



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 العربي التبسي - تبسة  
Université Larbi tébessi- Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'optention du diplôme de master  
Option: structures

**Influence de taux de corrosion sur le comportement  
des structures en béton armé**

**Réalisé par :**  
Naili hamza

**Promotion: 2019/2020**

Présenté et soutenu le 15/06/2020 devant le Jury, composé de :

**Président:** Harkati el Hadi  
**Rapporteur:** Abdelouahab Boudjellal  
**Examineurs:** Ghoudjil Fayçal

## **Remerciement**

*D'abord et avant tout, Alhamdulillah. Nous remercions, en premier lieu, notre dieu qui a bien voulu nous donner la force, la santé et la connaissance pour effectuer le présent travail.*

*Je tient à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, l'enseignant Abdelouahab Boudjellal qui me garder par leur connaissances, leur attention, leur soutien continu et leur encouragement tout au long de cette travail*

*Mes remerciement aux membres de jury et à son président avec qui nous allons soutenir ce mémoire et juger de sa qualité.*

*Enfin, je remercie mes collègues du département de génie civil, université de Tebessa pour leur aide et leur encouragement.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chères parents qui m'ont soutenu moralement, qui ont toujours cru en moi et mes études et tous mes succès et je ne rendrais jamais assez.*

*Mes chers frères et belle sœurs.*

*Tous mes amis*

*Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.*

*Toute la promotion génie civil (2019/2020).*

## Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>01</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>06</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>10</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>11</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>13</b>
<b>CHAPITRE I: Aspect bibliographiques sur la corrosion des armatures dans le béton</b>	
I-1: Introduction .....	18
I-2: Le phénomène de corrosion dans le béton armé .....	19
I-3: Le processus de base de la corrosion des aciers dans le béton .....	20
I-4: Amorçage et propagation de la corrosion .....	23
I-5: Amorçage de la corrosion par la pénétration des ions chlorures .....	24
I-5-1: Introduction .....	24
I-5-2: Les réactions physico-chimiques .....	25
I-5-3: Les facteurs influant sur la corrosion par pénétration des ions chlorures.....	26
I-5-3-1: Le rapport E/c .....	26
I-5-3-2: Enrobage .....	26
I-5-3-3: La nature de ciment .....	26
I-5-3-4: Degré de saturation.....	26
I-5-3-5: La température .....	27
I-6: Amorçage de la corrosion par la carbonatation du béton .....	27
I-6-1: Introduction .....	27
I-6-2: Les réactions physico-chimiques .....	28
I-6-3: Les facteurs influant sur la vitesse de la carbonatation du béton .....	29

I-6-3-1: L'humidité .....	29
I-6-3-2: La température .....	30
I-6-3-3: La concentration de dioxyde e carbone .....	30
I-6-3-4: Le dosage de ciment .....	31
I-6-3-5: Le rapport E/C .....	31
I-6-3-6: La résistance à la compression .....	31
I-6-4: Les conséquences de la carbonatation .....	31
I-7: Les conséquences de la corrosion et le lien avec les structures .....	32
I-8: Conclusion .....	33
<b>CHAPITRE II: Méthodes de diagnostic et de réparation des structures dégradées par la corrosion .....</b>	<b>34</b>
II-1: Introduction .....	35
II-2: Techniques d'investigation relatives à la corrosion des armatures .....	36
II-2-1: Visite préliminaire .....	36
II-2-2: Mesure de l'enrobage du béton .....	36
II-2-3: Evaluation de la corrosion dans le béton .....	37
II-2-3-1: Le principe de mesure du potentiel de corrosion des armatures .....	37
II-3: Mesure relative à la qualité du béton .....	38
II-3-1: Détermination de la profondeur de carbonatation .....	38
II-3-2: Mesure de la résistivité .....	39
II-3-2-1: Techniques de la mesure se résistivité de béton .....	40
II-3-2-1-1: Mesure par transparence .....	40
II-3-2-1-2: Mesure sur site .....	41

II-4: Méthodes de mesure de la corrosion des armatures dans le béton .....	42
II-4-1: Méthodes électromagnétiques .....	42
II-4-1-1: le radar .....	42
II-4-1-2: le pachomètre .....	43
II-4-2: Les méthodes nucléaires .....	43
II-4-2-1: le radiomètre .....	43
II-5: Les méthodes de réparation des structures en béton armé .....	44
II-5-1: Réparation traditionnelle .....	44
II-5-2: Traitement électrochimique .....	46
II-5-2-1: Protection cathodique .....	46
II-5-2-2: Protection galvanique .....	47
II-5-2-3: dé chloruration .....	48
II-5-2-4: Ré-alkalinisation .....	49
II-6: Inhibiteur de la corrosion .....	49
II-7: L'ensemble des principes et méthodes de réparation conformément à la norme EN 1504-09 .....	51
II-7-1: Définition de la norme EN 1504-09 .....	51
II-7-2: Les principes dans la norme EN 1504-09 .....	51
II-8: Conclusion .....	59
<b>CHAPITRE III: Aspects phénoménologique de comportement de l'interface Acier/béton</b>	
III-1: Introduction .....	61
III-2: Aspect phénoménologique du comportement de l'interface en absence de la corrosion .....	62
III-2-1: Description générale .....	62

III-2-2: Les différentes modes de ruine .....	63
III-2-3: Les facteurs influençant sur le comportement de l'interface Acier/béton .....	64
III-2-3-1: Les facteurs principaux .....	64
III-2-3-2: Les facteurs secondaires .....	65
III-3: Aspect phénoménologique du comportement du l'interface en présence de la corrosion .....	66
III-3-1: L'effet de la corrosion des armatures sur leur adhérence .....	66
III-3-2: Les facteurs influençant sur le comportement d'interface en présence de la corrosion .....	67
III-3-2-1: Les facteurs principaux .....	67
III-4: Présentation des essais d'adhérence pour identifie les paramètres d'interface Acier/béton .....	68
III-4-1: Présentation de l'essai d'arrachement .....	68
III-4-2: Présentation de l'essai tirant .....	70
III-4-3: Présentation de l'essai de flexion .....	70
III-5: Lois de comportement adoptées .....	71
III-5-1: le comportement du béton .....	71
III-5-1-1: Modèles isotropes .....	71
III-5-1-2: Modèles anisotropes .....	74
III-5-2: le comportement de l'acier soumis à la corrosion .....	74
III-5-2-1: Modèle de plasticité couplé avec l'endommagement .....	74
III-5-3: Récapitulatif des modèles d'interface Acier/béton.....	76
III-6: Conclusion .....	77

## **CHAPITRE IV: Modélisation de l'influence du taux de corrosion sur le comportement**

IV-1: Introduction .....	79
IV-2: Généralité .....	80
IV-3: Modélisation de la liaison .....	80
IV-3-1: Comportement du béton .....	83
IV-3-1-1: Comportement de béton a la compression.....	84
IV-3-1-2: Comportement de béton a la traction .....	85
IV-3-2: Comportement d'acier .....	85
IV-3-3: Conditions aux limite et chargement .....	86
IV-3-4: Paramètres d'endommagement par compression et traction .....	87
IV-3-5: Validation d'une poutre a la flexion .....	88
IV-3-5-1: Description du modèle (poutre non corrodée) .....	88
IV-3-5-2: Description du modèle (poutre corrodée).....	89
IV-4: Etude paramétrique .....	94
IV-4-1: Effet de degré de corrosion .....	94
IV-4-1-1: Effet de corrosion sur le comportement des barres de compression.....	94
IV-4-1-2: Effet de corrosion sur le comportement des barres de traction...	96
IV-4-2: L'effet de la résistance de béton .....	98
IV-4-3: L'effet de diamètre de barre corrodée et l'épaisseur de béton .....	99
IV-4-4: L'effet de la région de la corrosion .....	101
IV-5: Conclusion .....	103
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>105</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>107</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure (I-1):</b> Représentation des processus de la corrosion .....	20
<b>Figure (I-2):</b> Diagramme simplifié de Pourbaix pour le système Fe-H <sub>2</sub> O à 25°C.....	21
<b>Figure (I-3):</b> Diagramme d'amorçage et propagation de corrosion par le temps.....	23
<b>Figure (I-4):</b> Représentation de processus de la corrosion par piqûre des ions chlorure.....	25
<b>Figure (I-5):</b> Mécanisme de carbonatation du béton.....	28
<b>Figure (I-6):</b> Influence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation.....	29
<b>Figure (II-1) :</b> principe de mesure potentiel de corrosion des armatures.....	37
<b>Figure (II-2) :</b> Mesure de la corrosion par potentiel d'électrode.....	38
<b>Figure (II -3) :</b> Schéma de coloration du béton. ....	39
<b>Figure (II-4) :</b> Illustration du principe de la mesure de résistivité.....	39
<b>Figure (II-5) :</b> Schéma de mesure de résistivité par transparence en laboratoire.....	40
<b>Figure (II-6) :</b> Principe de la mesure de la résistivité du béton d'enrobage.....	41
<b>Figure (II-7):</b> Principe simplifié de la mesure de résistivité par sondes noyées.	41
<b>Figure (II-8):</b> Mesure de résistivité avec dispositif bipolaire (a) et quadripolaire de type Wenner (b).....	42
<b>Figure (II-9) :</b> Application de technique du béton projeté sur les surfaces dégradées par la corrosion.....	44
<b>Figure (II-10):</b> projection par voie humide.....	45

<b>Figure (II-11):</b> projection par voie sèche.....	45
<b>Figure (II-12):</b> Schéma d'une protection cathodique galvanique.....	47
<b>Figure (II-13):</b> Protection cathodique par courant imposé. ....	47
<b>Figure (II-14):</b> Réactions de principe impliquées dans l'extraction de chlorure.....	48
<b>Figure (II-15):</b> Application des inhibiteurs.....	50
<b>Figure (II-16):</b> Catégories des inhibiteurs de corrosion.....	50
<b>Figure (II-17):</b> Revêtement de la surface.....	52
<b>Figure (II-18):</b> Colmatage des fissures.....	52
<b>Figure (II-19):</b> Transformation des fissures en joint.....	52
<b>Figure (II-20):</b> Erection des panneaux externe.....	52
<b>Figure (II-21):</b> Application des membranes.....	53
<b>Figure (II-22):</b> Application de revêtement.....	53
<b>Figure (II-23):</b> Traitement hydrophobe.....	53
<b>Figure (II-24):</b> Application manuelle du mortier.....	54
<b>Figure (II-25):</b> Nouveau béton ou mortier.....	54
<b>Figure (II-26):</b> Ajout ou remplacement des barres incorporées ou externes....	55
<b>Figure (II-27):</b> Collage des plaques.....	55
<b>Figure (II-28):</b> Injection des fissures.....	55
<b>Figure (II-29) :</b> Ajout de mortier ou de béton.....	55
<b>Figure (II-30):</b> Revêtement. ....	55
<b>Figure (II-31):</b> Ajout de béton.....	55
<b>Figure (II-32):</b> Imprégnation.....	56

<b>Figure (II-33):</b> Ajout de produit chimique.....	56
<b>Figure (II-34):</b> Augmentation de l'enrobage par mortier ou béton additionnel.	56
<b>Figure (II-35):</b> Remplacement de béton carbonaté.....	56
<b>Figure (II-36):</b> Systèmes d'étanchéité pour éviter la pénétration d'eau.....	57
<b>Figure (II-37) :</b> Limitation de la teneur en oxygène (au niveau de la cathode) par (Saturation, ou par revêtement de surface).....	57
<b>Figure (II-38):</b> Application d'un potentiel électrique.....	58
<b>Figure (II-39) :</b> Application d'inhibiteurs de corrosion dans ou sur le béton....	58
<b>Figure (III-1):</b> influence de la corrosion sur le comportement des structures en béton armé.....	62
<b>Figure (III-2) :</b> types de fissures développées lors de la corrosion des aciers...	66
<b>Figure (III-3):</b> Principe de l'essai d'arrachement.....	69
<b>Figure (III-4):</b> Modèle de comportement en dommageable de Mazars.....	73
<b>Figure (IV-1):</b> Diagramme de contrainte-déformation pour la compression uni axiale.....	84
<b>Figure (IV-2):</b> Courbe contrainte – déformation de béton à la traction.....	85
<b>Figure (IV-3):</b> Relation bi-linéaire contrainte-déformation pour l'acier.....	86
<b>Figure (IV-4):</b> comportement du béton sous traction uni axiale (a) et compression uni axiale (b).....	87
<b>Figure (IV-5):</b> schéma représentative de la poutre non corrodée (dimensions en mm).....	88
<b>Figure (IV-6):</b> Exemple du modèle 3D pour la poutre dans ABAQUS.....	89
<b>Figure (IV-7):</b> schéma représentative d'une poutre corrodée.....	90
<b>Figure (IV-8):</b> Evaluation de $K(x/r)$ en fonction de $x/r$ (Lundgren 2007).....	93

<b>Figure (IV-9):</b> schéma représentative de zone de corrosion dans les barres de compression.....	94
<b>Figure (IV-10):</b> Courbe force-déplacement de la poutre corrodée- barres supérieures uniquement.....	95
<b>Figure(IV-11):</b> schéma représentative de zone de corrosion dans les barres de traction.....	96
<b>Figure (IV-12):</b> Fissuration de la zone tendue de poutre non corrodée.....	96
<b>Figure (IV-13):</b> Fissuration de la zone tendue de poutre corrodée (25% de corrosion).....	97
<b>Figure (IV-14):</b> Fissuration de la zone tendue de poutre corrodée (50% de corrosion).....	97
<b>Figure (IV-15):</b> Courbe force-déplacement de la poutre corrodée- barres inférieures uniquement.....	97
<b>Figure (IV-16):</b> Comparaison de la charge ultime pour des échantillons avec différentes résistances à la compression du béton.....	99
<b>Figure (IV-17):</b> Comparaison de la charge ultime pour des échantillons avec différentes valeurs de rapport C/D.....	100
<b>Figure (IV-18):</b> modèles des poutres avec divers régions de corrosion.....	101
<b>Figure (IV-19):</b> Courbe force-flèche pour des poutres avec différentes région de corrosion.....	102

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau II -1:</b> Gamme de résistivité électrique de différents bétons [23].....	40
<b>Tableau (IV-1):</b> paramètres d'endommagement plastique de béton.....	83
<b>Tableau (IV-2):</b> propriétés mécanique de béton.....	98
<b>Tableau (IV-3):</b> Les valeurs de C/D pour les échantillons.....	100

## **Résumé:**

La corrosion des armatures dans les structures en béton armé est une des pathologies qui altèrent les performances de ces structures. Elle entraîne des coûts pour la maintenance et la réparation de cette structure. Les différentes mécaniques mises en jeu dans les processus de la corrosion ont une influence directe sur le comportement mécanique des structures. Les conséquences de corrosion sont la modification de comportement acier et dégradation de l'interface acier/béton tel que la perte d'adhérence entre les armatures et le béton.

Ce travail est consacré à l'analyse de l'influence de la dégradation de la corrosion sur le comportement global de la structure. Ainsi il est proposé un modèle a été mené pour inclure tous les paramètres de dommage due à la corrosion et l'étude d'effets les différents degrés de corrosion dans la réponse au comportement des structures.

**Mots clé:** Armature, corrosion, béton armé, endommagement, liaison.

## **Abstract:**

Corrosion steel's in reinforced concrete structures is one of the pathologies that alter the performance of these structures. It leads to costs for the maintenance and repair of this structure. The different mechanics involved in the corrosion processes have a direct influence on the mechanical behavior of the structures. The consequences of corrosion are the modification of steel behavior and degradation of the steel / concrete interface such as the loss of adhesion between the reinforcements and the concrete.

This work is devoted to the analysis of the influence of corrosion degradation on the overall behavior of the structure. Thus it is proposed a model

has been conducted to include all the parameters of damage due to corrosion and the study of effects of the different degrees of corrosion in the response to the behavior of structures.

**Keywords:** Reinforcement, corrosion, reinforced concrete, damage, bond.

## INTRODUCTION GENERALE

Les structures en béton armé présentent une très bonne durabilité car elles sont capables de résister aux différents types d'exposition environnementale. Cependant, la principale cause de limitation du béton armé, même de bonne qualité, est la corrosion des barres d'armature induite par la pénétration des chlorures, du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de l'humidité, etc., peuvent détériorer les structures à un rythme extrêmement élevé.

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

La réparation et la réhabilitation des constructions soumise à la corrosion nécessitent des ressources considérables. En Europe par exemple, la dépense en matière de réparation et rénovation de structures, de bâtiments et d'équipements existants est estimée à 50% du budget annuel de la construction. Les infrastructures vieillissantes, et les restrictions concernant les budgets et ressources des nouvelles constructions devenant de plus en plus importantes, ce chiffre ne peut qu'augmenter. La réparation de structures détériorées en béton armé deviendra la partie essentielle des chantiers de construction dans les années à venir.

Dans les ouvrages en béton armé, La corrosion ne se développe pas tant que le béton assure une protection physique ou chimique des armatures. En effet l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé (environ 13) qui confère une stabilité permanente par un film protecteur constitué d'oxydes de fer adhérents aux armatures noyées dans le béton, ce phénomène est appelé passivation.

Cependant, l'acier peut être dépassivé par deux mécanismes principaux dont la carbonatation du béton par le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère ou par pénétration des ions chlorures (provenant de l'eau de mer, des embruns marins ou des sels de déverglaçage). 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.

Une pénétration des agents agressifs externes peut donc déstabiliser ce film et provoquer l'initiation de la corrosion. Lorsque la couche des oxydes s'épaissit du fait de la corrosion métallique une réduction de la section d'acier, une perte de ductilité, une perte d'adhérence ou une fissuration du béton peuvent se produire. La capacité portante diminue et le mécanisme de ruine des éléments d'ouvrage peut changer. Le besoin est alors de comprendre des mécanismes de la corrosion afin de réaliser une ré-évaluation de la durée de vie des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion.

L'évaluation de la dégradation progressive de la liaison entre le béton et l'acier d'armature est d'une grande importance pour évaluer la capacité portante résiduelle des éléments de structure en béton armé avec des armatures corrodées.

Le processus de corrosion n'est généralement pas uniforme et, par conséquent, les dommages dus à la corrosion peuvent varier le long de la barre d'acier. En fait, la corrosion dans des zones locales particulières (corrosion par piqûres) peut se produire par une pénétration localisée de chlorures, d'eau et d'oxygène dans des nids d'abeilles ou des zones de fissures structurelles. Cela provoque des effets de corrosion à ces emplacements, tandis que le reste des barres d'armature peut ne pas être corrodé.

La corrosion de la structure peut être réduite en surveillant correctement et en prenant des mesures de contrôle appropriées à l'intervalle de temps approprié.

Nous avons à partir d'analyse de données expérimentales, identifié les différents mécanismes de déformation élémentaires qu'il y a lieu de prendre en compte dans la modélisation d'une part.

D'autre part, une rétrospective des différents modèles de comportement est réalisée aussi bien pour l'interface acier/béton que celle de la réduction de section d'acier.

L'objectif principal de ce mémoire est de développer sous le code de calcul ABAQUS version 6.14 un modèle numérique 3D permettant d'apprécier le comportement et la capacité portante d'un élément fléchi en béton armé corrodés par exemple à partir de données (cartographie de corrosion etc ...) collectées sur terrain et ainsi une éventuelle prise de décision. Cette modélisation devrait prendre en compte, entre autres, l'effet couplé de la perte d'adhérence, la réduction de section d'acier en partie tendue et la dégradation des propriétés mécaniques des armatures corrodées (résistance et ductilité) sur le comportement mécanique local et global d'éléments corrodés.

Pour atteindre cet objectif, ce travail de mémoire PFE s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre passe en revue approfondie la littérature sur les divers sujets liés à la problématique de corrosion dans les structures en béton armé. Cette étude bibliographique présente une description de la pathologie de la corrosion des structures en béton armé, ainsi il recense ce qui est établi sur les mécanismes généraux de passivation et de la corrosion électrochimique d'un acier au sein du béton et ainsi les conséquences de la corrosion des armatures..

Le second chapitre décrit d'une part les principales techniques expérimentales d'investigation disponibles pour le suivi de la corrosion et d'autre part les méthodes réparation des structures dégradées par la corrosion des armatures.

Le troisième chapitre met en évidence les différents facteurs influents sur le comportement en flexion de structures corrodées. Entre autres, la dégradation du béton, l'influence de la qualité de l'interface acier-béton due à la corrosion, la réduction considérable de l'allongement à la rupture et la diminution de la section d'acier. une attention particulière à sur la modélisation existantes de l'interaction béton-acier des poutres fléchies en béton armé corrodées est apporté.

Enfin, le quatrième chapitre s'articule autour de deux grands points. Le premier présente le code de calcul ABAQUS dans sa version 6.14. et la présentation de la modélisation développée dans le cadre de ce travail. Le second point est dédié à une étude paramétrique afin de montrer l'effet de la modification du degré de corrosion, de la résistance de béton, de la région de la corrosion, de l'enrobage et du diamètre des armatures en zone tendue.

On termine par une conclusion générale.

## **CHAPITRE 01 :**

### **Aspects Bibliographiques sur la Corrosion des Armatures dans le Béton Armé**

### I-1 : Introduction

La durée de vie d'un ouvrage peut se définir par le temps durant lequel l'utilisation de l'ouvrage se fait en toute sécurité. Elle est en fonction de nombreuses conditions telles que la durabilité des matériaux utilisés dans la construction. La durabilité du béton est un fait reconnu et attesté par la pérennité des ouvrages exposés à des conditions climatiques ou environnementales les plus variés. Les ouvrages usuels résistent des années aux multiples agressions physico-chimiques auxquelles ils sont soumis.

La grande majorité des ouvrages d'art et des bâtiments sont construits en béton armé, l'une des principales causes de la pathologie du béton est la corrosion des armatures, qui est la cause de l'environ 80% des dégradations des ouvrages. Le mécanisme de la corrosion relève de plusieurs domaines de la chimie à la physique et à la mécanique.

Les deux mécanismes les plus courants contribuant au développement de la corrosion sont la pénétration des ions chlorures et la carbonatation de béton.

## I-2 : Le phénomène de corrosion dans le béton armé

La corrosion des armatures pour les ouvrages en béton exposés à l'atmosphère est principalement due à la carbonatation du béton, l'effet des chlorures ne concernant que les ouvrages en milieu marin. Le phénomène de corrosion peut être relativement rapide en cas de porosité excessive du matériau et/ou d'enrobage insuffisant [1].

Le béton sain ayant un pH de l'ordre de 13 correspond à un milieu naturellement protecteur pour les armatures. Autour des aciers se forme un film passif une solution solide de  $F_{e_3}O_4$  ou  $F_{e_2}O_3$  permet de réduire voire d'arrêter la vitesse de la corrosion [2]. La corrosion ne se développe pas tant que le béton assure une certaine durabilité en protégeant physiquement et chimiquement les armatures. En effet, l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé (environ 13) qui confère une stabilité permanente à la couche de rouille adhérente aux armatures noyées dans le béton, phénomène appelé passivation.

- **Corrosion:** le métal est corrodé, le produit de corrosion possède principalement une forme soluble.
- **Passivité:** le métal est susceptible de passiver. Le produit de corrosion est un solide insoluble susceptible de protéger le métal. La passivation du métal ne peut pas être observée si le produit solide de la corrosion n'isole pas parfaitement le métal du réactif.
- **Immunité:** le métal est stable vis-à-vis du réactif (aucune réaction n'est thermodynamiquement possible).

### I-3 : les processus de base de la corrosion des aciers dans le béton

Les processus de la corrosion des armatures dans le béton sont illustrés ci-dessous Fig (I-1).

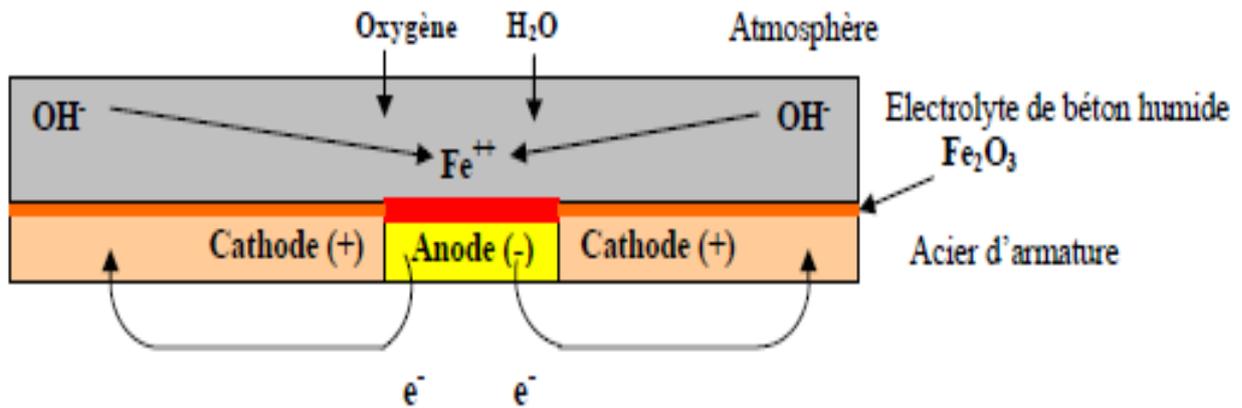


Fig (I-1)- Représentation des processus de corrosion des aciers dans le béton [3].

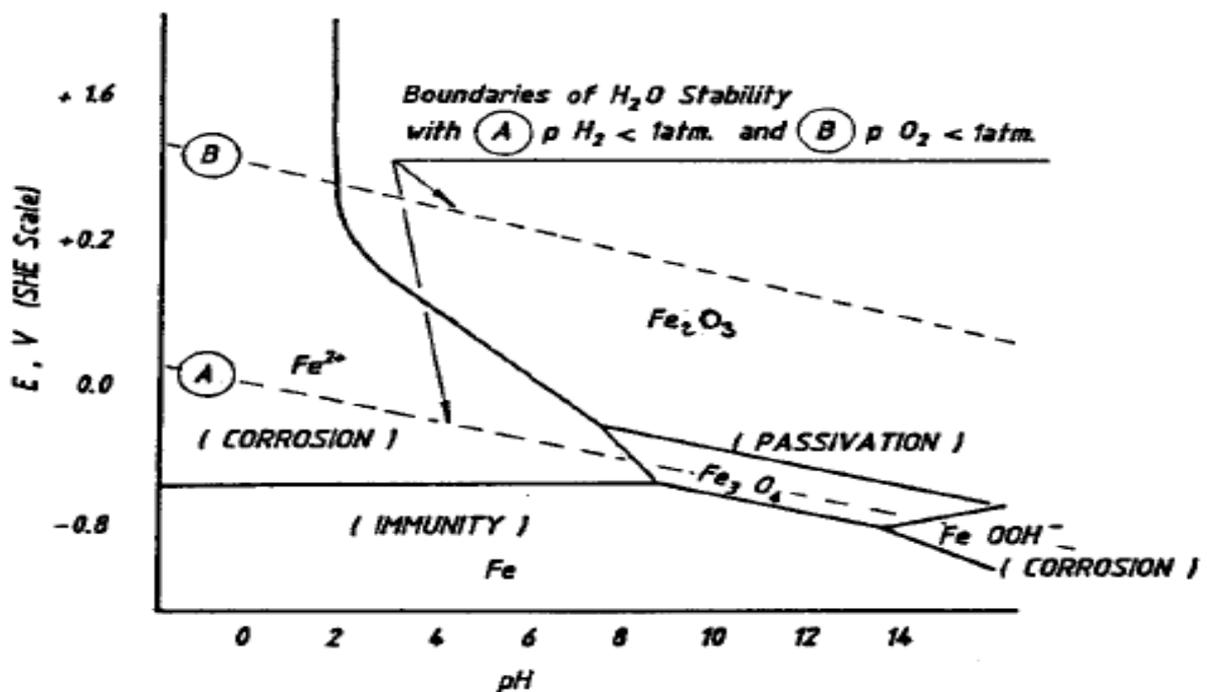
Dans la plupart des cas, les armatures sont protégées naturellement des risques de corrosion par l'enrobage, mais dans certains cas dont il y a des fissures dans le béton d'enrobage et la disponibilité de l'oxygène associée à un niveau de pH élevé conduit à la formation d'un film d'oxyde de fer à la surface des armatures [4]. En l'absence d'ions agressifs tels que les chlorures, les conditions thermodynamiques de stabilité électrochimique de l'acier et de ses oxydes dans l'eau sont représentées par le diagramme potentiel-pH de Pourbaix simplifié (Figure I-2).

Dans ce diagramme on peut distinguer trois domaines :

**Domaine de corrosion:** Les formes d'oxydation du métal sont des ions ( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe(OH)_3$ ).

**Domaine de passivité :** Eventuellement les formes d'oxydation du métal sont des oxydes ( $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ ) qui peuvent être protecteurs.

**Domaine d'immunité:** La forme stable et le métal plus précisément. La concentration molaire volumique des ions en équilibre est inférieure à une valeur déterminée.



**Figure I-2:** Diagramme simplifié de Pourbaix pour le système Fe-H<sub>2</sub>O à 25°C.

Mais dans le cas de présence de chlorures dans l'eau des pores du béton est défavorable du point de vu de la corrosion. Les chlorures détruisent le film passivant de protection du métal [5]. La destruction de cette protection se produit localement sur les surfaces les plus sensibles, ce qui conduit à l'apparition de piqûres qui deviennent des petites anodes formant des piles de corrosion actives avec un pH très bas d'environ 4 à 5.

Il y a deux facteurs rendent possible la corrosion dans les ouvrages en béton armé :

**a :** La conductivité électrolytique du béton pour laquelle la présence d'eau est

essentielle, l'eau réagit avec l'oxygène à la cathode et permet d'établir le circuit des charges électriques portés par les ions entre l'anode et cathode.

**b** : la présence d'oxygène.

Les réactions chimiques les plus probables sont :

1 : La dissolution du fer à l'anode :



2 : La décomposition de l'eau à la cathode :

\* En l'absence d'oxygène :



\* En présence d'oxygène :



3 : La migration des ions  $\text{OH}^-$  vers l'anode :



La corrosion des aciers dans les ouvrages en béton armé est de deux types :

- Corrosion localisée par piqûres : attaque par les chlorures.
- Corrosion généralisée par carbonatation du béton : elle se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques élémentaires.

## I-4:Amoçage et propagation de la corrosion

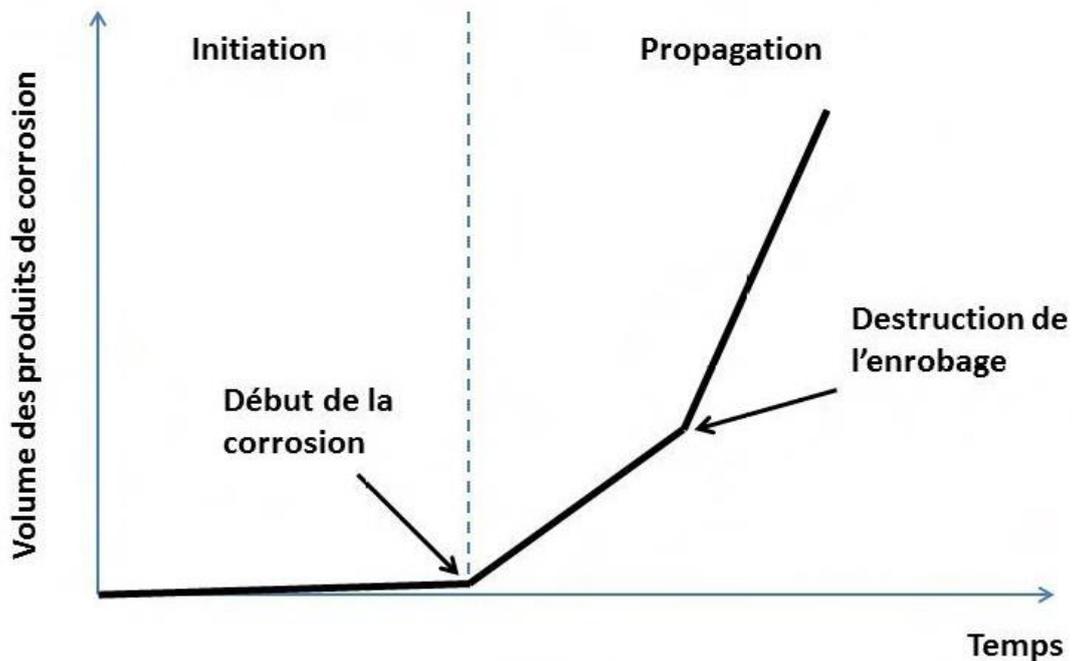


Figure I-3: Diagramme d'amoçage et propagation de corrosion par le temps.

Selon le modèle de Tuuti, la durée de vie des structures en béton armé peut être séparée en deux phases ( Fig I-3 ) :

- **la première phase** : L'initiation de la corrosion dans laquelle l'armature est passive, mais le processus de dépassivation ( par carbonatation ou par pénétration des ions chlorures) se produit.
- **la seconde phase** : la propagation de la corrosion qui débute lorsque l'acier est dépassivé [6].

Le temps de la propagation de la corrosion dépendent des facteurs comme les propriétés des armatures, l'état de surface des barres et les caractéristiques de béton [7].

Le type du liant peut être influer sur la capacité du béton à réduire la pénétration des ions chlorures. Plusieurs travaux ont démontrés pour le choix de type du ciment pouvait considérablement affecter la durée de vie des ouvrages

exposés à des ions chlorures. Selon les études Hussain et Coll 1996, une réduction de la teneur en  $C_3A$  aurait comme conséquence d'augmenter de manière considérable la pénétration des chlorures et par le fait même de réduire la période requise pour initier la corrosion des armatures.

La préparation du surface des barres sert à enlever toute les traces de saletés,des sels,de produits de corrosion et de calamine. La préparation su surface est une pratique courante dans le cas des aciers de charpente mais le cas de béton armé,la préparation est une étape souvent négligée.

### **I-5 : Amorçage de la corrosion par la pénétration des ions chlorures**

#### **I-5-1 : Introduction**

La présence des ions chlorures dans le béton peut être d'une :

- **Origine externe :**
  - sel de déverglaçage, eau souterrain et eau de mer.
- **Origine interne :**
  - l'eau de gâchage.
  - les ajoutes dans le béton comme les adjuvants chlorurés.
  - les granulats qui contiennent le cl (sable de mer).

Les chlorures pénètrent dans le béton et arrivent au contact de l'acier et quand leur teneur atteint un seuil critique, l'attaque des chlorures se distingue par l'entraînement de la corrosion des armatures qui sont initialement passivées ( avec une présence suffisante de  $O_2$  et  $H_2O$  pour soutenir la réaction ) en points localisés. Les ions chlorures associés aux hydroxyles présents dans la solution provoquent la destruction de la couche de passivation de l'armature et abaissent le pH de la solution. La corrosion peut alors commencer.

**I-5-2 : Les réactions physico-chimiques :**

Les ions chlorures pénètrent dans le béton et réagissent soit :

- avec les silicates de calcium hydratés (CSH) surtout par adsorption ;

ou

- avec les aluminates tricalciques (C<sub>3</sub>A) selon la réaction suivante :  $\text{CaCl}_2 + \text{C}_3\text{A} + 10\text{H}_2\text{O}$  et former des monochloroaluminates hydratés (C<sub>3</sub>A.CaCl<sub>2</sub>.10H<sub>2</sub>O) qui est relativement stable dans le béton, il permet de fixer les chlorures dans le béton [8].

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



Ces réactions engendrent une importante baisse de pH entre 3.8 et 5 [9]. La dissolution du fer est alors accélérée les piqûres croissent en profondeur.

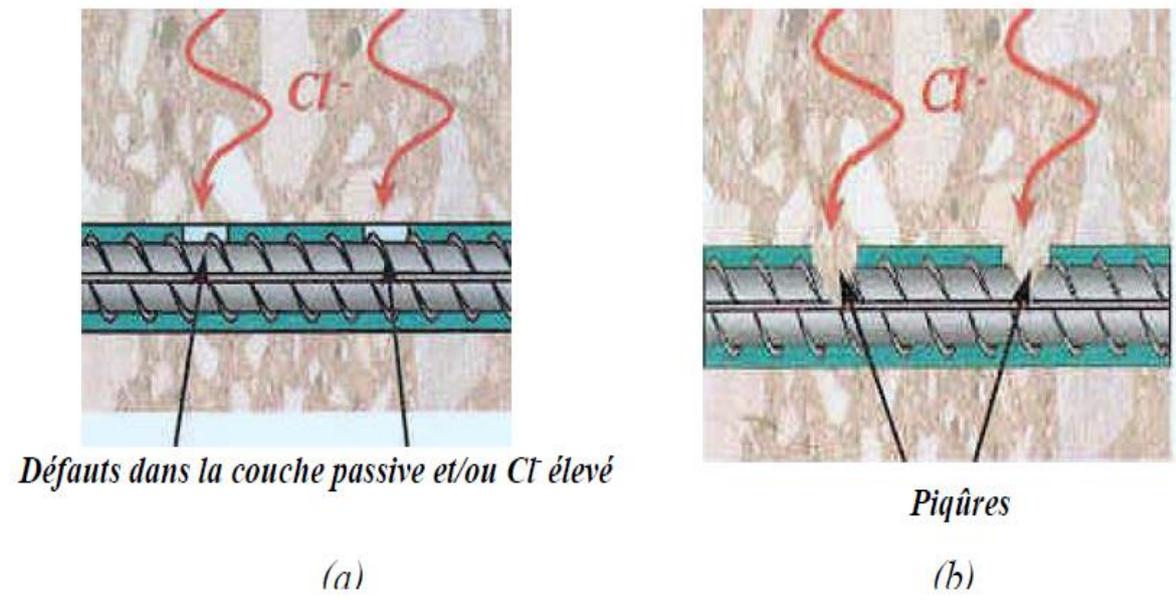


Figure I-4 : Représentation du processus de la corrosion par piqûre des ions chlorures

### **I-5-3 : Les facteurs influant sur la corrosion par pénétration des ions chlorures :**

#### **I-5-3-1 : Le rapport E/C**

Un rapport E/C élevé du béton favorise la pénétration des ions chlorures et la vitesse de corrosion dans le béton armé, comparativement au béton avec des rapport E/C plus faible [10]. Il a une très grande influence sur la porosité, plus la porosité du béton est grande, facilité de la pénétration des ions agressives puis la corrosion de l'acier.

#### **I-5-3-2 : Enrobage**

L'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont mettre les fluides agressives pour arriver à l'armature. Parfois la durée de vie d'une structure peut être fortement améliorée en augmentant l'épaisseur de l'enrobage.

#### **I-5-3-3 : La nature de ciment**

L'influence de type de ciment utilisé sur la diffusion des ions chlorures implique deux phénomènes, soit la modification de la microstructure de la pâte de ciment, et par conséquent, sa porosité [11] ainsi que les réactions chimiques de certaine phase minérales du ciment.

La nature de ciment joue un rôle important dans la fixation des ions chlorures. En effet les chlorures soit adsorbées sur les CSH, soit fixés par les aluminates ( $C_3A$ ) qui dépendent tous deux de la composition du ciment. FRANCY a montré l'influence de la teneur en aluminates de ciment sur la quantité de chlorures fixés (figure) [12].

#### **I-5-3-4 : Degré de saturation**

Les ions chlorures diffusent dans la phase liquide contenue dans les pores du béton. Pour les ouvrages en béton sont exposées à des cycles de

mouillage et de séchage, la degré de saturation affecte directement sur la diffusion ionique. Lorsque la teneur en eau diminue le réseau poreux contenant la solution interstitielle diminue aussi. Elle entraîne, par le fait même, une diminution de la diffusion[13].

- Un état sec d'un matériau peut rendre les ions chlorures inaptes à une fixation immédiate.

- La forte énergie cinétique de mobilité des ions chlorures dans les pores peut favoriser la désorption par rapport à la fixation.

### **I-5-3-5 : La température**

Un autre facteur qui influence le transport des ions chlorures dans le béton est la température. La diffusion ionique ainsi que les réactions chimiques sont ralenties que le contraire se produit à température élevée.

## **I-6 : Amorçage de la corrosion par la carbonatation**

### **I-6-1 : Introduction**

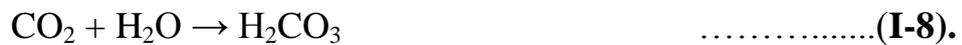
Le phénomène de carbonatation du béton est un domaine bien étudié avec une préoccupation toujours croissante pollution dans l'environnement. La corrosion des armatures par la carbonatation du béton est un phénomène de dégradation majeur des structure en béton armé. La concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est un facteur principale qui agit sur la vitesse de carbonatation du béton, elle favorise la carbonatation et par suite la corrosion des armatures dans le béton. La carbonatation correspond à la solution interstitielle, ce qui engendre une diminution du pH et elle provoque une destruction du film passif et la diminution de la porosité du béton.

**I-6-2 : Les réaction physico-chimiques**

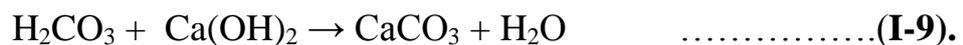
Le CO<sub>2</sub> atmosphérique pénètre sous forme gazeuze dans le béton d'enrobage et réagit avec les hydrates du ciment.La carbonatation résulte de la réaction entre le dioxyde de carbone(CO<sub>2</sub>) et les hydroxydes du ciment,et surtout la chaux(Ca(OH)<sub>2</sub>).

Le mécanisme de carbonatation suit les étapes suivantes :

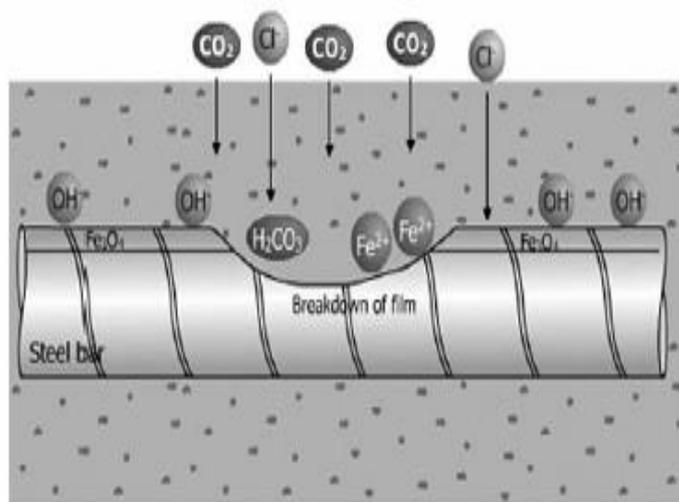
- l'eau chargée de gaz crbonique donne un acide faible (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)



- Le H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> réagit avec la chaux (Ca(OH)<sub>2</sub>) et donne la carbonate de calcium



- Dès que Ca(OH)<sub>2</sub> réagisse,le pH chute de 14 à 8 c'est pour cette raison que la protection des armatures devient moins bonne lorsque la couverture en béton se carbonate, le carbone de calcium n'est plus protecteur[14].



**Fig.I.5:** Mécanisme de carbonatation du béton [15].

### I-6-3 : Les facteurs influant sur la vitesse de la carbonatation de béton

#### I-6-3-1 : l'humidité :

Parmi les facteurs liés à l'environnement, l'humidité relative joue un rôle fondamentale dans le processus de diffusion et de dissolution du  $\text{CO}_2$ . En effet, l'humidité relative détermine la teneur en eau et donc l'état de saturation du [16]. La carbonatation procède plus rapidement en conditions humides comparées aux conditions sèches, Ainsi que la carbonatation ne se produit pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau.

La figure (I.6) montre la vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative. On constate que la degré de carbonatation devient importante dès que l'humidité relative atteint 60% .

La carbonatation du béton passe par 3 phases :

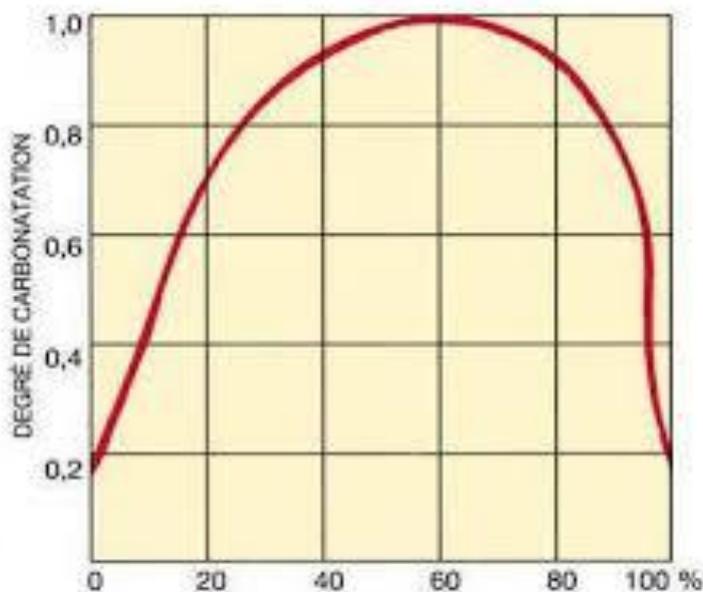


Figure (I.6) : Influence de l'humidité relative de l'air sur la vitesse de carbonatation [17].

- 1<sup>ère</sup> phase :

Les réactions de carbonatation se produisent en solution. Il y a un manque d'eau dans les pores du béton et la réaction est ralentie (humidité entre 20% et 50%).

- 2<sup>ème</sup> phase :

Les pores sont vides et le CO<sub>2</sub> diffuse rapidement dans la phase gazeuse, mais il y a encore une couche d'eau sur les surfaces des pores dans laquelle le CO<sub>2</sub> peut dissoudre et réagir avec les hydrates ( humidité entre 50% et 80%).

- 3<sup>ème</sup> phase :

Le béton est saturé, la vitesse de diffusion du CO<sub>2</sub> en liquide est très lente ( humidité > 80%).

### **I-6-3-2 : la température**

La température joue un rôle déterminant dans le processus de carbonatation, mais son influence est discutable. Alors qu'une élévation de la température favorise le séchage des pores et facilite la pénétration du CO<sub>2</sub> et par conséquent accélère la solubilité de CO<sub>2</sub> et diminue sa concentration [18] mais dans les cas généraux la température élevée engendre une accélération de carbonatation du béton.

### **I-6-3-3 : La concentration de dioxyde de carbone**

On observe une augmentation de la vitesse de carbonatation dans les cas où la teneur de CO<sub>2</sub> est élevée (garages chemisées....) [19]. La teneur atmosphérique en dioxyde de carbone est probablement le facteur influent lié à

l'environnement le plus important. On observe aussi les profondeurs carbonatées plus importantes lorsque la pression partielle de dioxyde de carbone augmente [20].

### **I-6-3-4 : Le dosage du ciment**

Le dosage en ciment contribue à augmenter la compacité du matériau et donc diminuer l'épaisseur carbonatées c-a-d l'augmentation du dosage en ciment du béton à un effet ralentisseur sur la propagation de carbonatation.

### **I-6-3-5 : Le rapport E /C**

Le rapport E/C est le facteur le plus influent sur la vitesse de carbonatation puisque l'eau conduit à un excès de porosité favorisant la pénétration des agents agressifs en particulier le CO<sub>2</sub>.

### **I-6-3-6 : La résistance à la compression**

Quand la résistance du béton à la compression augmente, la carbonatation diminue du fait de la diminution de la porosité [21].

### **I-6-4 : Les conséquences de la carbonatation**

- Diminution de la porosité.
- Augmentation de la résistance mécanique du béton.
- Une résistance accrue à la pénétration des agents agressifs.
- Chute de pH et corrosion des armatures.

## **I-7 : Les conséquences de la corrosion et le lien avec les structures**

Les oxydes et les hydroxydes formés à la surface de l'acier induisent deux conséquences majeures :

- Les réactions d'oxydation se font avec une augmentation de volume par rapport au métal de base. En supposant que la rouille est composée entièrement de magnétite  $Fe_3O_4$ , le volume final est au minimum deux fois plus grand que celui du métal de base [22]. Les variations volumétriques induisent une pression de rouille dans le béton d'enrobage avec apparition des petites fissures.

- Lorsque la corrosion est amorcée par la carbonatation du béton, les produits formés s'accumulent autour de l'acier. Mais, si elle est initiée par des chlorures, les produits de corrosion peuvent migrer à l'intérieur du système poreux et même apparaître à la surface du béton. Le transport des oxydes crée des cavités suggérant que l'acier est profondément altéré. La réduction de la section d'acier diminue la capacité portante des aciers et entraîne des conséquences défavorables sur la déformation et la résistance d'ouvrage.

La corrosion entraîne des dégâts comme :

- Une altération de l'aspect extérieur des ouvrages ;
- La détérioration de l'étanchéité et les problèmes de sécurité ;
- Une diminution de la capacité portante de la structure ;
- Apparition des fissures et décollement du béton d'enrobage.

## I-8 : Conclusions

La durée de vie de la structure dépend de certaines conditions physiques et chimiques de l'environnement ainsi que de la capacité des matériaux constitutifs du béton armé à se protéger contre les agressions physiques et chimiques.

La corrosion des armatures dans les ouvrages en béton armé est l'une des pathologies qui altèrent les performances des structures. Elle est la cause d'environ 80% des dégradations des ouvrages. Quand la corrosion devient active, le comportement mécanique des structures va être sérieusement modifié.

La corrosion se développe principalement suite à deux processus : la carbonatation du béton par le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) de l'atmosphère et l'attaque par les ions chlorures (provenant de l'eau de mer ou des sels du déverglaçage) qui, lorsqu'ils se trouvent en quantité suffisante à la surface d'armature, génèrent des piqûres de corrosion.

Parmi les conséquences de la corrosion est la diminution de la section d'armature. Cette augmentation volumétrique de la surface corrodée génère des pressions sur le béton et des fissures.

## **CHAPITRE 02 :**

# **Méthodes de Diagnostic et de Réparation des Structures Dégradées par la Corrosion**

### II-1 : Introduction

Actuellement, le béton est un matériau plus utilisé dans la réalisation des différentes constructions. Au cours de temps, les ouvrages en béton armé développent certaines pathologies qui provoquent des dégradations dans les structures.

Parmi les étapes de la réparation des structures endommagées est l'identification des causes des dégradations. Il n'est pas possible d'évaluer la nécessité de réparer une structure dégradée ou de choisir la méthode de réparation sans avoir au préalable, identifié l'origine des dégradations.

L'étude des dégradations des structures et ses causes consiste en l'analyse des processus susceptibles d'entraîner des désordres dans le domaine de bâtiment. Elle doit reposer sur un diagnostic précis d'ouvrage dégradé et l'état de ce dernier.

Le diagnostic est constitué de plusieurs étapes, qui permettent le choix de la méthode de réparation, protection ou renforcement des structures dégradées. Le choix de méthode de réparation est en fonction des nombreux paramètres : l'état d'ouvrage dégradé, les conditions d'exploitation d'ouvrage et l'accessibilité de la structure.

## **II-2 : Techniques d'investigation relatives à la corrosion des armatures**

### **II-2-1 : Visite préliminaire**

La visite préliminaire (selon AFGC 2003) a pour objet d'améliorer la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles. Cette inspection débouche un diagnostic préliminaire et sur un programme d'investigation. Elle comprend :

- La collecte des informations pour la compréhension d'ouvrage : documents, rapports, implantation, orientation, les plans d'ouvrages (plan coffrage et plan ferrailage) , les conditions environnementaux de site et les caractéristiques des matériaux (ciment, agrégats, dosage).
- Un examen de l'intégralité de la structure.
- Voir les surfaces dégradées et identification et localisation des zones sollicitées.
- Observation des zones critiques (joints et les appuis).

### **II-2-2 : Mesure de l'enrobage des armatures**

L'enrobage des armatures est un paramètre déterminant dans les phénomènes de corrosion. Il existe plusieurs méthodes d'estimation de l'enrobage du béton autour des armatures :

- la première méthode pour caractériser l'épaisseur d'enrobage est la radiographie qui permet de détecter des armatures sous des enrobages épais. Elle permet de localiser les armatures et détecter les vides.
- La deuxième méthode utilise des ondes électromagnétiques de très haute fréquence (radar). Elle permet surtout de localiser les armatures.
- La troisième méthode est celle de « l'impact-écho » où un impact est provoqué par un marteau spécial placé à la surface du béton. L'onde de choc est renvoyée

vers cette surface par des discontinuités (face arrière du béton ; armatures). Elle permet de localiser les armatures et de détecter les vides.

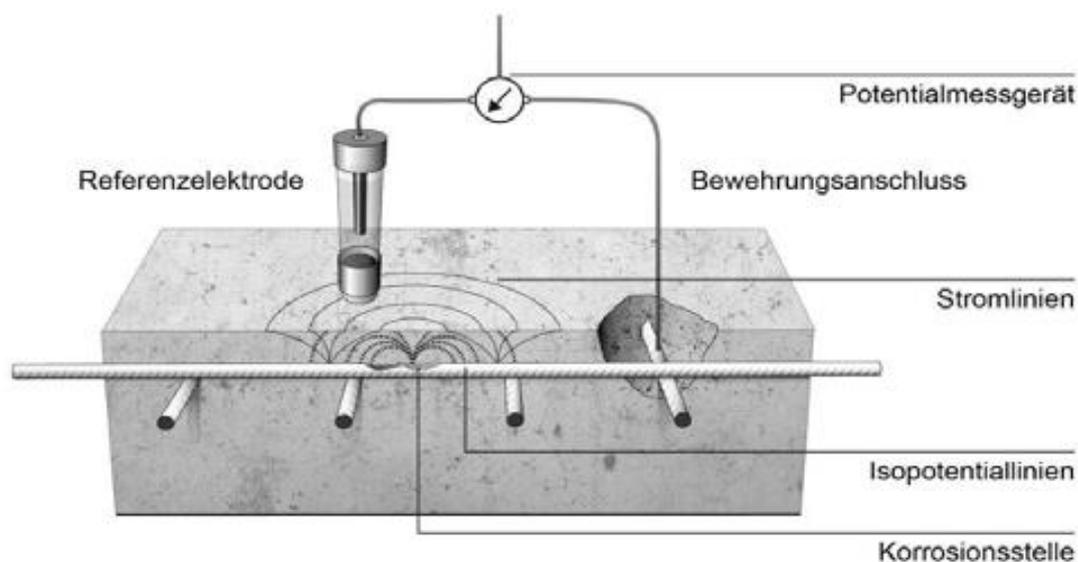
- La quatrième méthode est la détection des rayons infra-rouge émis à travers le béton par les armatures qui sont préalablement « chauffées ». Elle permet de localiser les armatures.

### II-2-3 : Evaluation de la corrosion dans le béton

#### II-2-3-1 : Le principe de mesure du potentiel de corrosion des armatures

La mesure de potentiel est une méthode de mesure pratiquement non destructive pour l'évaluation d'état de corrosion des armatures dans les ouvrages en béton armé. La façon la plus simple pour l'évaluation de degré de corrosion de l'acier est de mesure son potentiel.

Cette méthode de caractérisation de l'état des barres métalliques est appelée « relevé de potentiel par demi-pile ». L'électrode de référence est branchée à la borne positive du voltmètre et la barre métallique à la borne négative. Les valeurs obtenues permettent de tirer des conclusions fiables sur l'état de corrosion de l'armature et l'étendue des foyers de corrosion.



**Figure (II -1) :** principe de mesure potentiel de corrosion des armatures.

Une fois les branchements effectués, il faut réaliser des mesures des potentiels des zones auscultées en déplaçant l'électrode de référence :



**Figure (II -2) : Mesure de la corrosion par potentiel d'électrode**

Selon la norme ASTM C876-91, en utilisant une électrode  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  il y a une corrélation entre le potentiel de corrosion mesuré et l'état d'avancement de la corrosion.

### **II-3 : Mesure relative à la qualité du béton**

#### **II-3-1 : Détermination de la profondeur de carbonatation**

La mesure de la profondeur de carbonatation du béton s'effectue en laboratoire sur les cassures fraîches des carottes prélevées sur l'ouvrage. Immédiatement après fendage pour éviter la carbonatation de surface. On pulvérise une faible quantité d'eau distillée ou déminéralisée sur la tranche pour l'humidifier.

La mesure de la profondeur de la carbonatation, la plus simple, est à la phénolphthaléine. La phénolphthaléine est un composé organique de formule  $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ . Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur colore. Les zones où le pH est inférieur à 9 (zones carbonatées) restent incolores. Celle dont le pH est supérieur à 9 est colorée en violet. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation.



**Figure (II -3) :** Schéma de coloration du béton.

### II -3-2 : Mesure de la résistivité

La résistivité du béton a une influence sur le taux de corrosion. Elle est proportionnelle à la vitesse de corrosion lorsque l'armature est à l'état actif sauf le cas de béton saturé, très sec ou dégradé. Elle est une caractéristique spécifique d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle s'exprime souvent en ohm.mètre [ $\Omega \cdot m$ ].

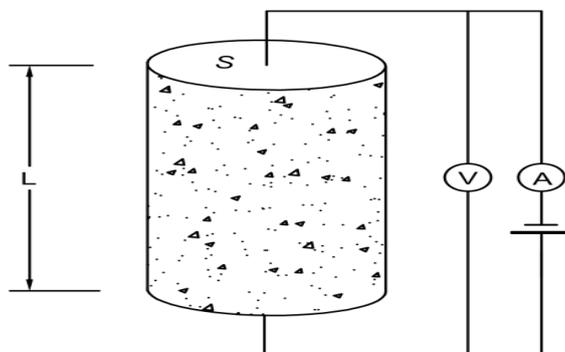
La résistivité s'exprime par l'équation suivante : 
$$\rho = \frac{R.S}{L}$$

Avec :  $\rho$  : Résistivité électrique [ $\Omega.m$ ].

R : Résistance électrique [ $\Omega$ ].

L : Longueur de l'échantillon [m].

S : Section plan de l'échantillon [ $m^2$ ].



**Figure (II-4) :** Illustration du principe de la mesure de résistivité.

La gamme de résistivité électrique du béton est très large en fonction de ses compositions et des conditions environnantes.

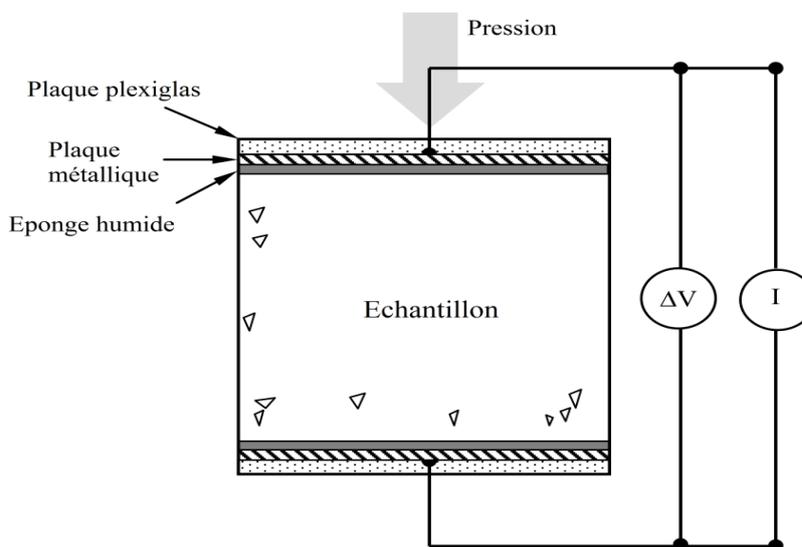
Environnement	Résistivité électrique(*) [ $\Omega.m$ ]	
	Ciment Portland Ordinaire (CEM I)	Ciment contenant le laitier de haut fourneau (>65%) ou cendre volante (>25%) ou fumée de silice (>5%)
Très humide, submergé, salle d'arrosage	50 – 200	300 – 1000
A l'extérieur, conditions naturelles	100 – 400	500 – 2000
A l'extérieur, protégé contre la carbonatation [20°C/80%RH]	200 – 500	1000 – 4000
Carbonaté	$\geq 1000$	2000 – 6000 et plus
A l'intérieur [20°C/50%RH]	$\geq 3000$	4000 – 10000 et plus

(\*) : Mesure sur les structures existantes (âgées de plus de 10 ans)

**Tableau II -1:** Gamme de résistivité électrique de différents bétons [23].

## II -3-2-1 : Techniques de la mesure de résistivité du béton

### II-3-2-1-1 : Mesure par transparence

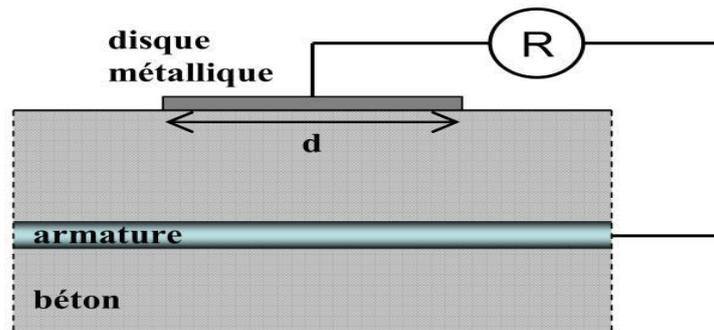


**Figure (II-5):** Schéma de mesure de résistivité par transparence en laboratoire [24].

Pour la mesure en transparence, un courant électrique est imposé entre deux extrémités d'une éprouvette grâce à des électrodes métalliques puis la différence du potentiel et l'intensité de courant entre ces deux électrodes sont mesurées.

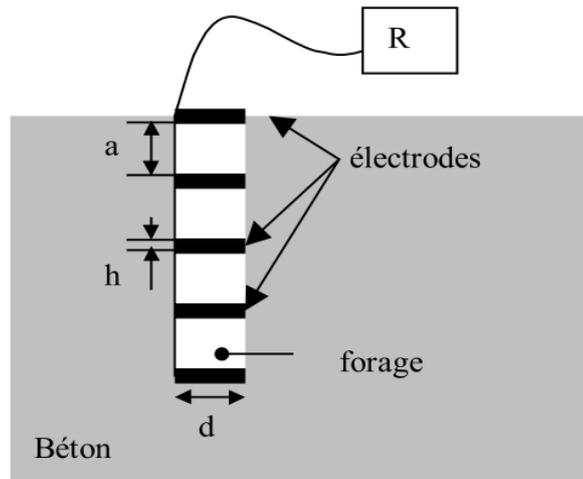
### II-3-2-1-2 : Mesure sur site

a : Mesure de la résistivité du béton d'enrobage :



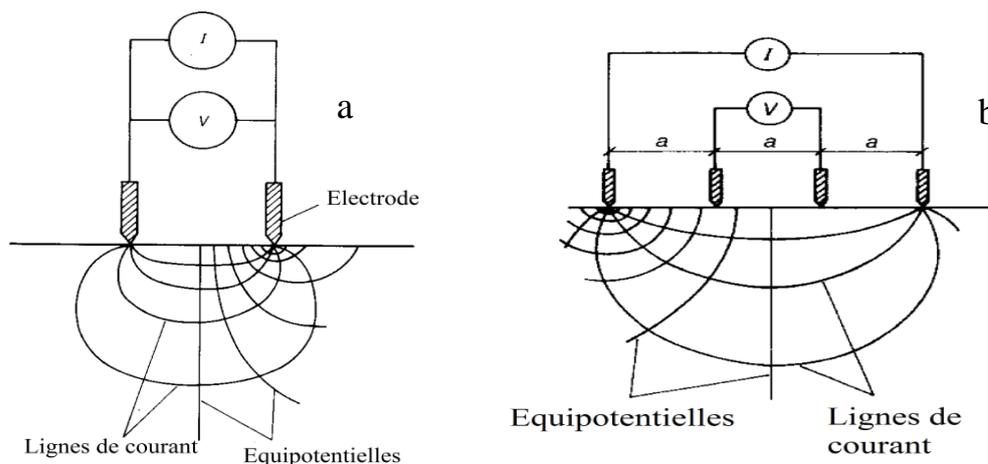
**Figure (II-6) :** Principe de la mesure de la résistivité du béton d'enrobage [25].

b : Mesure de la résistivité par sondes noyées :



**Figure (II-7) :** Principe simplifié de la mesure de résistivité par sondes noyées.

c : Mesure de la résistivité en surface :



**Figure (II-8) :** Mesure de résistivité avec dispositif bipolaire (a) et quadripolaire de Wenner.

### II-4 : Méthodes de mesure de la corrosion des armatures dans le béton

#### II-4-1 : Méthodes électromagnétique

La localisation des armatures concerne à la fois leur profondeur et leur position relative. Les appareils disponibles sont de type magnétique : un électro-aimant, mis sous une tension, est placé sur le parement de béton. Cette tension varie lorsque l'appareil s'approche de l'armature. La variation de la tension dépend de la profondeur et de diamètre d'armature et aussi de la présence d'autres aciers au voisinage d'armature détectée [26].

##### II-4-1-1 : Le radar

Le technique radar est reconnu comme un outil usuel dans l'évaluation non destructive des ouvrages en béton. Le système radar est composé d'antennes émettrice et réceptrice dont le nombre peut varier. Le radar est une application de la théorie de l'électromagnétique. Il émet une onde à une fréquence donnée qui se propage dans le milieu et se réfléchit sur les interfaces de différentes propriétés. Le signal radar est analysé en termes d'atténuation et de vitesse.

Dans le domaine du génie civil, on utilise le système radar pour déterminer les caractéristiques géométriques : la détection des armatures, des gaines de précontrainte, des canalisations et des fissures, ainsi que les caractéristiques physiques comme l'estimation des paramètres physiques du béton comme la teneur en eau et en chlorures.

### **II-4-1-2 : Le pachomètre**

Il est utilisé pour la détection et la localisation des armatures dans le béton. Il peut aussi être utilisé pour déterminer le diamètre des aciers de renforcement lorsque l'épaisseur de l'enrobage est connue. L'appareil de pachomètre applique un champ magnétique de basse fréquence à la surface du matériau. Le signal reçu diminue avec l'augmentation de la couche d'enrobage et il augmente lorsque le diamètre de l'acier est important.

### **II-4-2 : Les méthodes nucléaires**

Parmi les méthodes non destructives de la mesure est l'utilisation des techniques à rayons X et à rayons GAMMA. Les techniques employées dans l'industrie sont la radiographie et le radiomètre.

#### **II-4-2-1 : Le radiomètre**

Les rayons GAMMA sont générés par un radio-isotope spécialement conçu pour pénétrer dans le béton. La dispersion des rayons GAMMA est le résultat d'une ou de plusieurs collisions entre les électrons et un matériau absorbant. Le radiomètre GAMMA est utilisé pour déterminer la densité in situ de membres structuraux, l'épaisseur de dalle en béton ainsi que la variation de la densité des carottes de béton.

## II-5 : Les méthodes de réparation des structures en béton armé dégradées par la corrosion

### II-5-1 : Réparation traditionnelle

C'est la méthode la plus classique. Elle consiste à :

**a :** Enlever le béton éclaté ainsi que tout le béton contaminé et non protecteur. De nombreuses techniques permettent l'enlèvement du béton dégradé : burinage, décapage à l'eau à haute pression, ponçage, décapage thermique et chimique. L'importance de cette préparation est en fonction de la profondeur de carbonatation du béton ou des profils de concentration des chlorures. Il est nécessaire de nettoyer de la surface pour enlever les débris et les poussières, afin de développer une meilleure adhérence entre le matériau de réparation et le vieux béton avant la projection de béton. Le nettoyage est réalisé par un lavage à l'eau sous pression.

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé. La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement.



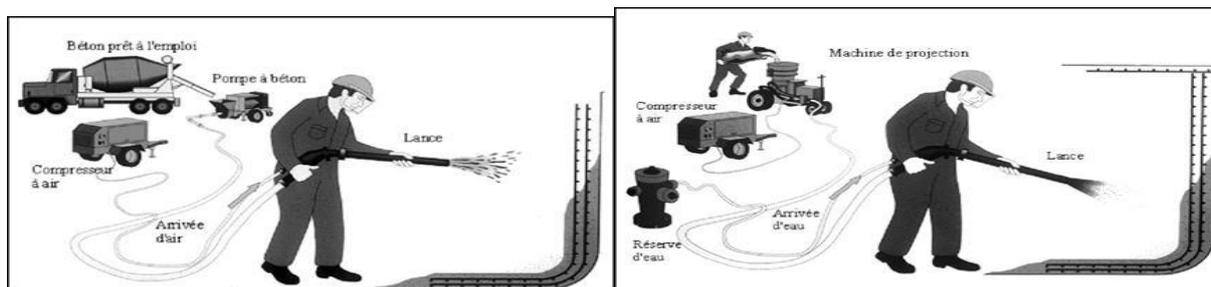
**Figure (II-9) :** Application de technique du béton projeté sur les surfaces dégradées par la corrosion.

Il existe principalement deux techniques de projection du béton suivant le moment d'introduction de l'eau de gâchage dans la chaîne. En projetant par voie humide, le béton gâché est pompé jusqu'à la lance, alors que par voie sèche, le mélange de ciment et de granulats sans l'eau, est propulsé par de l'air comprimé, l'eau s'ajoute en bout de lance.

Le choix de la technique de projection est en fonction de :

- l'importance du chantier ;
- la nature des travaux à effectuer ;
- les performances mécaniques à obtenir.

Différentes méthodes vont présenter de différents résultats. Par voie sèche, le rapport E/C est évidemment plus faible. On obtiendra une résistance plus élevée que par voie humide.



**Figure (II-10):** Projection par voie humide. **Figure (II-11):** Projection par voie sèche.

**b :** Eliminer l'intégralité des parties corrodées sur toute la surface des armatures par brossage métalliques et repiquage.

**c :** Remplacement des aciers : Les techniques de réparation et de renforcement des structures par des armatures passives additionnelles consiste à disposer :

- d'armature de béton armé (treillis ou cages d'armatures en acier ou carbone) au sein de l'ouvrage après l'enlèvement local du béton dégradé.

- d'armature de béton armé autour de la partie d'ouvrage dégradé puis enrobées par un ajout de béton coulé.
- des plaques ou des tôles collés à la surface du béton.

Le dégagement des armatures doit se faire sur une longueur suffisante pour assurer le recouvrement des barres.

**d** : traitement des fissures : elle consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes.

### II-5-2: Traitement électrochimique

#### II-5-2-1: Protection cathodique

Cette technique permet de restaurer la passivité des armatures, elle est installée de manière définitive. La protection cathodique est basée sur le changement du potentiel de l'acier à des valeurs plus négatives, pour que le métal agit comme cathode et ainsi de réduire le courant de la corrosion à des valeurs négligeables. Cette technique est appliquée non seulement pour les tabliers de pont mais aussi dans les structures (poutres, poteaux, et traverses) et structures maritimes. La protection cathodique de l'acier dans le béton fait l'objet de la norme européenne NF-EN12696. Dans l'application de la protection cathodique, deux méthodes principales sont utilisées à savoir :

1 : Anodes sacrificielles (courant galvanique) : un métal très actif (anode) est relié à la masse d'armature et placé dans le même électrolyte. L'anode polarise le métal vers des valeurs cathodiques.

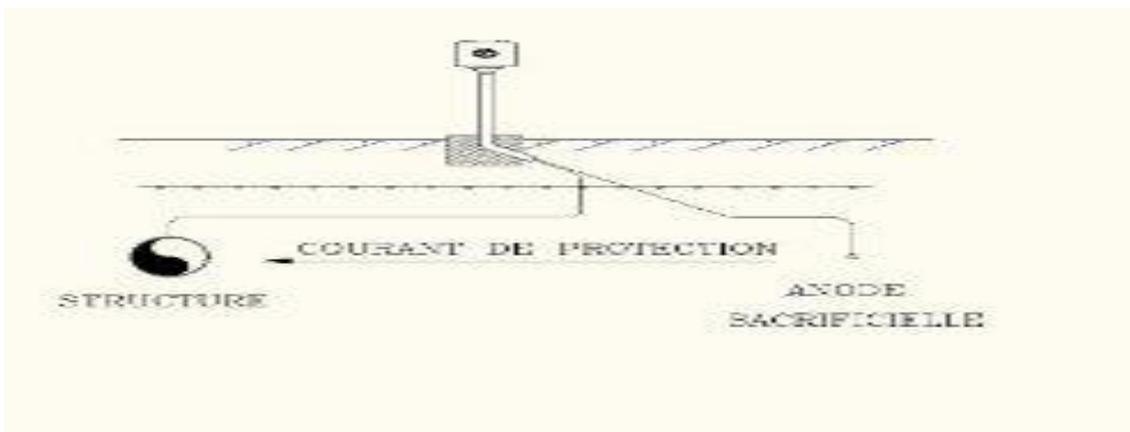


Figure (II-12) : Schéma d'une protection cathodique galvanique.

2 : Courant imposé : une anode inerte est raccordée à l'armature et un courant continu est appliqué pour décaler le potentiel vers des valeurs cathodiques.

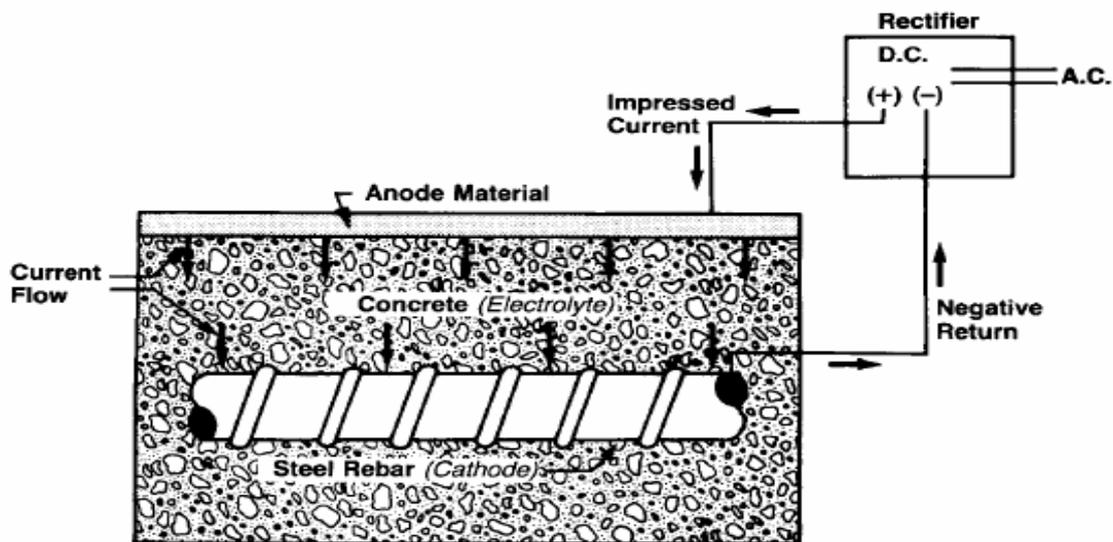


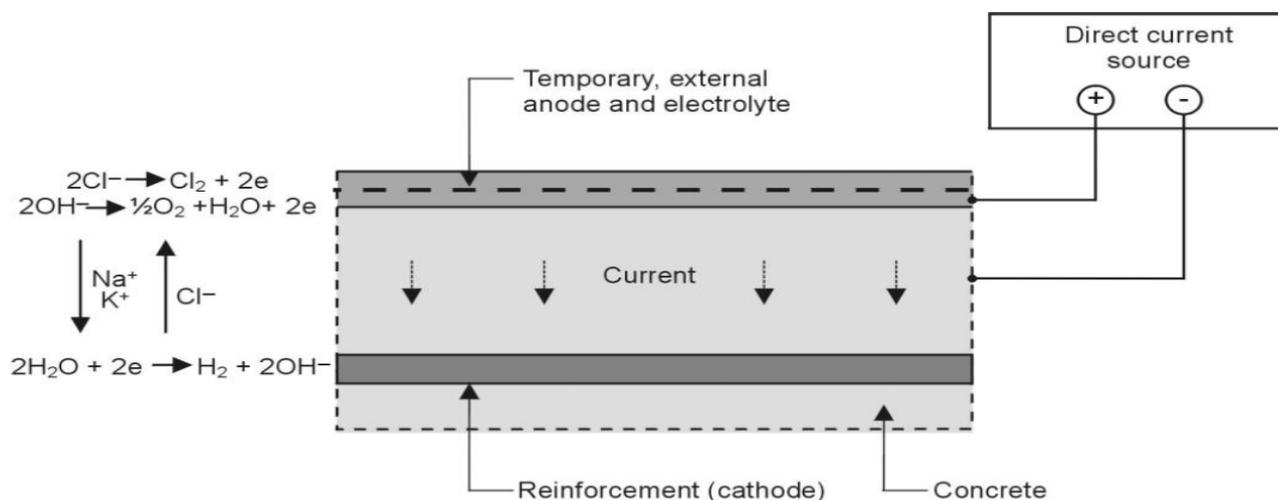
Figure (II-13): Protection cathodique par courant imposé.

### II-5-2-2 : Protection galvanique

Une anode active dite sacrificielle est placée sur le parement de la surface à traiter ou dans l'enrobage. Elle est connectée aux armatures. Il se crée ainsi un courant galvanique sans alimentation électrique. L'électrolyte assure une bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.

### II-5-2-3 : Déchloruration

La technique déchloruration ou l'extraction électrochimique des ions chlorure, consiste à faire passer un courant électrique continu entre une anode placée sur la surface du béton d'enrobage et l'acier (cathode). Ce courant provoque un déplacement des ions chlorures chargés négativement vers l'anode extérieur. Lorsque les ions chlorures arrivent à la surface du béton. Ils passent dans l'électrolyte et peuvent donc être enlevées définitivement du béton.



**Figure (II-14):** Réactions de principe impliquées dans l'extraction de chlorure.

Cette technique peut être réaliser à l'aide :

- d'un générateur électrique qui impose un courant continu circulant de l'anode vers l'armature.
- d'une anode active (grille d'acier) directement reliée à l'armature. Il y a création d'un courant galvanique.

L'efficacité de cette technique dépend des facteurs :

- Teneur initial en ions chlorures.
- Profondeur atteinte par les ions chlorures.
- Différence de potentiel appliqué.
- Qualité du béton d'enrobage.

### II-5-2-4 : Ré alcalinisation du béton carbonaté

Cette technique est basée sur le principe de la technique d'extraction des ions chlorures. Elle consiste à introduire sous l'effet d'un courant électrique des alcalins dans la zone d'enrobage des armatures. Elle est appliquée lorsque la corrosion est provoquée par la carbonatation du béton d'enrobage.

Pour effectuer cette technique, une solution basique est appliquée de façon à pénétrer à l'intérieure du béton et augmente le pH dans cette zone.

### II-5-2-5 : Effet des techniques électrochimiques

- Production d'hydrogène sur la surface de béton : la polarisation élevée d'acier provoque l'adsorption de l'hydrogène par l'acier conduit à la fragilisation par hydrogène.
- Diminution d'adhérence acier-béton : le passage à long terme d'un courant cathodique provoque une diminution effective de l'adhérence.

### II-6 : Inhibiteur de la corrosion

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité : il 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 [27].

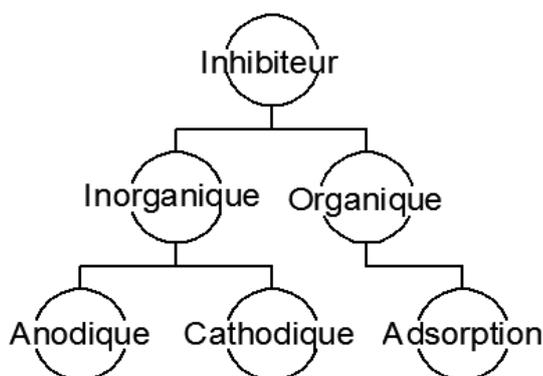
Un inhibiteur de corrosion est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration [28].

L'inhibiteur est appliqué directement sur la surface du béton après préparation du support. Il pénètre dans le béton par capillarité. La pénétration des inhibiteur dans le béton dépend de la porosité de béton, le degré d'humidité, le niveau de carbonatation et la teneur en chlorures.



**Figure (II-15) :** Application des inhibiteurs.

Il est possible de classifier les inhibiteurs selon leur mode d'action comme suite :



**Figure (II-16):** Catégories des inhibiteurs de corrosion.

- **Les inhibiteurs anodiques** : ont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Il peut conduire à un processus de corrosion localisé, plus intense qu'en l'absence d'un inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif au droit de l'acier.

- **Les inhibiteur cathodiques** : induisent une augmentation de la surtension cathodique et réduisent donc le courant de corrosion. Ils précipitent souvent des sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions  $\text{OH}^-$  sur les cathodes.

- **Les inhibiteurs mixtes (Adsorption)** : ces inhibiteurs accumulent un film protecteur hydrophobe par adsorption des molécules sur la surface métallique, ce qui fournit une barrière à la dissolution du métal dans l'électrolyte.

Avant d'appliquer un inhibiteur, la surface du béton doit être préparée. Il s'agit d'éliminer la peinture ou autre revêtement par sablage ou hydro sablage.

Les fonctions essentielles d'un inhibiteur sont les suivantes :

- pénétrer sur la couche du béton très hétérogène par nature.
- diminuer la vitesse de corrosion du métal sans changer les caractéristiques de ce dernier.
- être stable et compatible dans le milieu.
- ne pas d'être toxique.

### **II-7 : l'ensemble des principes et méthodes de réparation conformément à la norme EN 1504 :**

#### **II-7-1 : Définition de la norme EN1504 :**

La norme Européenne EN 1504 normalise les activités de réparation et fournit un cadre de travail amélioré qui permet de réaliser des réparations durables et réussies.

#### **II-7-2 : Les principes généraux dans la norme EN1504 :**

Les méthodes et principes décrits dans la norme s'appuient sur les meilleurs pratiques et sur les méthodes qui ont connu le plus de succès à long terme. Les méthodes de protection et de réparation des structures en béton présentées en détail dans la partie 9 de la norme EN1504 sont regroupées en 11 principes, sont les suivantes :

#### **Principe1 : Protection contre la pénétration :**

Il y a plusieurs méthodes pour la protection des structures en béton contre la pénétration des agents agressifs liquides ou gazeux. La sélection de la méthode adaptée dépend de certains paramètres comme le type d'agent agressif, la qualité du béton et de sa surface et les objectifs visés par les travaux de

réparation ou de protection. Parmi les méthodes de protection contre la pénétration, il y a :

**1-1:** Imprégnation.

**1-2:** Revêtement de surface avec ou sans capacité de pontage des fissures.

**1-3:** Fissures colmatées localement.

**1-4:** Remplissage des fissures.

**1-5:** Transfert des fissures en joints.

**1-6:** Montage des panneaux extérieurs.

**1-7:** Application des membranes.



**Figure (II-17):** Revêtement du surface.



**Figure (II-18):** Colmatage des fissures.



**Figure (II-19):** Transformation des fissures  
joint



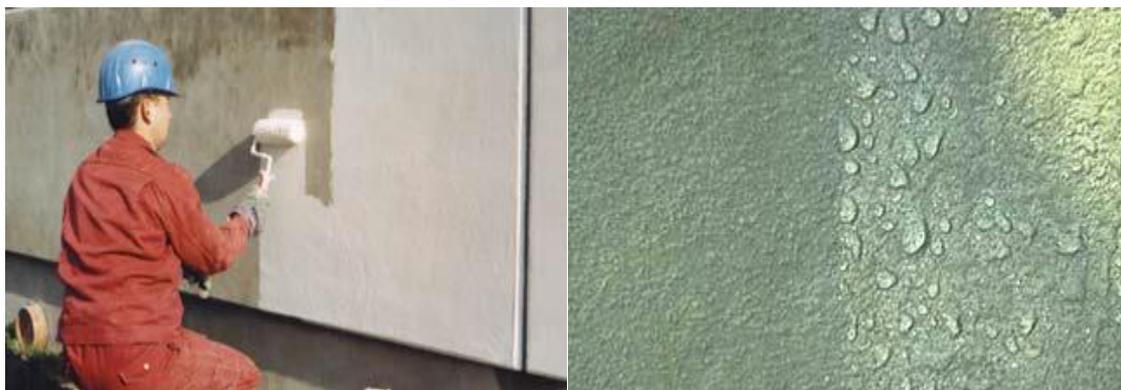
**Figure (II-20):** Erection des panneaux en  
externe



**Figure (II-21):** Application des membranes.

**Principe2 : Contrôle d'humidité** (réglage et maintien de la teneur en humidité du béton selon une gamme des valeurs spécifiées).

Cet objectif est atteint par application de différents types de produits comme les imprégnation hydrophobes , les revêtement du surface et les traitement électrochimiques.



**Figure (II-22):** Application de revêtement. **Figure (II-23):** Traitement hydrophobe.

**Principe 3 : Restauration du béton** (Remplacement et réparation du béton dégradé).

- Restauration de la forme et de la fonction spécifiée à l'origine, du béton d'origine d'un élément de la structure.
- Restauration de la structure en béton par remplacement partiel.

Parmi les méthodes sur la base de cet principe, il y a :

**3-1 :** Application du mortier à la main.

3-2 : Nouveau coulage de béton.

3-3 : Projection de béton ou de mortier.

3-4 : Remplacement de certains éléments.



**Figure (II-24):** Application manuelle.  
de mortier.

**Figure (II-25):** Nouveau béton ou mortier .

**Principe 4 : Renforcement structural** (Augmentation ou restauration de la capacité portante).

4-1 : Ajout ou remplacement d'armature en acier encastrées ou externes.

4-2 : Installation des barres liées entre elles dans des trous préformés ou forés dans le béton.

4-3 : Collage des plaques.

4-4 : Ajout de mortier ou de béton.

4-5 : Injection dans les fissures, vides ou interstices.

4-6 : Remplissage des fissures.

4-7 : Précontrainte.



**Figure (II-26):** Ajout ou remplacement des barres    **Figure (II-27):** Collage des plaques.  
Incorporées ou externes.



**Figure (II-28):** Injection des fissures.    **Figure (II-29) :** Ajout de mortier ou de béton.

### Principe5 : Augmentation de la résistance physique

Les structures en béton sont endommagées par des différents types d'attaques:

- Usure due l'abrasion.
- Abrasion hydraulique.



**Figure (II-30):** Revêtement.

**Figure (II-31):** Ajout de béton.

### Principe6 : Résistance aux produits chimiques

Augmentation de la résistance de la surface du béton détérioration par attaques

chimiques par :

- Recouvrement ou revêtement.
- Imprégnation.
- Ajout de mortier ou de béton.



Figure (II-32): Imprégnation.



Figure (II-33): Ajout de produit chimique.

### Principe7 : Préservation ou restauration de la passivité

Création des conditions chimiques dans lesquelles la surface de l'armature est maintenue ou retourne à l'état passif par :

- 7-1 : Augmentation de la couverture de l'armature avec mortier ou béton.
- 7-2 : Remplacement du béton contaminées ou carbonaté.
- 7-3 : Ré-alcalinisation électrochimique du béton carbonaté.
- 7-4 : Ré-alcalinisation du béton carbonaté par diffusion.
- 7-5 : Extraction électrochimiques des chlorures.



Figure (II-34): Augmentation de l'enrobage.



Figure (II-35) : Remplacement de béton carbonaté par mortier ou béton additionnel.

### Principe8 : Augmentation de la résistivité

Le principe 8 détaille l'augmentation de la résistivité électrique du béton, et de ce fait il couvre pratiquement les mêmes méthodes de réparation que le principe 2 de contrôle d'humidité.



Figure (II-36): Systèmes d'étanchéité pour éviter la pénétration d'eau.

### Principe9 : Contrôle cathodique

Création des conditions dans laquelle les zones d'armature potentiellement cathodique ne peuvent entraîner une réaction anodique.



Figure (II-37) : Limitation de la teneur en oxygène (au niveau de la cathode) par (saturation, ou par revêtement de surface).

### Principe10 : Protection cathodique

Le principe 10 fait référence aux systèmes de protection cathodique. Ce sont des systèmes électrochimiques qui réduisent le potentiel de corrosion à un niveau ou

la vitesse de dissolution de l'acier est fortement réduite. Dans la protection cathodique par courant induit, le courant est fourni par une source électrique externe et il est reparti dans l'électrolyte via des anodes auxiliaires. Ces anodes auxiliaires sont généralement intégrées dans le mortier afin de les protéger des dégradations. Pour fonctionner efficacement, le système requiert un mortier à résistivité assez basse pour permettre un courant de transfert suffisant.



**Figure (II-38):** Application d'un potentiel électrique.

### Principe11 : Contrôle des zones anodiques

Création des conditions dans laquelle les zones d'armature potentiellement anodique ne peuvent participer à la réaction de corrosion.



**Figure (II-39) :** Application d'inhibiteurs de corrosion dans ou sur le béton.

### II-8: Conclusions

Dans cette partie nous avons vu les solutions possibles et envisageables, les ressources et les moyens considérables mis en œuvre pour la réhabilitation des structures endommagées en béton armé.

On se permet aussi de conclure l'importance de l'étape de diagnostic qui est l'étape clé pour déterminer les types des pathologies des structures. C'est l'étape qui permettra l'implémentation des méthodes de réparation les plus convenable et l'évaluation des causes de ces problèmes. Les causes des pathologies peuvent être la nature de la structure et aussi être à cause de l'environnement d'ouvrage. Afin de conserver les réparations et les rendre durables, il est nécessaire de réaliser des travaux de protection adaptés pour éviter l'apparition rapide des nouvelles pathologies.

## **CHAPITRE 03 :**

### **Aspects phénoménologiques du comportement de l'interface Acier/béton**

### III-1: Introduction

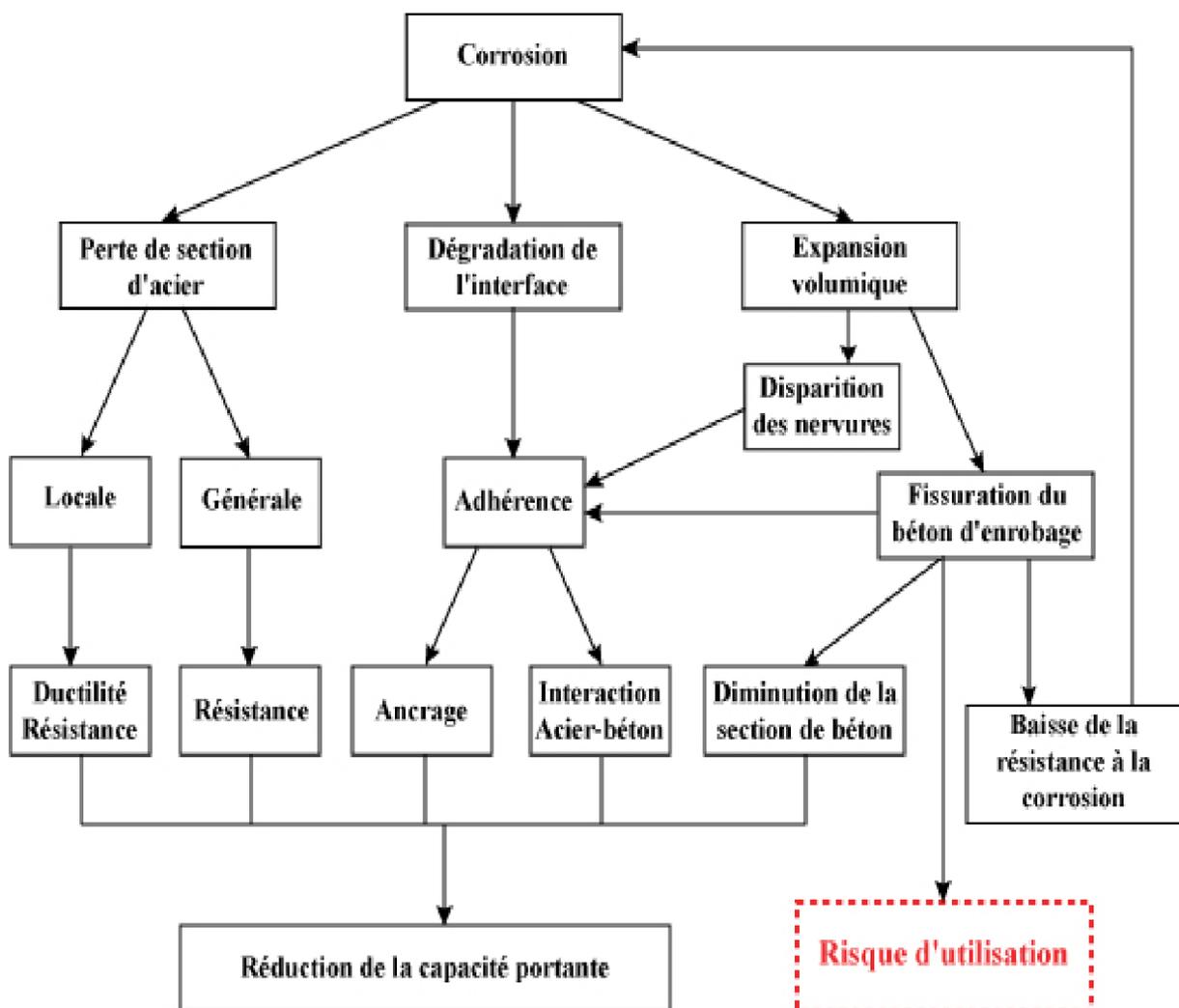
L'association de l'acier et du béton forme un couple : le béton armé. La corrosion ne se développe pas tant que le béton assure une certaine durabilité en protéger physiquement et chimiquement les armatures. Le comportement de la structure dépend essentiellement non seulement des comportements du béton et d'acier mais aussi l'interface entre l'acier et le béton. Il est possible de définir ce dernier comme la zone du béton qui entoure et protéger l'acier. Le comportement de l'interface est représenté par l'adhérence. Il est un phénomène qui permettant d'assurer une liaison entre deux surfaces de deux matériaux différentes.

La cause majeure des dégradations des ouvrages en béton armé survient à l'interface entre l'acier et béton. La couche de protection exposé à des facteurs environnementaux et disparaît avec le temps et un nombre d'ouvrage laisse apparaître des sinistres plus ou moins prononcés. La plupart des observations menées jusqu'à aujourd'hui ont tendance à montrer l'existence d'un couplage entre les effets du chargement extérieur et ceux induits à l'interface par la corrosion.

## III-2: Aspect phénoménologiques du comportement de l'interface en absence de la corrosion

### III-2-1: Description générale :

Le comportement de la liaison entre l'acier et béton peut être défini comme étant l'ensemble des processus d'interaction entre ces deux matériaux. De point de vue mécanique, ce phénomène possède deux caractéristiques principales qui sont la transmission la continuité des contraintes à l'interface.



**Figure (III-1):** Influence de la corrosion des armatures sur la capacité résiduelle de la structure.

### III-2-2: Les différentes modes de ruine :

Des microfissures, induits par le chargement peuvent se développer à l'interface acier/béton lors de processus de dégradation. Elles induisent un mode de ruine.

#### **a: Rupture par propagation des fissures longitudinales :**

Ce type de ruine est de loin le plus courant dans les ouvrages en béton armé, dans ce type de rupture, l'action radiale de l'armature sur le béton entraîne l'apparition des contraintes de traction circonférentielles. Une microfissures se développe selon l'axe d'armature et se propage lorsque le béton atteint sa résistance en traction. Cette propagation dépend de la résistance en traction du béton et d'enrobage de béton.

#### **b: Rupture par plastification des armatures :**

Dans certains cas, la rigidité du béton peut être telle que la ruine provient de la plastification d'armature. Ce type de ruine est très souvent constaté dans le cas d'ancres d'acier noyées dans un bloc massif de béton.

#### **c: Rupture par propagation des fissures cylindriques :**

Ce type de rupture se produit dans le cas où l'interface a atteint sa résistance maximale. Des fissures cylindriques appelée fissures de cisaillement se développent dans le voisinage proche de la barre qui va se trouver complètement libre. Ce type est celle qui caractérise le mieux le comportement de la liaison acier-béton jusqu'à la rupture par des fissures cylindriques de cisaillement.

### III-2-3: Les facteurs influençant sur le comportement de l'interface acier/béton :

#### III-2-3-1: Les facteurs principaux

##### a: Les caractéristiques géométriques des armatures

Le mécanisme de dégradation de la liaison est influencé par l'armature, ronde, lisse ou à haute adhérence. Ces caractéristiques sont primordiales pour évaluer la résistance de la liaison.

Le premier paramètre concerne la surface de la barre, la première phase de dégradation est quasi-inexistante pour les barres rondes et lisses. La liaison est donc plus résistante pour les barres possédant des nervures.

Le deuxième paramètre concerne le diamètre des barres. Ce paramètre quant à lui reste encore sujet à discussions. Les investigations étudiant l'influence des caractéristiques géométriques des armatures, portent essentiellement sur le rapport :

$$m = c/d \dots\dots\dots Eq(III-1).$$

où d : étant le diamètre de barre

c : épaisseur du béton d'enrobage.

##### b: Les caractéristiques géométriques de béton

La résistance en traction en béton est un paramètre significatif lors de la dégradation. Elle détermine la phase d'initiation de la fissure du béton ainsi que la fin de la phase d'adhérence parfaite. D'autre part, l'hétérogénéité du béton est directement liée à la résistance en compression-traction, ainsi elle affecte la résistance de la liaison. L'épaisseur de l'enrobage joue un rôle important, elle conditionne les propriétés de l'apparition des fissures longitudinales. Il s'agit aussi des facteurs quantitatifs (rapport eau/ciment, taille du granulat).

### **c: Les caractéristiques de chargement**

Le type de chargement (monotone ou cyclique) et la vitesse d'application de charge influencent sur le mécanisme de dégradation. Ainsi, le sens d'application de la charge joue un rôle non négligeable lorsque la limite élastique de la barre est atteinte.

### **d: Le confinement**

Le confinement est défini comme la somme des efforts appliqués à la surface de contact entre l'acier et béton. Il existe deux formes de confinement : le confinement par le renforcement passif et par la pression latérale ou transversale.

### **III-2-3-2: Les facteurs secondaires**

#### **a: La direction de coulage du béton**

Le sens de coulage par rapport à la direction de la charge appliqué a une influence sur la résistance de la liaison. Dans le cas où ils sont dans le même sens, on peut avoir une rigidité plus importante de la liaison.

#### **b: La corrosion**

En principe, la corrosion favorise la propagation des fissures longitudinales dans le béton et si elle a lieu au niveau de l'interface, on a une perte d'adhérence entre l'acier et béton.

Il s'agit aussi d'autres facteurs tels que :

- L'effet de pont sur la barre d'acier ;
- La fissuration au jeune âge du béton ;
- Les effets d'échelle.

### III-3: Aspect phénoménologiques du comportement de l'interface en présence de la corrosion

#### III-3-1: L'effet de la corrosion des armatures sur leur adhérence

##### a: Dégradation mécanique de l'enrobage

L'influence de la corrosion sur le béton se traduit essentiellement par la fissuration. Selon la géométrie (épaisseur d'enrobage, diamètre des armatures) et les caractéristiques mécaniques du béton, celui-ci peut soit se fissurer longitudinalement à l'aplomb d'acier, soit se détacher (épaufreure).

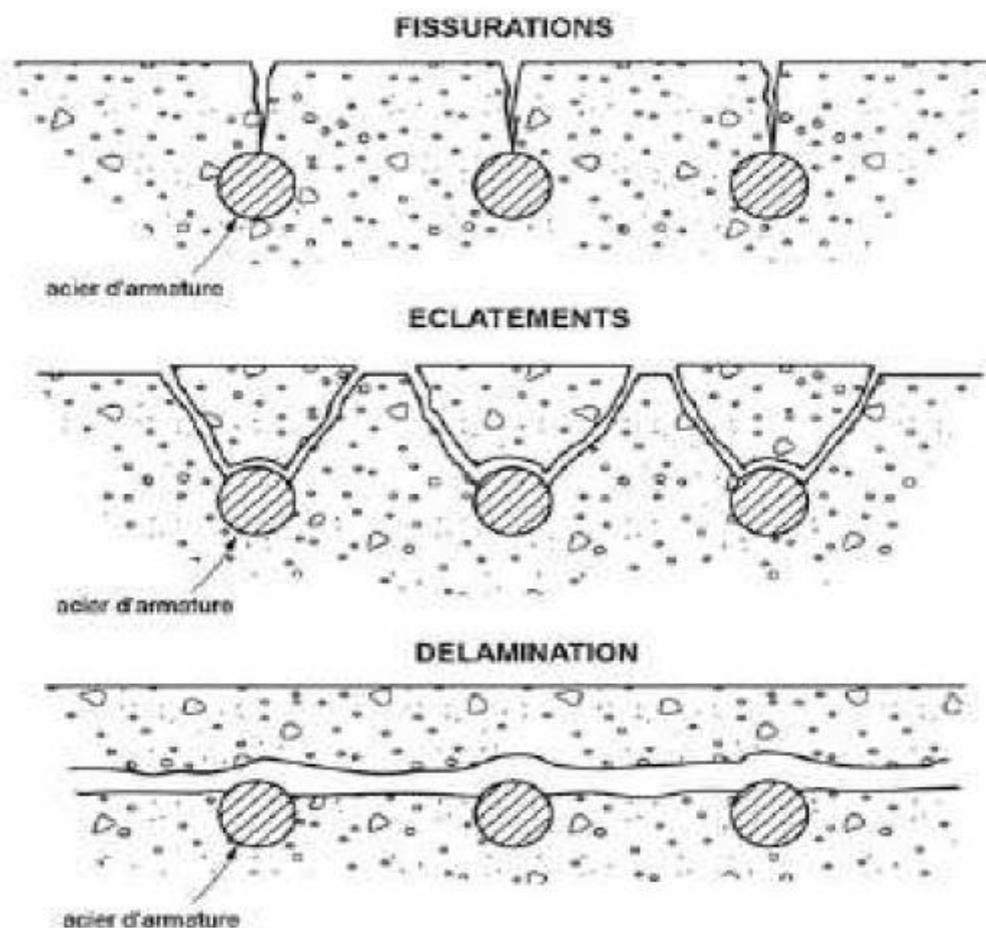


Figure (III-2) : types de fissures développées lors de la corrosion des aciers.

### **b: Rupture d'adhérence :**

La corrosion est un facteur majeur qui modifie l'interface entre l'acier et le béton dans son comportement sous charge, et principalement modifier les propriétés de frottement ou encourent d'adhérence.

Il faut savoir que l'adhérence est définie à une échelle locale, généralement à l'échelle de la nervure. La rupture d'adhérence d'une armature lisse se situe au niveau de la zone de transition mais pour les armatures nervurées, la rupture se localise au sein du béton.

### **III-3-2: Les facteurs influençant sur le comportement d'interface en présence de corrosion**

#### **III-3-2-1: Les facteurs principaux**

##### **a: Le confinement:**

Le confinement est un paramètre dont l'influence est d'une grande importance sur la réponse de l'interface. Lors de la première phase de dégradation et dans le cas de faible degré de corrosion, on remarque que le confinement améliore l'adhérence entre l'acier et le béton. Dans le cas du chargement cyclique, l'adhérence est améliorée lors de premier cycle de chargement.

##### **b: Les agents agressifs**

Il est observé que la fissuration du béton ne provoque pas de changement considérable sur le comportement de la corrosion. En présence de  $\text{CO}_2$ , la fissuration n'a pas d'effet sur le développement de la corrosion qui reste uniforme. Intuitivement, en présence des chlorures, l'accroissement de la corrosion se développe de manière non uniforme. Par ailleurs, la corrosion non uniforme accélère la fissuration du béton d'enrobage.

### C : Les facteurs secondaires

- La température ;
- Le type d'armature ;
- Le rapport massique de la quantité d'eau sur celle de ciment.

### III-4: Présentation des essais d'adhérence pour identifier les paramètres d'interface acier/béton

De nombreux essais ont été développés pour étudier la liaison acier/béton, car une telle étude requiert le développement d'instruments de mesure adaptés au phénomène étudié. Ainsi le modèle d'interface acier-béton mise en œuvre pourra être validé de manière pertinente au regard des résultats directement fournis par l'expérience.

Un classement des essais capable de caractériser l'adhérence entre l'acier et le béton en fonction du protocole utilisé, a été mise en place :

Ce classement comprend :

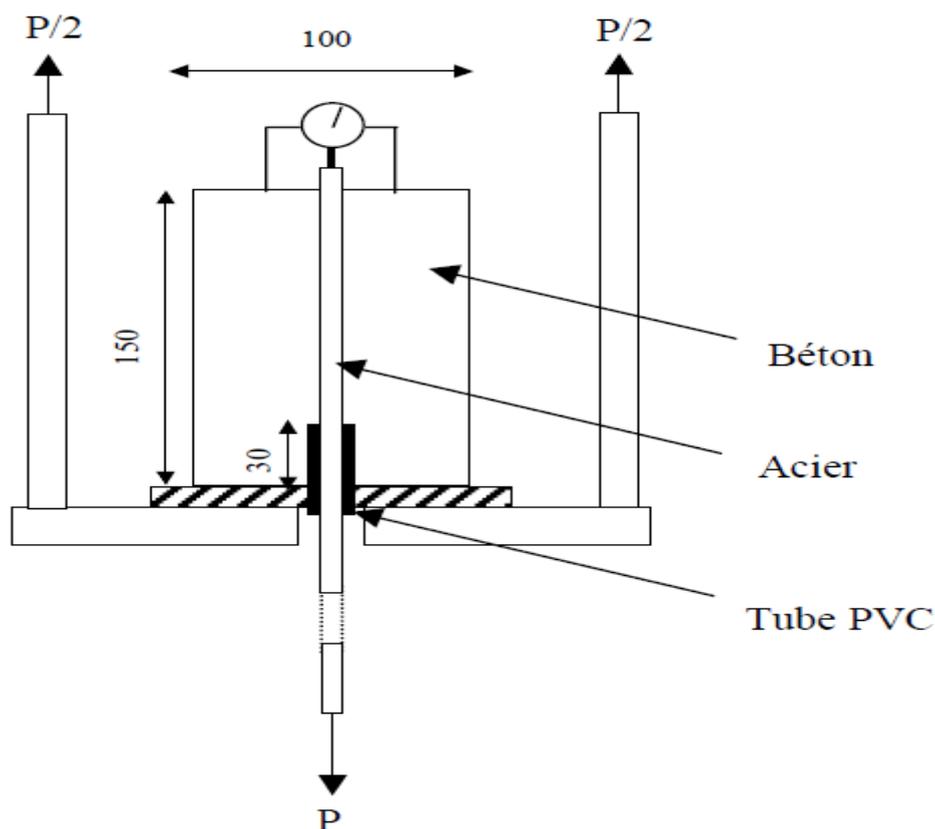
- Les essais d'arrachement ou « pull out ».
- Les essais de tirant.
- Les essais de poutre ou « beam and beam end test ».

#### III-4-1: Présentation de l'essai d'arrachement :

Les essais d'arrachement sont les essais d'adhérence les plus utilisés pour étudier le comportement de l'interface acier-béton. Ces essais ont pour but de déterminer la résistance maximale de l'interface. Son principe est représenté sur la figure ci-dessus, un prisme en béton est posé sur une plaque trouée qui laisse passer l'armature d'acier. Le but est d'exercer un effort de traction croissant à la barre jusqu'à la ruine de système.

Les éprouvettes ont été coulées dans des coffrages en bois. Le démoulage s'est fait 24 heures après la coulée. Puis une période de cure de sept jours a suivi immédiatement après l'utilisation d'une toile de jute maintenue constamment humide.

L'état de contrainte-déformation de la zone d'interface dans l'essai d'arrachement est du non seulement à l'activation d'interface mais aussi à l'enrobage de béton. Pour un enrobage insuffisant, on n'utilise pas cet essai car les fissures se développent rapidement vers la surface du béton et on ne peut pas exploiter toutes les informations.



**Figure (III-3):** Principe de l'essai d'arrachement.

Les avantages d'essais d'arrachement :

- Le faible coût et la simplicité ;
- C'est l'essai le plus utilisé pour analyser et étudier l'ancrage d'une armature dans un bloc de béton ;
- Le chargement appliqué est principalement de la traction pure ou le compression pure, sans couplage avec autre type de chargement (flexion ou torsion).

### **III-4-2: Présentation de l'essai tirant**

L'essai tirant est utilisé pour étudier les caractéristiques de la fissuration (la distribution, le nombre, l'espacement et l'ouverture des fissures) dans le béton en présence de la barre d'acier.

Pour l'essai de tirant classique, la fissuration est détectée lorsqu'elle apparaît en surface, au moment où le comportement de l'interface est très avancé. Cet essai permet observer l'influence de la dégradation de l'interface acier-béton sur le profil final de réseau des fissures.

### **III-4-3: Présentation de l'essai de flexion**

Ce type d'essai est utilisé plutôt pour étudier l'influence de l'interface (en changeant différentes type de béton et d'acier) sur le comportement globale de la poutre. Cet essai est soumis à une combinaison de différentes type chargement comme la flexion, la torsion ou le cisaillement. L'éprouvette est un bloc de béton soumis en général à la flexion 3 ou 4 points. Son comportement est exprimé en terme de courbe forces-flèche.

### III-5: lois de comportement adoptées

#### III-5-1: Le comportement du béton

Le comportement du béton est la combinaison de plusieurs mécanismes principalement non linéaire. Les non linéarités s'accompagnent de micro et/ou de macro fissures. A ce jour, plusieurs modèles ont été développées pour obtenir des résultats proches de la réalité.

##### III-5-1-1: Modèles isotrope

###### a: Modèle de MAZARS

Le modèle de MAZARS 1984 [30] est un modèle simple, réputé et robuste, basé sur la mécanique de l'endommagement qui permet de décrire la diminution de la rigidité du matériau sous l'effet de la création de microfissures dans le béton. Il s'appuie sur un seul variable interne scalaire  $D$ , décrivant l'endommagement de façon isotrope.  $D$  varie entre 0 (pour un matériau sain) et 1 (pour un matériau rompu). Cette variable est expérimentalement déterminée comme une fonction de la déformation.

La variable de l'endommagement  $D$  résulte d'une combinaison d'un endommagement de traction  $D_t$  et d'un endommagement de compression  $D_c$  :

$$D = \alpha_t D_t + \alpha_c D_c \dots\dots\dots \text{Eq(III-2)}.$$

(En traction pure:  $\alpha_t=1, \alpha_c=0$ . Et en compression pure :  $\alpha_t=0, \alpha_c=1$ ).

L'évolution de  $D_t$  et  $D_c$  est de la forme :

$$D_i(\varepsilon) = 1 - \frac{k(0)(1-A_i)}{\varepsilon} - \frac{A_i}{\text{Exp}[B_i(\varepsilon-K(0))]} \dots\dots\dots \text{Eq(III-3)}.$$

Avec :  $i=t$  ou  $c$

$A_c ; B_c ; A_t ; B_t$  sont les paramètres caractéristiques du modèle.

L'évolution de l'endommagement est pilotée par la déformation équivalente  $\varepsilon$  qui traduit l'état d'extension locale provoqué par la sollicitation. Elle s'écrit comme suit :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\langle \varepsilon_1 \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_2 \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_3 \rangle_+^2} \dots\dots\dots \text{Eq(III-4).}$$

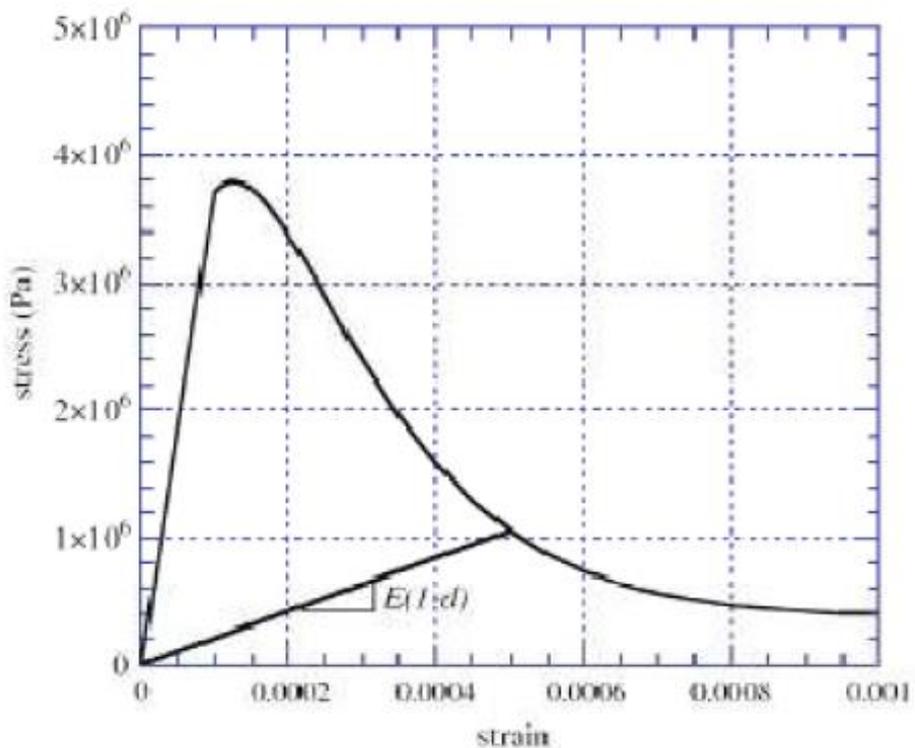
Où  $\varepsilon_i$  : La déformation principale dans la direction i.

$\langle \rangle_+$  : désigne le signe de Mac Cauley.

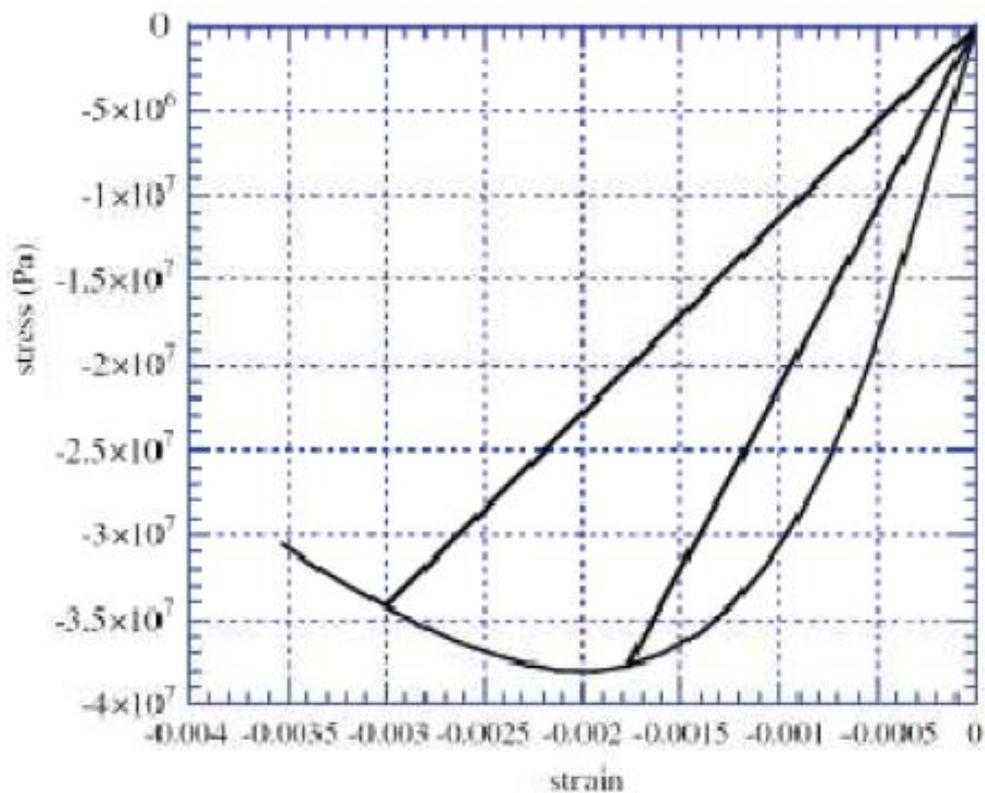
La surface seuil s'écrit :

$$f(\varepsilon, D) = \varepsilon - K(D) = 0 \dots\dots\dots \text{Eq(III-5).}$$

Où  $K(0) = \varepsilon_{d0}$  correspond au seuil d'endommagement du matériau vierge.



Traction



Compression

**Figure (III-4):** Modèle de comportement en dommageable de Mazars.

Il y a aussi le modèle de De Vree. Il garde le même principe de Mazars, mais il définit une nouvelle déformation équivalente  $\epsilon_{eq}$  :

$$\epsilon_{eq} = \frac{K-1}{2K(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2K} \sqrt{\frac{(K-1)^2}{(1-2\nu)^2}} I_1^2 + \frac{6K}{(1+\nu)^2} J_2$$

..... Eq(III-6).

Avec :  $J_1$  et  $J_2$  : respectivement le premier et le deuxième invariant du tenseur de déformation.

$K$  : le rapport entre la résistance uni axiale du matériau en compression  $F_c$  et en traction  $F_t$ .

La variable de l'endommagement  $D$  est définit comme suit :

$$D = 1 - \frac{1-A}{\varepsilon \varepsilon q} + \frac{A}{\text{Exp}(B(\varepsilon \varepsilon q - \varepsilon D_0))} \dots \text{Eq(III-7)}.$$

Où : A ; B ;  $\varepsilon_{D0}$  : sont les trois paramètres du modèle.

### III-5-1-2: Modèles anisotrope

Dragon et Halm proposent une modélisation anisotrope de l'endommagement dans laquelle l'endommagement est le seul phénomène dissipatif considéré.

Le modèle utilise une variable interne tensorielle d'ordre 2 d'endommagement (d) décrivant l'orientation et l'étendue des méso-fissures :

$$d = \sum_i d(s) n^i * n^i \dots \text{Eq(III-8)}.$$

Où  $D^i(s)$  : est une fonction scalaire adimensionnelle traduisant la densité de méso-fissures du système (i).

### III-5-2: Le comportement de l'acier soumis à la corrosion

#### III-5-2-1 : Modèle de plasticité couplé avec l'endommagement

Afin de considérer les effets de la corrosion sur le comportement mécanique de l'acier, il est nécessaire de prendre en compte deux effets importants : le taux de corrosion (perte de masse d'acier) et la présence de piqures (perte de capacités portantes et de ductilité). Un modèle couplant plasticité et endommagement ductile a été retenu.

L'énergie libre de Helmholtz s'exprime par :

$$\Psi = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{1}{2} (1 - D)(\varepsilon - \varepsilon p) E (\varepsilon - \varepsilon p) + R(r) \right] \dots \text{Eq(III-9)}.$$

Où  $\rho$  : la masse volumique.

$\Psi$ : le potentiel d'état.

E : le module d'Young.

D : la variable d'endommagement.

$\varepsilon$  : La déformation totales.

$\varepsilon^p$  : la déformation plastique.

R(r) : la fonction d'écrouissage isotrope.

La contrainte s'obtient par dérivation par rapport à la déformation totale :

$$\sigma = E(1-D)(\varepsilon - \varepsilon^p) \dots\dots\dots \text{Eq(III-10)}.$$

La contrainte équivalente de Mises définie par :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma^D \dots\dots\dots \text{Eq(III-11)}.$$

( $\sigma^D$  est la partie déviatorique du tenseur de contrainte  $\sigma$ ).

Le critère de Mises prend la forme suivante :

$$\rho = \frac{\sigma_{eq}}{1-D} - R - \sigma_y \dots\dots\dots \text{Eq(III-12)}.$$

Où :  $\sigma_y$  la limite d'élasticité initiale en traction simple.

$$F_{end} = P - P_D \dots\dots\dots \text{Eq(III-13)}.$$

Où P: La déformation plastique cumulée.

$P^D$ : La déformation qui correspond au début d'endommagement.

L'endommagement D s'exprime par :

$$D = \frac{D_c}{P_R - P_D} (P - P_D) \dots\dots\dots \text{Eq(III-14)}.$$

Où:  $D_c$  : l'endommagement critique.

$P_R$  : la déformation plastique à rupture.

Le taux de corrosion est défini par :

$$T_c = \left( \frac{d_{non\ corro} - d_{corro}}{d_{non\ corrodé}} \right) \dots\dots\dots Eq(III-15).$$

Avec  $d_{corrodé}$  et  $d_{non\ corrodé}$  : respectivement le diamètre des barres corrodée et non corrodée.

### III-5-3: Récapitulatif des modèles d'interface Acier/béton

Plusieurs modèles sont développées pour la description de comportement de l'interface acier-béton. Ceux jugés les plus pertinents ont été retenus: le modèle de Dominguez N et le modèle proposé par Lundgren K.

Lundgren K a proposé un modèle de comportement de l'interface (vue comme une surface discontinuité) en présence de corrosion vis-à-vis des sollicitations monotones ou cycliques. Le modèle peut être scindé en deux parties: une proposition d'un modèle de comportement d'interface et une prise en compte du phénomène de corrosion. Il est formulé dans le cadre de la théorie de plasticité.

Les aspects principaux sont: les surfaces de charge et aussi la loi de d'évolution. La modélisation repose sur l'approche que l'interface est une zone sujette à un transfert d'effort depuis l'acier et le béton.

Ce modèle a été développé en tridimensionnel (cylindrique) en tenue compte la corrosion de manière axisymétrique.

### III-6: Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les modes de ruine de l'interface Acier/béton en absence de la corrosion :

- Il est possible que la ruine se développe par la propagation des fissures longitudinales où des fissures cylindriques et par plastification des armatures.

Le comportement de l'interface en présence de la corrosion :

- C'est un mécanisme qui se fait par la dégradation mécanique de l'enrobage et par la suite par la rupture de l'adhérence entre l'armature et le béton.

Les caractéristiques géométriques de l'acier, du béton et les caractéristiques de chargement sont les facteurs principaux influençant sur le comportement de l'interface et certains facteurs secondaires (la corrosion et la direction de coulage de béton...etc ...).

Plusieurs essais d'adhérence sont réalisés pour déterminer les paramètres de l'interface Acier/béton : l'essai d'arrachement est le plus utilisé et le plus efficace pour déterminer la résistance maximale d'interface et aussi l'essai de tirant et l'essai de flexion ont pour but d'étudier les caractéristiques des fissurations dans le béton d'enrobage.

## **CHAPITRE 04 :**

# **Modélisation de l'influence du taux de corrosion sur le comportement mécanique des structures en béton armé**

### IV-1: Introduction:

La corrosion des armatures dans les structures en béton armé est l'un des problèmes de durabilité le plus courant. Les structures en béton armé soumise à la corrosion subit des différents problèmes de détérioration qui affectent sa capacité de charge tel que la perte d'adhérence entre les armatures et béton d'enrobage et la fissuration du béton et la réduction de la surface et la résistance des armatures.

En raison, la corrosion de l'acier reste un domaine d'étude plus important pour les structures en béton armé, plusieurs modèles expérimentaux où numériques ont été créés par les chercheurs, ayant des différentes modes de ruine ( flexion, cisaillement etc ...).

Dans ce chapitre, un modèle numérique sous le code de calcul ABAQUS 6.14 CAE en 3D a été développé pour simuler l'effet des différents degrés de corrosion ( intacts et corrodés ) sur le comportement mécanique en flexion d'une structure en béton armé.

Finalement, une étude paramétrique sous le code de calcul ABAQUS 6.14 CAE est réalisée afin de montrer l'effet de la modification du degré de corrosion, de la région de la corrosion, de l'enrobage et du diamètre des armatures en zone tendue ou en zone comprimée sur la capacité portante résiduelle de la structure en béton armé.

### IV-2: Généralité:

On peut définir l'interface acier/béton comme la zone de contact entre l'acier et le béton. Cette zone compose du béton autour de la barre d'acier. Le comportement d'interface c'est la relation entre la contrainte transféré et le déplacement de la face du béton par rapport à l'acier

Les interactions mécaniques entre l'acier et béton se provoquent des contraintes :

- Contrainte d'adhérence et glissement dans la direction tangentielle.
- Contrainte normal et ouverture entre le béton et l'acier dans la direction radiale.

La relation la plus importante pour décrire le comportement d'interface est le rapport entre la contrainte tangentielle et le glissement relatif d'armature. L'interface a pour but d'assurer le fonctionnement de béton et d'acier pour obtenir la capacité portante de la structure. La dégradation d'interface se fait principalement dans la zone de béton d'enrobage autour d'acier qui entraine un déplacement relatif entre l'acier et le béton.

### IV-3: Modélisation de la liaison :

Il y a des options principales ont été utilisées dans la littérature pour simuler la liaison béton / acier dans la modélisation des poutres :

- La première option est l'utilisation d'une interface ou d'un élément ressort pour transférer la contrainte entre l'acier et le béton. Cette méthode consomme plus de temps et d'efforts et n'est donc pas pratique pour modéliser de grandes structures 3D. La plupart des chercheurs ont utilisé cette méthode de différentes manières.

L'élément d'interface 1-D, nommé traducteur dans ABAQUS, a été utilisé par Li et al. (2014) a développé un modèle EF pour étudier le comportement des digues

en béton affectées par la corrosion. L'élément, qui représente la liaison, a deux nœuds reliant les éléments en béton et les barres d'armature.

- La deuxième option consiste à modifier les propriétés des éléments en béton ou en acier pour simuler l'effet de la liaison. Les propriétés des matériaux d'une petite région de béton, en contact avec la barre d'armature ont été modifiées pour représenter une meilleure interaction de liaison.

- La troisième option est la liaison comme interaction entre deux surfaces 3D. Cette méthode peut être utilisée dans différentes approches dans ABAQUS pour le modèle 3D du béton et de l'acier.

### **Présentation du logiciel ABAQUS :**

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis, développé par Dassault Systèmes. La simulation par éléments finis ou «méthode des éléments finis» désigne un ensemble de techniques numériques permettant de résoudre approximativement une certaine catégorie de problèmes mathématiques basés sur des équations aux dérivées partielles, dont on ne sait généralement pas trouver de solutions exactes. Il permet, entre autres, de réaliser des simulations du comportement de pièces ou de structures impliquant des éléments en polymères ou en élastomères : prise en compte des non linéarités, des grandes déformations, couplage avec les effets de température. Il est ainsi possible de réaliser des analyses en statique, ou en dynamique.

ABAQUS se compose de trois produits:

- ABAQUS/Standart (solveur utilisant un schéma d'intégration implicite)
- ABAQUS/Explicit (solveur utilisant un schéma d'intégration explicite)
- ABAQUS/CAE (interface de modélisation et de visualisation des résultats)

ABAQUS permet d'effectuer des simulations dans des domaines variés (mécanique ; thermique ; électrique) et autorise les couplages (thermo – mécaniques, acousti -mécaniques ; etc.). ABAQUS permet également de traiter des problèmes de différentes natures (statique ; dynamique ; linéaire ; non linéaire).

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS / Standard permet d'analyser les types de problèmes suivants:

- Statique linéaire et non linéaire.
- Dynamique linéaire.
- Dynamique non linéaire à faible vitesse (réponse en fréquence).
- Transfert de chaleur non linéaire.
- Déplacement de température couplé (quasi-statique).
- Thermoélectrique couplé.
- Problèmes de diffusion de masse.
- Acoustique structurelle.

### IV-3-1: Comportement du béton :

Le développement d'un modèle numérique pour le comportement du béton est une tâche difficile car le béton est un matériau fragile en traction et a un comportement hétérogène en compression.

Le modèle d'endommagement plastique a été utilisé pour décrire le comportement du béton. Pour définir le modèle d'endommagement plastique du béton dans ABAQUS, plusieurs paramètres doivent être convenablement spécifiés :

$\psi$	$\varepsilon$	$f_{b0}/f_{c0}$	$K_c$	$\mu$
30	0.1	1.67	0.67	0,001

**Tableau (IV-1):** paramètres d'endommagement plastique de béton.

Avec :  $\psi$  : angle de dilatation ;

$\varepsilon$  : excentricité du potentiel d'écoulement ;

$f_{b0}/f_{c0}$  : rapport de la limite d'élasticité en compression bi axial initiale à la limite d'élasticité en compression initiale ;

$k_c$  : invariant du rapport de contrainte ( $k_c = 2/3$ )

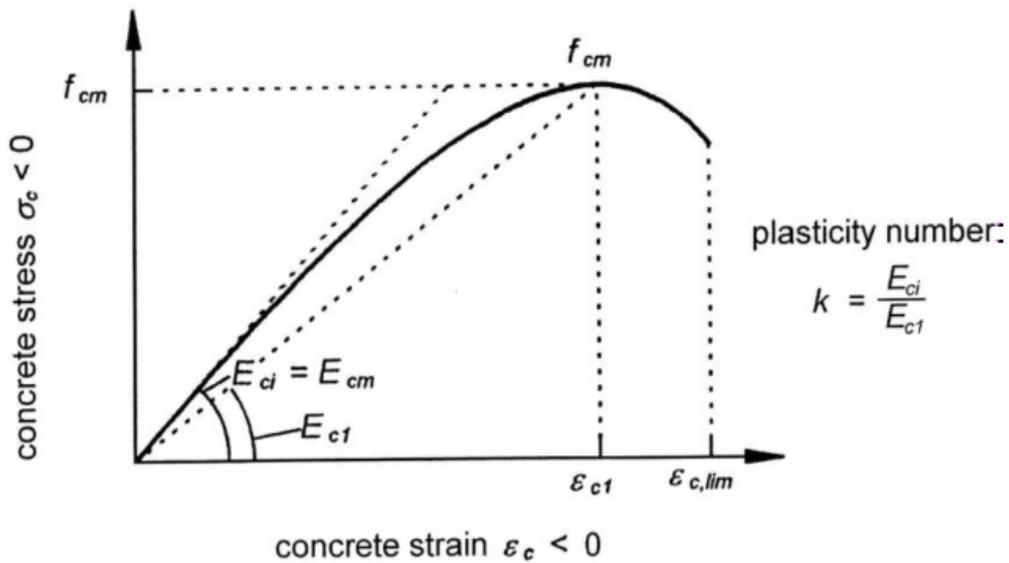
$\mu$  : paramètre de viscosité ;

$E$  : le module d'élasticité ( $E = 25000 \text{ N / mm}^2$ ) ;

$\nu$  : le coefficient de Poisson ( $\nu = 0,18$ ).

**IV-3-1-1: Comportement du béton a la compression :**

Le modèle d'endommagement de béton à la compression requiert en entrée la contrainte par rapport à la déformation inélastique du béton à la fois pour la compression et la traction, obtenues à partir d'essais de compression et de traction uni axiale.



**Figure (IV-1):** Diagramme de contrainte-déformation pour la compression uni axiale.

Où ;  $\sigma_c$  : la contrainte de compression,

$f_{cm}$  : est la résistance moyenne à la compression des cylindres en béton,

$E_{c1}$  : est le module d'élasticité sécant du béton de l'origine à la contrainte de compression maximale.

$E$  : est le module d'élasticité du béton.

Un modèle est développé par Sargin pour définir la relation contrainte – déformation à la compression :

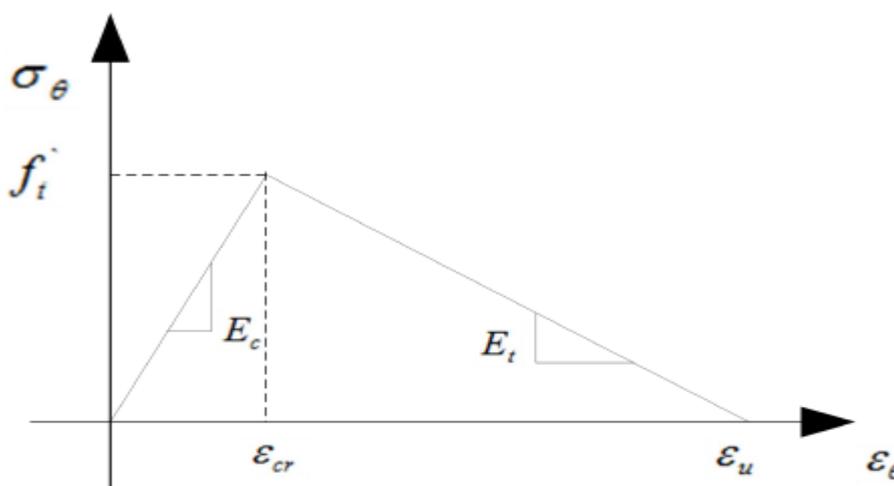
$$\sigma_c = \frac{\left( \left( \frac{E_c}{E_g} \right) (\epsilon/\epsilon_c) \right) + (D - 1) (\epsilon/\epsilon_c)^2}{1 + \left( \left( \frac{E_c}{E_g} \right) - 2 \right) (\epsilon/\epsilon_c) + D (\epsilon/\epsilon_c)^2} f_c \dots\dots\dots \text{Eq(IV-1).}$$

Avec :  $E_g$  : module de cisaillement de béton.

$\varepsilon_c$  : est la déformation maximale du béton et  $D$  est compris entre 0 et 1.

**IV-3-1-2: Comportement de béton a la traction :**

Le comportement en traction du béton est considéré comme un élastique linéaire jusqu'à ce que la fissuration du béton soit initiée à une résistance à la traction en flexion.



**Figure (IV-2):** Courbe contrainte – déformation de béton à la traction.

$\sigma = E_c \cdot \varepsilon$  pour  $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cr}$  .....Eq (IV-2).

$\sigma = f_t - E_t(\varepsilon - \varepsilon_{cr})$  pour  $\varepsilon_{cr} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$  .....Eq (IV-3).

$\sigma = 0$  pour  $\varepsilon > \varepsilon_u$  .....Eq (IV-4).

**IV-3-2: Comportement d'acier :**

Dans cette étude, un comportement élasto-plastique parfait a été considéré pour l'acier. Le comportement de l'acier est supposé suivre une relation bi-linéaire. Dans ABAQUS, ce comportement est d'abord défini par le comportement élastique linéaire de pente ascendante égale au module d'élasticité

( $E_s = 210000 \text{ N / mm}^2$ ) et le coefficient de Poisson ( $\nu = 0,3$ ). Une fois que la contrainte atteint la contrainte d'élasticité  $f_y$ , elle est maintenue constante.

L'acier est supposé se comporter de la même manière en traction et en compression (Figure IV-3).

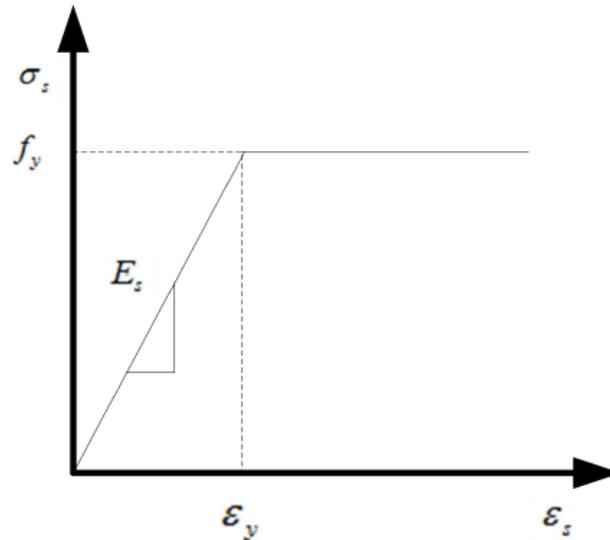


Figure (IV-3): Relation bi-linéaire contrainte-déformation pour l'acier

### IV-3-3: Conditions aux limites et chargement

Les poutres sont simplement supportées et soumises à un essai de flexion quatre points en condition quasi-statique. La commande de déplacement est utilisée lors du chargement est appliqué sur la structure. Dans le support double, les degrés de liberté de les transitions sont nulles dans les trois directions principales. Selon la direction de l'axe longitudinal (Z), la translation d'une ligne de nœuds sous le support, le long de l'axe X a été contraint ( $U_X = U_Y = U_Z = 0$ ). Cependant, dans le support simple, les nœuds sont contraints dans les directions X et Y ( $U_X = U_Y = 0$ ).

### IV.3.4: Paramètres d'endommagement par compression et traction du béton

Les paramètres devant être également spécifiés pour le modèle dans le code de calcul ABAQUS sont les paramètres d'endommagement par compression et tension ( $d_c$  et  $d_t$ ).

Lorsque l'échantillon de béton est déchargé, la rigidité élastique se dégrade en tout point sur la branche descendante des courbes de contrainte-déformation. Le paramètre de dommage indique la détérioration de la rigidité du béton et est exprimée par deux variables  $d_c$  et  $d_t$  pour compression et tension respectivement. Les valeurs maximales de  $d_c$  et  $d_t$  sont proches de 0,4 et 0,8 respectivement. Ces paramètres sont disponibles dans la section des matériaux du manuel d'utilisation d'ABAQUS.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E^{-1}} \quad \text{Eq (IV-3).}$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E^{-1}} \quad \text{Eq (IV-4).}$$

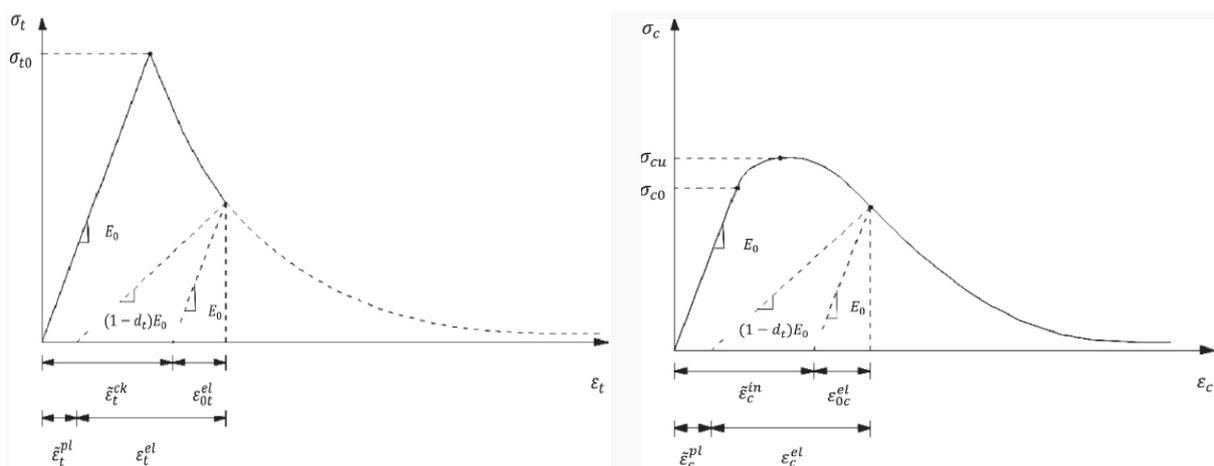


Figure IV.4: comportement du béton sous traction uniaxiale (a) et compression uniaxiale (b).

### IV-3-5: Validation d'une poutre à la flexion:

#### IV-3-5-1: Description du modèle ( poutre non corrodée ):

Afin de tester l'influence de la corrosion sur la résistance résiduelle de structures en béton armé, un modèle de flexion 4 points sur poutres en béton armé a été développé sous le code de calcul ABAQUS. La poutre est de 2000mm de longueur pour une section transversale de (200x200)mm. Les renforcements d'acier sont constitués de 2 barres supérieures HA8 et 2 barres inférieures HA10 et des cadres de 6 mm de diamètre avec espacement de 150mm. Un tel dimensionnement favorise la rupture des aciers permettant de mieux apprécier l'influence de la corrosion sur la tenue de telles structures.

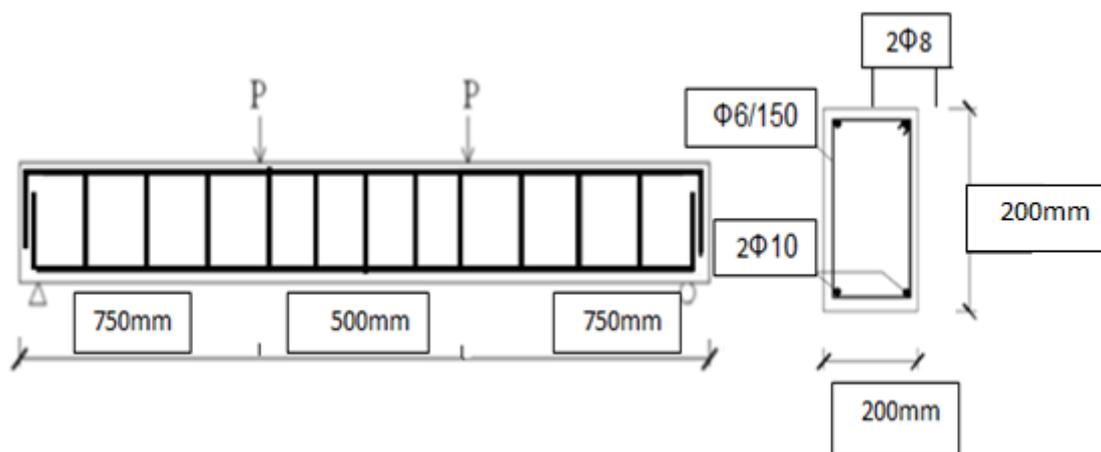


Figure (IV-5): schéma représentatif de la poutre non corrodée.

Dans cette étude, les modèles numériques par EF développés impliquent des éléments solides tridimensionnels 3D. Des conditions aux limites ont été appliquées à la ligne médiane inférieure des plaques d'acier de support. Le chargement a été appliqué sous forme de pression uniforme sur la surface supérieure des plaques de chargement en acier pour éviter les problèmes de concentration de contraintes comme il est représenté sur la figure (IV-4).

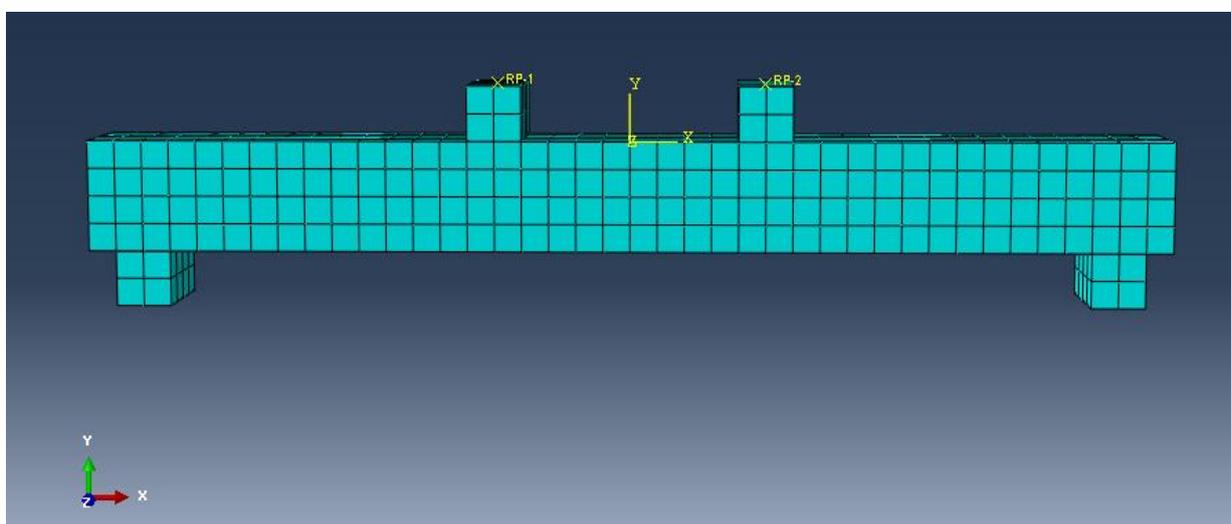
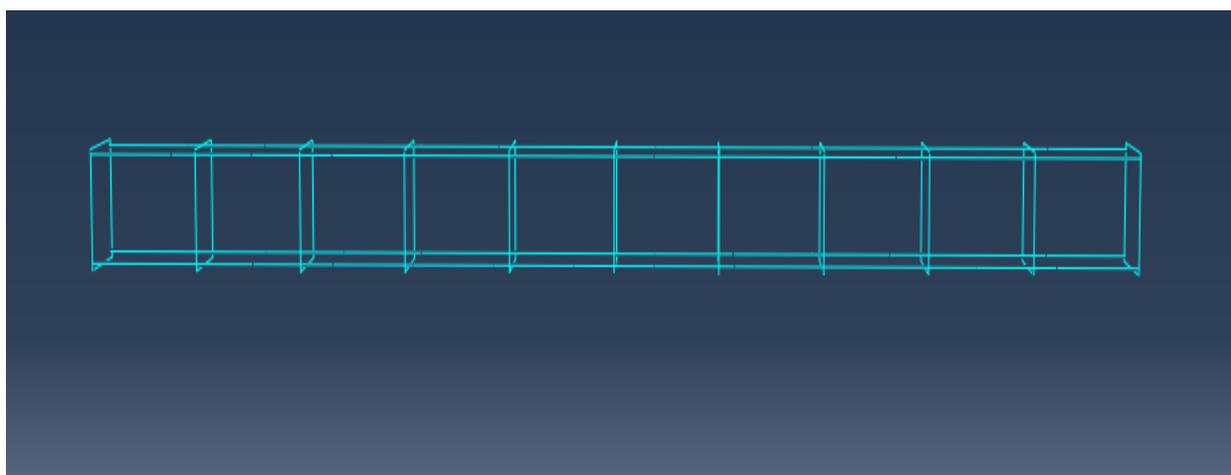
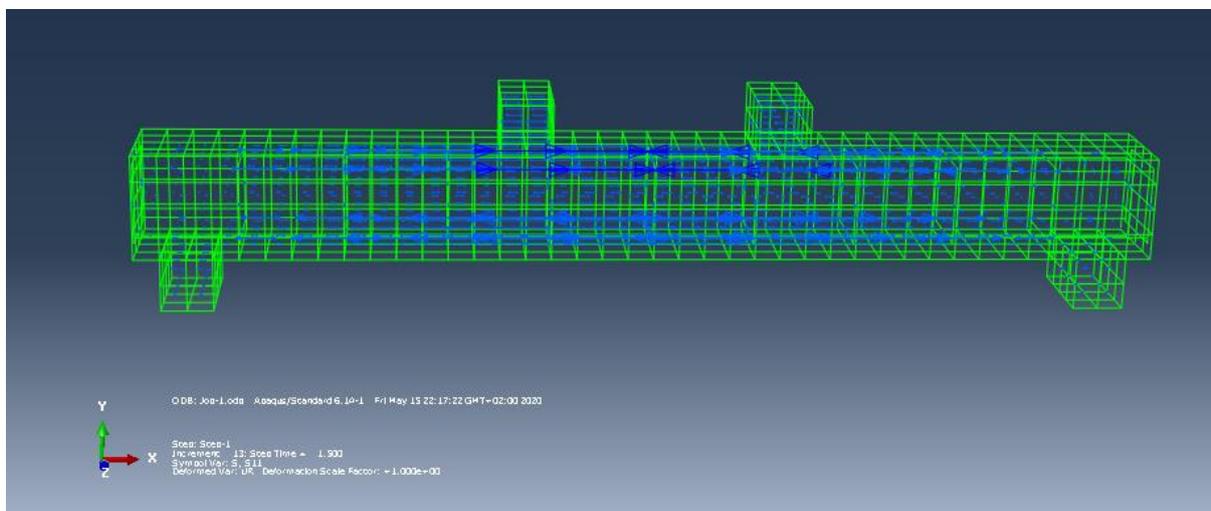
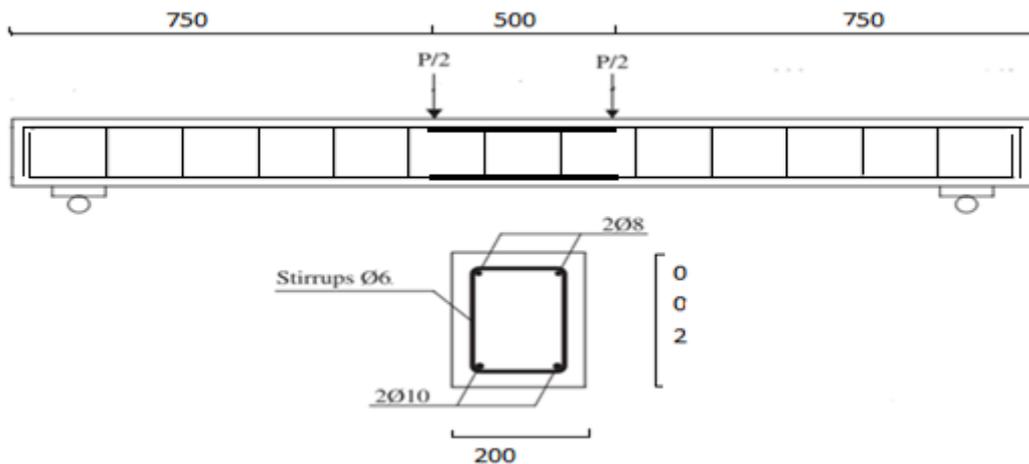


Figure (IV-6): Exemple du modèle 3D pour la poutre dans ABAQUS.

### IV-3-5-2: Description du modèle (poutre corrodée):

Pour obtenir l'effet de degré de la corrosion sur la charge de rupture dans les poutres, des modèles ont été réalisées par ABAQUS de mêmes propriétés des matériaux avec de degré de corrosion différentes (10%, 25%, 40%, 50%). Ces degrés de corrosion ont été appliqués soit aux barres supérieures soit aux barres inférieures ou soit les barres supérieures et inférieures.



**Figure (IV-7):** schéma représentative d'une poutre corrodée.

La modélisation de la poutre corrodée est difficile car la corrosion peut varier considérablement de long de la barre dans la poutre et la fissuration de béton d'enrobage est aléatoire. Les propriétés des matériaux ont été modifiées pour refléter les dommages causés par la corrosion (la réduction de la surface d'acier et réduction des propriétés mécaniques d'acier etc ...).

Afin de modéliser la liaison entre le béton et l'acier dans l'ABAQUS on utilise une approche cohésive basé sur la surface. Des paramètres qui définissent l'interaction Acier-béton doivent être définis.

**La réduction de la résistance du béton d'enrobage:** La corrosion des armatures provoque des fissurations dans la zone de béton d'enrobage près de la barre corrodée. Cette fissuration affectera le comportement de la poutre en particulier de la zone comprimée.

**La réduction des propriétés mécaniques d'acier:** La corrosion entraîne une réduction de la section transversale des barres d'acier.

la surface d'acier après la corrosion peut être exprimé par :

$$A_s = (1 - 0.01X_p)A_0 \dots\dots\dots \text{Eq (IV-5)}.$$

Avec :  $A_s$ : La section de la barre corrodée.

$A_0$ : La section d'origine de la barre (avant corrosion).

$X_p$ : Exprime la perte de masse de barre.

Et que la corrosion est augment, les forces résiduelles de barre d'acier diminuent, et par conséquent, il y a une réduction de la limite d'élasticité.

**La réduction de la force d'adhérence:** La méthode proposée pour la modélisation de la liaison est la méthode cohésive basée sur la surface de contact. Elle dépend des valeurs de  $\tau_{\max}$ ,  $S_1$ ,  $K_{ss}$  dans l'ABAQUS ( $\tau_{\max}$  est la force de liaison maximal).

La corrosion peut être approchée comme suite :

- La force d'adhérence ultime doit être modifiée par chaque niveau de corrosion.
- Le mode de défaillance est supposée un mécanisme de division.

Dans cette étude nous supposent que la corrosion est uniforme au long de barre d'acier car la simulation de la corrosion non uniforme est très difficile directement à l'aide d'un logiciel par MEF. L'état de corrosion d'armature peut être simulé directement par la réduction de la section d'armature, Le degré de corrosion est obtenu sur la base de la perte de la masse des barres d'acier.

Certains tests ont rapporté que 2% de perte de diamètre de la barre d'acier a provoqué une réduction de 80% de la force de liaison (Auyeung et al. 2000).

Wang et Liu utilisent la limite d'élasticité nominale et module d'Young nominale pour identifier les paramètres des barres d'acier corrodées.

$$f_{yc} = (1 - 0.00198\delta)f_y \dots\dots\dots\text{Eq(IV-6)}.$$

$$E_{sc} = (1 - 0.00113\delta)E \dots\dots\dots\text{Eq(IV-7)}.$$

Avec :  $f_y$ : La limite d'élasticité nominale de barre non corrodée.

$f_{yc}$ : La limite d'élasticité nominale de barre corrodée.

$E$ : Module d'Young des barres avant corrosion.

$E_{sc}$ : Module d'Young des barres après corrosion.

$\delta$  : Le taux de la perte de masse des barres d'acier corrodée.

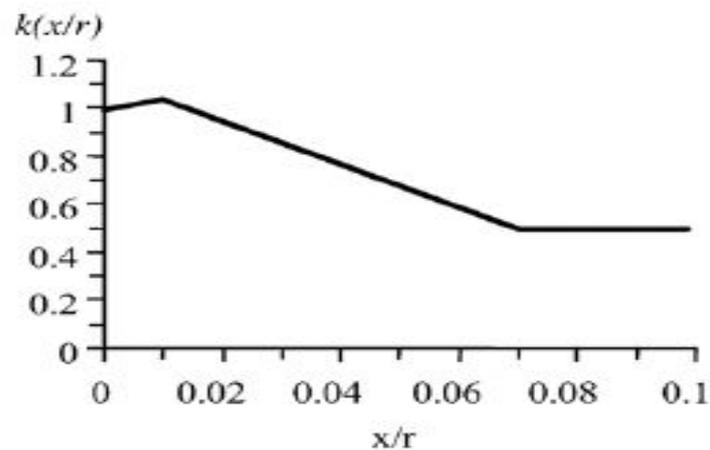
$$\rho_s = \begin{cases} 0.013 + 0.987\delta, \delta \leq 10\% & \dots\dots\dots\text{Eq(IV-8)}. \\ 0.061 + 0.939\delta, 10\% < \delta \leq 20\% & \dots\dots\dots\text{Eq(IV-9)}. \\ 0.129 + 0.871\delta, 20\% < \delta \leq 30\% & \dots\dots\dots\text{Eq(IV-10)}. \\ 0.199 + 0.810\delta, 30\% < \delta \leq 40\%. & \dots\dots\dots\text{Eq(IV-11)}. \end{cases}$$

Afin d'évaluer la capacité de la liaison, le coefficient de frottement  $\mu$  doit être déterminé. Lundgren (2007) est proposé un modèle pour défini le coefficient, une augmentation de coefficient de frottement avec faible niveau de corrosion.

$$\mu(x) = K(x/r)\mu_0$$

$\mu_0$ : Coefficient de frottement de barre non corrodée ( $\mu_0$  a été mesuré expérimentalement entre 0.3 et 0.6 et dans le test d'arrachement par MEF est mesuré entre 0.9 et 1 pour les barres lisses et nervurées respectivement).

$K(x/r)$ : est en fonction de pénétration des attaques. Les valeurs de  $k$  en fonction de  $x/r$  est donné par la figure suivante :



**Figure (IV-8):** Evaluation de  $K(x/r)$  en fonction de  $x/r$  (Lundgren 2007).

Les étapes pour modéliser une poutre corrodée sont comme suite:

- Définir la géométrie de la poutre.
- Définir le comportement de béton.
- Définir le comportement d'acier.
- Définir le comportement de la liaison.
- Modification des propriétés de béton (cas de corrosion) (la réduction de comportement de - compression et de comportement de traction de béton dans les zones fissurées).
- Modification des propriétés d'acier et de la liaison.
- Exécuter l'analyse dans l'ABAQUS et obtenu les résultats.

### IV-4: Etude paramétrique:

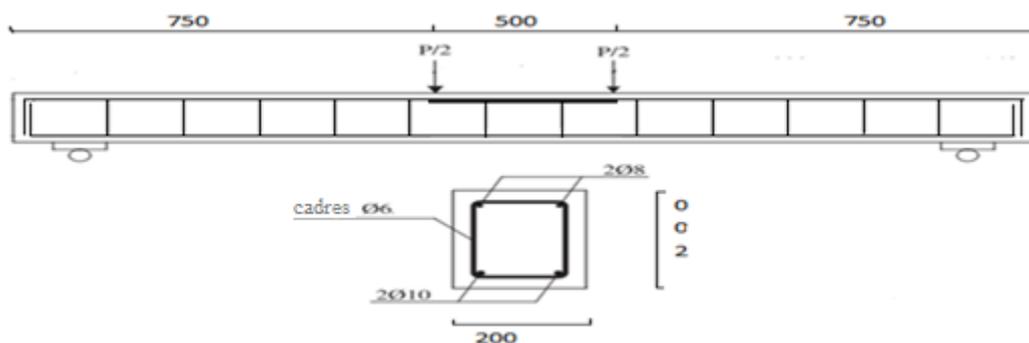
Cette partie présente les résultats d'une étude paramétrique réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF) qui étudie les effets de certains paramètres sur la réponse en flexion et la capacité portante des poutres corrodées.

- 1: l'effet de degré de corrosion
- 2: l'effet de la résistance du béton.
- 3: l'effet de diamètre de barre corrodée et l'épaisseur de béton d'enrobage.
- 4: l'effet de la localisation de la corrosion.

#### IV-4-1: Effet de degré de corrosion:

##### IV-4-1-1: Effet de la corrosion sur le comportement des barres de compression:

Il est très important de comprendre comment influence la corrosion sur le comportement des barres de compression et la capacité portante de la structure en béton armé. La Figure IV-8 donne les résultats de la modélisation d'une poutre non corrodée et celles avec diverses valeurs de taux de corrosion des armatures comprimées.



**Figure (IV-9):** schéma représentative de zone de corrosion dans les barres de compression.

Nous avons créés quatre modèles de poutre avec des degrés de corrosion variant dans la plage 10%, 25%, 40%, 50% dans le but d'étudier l'impact de la corrosion dans les barres d'acier de compression (barres supérieures). Nous avons créés une modification en conséquence des propriétés des matériaux de poutre en fonction de degré de la corrosion.

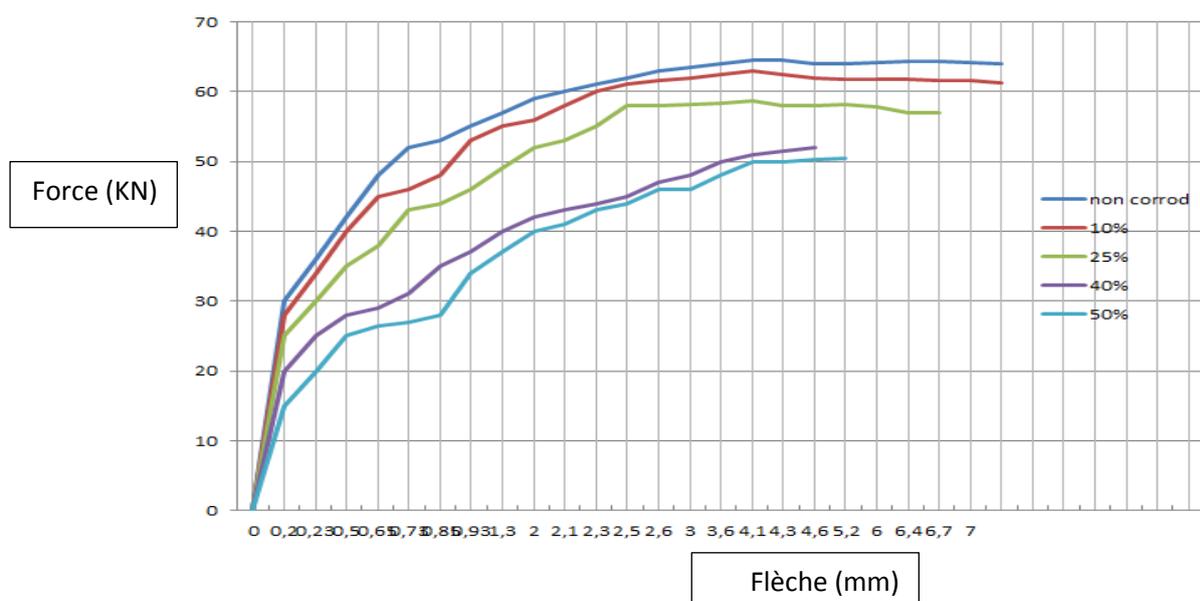
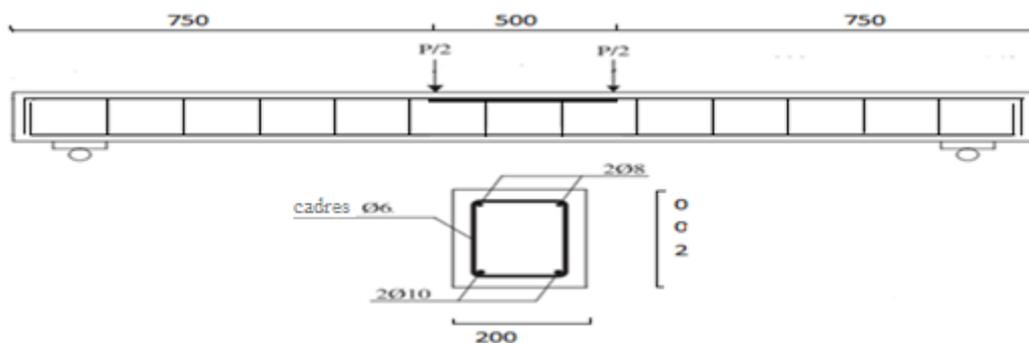


Figure (IV-10): Courbe force-déplacement de la poutre corrodée- barres supérieures uniquement.

### Interprétation des résultats :

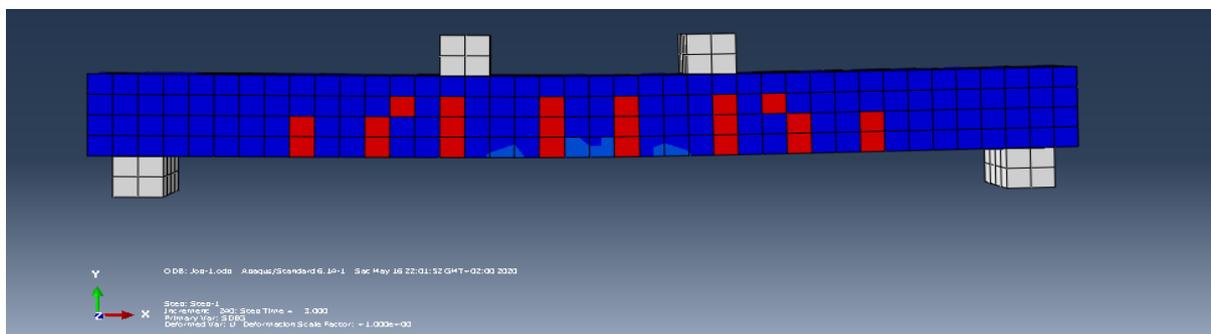
A partir de la courbe Force-Flèche de la Figure IV-8, on remarque qu'il n'y a pas de changement notable de la valeur de flèche dans la poutre non corrodée et les poutres corrodées car les barres de compression n'ont aucun influence sur la capacité de flèche de la poutre. La légère réduction de la charge ultime due à la réduction de la résistance de la compression causée par les fissurations dans la zone comprimée. Entre autres, une diminution respective des paramètres de fissuration avec l'accroissement du taux de corrosion.

## IV-4-1-2: Effet de corrosion sur le comportement des barres de traction :

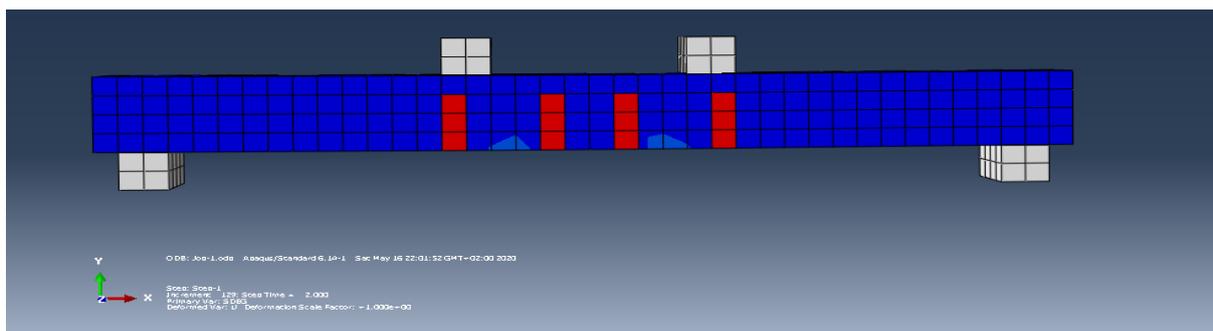


**Figure (IV-11):** Schéma représentative de zone de corrosion dans les barres de traction.

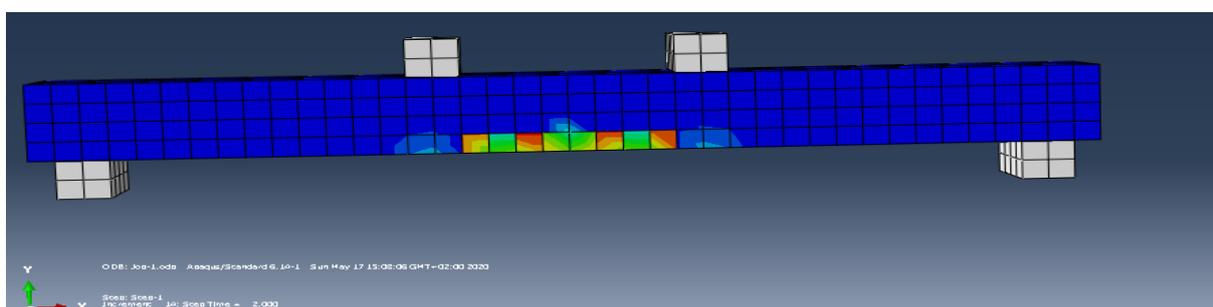
Dans le but d'étudier l'influence de la corrosion dans les barres d'armatures tendues (barres inférieures uniquement), nous avons réalisées également quatre modèles de poutre avec des degrés de corrosion variant dans la plage 10%, 25%, 40%, 50%. Nous avons en conséquence pris en considérations les variations des propriétés des matériaux de la poutre en fonction de degré de la corrosion. Les Figure IV-10, IV-11 et IV-12 ci- dessous montrent l'évolution de la fissuration dans la zone tendue de la poutre et la capacité portante pour les différents taux de corrosion.



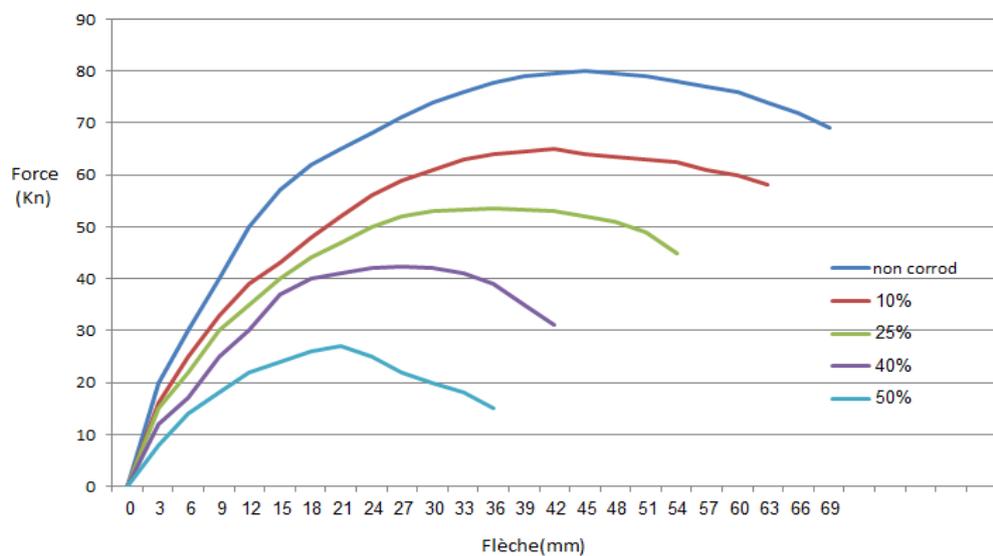
**Figure (IV-12):** Fissuration de la zone tendue de poutre non corrodée.



**Figure (IV-13):** Fissuration de la zone tendue de poutre corrodée (25% de corrosion).



**Figure (IV-14):** Fissuration de la zone tendue de poutre corrodée (50% de corrosion).



**Figure(IV-15):** Courbe force-déplacement de la poutre corrodée- barres inférieures uniquement.

### Interprétation des résultats :

Dans le cas présent, on observe une diminution accrue des paramètres de fissuration et prématurés avec l'accroissement du taux de corrosion qui ont conduit tout d'abord à une réduction de la capacité portante de la poutre réduite et par suite par la déformation plastique de la barre de traction. Ainsi on observe une diminution de la flèche des poutres corrodées par rapport de la poutre non corrodée.

A partir de ces résultats, on peut conclure que la capacité portante des poutres dépend essentiellement de la capacité des barres de traction avec une capacité suffisante entre l'acier et béton.

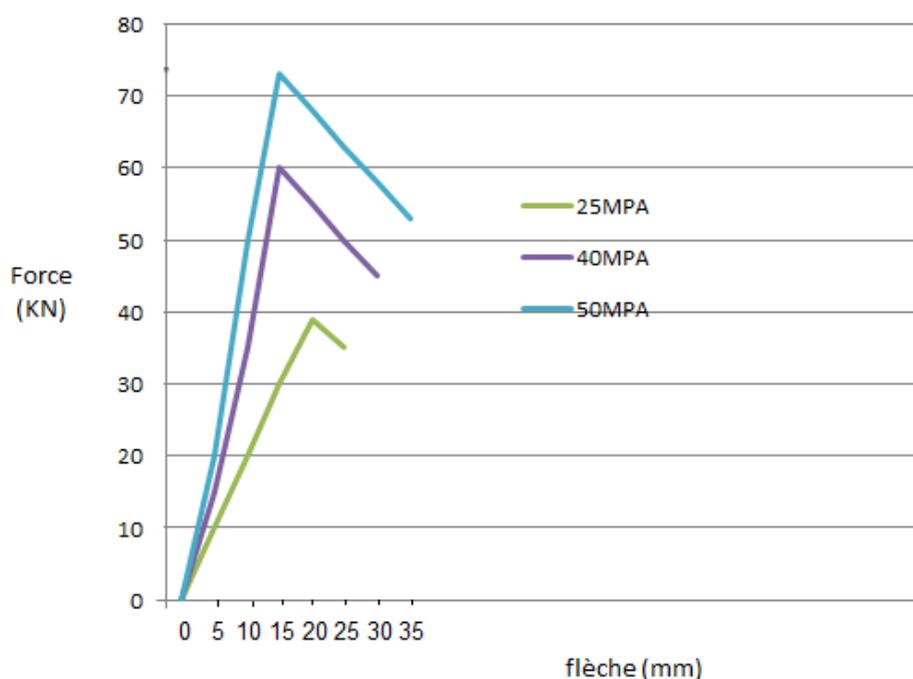
### IV-4-2: L'effet de la résistance de béton:

Dans le but d'étudier l'influence de la résistance du béton et le module d'Young sur le comportement en service et la capacité portante, trois modèles de poutres en béton armé ont été réalisés. La plage des résistances du béton à la compression choisie est de 25 MPa, 40 MPa et 50 MPa. Les résultats de la modélisation Force – flèche sont montrées sur la figure IV-13.

Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'Young (GPa)
25	2.1	32
40	3.0	36.3
50	3.6	38.6

**Tableau (IV-2):** propriétés mécanique de béton.

A partir des courbes (Force-Flèche) représentées sur la figure (IV-13), on remarque que la poutre avec une rigidité de béton plus élevée (résistance à la compression est 50 MPA) présente une grande capacité portante avec une faible dégréé de corrosion (10%). Cette capacité est réduite avec l'augmentation de niveau de corrosion et la réduction de la résistance à la compression de béton.



**Figure (IV-16):** Comparaison de la charge ultime pour des poutres avec différentes résistances à la compression du béton.

### IV-4-3: L'effet de diamètre de barre corrodée et l'épaisseur de béton d'enrobage:

L'influence du diamètre des barres corrodées et l'épaisseur du béton d'enrobage sur le comportement mécanique a été étudié également sur trois modèles de poutres en béton armé. La plage de variation de ces paramètres est donnée dans le tableau IV-3 ci-dessous. On utilise le rapport C/D pour cette étude avec :

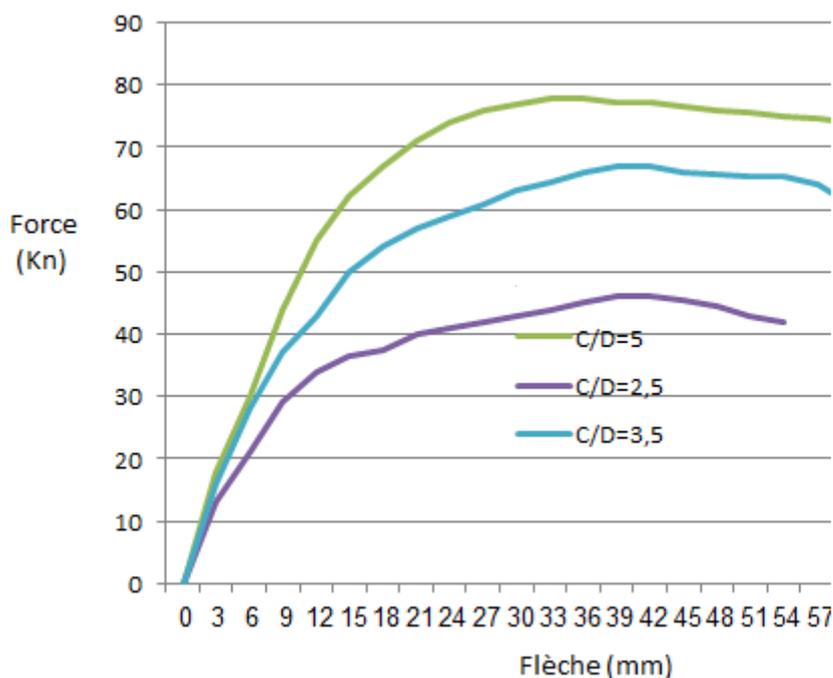
C : Epaisseur de béton d'enrobage.

D : Diamètre de barre d'acier.

Les résultats de la modélisation charge – flèche sont montrée sur la figure IV-13.

Poutre	C (mm)	D (mm)	C/D
MODELE 01	25	10	2.5
MODELE 02	35	10	3.5
MODELE 03	50	10	5

**Tableau (IV-3) :** Les valeurs de C/D pour les échantillons.



**Figure (IV-17):** Comparaison de la charge ultime pour des échantillons avec différentes valeurs de rapport C/D.

On observe que le modèle avec un rapport C/D plus élevé ( C/D=5) donne une charge de rupture élevée et par conséquent une force de liaison importante entre l'acier et béton. Aussi on remarque une augmentation de la charge ultime pour les trois modèles à partir de la résistance plus importante à la fissuration de béton d'enrobage lorsque l'enrobage est augmenté. On peut conclure donc que dans les structures en béton armé lorsque l'épaisseur du béton d'enrobage est suffisante, elle assure non seulement une protection élevée contre l'initiation de la corrosion mais aussi une résistance mécanique importante à la dégradation de liaison entre l'acier et béton.

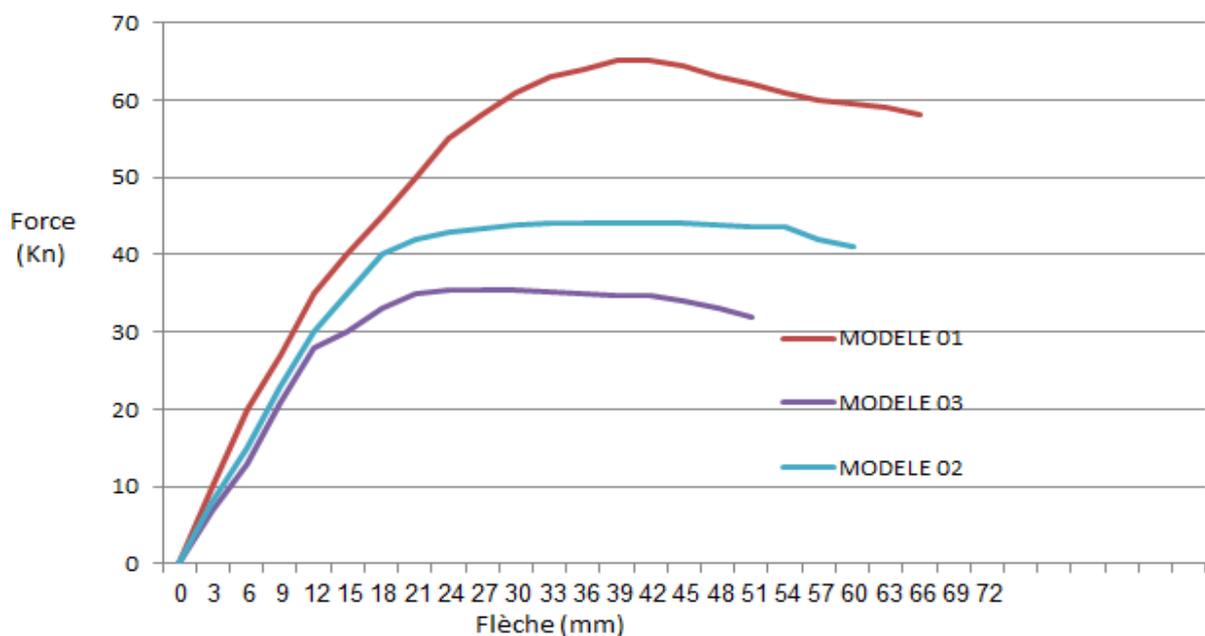
**IV-4-4: L'effet de la région de corrosion:**

Le processus de corrosion n'est généralement pas uniforme et, par conséquent, les dommages dus à la corrosion peuvent varier le long de la barre d'acier. Dans ce qui suit on a considéré la cas où le taux de corrosion de 10% identique dans les tous cas de modélisation. La corrosion n'est prise en compte que dans les armatures tendues (barres inférieures). Les régions considérées dans cette études sont celles représentées dans la figure IV-16 ci-contre.

MODELE	REGION DE CORROSION
MODELE 1	
MODELE 2	
MODELE 3	

**Figure (IV-18): modèles des poutres avec divers régions de corrosion.**

L'analyse des résultats de la figure IV-17 représentant la courbe Force-Flèche montre que la poutre corrodée dans la région centrale (modèle 1) présente la capacité portante la plus élevée que les deux autres modèles (modèle 2 et modèle 3) où la région de corrosion est appliquée dans les extrémités proche des appuis et le cas de corrosion est appliquée le long des armatures tendues.



**Figure (IV-19):** Courbe force-flèche pour des poutres avec différentes régions de corrosion.

Il est à noter que la perte de l'adhérence (c.-à-d. glissement entre l'armature et le béton) sur une longueur partielle à mi-portée d'un élément en béton armé ne conduit généralement pas à la rupture de l'élément, mais elle entraînera une redistribution des contraintes entraînant une fissuration du béton, une réduction de la rigidité de l'élément et une augmentation de la flèche de l'élément.

### IV-5: Conclusions :

La modélisation de ouvrages en béton armé tenant en compte des particularités réelles d'exploitation permettant d'apprécier le comportement et la capacité portante conjuguées à des données ( cartographie de corrosion, de fissuration etc ...) collectées sur terrain et ainsi une éventuelle prise de décision.

Cette modélisation devrait prendre en compte, entre autres, l'effet couplé de la perte d'adhérence, la réduction de section d'acier en partie tendue et la dégradation des propriétés mécaniques des armatures corrodées (résistance et ductilité) sur le comportement mécanique local et global d'éléments corrodés.

Les dommages induits par la corrosion modifient considérablement la réponse à la flexion de la poutre, diminue proportionnellement la capacité portante de poutre avec l'augmentation de degré de corrosion dans les armatures.

Il n'y a de changement notable de la valeur de flèche dans la poutre non corrodée et les poutres corrodées car les barres de compression n'ont aucun influence sur la capacité portante de la poutre. Une légère réduction de la charge ultime due à la réduction de la résistance de la compression causée par les fissurations dans la zone comprimée.

Il y'a diminution accrue des paramètres de fissuration et prématurés avec l'accroissement du taux de corrosion. On a observé une diminution de la flèche des poutres corrodées par rapport de la poutre non corrodée. la capacité portante des poutres dépend essentiellement de la capacité des barres de traction.

La poutre avec une rigidité de béton plus élevé (résistance à la compression est 50 MPA) présente une grande capacité portante avec un taux de corrosion modéré 10% - 25%. Cette capacité est réduite avec l'augmentation du niveau de corrosion et la réduction de la résistance à la compression de béton.

Dans les structures en béton armé lorsque l'épaisseur du béton d'enrobage est suffisante, elle assure non seulement une protection élevée contre l'initiation de la corrosion mais aussi une résistance mécanique importante à la dégradation de liaison entre l'acier et béton.

La poutre corrodée dans la région centrale présente la capacité portante la plus élevée que lorsque la région de corrosion est appliquée dans les extrémités proche des appuis et le cas de corrosion est appliquée le long des armatures tendues.

## **Conclusions Générales:**

La corrosion des armatures dans les ouvrages en béton armé est l'une des pathologies qui altère les performances des structures. Elle est la cause d'environ 80% des dégradations des ouvrages. Quand la corrosion devient active, le comportement mécanique des structures va être sérieusement modifié.

L'importance de l'étape de diagnostic qui est l'étape clé pour déterminer les types des pathologies des structures. C'est l'étape qui permettra l'implémentation des méthodes de réparation les plus convenable et l'évaluation des causes de ces problèmes.

L'un des facteurs les plus importants régissant la résistance et l'aptitude au service des structures en béton armé est l'adhérence, qui assure le transfert des forces de traction entre l'armature et le béton environnant.

Les structures en béton armé soumise à la corrosion subissent des différents problèmes de détérioration qui affectent sa capacité de charge tel que la perte d'adhérence entre les armatures et béton d'enrobage et la fissuration du béton et la réduction de la surface et la résistance des armatures.

La modélisation de ouvrages en béton armé tenant en compte des particularités réelles d'exploitation permettant d'apprécier le comportement et la capacité portante conjuguées à des données ( cartographie de corrosion, de fissuration etc ...) collectées sur terrain et ainsi une éventuelle prise de décision.

Cette modélisation devrait prendre en compte, entre autres, l'effet couplé de la perte d'adhérence, la réduction de section d'acier en partie tendue et la dégradation des propriétés mécaniques des armatures corrodées (résistance et ductilité) sur le comportement mécanique local et global d'éléments corrodés.

Les dommages induits par la corrosion modifient considérablement la réponse à la flexion de la poutre, diminue proportionnellement la capacité

portante de poutre avec l'augmentation de degré de corrosion dans les armatures.

Il n'y a de changement notable de la valeur de flèche dans la poutre non corrodée et les poutres corrodées car les barres de compression n'ont aucun influence sur la capacité portante de la poutre. Une légère réduction de la charge ultime due à la réduction de la résistance de la compression causée par les fissurations dans la zone comprimée.

Il y'a diminution accrue des paramètres de fissuration et prématurés avec l'accroissement du taux de corrosion. On a observé une diminution de la flèche des poutres corrodées par rapport de la poutre non corrodée. la capacité portante des poutres dépend essentiellement de la capacité des barres de traction.

La poutre avec une rigidité de béton plus élevé (résistance à la compression est 50 MPA) présente une grande capacité portante avec un taux de corrosion modéré 10% - 25%. Cette capacité est réduite avec l'augmentation du niveau de corrosion et la réduction de la résistance à la compression de béton.

Dans les structures en béton armé lorsque l'épaisseur du béton d'enrobage est suffisante, elle assure non seulement une protection élevé contre l'initiation de la corrosion mais aussi une résistance mécanique importante à la dégradation de liaison entre l'acier et béton.

La poutre corrodée dans la région centrale présente la capacité portante la plus élevée que lorsque la région de corrosion est appliqué dans les extrémités proche des appuis et le cas de corrosion est appliquée le long des armatures tendues.

## Bibliographie

- [1]: NGOC T, 2011, «Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé: approche expérimentale et probabiliste », thèse de doctorat de l'université de Toulouse.
- [2]: BELAID A, 2014, « Le comportement mécanique des structures en béton armé dégradé par la corrosion », Mémoire de Master, faculté des sciences de la technologie, université de Tébessa.
- [3]: NOBEL PUJOL-LUSUEUR V, « Etude électrochimique du mécanisme d'action du monofluoro phosphate de sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton », thèse de doctorat, université de paris, 2004.
- [4]: ARUP H. "The mechanism of protection of steel by concrete", in Crane, A.P, ed, Corrosion of reinforcement in concrete construction, page 151-157. Society of chemical industry. Ellis Harwood Limited, 1983.
- [5]: CHEN D. MAHADEVAN S. "Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation" Cement and concrete composite, 2008.Pages 227-238.
- [6]: Tarek D, 2012, « Etude de l'effet de la corrosion des armatures sur la durabilité des ouvrages en béton armé », Mémoire de Magister, faculté des sciences de la technologie, université de Biskra.
- [7]: Bartolini L, 2004."Corrosion of steel in concrete". Prevention, diagnostic and Repair, Wiley -Vch, Weinhein.
- [8]: Cour Salhi,2019.
- [9]: Byford k," Chloride initiated reinforcement corrosion (chloride binding) CBI report1:90", Swedish Cement and concrete research institute, Stockholm, 1990.
- [10]: M. Sabri, M. ing, P. Lamothe, « Analyse des facteurs influençant la mesure du potentiel de corrosion », Groupe Qu'alitas inc, Montréal, Canada, Avril, 2013.
- [11]: Delagrave A, « Mécanismes de pénétration des ions chlorures et de dégradation des systèmes cimentaire normaux et à haute performance », thèse de doctorat, département de génie civil, Université Laval,Canada,1996.
- [12]: Van Mulder J, Vansathler L, Winand R," Electrochemical behavior of iron in localized corrosion cells in the presence of chloride".7<sup>th</sup> int. Cong, Rio de janerio, vol 2,1978,PP705.
- [13]: Nilsson et al, "Chloride penetration into concrete, state of the art, transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models", Report N° 53, the road directorate, Denmark, 1996, P151pages.

- [14]: C Perez, J-J, « Etude de la dé-passivation et de la ré-passivation des armatures métalliques dans les bétons » Document OA9, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, 1991.
- [15]: S.R Yeomans, « Concrete corrosion », Elsevier, 2004.
- [16]: Jonathan M, 2013, « Corrosion des armatures du béton : Couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques », thèse de doctorat de l'université de Toulouse.
- [17]: Olliver J.P, Vichot A, la durabilité des bétons, Press de l'école Nationale des ponts et chaussées, 840pages, 2008.
- [18]:Thiery M, « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires prise en compte des effets cinétiques et des modifications micro structurales et hydriques », thèse de doctorat de l'école national des ponts et chaussées, 2005.
- [19]: Nicher P, "the Quality of the concrete texture, betonwerk+fertigteil-Tecknik, vol52, P683-696,1986.
- [20]: Hyvertn, « Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton », thèse de doctorat, l'université de Toulouse en collaboration avec le CERIB, 2009.
- [21]: Hoist YF, « Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie », thèse N°1108 de l'école polytechnique fédérale de Lauranne, 1992.
- [22]: Molina F J, Alonso C, « Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2-numerical model », Materials and structures, vol26, 1993, pp532-548.
- [23]: Polder R, Andrade C, « Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete», Master struct.1December 2000, Vol33 N°10, P603-611.
- [24]: MC Carter W.J , Taha H.M, «two-point concrete resistivity measurement: interfacial phenomena at the electrode-concrete contact zone». Mesa, Sci-tecknol, 2015, Vol25N° 8.
- [25]: Near S, «Evaluation non destructive du béton par mesure de résistivité électrique et thermographique infrarouge passive », thèse de doctorat, bordeaux France : université de bordeaux, université de Sherbrooke, 2006, 290P.
- [27]: Carissimi V : Corrosion science and technology, Plenum Press, New york.
- [28]: Bradford S; Corrosion and protection, Van No strand Reinhold, New York, 1992.