique sont fortement corrélées au mode de rupture.

10. Avantages et inconvénients de la technique d'émission acoustique :

Les avantages et les inconvénients de la technique d'émission acoustique se résument dans tableau 3.

Tableau 3: Avantages et inconvénients de la technique de l'EA

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• La possibilité de faire une évaluation globale de l'intégrité d'une structure;• La possibilité de vérifier des structures en service en minimisant l'interruption de production;• La rapidité du contrôle.• EA est adaptable sous diverses conditions environnementales sans imposer des infrastructures lourdes.• La mise en place reste moins cher (capteurs, chaîne d'acquisition).• Evaluer l'endommagement des matériaux opérant en temps in-situ.	<ul style="list-style-type: none">• Manque de reproductibilité à cause de la nature des signaux sources qui est due à la formation aléatoire et parfois soudaine de la fissure.• La présence de bruit dans le milieu environnant; ce qui peut empêcher la détection des signaux acoustiques très faibles et rend difficile l'interprétation des résultats.

11. Conclusion :

Dans le présent chapitre, nous avons exposé les différentes applications de l'émission acoustique pour constater en temps réel la déformation, la dégradation et la détérioration des ouvrages en béton armé sous les conditions de l'environnement.

L'endommagement dû à la corrosion et les divers phénomènes associés peuvent toutefois être détectés, comme la dislocation, la micro fissuration, la décohésion, le délaminage, la rupture, et autres transformations diverses et variées.

La mise en place d'un pilote d'onde est plus que nécessaire, afin de détecter tout signal et de préserver les capteurs des charges électriques.

Les signaux émis par son ou vibration, au niveau des échantillons sont transmis convenablement et optimisent au maximum la vitesse d'avancement et de propagation des ondes dans le matériau.

Cette technique mise au point présente en outre plusieurs avantages liés à la détection des phénomènes de corrosion affectant les barres d'armatures dans les structures en béton armé.

Conclusion générale

L'approximation de la corrosion est une étape fondamentale dans la protection des armatures des ouvrages en béton armé; ainsi, diverses études ont été menées afin d'assimiler les mécanismes d'inhibition de la corrosion, et en outre de protection contre la corrosion afin d'atténuer ce problème.

Le but principal de notre travail est d'exposer les principales méthodes utilisées pour détecter ou évaluer la corrosion et les processus utilisés pour protéger les armatures enrobées dans le béton de façon simple et évidente.

D'abord, nous avons présenté le problème de la corrosion et ses principales causes, tels que : la carbonatation du béton d'enrobage au contact du CO₂ atmosphérique et la pénétration des chlorures du milieu environnant

Ensuite, nous avons exposé les différentes techniques d'évaluation de la corrosion des armatures, parmi celles, les méthodes non destructives qui sont d'une importance majeure afin de détecter le déclenchement de la corrosion, car dans cette étape les dégradations ne sont pas visibles, par conséquent, la prévention demeure une alternative intéressante afin d'éviter des coûts supplémentaires de réparation.

La méthode la plus répandue vue sa simplicité, étant la surveillance du potentiel autour des armatures. D'autres méthodes sont aussi abordées tel que : les mesures du potentiel de corrosion, aussi, les méthodes électromagnétique, les méthodes de détection optique, les méthodes d'impulsion galvanostatique, et les mesures du bruit électrochimique, et d'autres méthodes déjà présentées.

D'autres méthodes d'évaluation de la corrosion habituellement utilisées à citer, les méthodes gravimétriques (perte de masse) et électrochimiques ont été présentées dans cette partie.

Nous avons exposé les différentes applications de la technique de l'émission acoustique dans le cadre de la détection des fissures et endommagements des structures en béton armé.

L'objectif de la présente étude est de montrer l'intérêt de la technique de l'EA pour la détection de la propagation des fissures dues à la corrosion des armatures, cette méthode non destructive a été exploitée par plusieurs chercheurs pour la détection de la corrosion et le suivi de l'état des structures en béton armé bien que cette méthode a

été déjà adaptée dans le cadre de l'auscultation des structures en béton armé, à citer : la propagation de la fissuration des ouvrages afin d'évaluer un grand nombre de dégradations affectant les matériaux et structures, la déformation plastique, l'évolution de la Corrosion des armatures.

En outre, bien que cette technique présente l'avantage de donner des informations directes in situ sur l'état des structures en béton armé, plusieurs inconvénients sont signalés comme le manque de reproductibilité à cause de la nature des signaux sources qui est due à la formation aléatoire et parfois soudaine de la fissure. Aussi, la présence de bruit dans le milieu environnant ; ce qui peut empêcher la détection des signaux acoustiques.

La technique de l'émission acoustique présente une bonne alternative pour détecter l'état des structures en béton armé et quantifier le taux d'endommagement afin d'agir à temps.

Cette technique appliquée in situ fait l'objet de plusieurs recherches afin de développer d'autres méthodes plus performantes dans le but d'atténuer les dégâts dus à la corrosion.

Références Bibliographiques

Code	Référence
[1]	[www.strres.org]
[2]	H Abdoul-Anziz, P Seppecher, Mathematics and mechanics of complex systems 6 (3), 213-250, 2018
[3]	DIVET Loic, Mécanismes d'altération des bétons armés et protection par systèmes de peinture, Rencontres de la peinture anticorrosion – 2015
[4]	DIVET Loic, Jérémy COLAS, Thierry CHAUSSADENT, Stéphane LAVAUD, Béatrice DESRUES, Perspectives de valorisation de granulats riches en sulfates dans les bétons, IFSTTAR – Champs sur Marne, 2015
[5]	[www.qualiteconstruction.com]
[6]	[www.guidebeton.com]
[7]	Hassoune M., Amorçage de la corrosion des armatures dans le béton exposé au milieu marin : Prédiction et prévention par inhibition, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2018
[8]	Joceline J. (Setra), Taché G. (CEBTP), Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, 2008, AFGC, Paris, p. 107, 2003
[9]	[www.construirelwallonie.be]
[10]	[www.technichem.be]
[11]	[www.fr.made-in-china.com]
[12]	[www.batiactu.com]
[13]	[www.cla.vidal.free.fr]
[14]	cla.vidal, "Moyens de protection contre la corrosion". cla.vidal.free.fr/protec%20corros.htm; (2014)
[15]	ISO 13174:2012 Protection cathodique des installations portuaires
[16]	Christodoulou et al [68] ([68]CHRISTODOULOU, C., GOODIER, C.I. and AUSTIN, S.A., 2014. Site performance of galvanic anodes in concrete repairs. IN:

	Grantham, M, et al (eds). Concrete Solutions 2014
[17]	Schaschl E., “NACE Corrosion Inhibitors”, USA, National Association of Corrosion Engineers, (1973) 28.
[18]	[TIB374DUO, no ref. article : cor1005, juill. 1990.]
[19]	[Fiaud C., Lemaitre C., Pebere N., Inhibiteurs de corrosion In : G. Beranger, H. Mazille, Corrosion et anticorrosion (pratique industrielle), Mécanique et ingénierie des matériaux, Lavoisier, Paris, Hermès, Sciences publications, (2002)]
[20]	Bommersbach P., Alemany-Dumont C., Millet J. P., Normand B., “Formation and behaviour study of an environment-friendly corrosion inhibitor by electrochemical methods,” <i>ElectrochimicaActa</i> , (2005), vol. 51, no. 6, pp. 1076–1084.
[21]	Kashyap A., Effects of water chemistry, temperature, gaseous cavitation & phosphate inhibitors on concrete corrosion, Master en Science, 2008, Virginia, USA.
[22]	Virmanj P., Clemena G. G., Corrosion protection concrete bridges, Rapport N° FHWA- RD-98.088, (1998), FederalHighway Administration publications research, p.72.
[23]	Baboian R., Corrosion Tests and Standards ASTM, Philadelphia, 1995
[24]	Joceline J. (Setra), Taché G. (CEBTP), Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, 2008, AFGC, Paris, p. 107
[25]	A. S. Abdulrahman, M. Ismail, et M. S. Hussain, « Corrosion inhibitors for steelreinforcement in concrete: A review », <i>ScientificResearch and Essays</i> , vol. 6, no 20, p. 41524162, 2011
[26]	Taché, G. (4, avril 2017). Le béton : la pollution par les chlorures. Consulté le 17 Aout , 2020, sur Le STRRES: http://www.strres.org/le_beton_la_pollution_par_les_chlorures-253fr.php
[27]	Mai-Nhu, J. (2015). Corrosion des armatures : intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi durant la vie de l'ouvrage. CERIB : études et recherches.
[28]	Cheriyedath, S. (s.d.). Electrochemicalanalysis. Consulté le 07 22, 2020, sur News Medical : lifesciences.
[29]	RILEM TC 116-PCD (1999) Permeability of Concrete as a Criterion of ItsDurability. <i>Materials and Structure</i> , 32, 163 -173.
[30]	IFSTTAR programme de recherche, 2018

[31]	[www.geocities.ws]
[32]	Mellouk Brahim et Oussama Belleabdeli Utilisation du corrosimètre Canin+ pour déterminer le potentiel de corrosion dans les structures en béton armées, 2017
[35]	[www.metrohm.com]
[39]	HR Marsden, L Gabrielli, A Kros, Rapid preparation of polymersomes by a water addition/solvent evaporation method , Polymer Chemistry 1 (9), 1512-1518
[37]	[www.impulseradargpr.com]
[38]	Zaki, A., Chai, H. K., Aggelis, D. G., & Alver, N. (2015). "Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique". (V. M. Passaro, Éd.) Sensors
[39]	[www.usinenouvelle.com]
[40]	Liang, M. T., & Su, P. J. (2001). Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using impact-echo method. Cement and Concrete Research, 31
[41]	Šamárková, k., Chobola, Z., & Štefková, D. (s.d.). The corrosion status of reinforced concrete structure monitoring by impact-echo method. Advanced Materials Research, 2014
[42]	[Abdelli F et Abdelli H Méthodes d'évaluation de la corrosion Analyse chronologique, Mémoire de Master en Génie civil, Université Aboubekr Belkaid , Tlemcen, 2020
[43]	[www.bil-ibs.be/fr]
[44]	Ghods P., Isgor O. B., Mcrae B., T. Millar, The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement, cement and concrete composites, Ed. Elsevier, 31 (2009), 2-11.
[45]	Sail L, ETUDE DE LA PERFORMANCE D'INHIBITEURS DE CORROSION A BASE DE PHOSPHATE POUR LES CONSTRUCTIONS EN BETON ARME, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2013
[46]	DOUIDI O & BRIXI GORMAT M « Application du thiocyanate de potassium dans l'inhibition de la corrosion des armatures dans le béton, Mémoire de MASTER en Génie Civil , 2019
[47]	Cheriyedath, S. (2018). How Does Ion Exchange Chromatography Work? Consulté le juillet 23, 2020, sur News medical: https://www.news-medical.net/life-sciences/How-Does-Ion-Exchange-Chromatography-Work.aspx
[48]	[www.jfetec.com]

[49]	Mercer A.D., Testing techniques in corrosion inhibition, 6ème Symposium européen sur les inhibiteurs de corrosion, Ferrare, Italie, (1985), p. 729.
[50]	Zendaoui A., Caractérisation de deux états structuraux d'anodes réactives à base de zinc et d'aluminium, thèse de Magister, Juin, (2005), Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 14-48.
[51]	Trejo D., Halmen C., Reinschmidt K., Corrosion performance tests for reinforcing steel in concrete: Technical report, Rapport 0-4825-1, (2009), Université de Texas, USA.
[52]	Mekkidaouadji M., Les techniques de mesure de la vitesse de corrosion, Séminaire, Ecole d'ingénieurs de Boumerdès, Dépt. Chimie et Environnement, IAP, 20-24 mars, (2004), p. 11
[53]	Bard A. J., Faulkner L.R., Electrochimie, principe, méthodes et applications, Edition Masson, Paris, (1983), 239-24.
[54]	Beldjilali F., Essais sur l'inhibition de corrosion de l'acier XC 38 en milieu acide HClO4 1M, Projet de Fin d'études en chimie et génie des procédés, (2005), Université de Tlemcen, Algérie.
[55]	Rolando Tremont J., Blasini D. R., Cabrera C.R., Controlled self-assembly of mercapto and silane terminated molecules at Cu surfaces, Journal of Electroanalytical Chemistry, 556 (2003), 147-158
[56]	Torbiero B.O., Développement de microcapteurs électrochimiques pour l'analyse en phase liquide, Thèse de Doctorat, (2006), Toulouse, France.
[57]	D. Gabrielli, G. Jona-Lasinio, and C. Landim, Onsager Reciprocity Relations without Microscopic Reversibility, Phys. Rev. Lett. 77, 1202, 1996
[58]	D. Lockner, «The role of acoustic emission in the study of rock fracture,» International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, pp. 883-899, 1993..
[59]	J. Capelle, «Thèse (Étude de la nocivité d'un défaut de type éraflure sur une conduite destinée au transport de gaz naturel soumise à une pression d'hydrogène),» Metz, 2008
[60]	American Society for Nondestructive Testing, 2005
[61]	Kaiser, Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, Thèse de Doctorat, Technische Universität München, Allemagne, 1950.
[62]	C. A. Tatro, «Sonic technique in the detection of crystal slip in metal,» Engineering

	Research, vol. 1, pp. 23-28, 1957
[63]	H. L. Dunegan, «Acoustic Emission: A Promising Technique, UCID-4643,» Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA, 1963.
[64]	K. Máthis et F. Chmelík, «Exploring Plastic Deformation of Metallic Materials by the Acoustic Emission Technique,» InTech, 2012..
[65]	R. TOUYA, «Contrôle non destructif par émission acoustique,» Directions des Recherches Etudes et Techniques, 1979
[66]	F. Grosjean, J. Kittel, F. Ropital, E. Serris et V. Peres, «Coupling of thermogravimetric and acoustic emission technics for high temperature corrosion studies,» Spectra Analyse, vol. 279, pp. 35-44, 2011
[67]	Al hadj O, Apports de l'émission acoustique couplée à la thermogravimétrie pour l'étude de la corrosion à haute température des métaux et alliages, Thèse de Doctorat, Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2015. France
[68]	G. Michlmayr, D. Cohen et D. Or, «Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media — A review,» Earth-Science Reviews, vol. 112, pp. 97-114, 2012.
[69]	S. Frydman et A. Pszonka, «Acoustic emission of two phase brass,» Materials Science and Engineering, vol. 40, pp. 191-196, 1979.
[70]	M. Walter, M. Schütze et A. Rahmel, «Behavior of oxide scales on alloy 800 H and HK 40 during thermal cycling,» Oxidation of Metals , vol. 40, pp. 37-63, 1993
[71]	L. Gaillet, S. Benmedakhne, A. Laksimi et G. Moulin, «Nickel high temperature oxydation under creep loading using acoustic emission monitoring,» Journal of Materials Science, vol. 38, pp. 1479- 1484, 2003
[72]] P. D. Rouby, P. Fleischmann, and C. Duvergier, "Un modèle de sources d'émission acoustique pour l'analyse de l'émission continue et de l'émission par salves I. Analyse théorique," Philosophical Magazine B, vol. 47, pp. 671-687, 1983
[73]	F. Thummen, "Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires," Thèse de doctorat, Matériaux, INSA de Lyon, Villeurbanne, 2004.
[74]	M. G. R. Sause and S. Horn, "Simulation of Acoustic Emission in Planar Carbon Fiber Reinforced Plastic Specimens," Journal of Nondestructive Evaluation, vol. 29, pp. 123-142, Jun 2010
[75]	[www.ndt.net]

[76]	L. Jaubert, "Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables: utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques," Thèse de doctorat, Matériaux, INSA de Lyon, Villeurbanne, 2004.
[77]	Y.P.Kim, "Etude de la corrosion caverneuse d'un acier inoxydable austénitique: utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques," Thèse de doctorat, Matériaux, INSA de Lyon, Villeurbanne, 2003.
[78]	D. Caron, "Influence de l'hydrogène sur la vitesse de propagation des fissures de corrosion sous contrainte dans l'alliage 600 en milieu primaire de réacteurs nucléaires à eau sous pression," Thèse de doctorat, Matériaux, INSA de Lyon, Villeurbanne, 2000.
[79]	S. Yuyama, "Fundamental aspects of acoustic emission applications to the problems caused by corrosion," Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Non-Destructive Testing and Electrochemical Methods, pp. 43-74, 1986.
[80]	Y.-P. Kim, "Etude de la corrosion caverneuse d'un acier inoxydable austénitique: utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques," Thèse de doctorat, Matériaux, INSA de Lyon, Villeurbanne, 2003.
[81]	M. Silk and K. Bainton, "The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves," Ultrasonics, vol. 17, pp. 11-19, 1979
[82]	Le Gall, Jean-François. Free Preview ... (2016). Brownian Motion and Stochastic Calculus. Karatzas, I. (et al.) (1998).
[83]	AE techniques have also been used (e.g. by Jomdecha et al. ... In 2007, Jomdecha, studied several types of reinforcement corrosion in concrete
[84]	January 2010; Corrosion Science 52(1):187-197 ... Authors: Chalermkiat Jirarungsatian at King Mongkut's University of Technology Thonburi.
[85]	Kawasaki, Yuma, Wakuda, Tomoyo, Koburai, Tomoe, Ohtsu, Masayasu, Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission, Construction and Building Materials, 2013 / 11 Vol. 48,2013]
[86]	J Calabrese, A Chater, H Chatterjee, International journal of nursing studies 50 (3), 392- 403, 2013.
[87]	HA Elfergani, R Pullin, KM Holford. Construction and Building Materials 40, 925-933, 2013. 120, 2013. Acoustic emission analysis of prestressed concrete
[88]	Batanouny et al. 2014; Vélez et al. 2015). The idea of this filter is based on the assumption that real AE signals

[89]	Wu, A New Approach for Online Monitoring of Additive Manufacturing Based on Acoustic Emission, Conference: ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2016
[90]	G Patil, GB Dhanakshirur, MR Aithala, G Naregal, KK Das ... 21, 2017. Heart-type fatty acid-binding protein, in early detection of acute myocardial
[91]	R Janeliukstis, S Kaewunruen ... International Journal of Structural Stability and Dynamics 19 (01), 1940001, 2019
[92]	Ai Ping Teoh et; Yen Shi Tan ...plus d'informations ... Couverture de Volume 21, numéro 4, novembre 2020, p. 1-322 ... Al-Gahtani, S. S. (2016).
[93]	Grosse, C. and Ohtsu, M. (2008) Acoustic Emission Testing Basics for Research—Applications in Civil Engineering. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
[94]	Jacqueline Saliba 1. Détails. 1 GeM - Institut ... Vignette du document · THESE-SALIBA.pdf ... Matériaux. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012. Français.
[95]	Nair et al., 2006. In: The Medicago truncatula handbook. Mathesius U, Journet EP, Sumner LW (eds). ISBN 0-9754303-1-9.
[96]	M. Ohtsu and K. Ono, "AE source location and orientation determination of tensile cracks from surface observation," NDT International, vol. 21, pp. 143-150, 1988