République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbes

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil et Travaux Publics

Thèse

Modélisation couplée des ouvrages géotechnique soumis à la corrosion.

Présentée au Département de Génie Civil et Travaux Publics[1],UDL, Sidi Bel Abbes

Par:

METERFI Yasmine

Pour obtenir Le Diplôme de Doctorat 3éme Cycle DLMD

Spécialité : Génie Civil **Option : Géotechnique**

Thèse soutenue publiquement en juillet 2023, devant le jury composé de :

ABBAD HICHEM	**Professeur**	**UDL, Sidi Bel Abbés**	**Président**
HOUMADI YOUCEF	**Professeur**	**U. Tlemcen**	**Encadreur**
TROUZINE HABIB	**Professeur**	**UDL, Sidi Bel Abbés**	**Co-Encadreur**
AISSA MAMOUNE SIDI MOHAMMED	**Professeur**	**U. Ain Temouchent**	**Examinateur**
ZADJAOUI ABDELDJALIL	**Professeur**	**U. Tlemcen**	**Examinateur**
MECHAB ISMAIL	**Professeur**	**UDL, Sidi Bel Abbés**	**Examinateur**

[1] Ce travail est réalisé au LGCE Civil Engineering & Environnemental Laboratory (Laboratoire de Génie civil et Environnement).

Remerciement:

Du profond du cœur, et chaleureusement, il m'est agréable d'adresser mes vifs remerciements, et d'exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de loin comme de près, dans l'élaboration de ce travail.

Je remercie le président du jury, le Professeur ABBAD Hichem pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie également les professeurs AISSA MAMOUNE Sidi Mohammed, ZADJAOUI Abdeldjalil, et MECHAB Ismail pour avoir acceptés de juger ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude et mes remerciements à mon directeur et mon co-directeur de thèse Professeur Houmadi Youcef de L'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen , et Professeur Habib Trouzine à l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, pour avoir assuré l'encadrement scientifique de mon travail. C'est grâce à la confiance, qu'il a témoignée à mon égard, que j'ai pu arriver à la conclusion de ce travail.

Je remercie l'équipe de laboratoire (L.G.C.E) de l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements pour ma respectueuse famille pour toute l'aide et le soutien moral et économique qu'elle m'a apporté tout au long de mon parcoure doctorale. J'espère être à la hauteur de son espérance et me montrer digne de sa confiance et encouragements.

Dédicace:

Je ne sais comment signifier, ni exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont soutenu, guidé, assisté, aidé et contribué à ma formation.

Je dédie ce travail en espérant qu'il témoignera ma gratitude et mes respects :

A mes parents, grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu crée le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Toutes les personnes qui m'ont toujours soutenu, cru en moi et encouragé à réaliser mes rêves. A mon frère et mes sœurs « Yacine, Sarah et Amira », les familles: METERFI - HALLAH - CHAFI - MEHAREB.

Tous mes amis principalement : Le groupe de randonnée "Outdoor Adventures SBA"

A la mémoire de :

Mon grand père : METERFI .H

Mes grandes mères : TOUMERT .Gh et TOUMERT.F

Mon oncle : METERFI .R

Mon oncle : HALLAH .A

النمذجة المقترنة للهياكل الجيوتقنية المعرضة للتآكل.

الملخص

يعد ضمان دوام الأنظمة الجيوتقنية من خلال تصميم الهياكل التي تضمن الأداء والسلامة خلال فترة خدمتها مصدر قلق كبير في الهندسة المدنية. على الرغم من طبيعة الهيكل الجيوتقني ، لا يزال الفولاذ هو المادة السائدة التي تسلط الضوء على الصدء متصلا بالظروف البيئية القاسية يتجلى تآكل هياكل الانظمة الجيوتقنية في أشكال مختلفة وتنتج عملية التآكل المعقدة عن العديد من الآليات والتفاعلات الكهروكيميائية.إن التنبؤ بالسلوك طويل الأجل للتعزيزات في الهياكل الجيوتقنية من خلال تقييم الضرر الذي من المحتمل أن تتعرض له بمرور الوقت بعد التعرض للتآكل والضغوط الميكانيكية المختلفة يمثل تحديا كبيرا ، من وجهة نظر اقتصادية وعلمية.يهدف العمل الحالي إلى تعميق فهم آلية الهجوم الميكانيكي الكهروكيميائي المقترن بالتآكل والضغوط الداخلية / الخارجية المطبقة على العناصر الهيكلية للهياكل الجيوتقنية. في إطار الموثوقية والنمذجة العددية ، قمنا في هذا العمل بنمذجة سلوك عارضة متآكلة تحت تأثير حمل متغير عشوائيا بمرور الوقت من أجل تقييم احتمال فشله ويتم إجراء تحليل الموثوقية من خلال نهج مونت كارلو الأمثل يتم تحقيق النموذج العددي من خلال إدخال تقنيات اقتران لتحليل سلوك العارضة وكذلك المنطقة الانتقالية بين مادتي لفولاذ/ الخرسانة (ITZ) . تحت التأثير المقترن للتآكل والضغوط الميكانيكية المطبق.يتم إجراء هذه الدراسة عن طريق إدامة مسامية الخرسانة مع إظهار تأثير الحماية الكاثودية على تطور التآكل. أظهرت النتائج أن دراسة منطقة انتقال ا لفولاذ/لخرسانة مهمة في تحليل سلوك العناصر الهيكلية للهياكل الخرسانية المسلحة في ظل العمل الميكانيكي الكهروكيميائي المشترك نظرا لأنها أضعف منطقة تظهر تلفا بسبب التآكل ، تقييم انتشار الأكسجين وتركيزه من خلال شبكة الخرسانة المسامية إلى الواجهة الفولاذية / الخرسانية يعد تقييم إمكانات التحليل الكهربائي وتطور الهيدروجين وكذلك كثافة تيار التآكل أمرا مهما في نمذجة تطور عملية التآكل للهياكل الجيوتقنية خلال فترة خدمتها باستخدام برنامج العناصر المحدودةComsol.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ، التآكل ، تقنيات الاقتران، البنى التحتية، النمذجة ، تحليل الموثوقية ،

Coupled modelling of geotechnical structures subject to corrosion.

Abstract.

Ensuring the sustainability of geotechnical systems by designing structures that guarantee performance and safety during their service lives is a major concern in civil engineering. Despite the geotechnical structure nature, steel remains the predominant material that highlights corrosion. Connected to the aggressive environmental conditions the corrosion of infrastructures manifests in different forms, the complex process of corrosion results from several mechanisms and electrochemical interactions. Predicting the long-term behavior of reinforcement in geotechnical structures by assessing the damage caused by corrosion exposure and different mechanical stresses over time is a major challenge in the economic and scientific context. The present work aims to deepen the understanding of the mechanical-electrochemical coupled corrosion attack mechanism and the internal/external stresses applied to the structural elements of the geotechnical structures. Within the framework of reliability and numerical modeling, in this work we have modeled the behavior of a corroded beam under the impact of a randomly varying load over time, the reliability analysis is carried out by an optimized Monte-Carlo (MCS) approach in order to evaluate its failure probability, the numerical model is carried out by introducing coupling modeling techniques to assess the beam behavior as well as the transition zone between the two materials steel/concrete (ITZ) under the coupled effect of corrosion and the applied mechanical stress, this study is carried out by including the porosity of the concrete while showing the impact of cathodic protection on the corrosion evolution. The results show that the study of the steel/concrete transition zone (ITZ) is important in the analysis of the structural elements of reinforced concrete structures and the behaviour under the combined mechanical-electrochemical action since it is the weakest zone manifesting corrosion damage. The assessment of oxygen diffusion and concentration through the concrete porous system to the steel/concrete interface, as well as the evaluation of the electrolytic potential, and the evolution of hydrogen and the density of the corrosion current is important in modeling the corrosion process evolution of the geotechnical structures during their service life using the Comsol Finite Element Software.

Keywords: Concrete, Corrosion, Coupling techniques Infrastructures, Modeling, Reliability analysis

Modélisation couplée des ouvrages géotechnique soumis à la corrosion.

Résumé.

Assurer la durabilité des systèmes géotechniques en concevant des ouvrages qui garantissent performance et sécurité durant leur vie de service est une préoccupation majeure en génie civil. Quelle que soit la nature des ouvrages géotechniques, l'acier reste le matériau prédominant qui met en évidence la corrosion. Liées aux conditions environnementales agressives la corrosion des infrastructures se manifeste sous différentes formes, le processus complexe de la corrosion résulte de plusieurs mécanismes et interactions électrochimiques. Prédire le comportement à long terme des armatures dans les ouvrages géotechniques en évaluant les endommagements qu'ils sont susceptibles de subir dans le temps suite à une exposition à la corrosion est aux différentes contraintes mécaniques est un enjeu majeur, notamment d'un point de vue économique et scientifique. Le travail présenté vise à approfondir la compréhension du mécanisme de l'attaque mécano-électrochimique couplée de la corrosion et les contraintes internes/externes exercées sur les éléments structuraux des ouvrages géotechniques. Dans le cadre d'une modélisation fiabiliste et numérique, dans ce travail nous avons modélisé le comportement d'une poutre corrodée sous l'impact d'un chargement variant aléatoirement dans le temps, l'analyse fiabiliste est effectuée par une approche de Monte-Carlo (MCS) optimisée dans le but d'évaluer sa probabilité de défaillance, le modèle numérique est réalisé en introduisant les techniques de couplage pour analyser le comportement de la poutre ainsi que la zone de transition entre les deux matériaux acier/béton (ITZ) sous l'effet couplé de la corrosion et les contraintes mécaniques appliquées, cette étude est effectuée en pérennant en compte la porosité du béton tout en montrant l'impact de la protection cathodique sur l'évolution de la corrosion. Les résultats montrent que l'étude de la zone de transition acier/béton (ITZ) est importante dans l'analyse du comportement des éléments structuraux des ouvrages en béton armé sous l'action combinée mécano-électrochimique, vu que c'est la zone la plus faible manifestante les endommagent due à la corrosion, L'évaluation de la diffusion et concentration d'oxygène à travers le réseau poreux du béton jusqu'à l'interface acier/béton, l'évaluation du potentiel électrolytique, et l'évolution de l'hydrogène ainsi que la densité du courant de corrosion est importante dans la modélisation de l'évolution du processus de corrosion des ouvrages géotechniques durant leur vie de service, en utilisant le logiciel des éléments finit Comsol.

Mots-Clés :Béton, Corrosion, Techniques de couplages Infrastructures, Modélisation , Analyse de fiabilité

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA CORROSION

1.1. Introduction 4

1.2. Définition de la corrosion 5

1.3. Les étapes du processus de la corrosion 7

1.4. Typologie de la corrosion 8

1.4.1. La corrosion généralisé (uniforme) 9

1.4.2. La corrosion galvanique 10

1.4.3. La corrosion par piqure 10

1.4.4. La corrosion par crevasse 11

1.4.5. La corrosion sélective 12

1.4.6. La corrosion sous contrainte mécanique(CSC) 12

1.4.7. La corrosion fatigue 13

1.4.8. La corrosion bactérienne 14

1.5. Les facteurs affectant la corrosion 14

1.5.1. Les facteurs affectant la corrosion dans le béton 15

1.5.1.1. Les facteurs chimiques 16

1.5.1.1.1. la carbonatation 16

1.5.1.1.2. la pénétration des ions chlorures 18

1.5.2.2.3 l'effet combiné de la carbonatation et de la pénétration du chlorure 20

1.5.2.2.4 La Dépassivation des armatures 21

1.5.1.2. Les facteurs mécaniques 22

1.5.2.2.1 Influence des fissures 22

1.5.2. Les facteurs affectant la corrosion dans le sol 23

1.6. Les impacts la corrosion 25

1.6.1. influence de la corrosion sur l'adhérence acier/béton 25

1.6.2. Influence de la corrosion sur les propriétés mécaniques des aciers 25

1.7. Protection contre la corrosion 25

1.7.1. Protection cathodique 26

1.7.2. Inhibiteur de corrosion 26

1.7.3. Les revêtements 26

1.7.3.1. Les revêtement de prétraitement de surface 27

1.7.3.2. Revêtements de prétraitement non métallique-inorganique 27

1.7.3.3. Revêtements de prétraitement organiques 27

1.7.3.4. Les revêtement métalliques sacrificiels 28
1.7.3.5. Résines époxy 28
1.7.3.6. Vinyles 28
1.7.3.7. Caoutchoucs chlorés 28

1.8. Conclusion 28

CHAPITRE 2 : Revue bibliographique sur la méthode probabiliste et couplage multiphysique

2.1. Introduction 29

2.2. La modélisation fiabiliste 30

2.2.1. l'analyse de fiabilité dépendante du temps 31

2.2.2. Les méthode d'analyse fiabiliste 32

2.2.2.1. Monte-Carlo(MCS) 33
2.2.2.2. Subset simulations 33

2.2.3. Les méthode d'analyse fiabiliste en géotechnique 34

2.3. Le couplage multiphysique 35

2.3.1. Modélisation numérique 35

2.3.2. Définition de la multiphysique: 36

2.3.3. Les techniques de couplages de corrosion 37

CHAPITRE 3 : Analyse fiabiliste de la corrosion dans les ouvrages géotechniques

3.1. Introduction 38

3.2. L'incertitudes dans les ouvrages géotechniques 39

3.2.1. La variabilité naturelle 40

3.3. l'approche probabiliste en géotechnique 40

3.3.2. La technique de franchissement 42

3.3.3. La méthode MCS optimisée 43

3.3.4. Cas d'étude (Poutre corrodée) 44

3.4. Conclusion 48

CHAPITRE 4 : Analyse multiphysique numérique couplée

4.1. Introduction 49

4.2. La modélisation numérique mécano-électrochimique couplée 50

4.2.1. La porosité du béton (diffusivité de l'oxygène et transport de charge) 50

4.2.1.1. La porosité et la diffusivité de l'oxygène 51
4.2.1.2. La porosité et le transport de charge 51

4.3. Processus de modélisation 52
4.3.1. Cas d'étude I :(Poutre en béton armé sous chargement aléatoire) 52
4.3.1.1. Partie I (Etude mécanique) 53
4.3.1.2. Partie II (Etude électrochimique) 56
4.3.2. Cas d'étude II: (étude de la zone de transition sous la corrosion et charge mécanique) 62
4.3.2.1. Partie I (Analyse mécanique) 63
4.3.2.2. Partie II (Modélisation de L'électrochimie de la corrosion) 65
4.3.2.3. Partie III (La modélisation mécanique et électrochimique couplée) 70
4.4. Conclusion 73
Chapitre 5 : Résultats et interprétations
5.1. Introduction 75
5.2. Partie (I): Analyse fiabiliste (MCS optimisé) 76
5.3. Partie (II): Analyse numérique mechano-électrochimique couplée 77
5.3.1. Première partie (1) : analyse mécanique 78
5.3.1.1. Déplacement de la poutre 78
5.3.1.2. L'électrochimie de la corrosion et l'impact de la porosité du béton 79
5.4. Partie (III): La modélisation numérique couplée de la zone de transition(ITZ) 83
5.4.1. Première partie (1) : analyse mécanique de la poutre 83
5.4.2. Deuxième partie (2) : analyse électrochimique (étude stationnaire) 84
5.4.2.1. L'impacte de la saturation du béton sur le processus électrochimique de la corrosion 84
5.4.2.2. La déformation de l'ITZ sous le processus de corrosion 86
5.4.3. Troisième partie (3): l'étude mécano-électrochimique 87

Liste des figures

Figure1.1: Evolution de la dégradation du béton [17] 8

Figure 1.2: Principe de la corrosion généralisée ou uniforme [22] 9

Figure1.3: Principe de la corrosion galvanique (Ex: aluminium, cuivre) [24] 10

Figure1.4: Représentation schématique de la configuration d'une piqûre[26] 11

Figure1.5:processus de la corrosion caverneuse [27] 12

Figure1.6: Paramètres intervenants dans l'apparition de la CSC [31] 13

Figure1.7: Les modèles de Tuuti et Fib [38] 16

Figure1.8: Le diagramme de Pourbaix [49] 18

Figure1.9: Représentation schématique des aspects de modélisation de la corrosion induite par le chlorure[41] 20

Figure 2.1: problème stochastique général [81] 30

Figure 3. 1: incertitudes en géotechnique 40

Figure 3.2: Poutre corrodée sous charge aléatoire à mi-travée[92][93] 46

Figure 3.3: L'évolution de la probabilité de défaillance pour 10^3 simulations 48

Figure 3.4: L'évolution de la probabilité de défaillance pour 10^4 simulations 48

Figure 3.5: L'évolution de la probabilité de défaillance pour 10^5 simulations 49

Figure 4.1: Le modèle 3D du la poutre corrodée flexion en béton armée 55

Figure 4.2: Déplacement total de la poutre corrodé 57

Figure 4.3: Déplacement total de la poutre sous des charges aléatoires , et perte de section sur une période de 10 ans 57

Figure 4.4: Déplacement total de la poutre sous la charge(moyenne) F=5800 N et une perte de section sur 10 ans 58

Figure 4. 5: Potentiel électrolytique pour un degré de saturation de 80% 62

Figure 4.6: Concentration en oxygène pour un degré de saturation de 80% 62

Figure 4.7: Le potentiel d'électrode au niveau des points étudiés à l'interface de béton 63

Figure 4.8: Concentration locale d'oxygène à l'interface acier-béton 63

Figure 4.9: Densités de courant locales de réduction de l'oxygène à l'interface acier-béton 64

Figure 4.10: Densités locales de courant d'évolution de l'hydrogène à l'interface acier-béton 64

Figure 4.11: Densités de courant de corrosion de l'acier à l'interface acier-béton 64

Figure 4.12: Schéma de la section transversale de la poutre étudiée 65

Figure 4.13: le déplacement de la surface supérieure de la poutre due à la charge extérieure appliquée 67

Figure 4.14: Les quatre points étudiés de la zone de transition ITZ 69

Figure 4.15: Potentiel d'électrode au niveau des points à l'interface acier/béton 69

Figure. 4.16: Concentration locale d'oxygène à l'interface acier/béton 69
Figure. 4.17: le courant de densité local de la réduction d'oxygène à l'interface acier/béton 70
Figure. 4.18: le courant de densité local de l'évolution d'hydrogène à l'interface acier/béton 70
Figure. 4.19: Densités de courant de corrosion à l'interface acier/béton 70
Figure. 4.20: Potentiel électrolytique et la déformation de la géométrie de l'ITZ 71
Figure. 4.21: Densité de courant de corrosion le long de la surface de l'électrolyte 72
Figure. 4.22: Déformation de l'électrode à différents instant sur une période de 10 ans 73
Figure 4.23: la structure géométrique et technique de maillage du modèle 74
Figure 4.24: La contrainte effective de Von Mises de la poutre déformée dans des conditions normales 75
Figure 4.25: La contrainte Von Mises effective de la poutre déformée en conditions de corrosion 75

Liste des Tableaux

Tableau.1 1: Conditions de sol pouvant suggérer une force corrosive élevée[10] 23

Tableau.3.1: Variables et paramètres aléatoires de la poutre corrodée[93] 46

Tableau.3.2: Les paramètre du processus stochastique 47

Tableau.3.3: Les probabilité de défaillance calculé pour 10^3 $10^4$$10^5$ avec MCS optimisée 49

Tableau.4.1: Les paramètres du processus stochastique F(t) 56

Tableau.4.2 Valeurs des paramètres de réaction des électrodes 62

Tableau.4.3 Les propriétés des matériaux 66

Tableau.5.1: Comparaison entre les résultats de probabilité de défaillance pour 10^3 10^4 10^5 simulations trouvés et ceux calculés dans l'article 79

Liste des symboles

A_{Fe} : La pente de Tafel (oxydation du fer)

A_{H2} : La pente de Tafel (évolution de l'hydrogène)

A_{O2} : La pente de Tafel (réduction de l'oxygène)

b_0 : La largeur initiale de la section transversale (avant corrosion) (m)

c: Le coefficient de corrosion (mm/an)

$C_{O2,ref}$: La concentration de référence en oxygène

$C_{O2,Zn}$: La concentration d'oxygène à l'interface béton-zinc

D_i : Le coefficient de diffusion

e : Le seuil prédéfini

Eeq : Le potentiel d'équilibre (V)

$E_{eq,Zn}$: Le potentiel d'équilibre du Zn, (V)

F(t) : Le processus stochastique Gaussien et stationnaire

G : La fonction d'état limite La moyenne (N)

H : L'humidité relative

h_0 : La hauteur initiale de la section transversale (avant corrosion) (m)

I : L'intensité du courant (A)

$i_{0,Fe}$: La densité de courant d'échange d'oxydation du fer (A/m2)

$i_{0,H2}$: La densité de courant d'évolution de l'hydrogène (A/m2)

$i_{0,O2}$: La densité de courant d'échange par réduction d'oxygène (A/m2)

L: La longueur de la poutre(m)

L : La longueur d'autocorrélation

N : Le nombre total de cycles de simulation (le nombre de trajectoire total simulé)

N_f : Le nombre de cycles de simulation

N_i : Le flux molaire pour l'espèce (i)

P_f : La probabilité de défaillance

R : La résistance (Ω)

T : La température du béton (°C)

t : Le temps (s)

temps_f : L**e** e vecteur des temps de premiers franchissements.

temps_f_j : La matrice des temps de tous les franchissements

V: La différence potentielle (V)

W : Le poids propre de la poutre (N/m)

w/c : Le rapport eau/ciment

X : Le vecteur de n variables aléatoires

$Y(t)$: m processus stochastiques s'accumulant en réponse pratique

Δt : Le pas de discrétisation (an)

η : Le surpotentiel (V)

μ: La moyenne (N)

ρ_{st} : La densité de l'acier (N/m^3)

σ : L'écart type (N)

ϕ_l : Le potentiel électrique dans le béton (V)

$\phi_{s,steel}$: Le potentiel électrique externe de la poutre d'acier (V)

$\phi_{s,Zn}$: Le potentiel de l'acier à l'interface anode Zn-béton (V)

Introduction générale

Dans les ouvrages géotechniques : ouvrages de soutènements, fondations, bâtiments ou autres ouvrages de génie civil, la corrosion représente la principale cause de défaillance et de détérioration des structures en béton armé où l'acier représente un constituant prédominant.

La corrosion, qui est en rapport avec les conditions environnementales agressives, constitue une menace certaine sur la durée de vie de ces structures. Des progrès significatifs ont été réalisés au cours de la dernière décennie dans les méthodes de conception et de la compréhension des facteurs qui affectent la durabilité des structures géotechniques.

Prédire le comportement à long terme des armatures dans les ouvrages géotechniques en évaluant les endommagements qu'ils sont susceptibles de subir dans le temps suite à une exposition à la corrosion est un enjeu majeur, notamment d'un point de vue économique et scientifique. La conception des systèmes infrastructuraux vise deux objectifs principaux qui définissent des systèmes qui ont une fiabilité satisfaisante, rentable, en gagnant en temps de calcul et en coûts.

La caractérisation et le suivi de la cinétique de la corrosion menés conjointement avec l'évaluation du comportement et de la durabilité des structures géotechniques sont nécessaires pour mieux cerner la complexité du processus de la corrosion.

L'évaluation du taux de corrosion permet de déterminer et dimensionner la capacité portante des infrastructures corrodées ce qui fait de la modélisation numérique ou analytique une étape cruciale dans l'évaluation des risques et comprendre la complexité du processus de la corrosion.

En pratique, la perte de section d'armature peut caractériser le degré de la corrosion dans les infrastructures en béton armé. La réduction isotrope de la section d'acier peut avoir un impact significatif sur le comportement des éléments de structure dans le temps en déstabilisant l'interface acier/béton, affectant la stabilité, la résistance en réduisant les propriétés mécaniques ce qui dégrade l'état de service des systèmes infrastructuraux.

Les éléments en béton armé combinent trois sections principales : le béton, la barre d'acier et l'interface entre ces deux matériaux appelée zone de transition (ITZ). L'ITZ est considéré comme la zone la plus sensible des éléments structuraux, elle est caractérisée par l'adhérence entre les deux matériaux où la microstructure est transformée. L`analyse du comportement de la zone de transition acier/béton sous des conditions corrosives est un paramètre important dans l'évaluation de la durabilité structurale des infrastructures.

Selon Fujimoto et al.[1] la prédiction de la corrosion est effectuée en utilisant deux approches: les modèles déterministes basés sur des calculs numériques et des modèles probabilistes stochastiques. En raison des avancées technologiques récentes, les calculs numériques sont principalement basés sur la

méthode des éléments finis (MEF). Le développement de modèles numériques de simulations fiables telles que l'analyse par élément fini est fondamental pour les futurs concepts de maintenance des éléments infrastructuraux [2][3]. Les aspects multi-physiques des processus de corrosion nécessitent des méthodes multidisciplinaires combinant plusieurs approches avec différentes techniques de modélisation telles que le couplage pour simuler les différents phénomènes impliqués [4][3].

En matière de modélisation numérique et analytique, différents travaux de la littérature sur le phénomène de corrosion ont grandement amélioré la compréhension qualitative des processus complexes de corrosion à différents endroits des structures dans diverses conditions, par contre l'analyse couplée du comportement des infrastructures corrodées sous des conditions de chargement mécanique reste un peu limitée.

Le présent travail démontre l'efficacité des techniques de couplage mécano-électrochimique dans l'analyse du comportement des structures corrodées en béton armée, ainsi que la zone de transition entre les deux matériaux compostant, sous des contraintes mécaniques pendant le processus de corrosion.

Ce manuscrit est organisé en deux grandes parties, divisées en cinq chapitres. La première partie est sous forme d'une synthèse bibliographique, elle est formée de deux chapitres qui englobent le travail de thèse par rapport à l'état de l'art.

Le premier chapitre définit la corrosion et les étapes de son processus complexe ainsi que toutes ces formes dans différents environnements corrosifs, en démontrant son impact sur les ouvrages géotechniques.

Le deuxième chapitre lui-même est divisé en deux sections une est consacré à la méthode probabiliste dans l'évaluation des incertitudes que peut contenir le processus de corrosion, les matériaux composant les éléments structuraux ainsi que le milieu environnant, la deuxième section introduit la modélisation numérique ainsi que les techniques de couplages multi-physiques dans l'évaluation de la corrosion des infrastructures.

La deuxième partie est destinée à l'étude numérique et analytique d'une poutre en béton armé corrodée, cette partie comporte trois chapitres.

Le troisième chapitre est sous forme d'une analyse fiabiliste de la corrosion. ce chapitre présente une approche fiabiliste optimisée pour cerner le problème du caractère aléatoire des propriétés des matériaux, et géométrie des éléments infrastructuraux et la contrainte interne et externe appliquée sur ces derniers, leur comportement dans le temps sous l'impact de la corrosion ainsi que le comportement du système lui-même, et sa variabilité dans le temps qui met en avant l'importance de l'analyse de fiabilité à variation temporelle.

Le quatrième chapitre est aussi composé de deux cas d'études consacrées à la modélisation numérique couplée d'une poutre sous l'effet combiné de la corrosion et les contraintes mécaniques, le premier cas traite le comportement d'une poutre corrodée sous un chargement mécanique en prenant en compte la porosité du béton utilisée, le deuxième cas met en évidence le comportement de la zone de transition (ITZ) acier/béton en analysant le comportement de cette dernière sous l'impact combinée d'une action mécano-électrochimique.

Le cinquième chapitre regroupe tous les résultats des cas d'études effectuées par la méthode fiabiliste et numérique qui sont analysés interprétés et comparés, sachant que les calculs fiabilistes sont effectués avec le logiciel Matlab, et la partie des calculs numériques est effectuée avec le logiciel Comsol.

Ce travail mais l'accent sur l'importance de la modélisation numérique et des techniques de couplage dans l'étude de l'impact de la corrosion sur le comportement des ouvrages géotechniques qui sont constamment soumis à des contraintes mécaniques internes et externes.

Chapitre 1 : Revue bibliographique sur la corrosion

1.1. Introduction

En raison de sa capacité à être moulé sous diverses formes, sa durabilité et sa robustesse, le béton armé est un matériau de construction à usages multiples le plus utilisé, économique et efficace. Par contre une mauvaise conception, un mauvais choix des matériaux constituants, l'agressivité de l'environnement ou bien la combinaison de ces facteurs peut jouer un rôle important dans le mal fonctionnement de ce dernier dans son rôle principal de matériau de construction[5].

On peut définir la présence de l'acier dans le béton comme une arme à double tranchant, il est caractérisé par sa haute résistance aussi bien qu'a la traction que compression, sa fragilité se résume dans la corrosion de ce dernier en contact avec un milieu agressif, car d'après Broomfield [5] dans son ouvrage ce contact a tendance à inverser le processus, le métal raffiné réagira avec le milieu environnant pour former des oxydes, des sulfates, des sulfures, des chlorures...etc. avec des propriétés chimique et physiques différentes du métal consommé, qui en contact avec l'oxygène et l'eau a tendance à rouiller et se décomposer.

Bréchet décrit la corrosion comme le résultat de la cohésion métallique et les propriétés attractives des métaux assurés par le gaz d'électrons libres, et souligne le fait qu'en conception il ne s'agit pas seulement de garantir des caractéristiques fonctionnelles, il s'agit aussi de garantir une longue durée de vie qui est souvent limitée par les interactions avec le milieu chimique, d'où vient l'importance d'étudier ce phénomène dans une multitude de domaines tels que celui du génie civil [6], l'attention portée à cette pathologie s'accroît dans les communautés scientifiques ce qui laisse les chercheurs à le considérer toujours comme un domaine de recherche ouvert pour estimer les risques et trouver le meilleur moyen de comprendre la complexité de la corrosion, pour but de prendre les mesures appropriées.

Si on parle de développement de la construction durable, les ingénieurs mettent aujourd'hui l'accent sur une conception basée sur la durabilité, une gestion de la durée de vie utile et la prévision des coûts qui ont une relation directe avec l'entretient des composants corrodés des infrastructures, et les constructions en béton armé [7], le problème majeur de la durabilité est due à la détérioration des structures causées par la corrosion, vu que ce phénomène représente un défi important, le

développement de mesures et de techniques de lutte contre cette pathologie demeure un sujet de préoccupation industrielle et académique important [8].

1.2. Définition de la corrosion

Que ça soit un ouvrage de soutènement, fondation, bâtiment ou n'importe quel ouvrage en génie civil, l'acier représente une grande majorité de ces derniers ce qui met l'accent sur la corrosion et la rend l'une des premières causes de détérioration des ouvrages liés aux conditions environnementales agressives.

Selon la norme ISO 8044 (2015) [9], la corrosion est définie comme une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement qui entraîne des changements dans les propriétés du métal et qui peut entraîner une altération significative de la fonction du métal, de l'environnement ou du système technique dont il fait partie [9].

Tout ouvrage peut-être cibler par des agents agressifs en contact avec l'environnement extérieur, la corrosion peut être causée par plusieurs facteurs(le milieu, la conception, le matériau, le temps...etc.), son processus englobe deux catégories, la première c'est "corrosion sèche" qui ce produit dans l'air, lorsque le milieu est aqueux, on parle de la "corrosion humide".

- La corrosion sèche:

La vitesse de développement de la corrosion sèche dans l'atmosphère est limitée, elle peut être considérée comme négligeable[10], sur la surface des métaux une très mince couche d'oxyde se forme en contact avec l'oxygène, la température a une grande influence sur l'épaisseur de cette dernière qui augmente par l'augmentation de la température vue que les métaux soumis à un réchauffement présentent une couche plus épaisse qui se détache. La couche d'oxyde reste continue tant que le contacte avec l'aire est maintenu, formant un film protecteur, la couche d'oxydes complexes instables physiquement garde une certaine valeur protectrice. Il y a certaines corrosions qui se produisent même dans un taux d'humidité nul, même si en majorité c'est l'humidité relative ou la teneur en vapeur d'eau qui est le principal activateur de la corrosion atmosphérique de l'acier [11]. Même en cas de corrosion atmosphérique, la surface des matériaux est exposée à de fines couches d'électrolyte, parfois avec des périodes successives d'humidité et de séchage[12].

- La corrosion humide:

De nature électrochimique la corrosion humide ce produit dans un milieu humide qui est défini par une humidité relative qui excède 60% entraînant la formation d'une couche mince d'électrolytes d'une épaisseur variable à la surface de l'acier [10].

La nature électrochimique de la corrosion ce traduit par l'apparition d'un courant électrique en l'absence de toute source extérieure, le processus est défini comme l'attaque d'un métal par le

développement de réactions électrochimiques qui ont lieu à l'interface métal-solution conduisant à un transfert d'ions et d'électrons à cette interface en présence d'une différence de potentiel entre ces deux phases, les défauts superficiels du métal, tels que les déformations, impuretés sont des zones qui favorisent la production de ces réactions. Les sites d'énergie élevée deviennent alors des centres actifs et se comportent comme des micro anodes; de même les sites d'énergie plus faible correspondent à des centres cathodiques.

La surface du métal est considérée comme siège de plusieurs réactions interagissant entre elles, appelées réactions conjuguées. Principalement deux réactions primaires (anodiques et cathodiques et une réaction secondaire sont distinguées [13].

Le métal est sous forme d'une collection d'ions positifs flottant dans un nuage d'électrons qui assurent la cohésion entre ces derniers en agissant comme une colle, car sans les électrons les ions chargés positivement se repousseraient.

Au contact des non-métaux dans certaines conditions, les métaux sont susceptibles de libérer les électrons donc subir une oxydation, exemple des atomes de fer neutres [14]:

$$Fe \Leftrightarrow Fe^{n+} + ne^{-} \tag{1.1}$$

Sachant que *n* dépend du type de fer formé, les métaux ont une forte tendance à abandonner les électrons aux non-métaux. Dans la réaction anodique, il va y avoir une oxydation du métal, l'ion métallique quitte le réseau cristallin solide et passe en solution, une autre réaction cathodique ce produit simultanément. Selon la quantité d'oxygène a la cathode, ou bien l'environnement, deux types de réactions primaires peuvent se manifester suivie par l'apparition d'un dépôt a la surface du métal:

- En l'absence d'oxygène:

$$2H_2O + 2\text{é} \Leftrightarrow 2OH^{-} + H_2 \tag{1.2}$$

$$2H^{+} + 2\mathbf{é} \Leftrightarrow H_2 \tag{1.3}$$

- En présence d'oxygène:

$$O_{2+}2\text{é} \Leftrightarrow H_2 \tag{1.4}$$

Les équations qui résument les réactions s'écrivent comme suit [13]:

$$F^{n+} + nOH^{-} \rightarrow Fe\ (OH)_n \tag{1.5}$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 \Leftrightarrow 2Fe_2O_3 + 4H_2O \tag{1.6}$$

1.3. Les étapes du processus de la corrosion

Deux processus de corrosion de l'acier peuvent être distingués, chimiques et électrochimiques.

a) - Corrosion chimique:

La présence de l'eau avec l'action de l'oxygène de l'air déclenche le processus chimique, les réactions de ce dernier sont accéléré par le gaz carbonique et l'anhydride sulfureux présents dans l'air et dans les gaz d'échappement. La présence d'oxygènes et d'humidité participe dans la continuité du processus de corrosion vu que la couche d'oxyde n'est pas protectrice.

b) - Corrosion électrochimique:

Le processus électrochimique de la corrosion est beaucoup plus complexe, une fois la corrosion de l'acier d'armature déclenchée, le comportement de l'ensemble de la structure se détériore, la durabilité des structures en béton armé est affectée par la corrosion des armatures due à la pénétration des ions de chlorure et à la carbonatation du béton, si la concentration du chlorure sur la surface de l'armature dépasser un certain seuil ou que la réaction de la carbonatation fait chuter le pH de la solution des pores du béton jusqu'à une valeur seuil, l'armature en acier subit le processus de dépassivation [15].

La formation des produits de corrosion sur la surface de l'armature en acier par des réactions électrochimiques dues à l'intrusion d'oxygène se résume en deux phases distinctes: la phase d'initiation(1) et la phase de propagation (2).

(1) La phase d'initiation de la corrosion: fait référence au processus de dépassivation de l'acier d'armature, elle se traduit par la pénétration des éléments agressifs présents dans le milieu environnant dans le béton, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), elle commence de la mise en place des structures jusqu'à la dégradation du film d'oxyde protecteur sur la surface de l'acier d'armature (film passif).

(2) La phase de propagation de la corrosion: se traduit par un processus de dégradation mécanique des structures en béton armé attaquées par la corrosion, cette phase commence par la formation de cellules de corrosion à l'interface acier/béton jusqu'à l'état limite des dommages dus à la corrosion(3) [16].

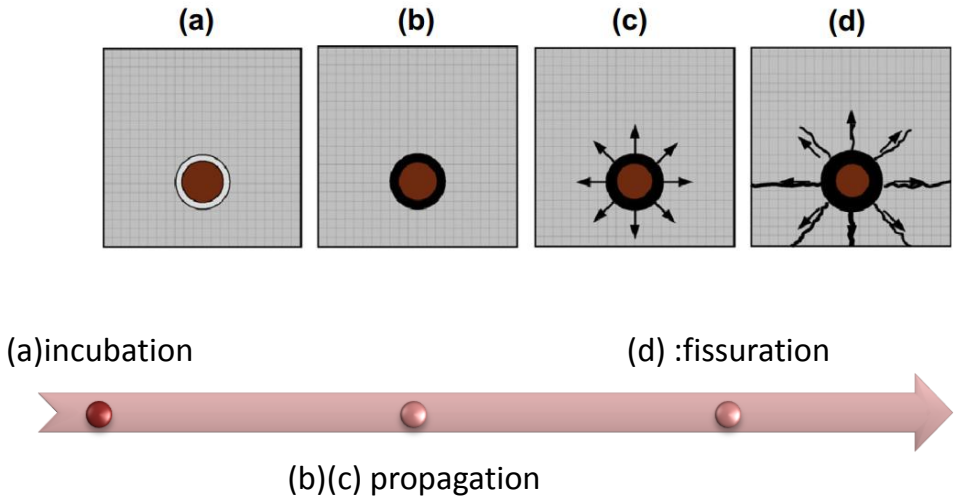


Figure1.1. Évolution de la dégradation du béton [17]

Donc:

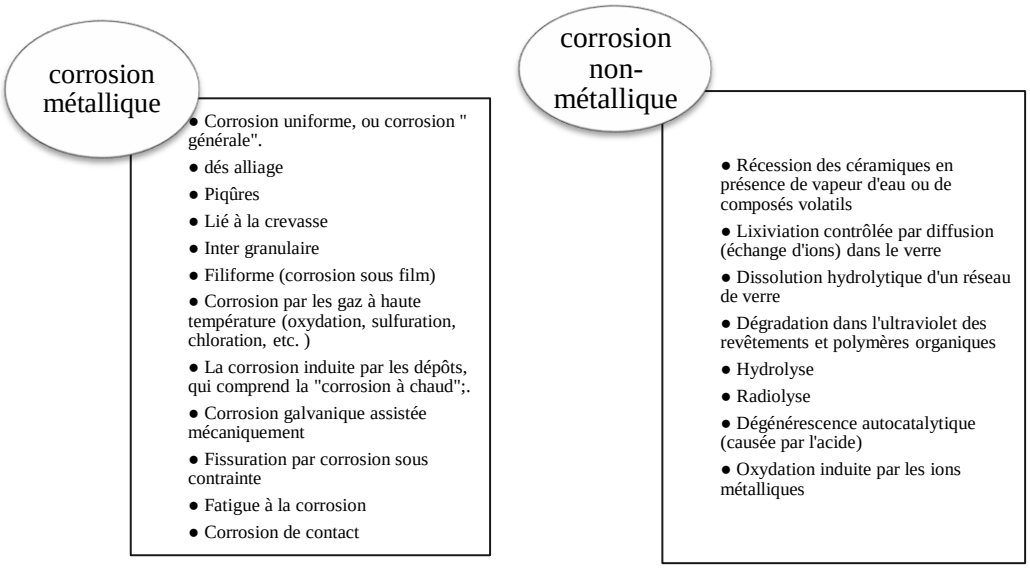
Les principales étapes du processus de corrosion des armatures sont donc:

(1) la propagation des agents agressifs extérieurs tels que le gaz carbonique CO_2ou les ions chlorure Cl^-, l'amorçage de la corrosion (depassivation des armatures).

(2) la propagation de la corrosion conduisant à l'endommagement du béton d'enrobage (éclats, épaufrures, ruptures) (3).

1.4. Typologie de la corrosion

Les processus de dégradation mécanique, comme le fluage, l'usure et la fatigue, ne sont pas considérés comme de la corrosion, bien que les processus de corrosion puissent accélérer ces modes de dégradation, la corrosion peut se produire sous une multitude de formes, les caractéristiques de détérioration des matériaux indiquent leur résistance chimique ou leur activité. Les produits de corrosion sont les résultats de l'influence chimique soit a la surface ou l'intérieur du métal alors que l'influence mécanique (par exemple, l'érosion) provoque l'usure de la surface métallique (amincissement physique) entrainant une perte de section du métal [14] en un point de la surface exposée, allant d'attaques uniformes sur toute la surface à des attaques locales, les principaux types de corrosion sont classé par la manière qui suit corrosion métallique et non-métallique [18]:



Selon la littérature il existe plusieurs formes de corrosion, dont certaines résultent d'une conjonction de phénomènes, sachant que la première approche de la corrosion se distingue généralement visuellement soit par l'aspect de l'attaque qui en résulte, la localisation ou l'association à un mécanisme de dégradation, certaines sont spécifiques à des domaines industriels ou à des environnements particuliers.

1.4.1. *La corrosion généralisé (uniforme)*

Attaque uniforme ou corrosion générale est caractérisée par des attaques corrosives qui se développent uniformément sur toute la surface métallique ou sur une grande partie de la surface totale, c'est un type de corrosion qui touche sur tout, les pipelines que l'on trouve couramment dans l'industrie pétrolière et gazière entraînant une réduction uniforme de leurs parois [19]. La corrosion généralisée se caractérise par plusieurs processus électrochimiques individuels qui se produisent uniformément sur toute la surface se traduisant par la diminution d'épaisseur soit par unité de temps ou en perte du poids par unité de surface et par unité de temps si les produits de corrosion sont solubles, ou par un dépôt uniforme s'ils ne le sont pas [17][18], c'est connu comme l'une des principales causes de défaillance des pipelines, le métal de la paroi continue de perdre de l'épaisseur jusqu'à ce qu'il s'effrite. La corrosion uniforme est le type de corrosion qui altérer extrêmement le métal.

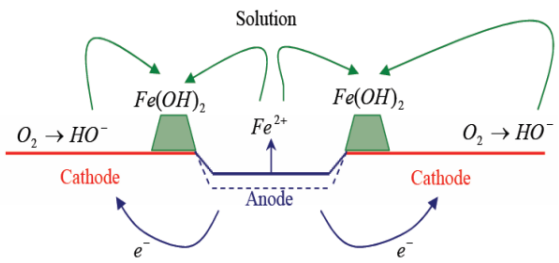


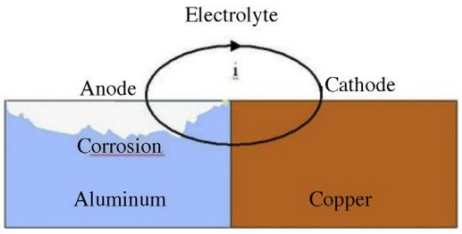
Figure 1.2. Principe de la corrosion généralisée ou uniforme [22]

La figure (1.2) montre que sur la surface du métal il y a des zones anodiques dans lesquelles l'oxydation du métal se produit, et des zones cathodiques qui reprennent les électrons fournis par l'anode, un film d'oxyde se forme sur la cathode due à la migration des ions vers cette dernière via la solution conductrice, vu que l'anode et la cathode changent d'emplacement constamment, toute la surface du métal se corrode, d'où la définition de la corrosion uniforme.

1.4.2. *La corrosion galvanique*

Cette forme de corrosion est parfois appelée corrosion dissemblable, due à l'assemblage ou le contact direct entre différents métaux, de ce fait la combinaison de certains métaux (par exemple dans le cadre d'une structure porteuse) peut engendrer de graves problèmes.

La corrosion galvanique est une corrosion électrochimique résultante de la formation d'une pile par mise en contact de deux matériaux conducteurs différents dans un environnement assurant un milieu électrolytique. La série galvanique des métaux fournit des détails sur la façon dont le courant galvanique circule entre deux métaux, et quel métal se corrodera lorsqu'ils sont en contact ou près l'un de l'autre en présence d'un électrolyte [23] par exemple un environnement qui contient (humidité + chlorure de sodium) convient très bien pour ce type de corrosion vue que la différence de potentiel due à l'existence d'un électrolyte fournira une force motrice plus forte pour la dissolution de la matière moins noble (plus électriquement négative), il réduira également la tendance du métal le plus noble à se dissoudre.



Aluminum: Aluminium; Copper: Cuivre

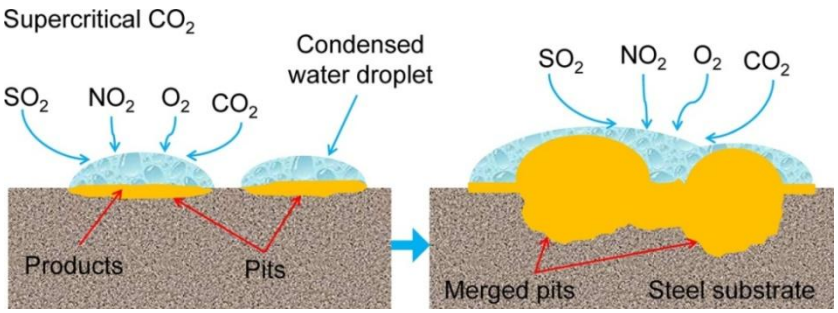
Figure1.3: Principe de la corrosion galvanique (Ex: aluminium, cuivre) [24]

1.4.3. *La corrosion par piqure*

Cette forme de corrosion est un phénomène électrochimique, ce dernier est caractérisé par une perte de métal très localisée qui se traduit par des piqûres pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne, la corrosion par piqure menace considérablement la durabilité des ouvrages causant une concentration de contraintes ayant un impact sur la capacité portante des éléments de la structure [25].

Ce type de corrosion est produit par certains anions, particulièrement les chlorures sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince, plusieurs facteurs influent son processus, notamment les anions agressifs, le traitement thermique, la microstructure et composition des métaux, la température ainsi que le pH global et local [26].

Une étude a été menée sur une existante poutre exposée à un environnement marin depuis quarante ans, deux types de piqûres de corrosion ont été identifié: une fosse large et peu profonde et une fosse étroite et profonde, l'étendue de la fosse large souvent recouverte par des produit de corrosion la rende difficilement détectable lors de l'inspection conduisant a son prolongement dans le temps en largeur comparée a sa profondeur contrairement aux fosses étroites qui évolues davantage en profondeur [25]. La figure (1.4) illustre un mécanisme de corrosion par piqûres d'acier de pipeline dans du CO2 supercritique saturé d'eau avec des impuretés de SO_2, NO_2 et O_2:

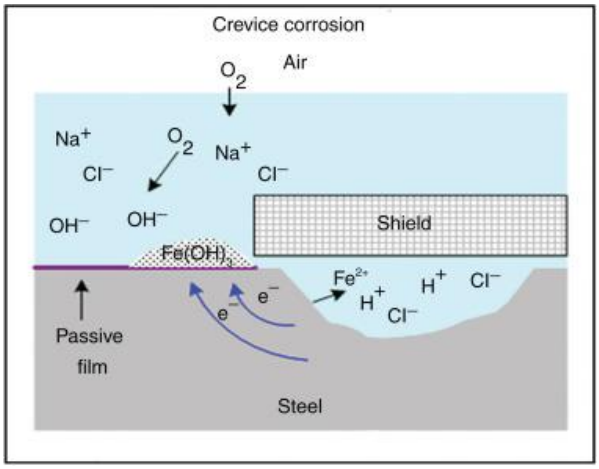


Supercritical CO_2: CO_2 supercritique; Condensed water droplet: Gouttelettes d'eau condensée; Products: Produits; Pits: Les fosses; Merged pits: Les fosses fusionnées; Steel substrate: Substrat en acier

Figure1.4. Représentation schématique de la configuration d'une piqûre [26]

1.4.4. *La corrosion par crevasse*

La corrosion par crevasses ou corrosion caverneuse contrairement à la corrosion par piqûres est un phénomène différé qui nécessite un temps d'incubation relativement long, c'est une forme d'attaque de corrosion localisée où la corrosion peut se produire entre des surfaces adjacentes, sous une couche protectrice contre la corrosion, ou bien sous des bandes métalliques, et même sous des dépôts de corrosion ou de tartre. Ce type de corrosion localisée est très semblable à la corrosion par piqûre, sauf que la géométrie de la fissure a un impact sur l'amorçage et la propagation de cette dernière. La corrosion par crevasse est de même nature que la corrosion par piqûre, la différence se ramène dans les mécanismes qui affectent la phase d'initiation [27], contrairement à la corrosion par piqure la cinétique et la morphologie de la corrosion caverneuse s'étend en largeur sur la surface de l'interstice ou sous le dépôt et non pas en profondeur; Dans n'importe quel milieu corrosif tout métal peut-être ciblé par ce type de corrosion, cependant, dans les milieux riches en chlorures comme l'eau de mer, les métaux comme l'aluminium et les aciers inoxydables dont la résistance à la corrosion dépend de leur film oxydes de surface sont particulièrement sujets à cette attaque [23].



Crevice corrosion: Corrosion des crevasses; Shield: Protection; Passive film: film passive; Steel: Acier

Figure1.5. Processus de la corrosion caverneuse [27]

1.4.5. *La corrosion sélective*

Comme son nom l'indique, le désalliage est un processus de corrosion sélective ce mode de corrosion se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage possédant une haute activité électrochimique. Le processus de la corrosion sélective est décrit par la dissolution des éléments les plus électro-chimiquement actifs d'un alliage, alors que les atomes restants étant les plus nobles se diffusent le long de l'interface solide-électrolyte [28]. L'attaque de la corrosion sélective peut se présenter sous différentes forme, localisée créant une surface poreuse, ou uniformément répartie sur la surface métallique provoquant la dégradation des caractéristiques mécaniques du matériau.

Le désalliage est un domaine qui s'élargit énormément en recherche, alors que certains étudient ses mécanismes et propriétés, d'autres se concentrent sur le développement de nouveaux métaux et alliages poreux. À l'origine son mécanisme était envisagé que dans le contexte de la corrosion, mais aujourd'hui le désalliage est utilisé comme une technique pour la fabrication de matériaux nano poreux à haute surface [29].

1.4.6. *La corrosion sous contrainte mécanique(CSC)*

La corrosion sous contrainte est caractérisée par le temps d'incubation, plus la contrainte est élevée, plus le temps d'incubation est court. Le courant de corrosion augmente considérablement sous contrainte conduisant à l'augmentation de la vitesse de corrosion des métaux.

La corrosion par piqûre est également considérée comme un site d'amorçage pour la corrosion sous contrainte, l'expansion de corrosion par piqûres croît à un rythme beaucoup plus rapide sous contrainte qu'en l'absence de contrainte, ayant un impact important sur la durabilité des structures portantes.

Le processus de la corrosion sous contrainte se résume dans l'accélération de la dissolution anodique par le stress appliqué par une contrainte conduisant à l'augmentation de l'énergie d'activation atomique ce qui augmente le degré de déformation locale du métal.

D'une autre part l'application de contrainte affect la rupture du film passif, particulièrement les zones de haute contrainte entraînant une dissolution préférentielle aux endroits de rupture [30].

La corrosion sous contrainte est influencée par certains facteurs métallurgiques:

- Composition du métal.
- Orientation des grains.
- Composition et répartition des précipités.
- Dislocations, traitement thermique.

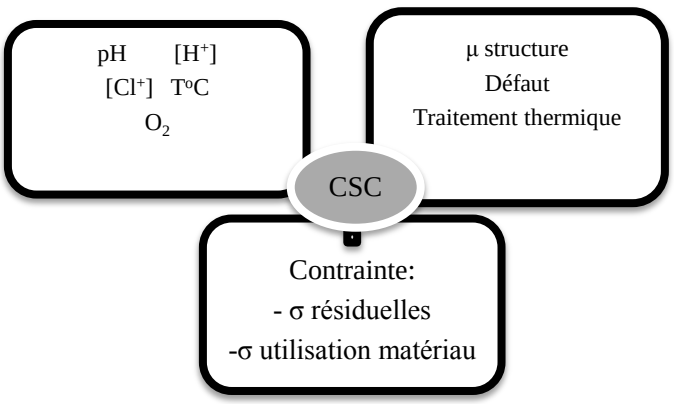


Figure1.6. Paramètres intervenants dans l'apparition de la CSC[31]

1.4.7. *La corrosion fatigue*

La corrosion-fatigue est la dégradation mécanique d'un matériau dont la teneur en oxygène du milieu, sa température, son acidité, sa composition ont une grande influence sur ce dernier.

Étant l'une des principales causes de dégradation prématurées de structure portante, la corrosion fatigue est le résultat d'une rupture mécanique d'un matériau causée par l'action combinée d'un chargement cyclique et de la corrosion. Le processus de ce dernier se détermine par la fragilisation du film passif d'oxyde sous une certaine charge cyclique, sa rupture sépare les deux zones anodique et cathodique entrainant centralisation de la réaction de dissolution anodique, visible sous forme de crevasses qui servent de collecteurs de contraintes. Si la taille de certaines piqures de corrosion dépasse une valeur critique, l'augmentation des contraintes locales peut provoquer la formation d'une fissure de fatigue [32].

La corrosion fatigue se distingue de la CSC par les contraintes appliquées, en corrosion fatigue les contraintes ne sont plus statiques, mais cycliques (efforts périodiques alternés), prenant exemple des poutres en béton armé couramment utilisées dans la conception des ponts routiers, souvent ciblées par un chargement cyclique dû aux mouvements répétés des véhicules augmentant leur vulnérabilité a la dégradation par corrosion fatigue [33].

Les essais de fatigue pratiqués dans certaines expériences ont déterminé que les fissures, déformations, et rigidité résultant des endommagements par fatigue, passent par trois étapes, un rapide développement dans la première phase, un développement lent dans la deuxième phase et une rupture fragile prononcée dans la troisième phase de l'essai de fatigue[34].

1.4.8. *La corrosion bactérienne*

la corrosion bactérienne ajoute une certaines complexité à la dégradation des structures géotechniques ayant un contact avec le sol. Dans l'absence d'oxygène (milieu anaérobique) les bactéries peuvent contribuer à la corrosion par piqûre, les bactéries du sol (thiobaccilli) convertissent le soufre et les sulfures en acide sulfurique, alors que d'autres espèces (ferrobaccili) attaquent les sulfures de l'acier (FeS) des barres d'acier exposées provoquant leurs corrosions associées à une odeur de sulfure d'hydrogène et des piqures régulières sur la surface d'aciers accompagnés des produits de corrosion noire [5]. Un intérêt particulier est apporté sur la possible fonction des microbes en tant qu'agent de contrôle de la corrosion dans de nombreux domaines, tels que la microbiologie et l'ingénierie, vue que certains micro-organismes qui influencent la corrosion peuvent à la fois provoquer et inhiber la corrosion. Comme ils ne peuvent être liés à une réaction biochimique unique ou à des espèces ou groupes microbiens spécifiques, les mécanismes de la corrosion d'origine microbienne et de l'inhibition de la corrosion d'origine microbienne ne sont pas entièrement compris [35].

1.5. Les facteurs affectant la corrosion

Au contact avec l'environnement externe les métaux réagissent à un stimulus spécifique imposé qui peut être chimique, physique (mécanique) ou mixtes (combinaisons chimiques-mécaniques), la nature du stimulant provoque une certaine sorte de réaction qui influe le type de dégradation du matériau [14]. Les interactions de multiples facteurs environnementaux comme l'humidité relative, température, dioxyde de soufre, chlorures, les polluants et le vent confirme la complexité du processus de corrosion, l'interaction complexe entre les différents facteurs complique l'analyse de leurs influences. En raison de cette complexité les travaux réalisés pour l'obtention des modèles précis afin d'estimer la corrosion dans différentes conditions environnementales sont divers et nombreux [36]

Une structure est ciblée de dégradation lors de sa mise en service, quelle que soit l'origine des facteurs, physique comme les températures extrêmes, facteurs mécaniques qui se résument dans les

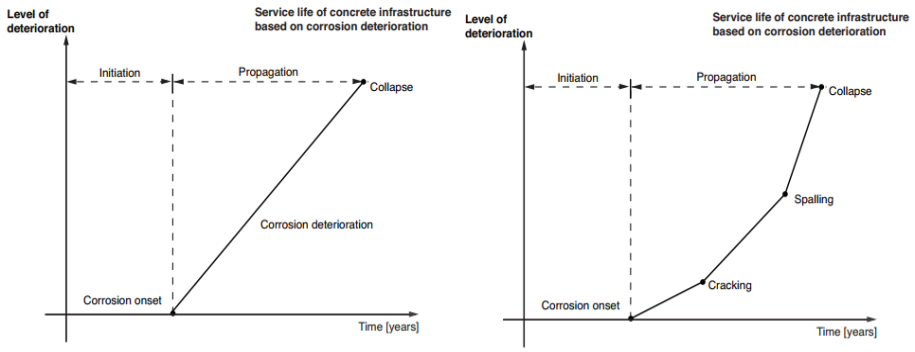
charges excessives et les chocs par exemple l'enlèvement l'amincissement physique et gaspillage du métal dû à l'érosion, ou bien facteur chimique provoquant des réactions chimiques sur la surface métallique ou à l'intérieur causant l'apparition des produits de corrosion, des piqûres ou des fissures, il a été déterminé que la résistance ou activité chimique des matériaux est indiquée par leurs caractéristiques de détérioration [14].

1.5.1. *Les facteurs affectant la corrosion dans le béton*

Les infrastructures telles que les canalisations en béton et les structures souterraines...etc. sont vulnérables aux attaques chimiques ciblant l'acier ou le béton composant, l'interaction avec le milieu environnant entraîne des défaillances affectant leur durabilité [5].

L'air, l'eau et le sol favorisent la migration d'agents polluants dans le béton par la pénétration de ces derniers dans les pores du béton, modifiant ainsi ses caractéristiques, en particulier la composition chimique de la solution interstitielle. On peut classer les facteurs de corrosion affectant les structures en béton armées en fonction des types de structure, l'influence des paramètres environnementaux, des propriétés des matériaux du béton, de la qualité de construction, et de l'épaisseur du béton d'enrobage [37], Le béton alcalin change à mesure qu'il interagit avec son milieu environnant ce qui modifie ses propriétés, tout type de béton se détériore et se fissure à la suite d'interactions chimiques (dissolutions, gonflements, ...etc.), des contraintes thermiques (variations extrêmes de température) ou contraintes mécaniques (déformations dues à des charges excessives, à des chocs,...etc.) [10].

La pénétration des ions de chlorure et la carbonatation du béton sont l'une des principales causes de la corrosion des armatures. Selon le modèle de corrosion proposé par Tuutti mis à jour par Fib en incorporant des états limites intermédiaires dans la période de propagation (les deux modèles sont représentés dans la figure(1.7) [38], pour but d'étudier la durabilité du béton, la facilité de pénétration de produits chimiques tels que le dioxyde de carbone, les chlorures, l'oxygène et l'eau sont cruciaux, l'amorçage et la propagation de la corrosion des armatures sont déterminés par la présence de ces produits chimiques dans le béton [39].



Level of deterioration: Niveau de détérioration;Service life of concrete infrastruture based on corrosion deterioration: Durée de vie des infrastructures en béton basée sur la détérioration par corrosion; Corrosion onset: Début de la corrosion; Initiation: Initiation; Propagation:Propagaion; Corrosion deterioration: Détérioration par corrosion; Cracking: Fissure; Spalling: Épilage; Collapse: Effondrement; Time(Years): Temps(Années)

Figure1.7. Les modèles de Tuuti et Fib [38]

Selon la figure(1.7) le modèle de Tutti divise la durée de vie d'un béton soumis à la corrosion des armatures en deux périodes, la période d'initiation qui se résume dans la pénétration des agents agressifs, et celle de propagation où la dégradation de l'acier se produit, Fib a revisité ce dernier en introduisant des étapes intermédiaires dans la période de propagation.

1.5.1.1. Les facteurs chimiques

1.5.1.1.1. la carbonatation

En raison de la faible concentration de CO_2 dans l'atmosphère (~ 0,03 - 0,04 %), la carbonatation naturelle se produit à un rythme relativement lent, ce dernier peut être plus rapide dans les environnements urbains et industriels où la concentration de CO_2 est relativement élevée (>0,04 %) et ne cesse d'augmenter [40].

Les structures exposées à l'air ambiant et à de très fortes concentrations en dioxyde de carbone tel que les tunnels routiers, les ouvrages urbains ou encore les parkings souterrains sont constamment soumis au phénomène de carbonatation et donc à des risques de corrosion des armatures dans le cas des bétons armés ou précontraints [41].

Le processus de carbonatation est lié à l'état de saturation du béton vu que le CO_2 pénètre rapidement dans le réseau poreux du béton par l'intermédiaire de la phase gazeuse comparée à la phase liquide[41].

En général la corrosion de l'acier dans le béton carbonaté est définie comme la réaction chimique entre le dioxyde de carbone atmosphérique et les produits d'hydratation, en particulier l'hydroxyde de calcium qui réduit le pH initialement élevé de la solution interstitielle à un niveau auquel le film passif peut se déstabiliser et se décomposer permettant à l'acier de se corroder à un taux déterminé principalement par la conductivité électrolytique du matériau carbonaté [42][43].

En présence du gaz CO_2, les réactions suivantes se produisent dans les structures en béton [44]:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1.7)$$

$$C - S - H + 2CO_2 \rightarrow SiO_2 + 2CaCO_3 + H_2O \quad (1.8)$$

Selon les réactions ci-dessus, le CO_2 réagit avec le $Ca(OH)_2$, en consommant l'ion (OH), le pH de la solution interstitielle s'élève entraînant l'augmentation de la vitesse de corrosion [45] et une réduction de la porosité due à l'augmentation du volume solide dans le processus de carbonatation l'or de la transformation du $Ca(OH)_2$ en $CaCO_3$ [46].

La dissolution du CO_2 dans l'eau conduit au déroulement de la réaction (1.11) dans la solution des pores du béton:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \quad (1.9)$$

$$H_2CO_3 + H_2O \rightarrow HC_3^- + H_3O^+ \quad (1.10)$$

$$HCO_3^- + H_2O \rightarrow CO_3^{2-} + H_3O^+ \quad (1.11)$$

La détermination du taux de carbonatation et les facteurs qui l'influence sont le principal but des recherches, il a été déterminé que la minéralogie et la texture des mortiers, le type d'adjuvants utilisé, et l'épaisseur de l'enrobage en béton, ont une forte influence sur le mécanisme et la cinétique de la carbonatation ainsi que sur la période du déclenchement de ce processus [47]. Selon divers essais en laboratoire et les tests effectués sur des structures réelles, il a été déterminé que la corrosion de l'acier peut se manifester avant que le front de carbonatation n'atteigne l'armature, c.à.d. avant même que la profondeur de carbonatation dépasse réellement l'épaisseur du béton d'enrobage [48].

Divers résultats ont été affichés dans la littérature sur l'emplacement du front de carbonatation et l'apparition de la corrosion sur les armatures, Hussain et al. [42] ont constaté que la corrosion se déclenche à une profondeur de carbonatation de 80% de l'épaisseur de l'enrobage de béton.

Théoriquement la corrosion commence lorsque le front de carbonatation atteint l'armature, mais certains auteurs ont observé un début plus précoce, l'étude d'A. Belda et al.[48] sur des échantillons de mortier renforcé et de mortier ordinaire explique l'apparition précoce, et joint l'avis des auteurs en montrant que la variation spatiale de la profondeur de carbonatation était différente, les échantillons renforcés manifestes une profondeur de carbonatation plus élevée à proximité de l'armature.

Hussain et al. [42] ont démontré que la corrosion induite par la carbonatation a une tendance à baisser avec le temps, expliquant qu'au fur et à mesure que le processus de carbonatation progresse, la résistivité du béton augmente, ce qui diminue la conductivité électrolytique de la solution interstitielle et ralentit la vitesse de corrosion.

Les diagrammes Potentiel-pH aussi appelé diagrammes de Pourbaix ont démontré une grande utilité dans l'évaluation de la stabilité et de la composition des produits de corrosion en illustrant les variations du pH et du potentiel à mesure que le fer passe des zones de corrosion aux zones passives, ensuite à la zone d'immunité. Les diagrammes de Pourbaix sont construits à partir de calculs basés sur l'équation de Nernst et les données de solubilité pour divers composés métalliques, ces derniers représentent graphiquement la stabilité d'un métal et de ses produits de corrosion en fonction du potentiel et du pH (acidité ou alcalinité) de la solution aqueuse [1][20].

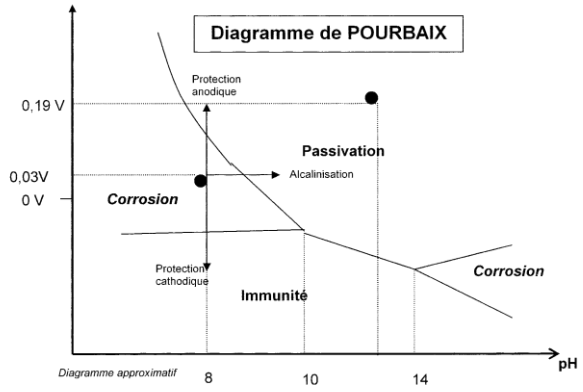


Figure1.8. Le diagramme de Pourbaix [49]

la figure(1.8) illustre les différentes zones du diagramme de Pourbaix, on peut remarquer que pour des pH>11 nous sommes dans une zone où l'acier ne se corrode pas qui est typiquement la zone du béton (pH>12).

1.5.1.1.2. La pénétration des ions chlorures

Les chlorures contenus dans le béton peuvent provenir de deux sources, soit du béton lui-même comme les chlorures provenant des granulats eau de gâchage et adjuvant, ou bien l'environnement extérieur comme les produits chimiques qui pénètrent dans le béton par diffusion et/ou par convection selon le taux de saturation du matériau.

La corrosion des armatures dans un environnement agressif résultant de l'exposition au chlorure est un processus physicochimique très complexe au cours duquel l'humidité et les ions de chlorures pénètrent à travers le béton alcalin à la surface de l'armature. Les conditions d'exposition ainsi que les caractéristiques physiques de la structure et chimique du matériau ont un impact direct sur l'amorçage du processus de corrosion [7]. Lorsque la quantité d'ions de chlorure à l'interface acier/béton atteint un certain seuil, l'acier commence à se corroder, et les produits de corrosion s'accumulent sur la surface de l'acier progressivement ce qui entraîne éventuellement des fissures prématurées des éléments en béton armé [50]. Un seuil de chlorure peut être défini comme le niveau de chlorure à proximité de l'acier à une profondeur qui provoque un taux considérable de corrosion. Le seuil était défini communément par l'utilisation des valeurs conservatrices telles qu'un % (en poids

de ciment), des études plus récentes ont démontré que le seuil de chlorure s'exprime le mieux sous la forme d'un rapport chlorure/concentration hydroxyle, ou concentration de chlorure libre dans la solution interstitielle. Il a été déterminé que le chlorure lié augmente le stock de chlorure naturellement disponible à l'interface acier/béton, cela évite une baisse de l'activité locale de chlorure causé par l'implication de ce dernier dans le processus de corrosion au niveau d'une anode naissante, de plus la stimulation de la libération des chlorures liés due à l'acidification qui se produit au cours de la formation d'anode augmente l'activité de chlorure local au-dessus de sa valeur initiale [51].

Les différentes charges appliquées sur les structures en béton armé peuvent avoir un impact direct sur le taux de transport des chlorures au niveau du béton, J.Shi et al.[50] ont certifié que sous une charge de flexion on peut observer beaucoup plus de produits de corrosion à la surface de l'acier dans la zone de traction que dans la zone de compression, ce qui rend le taux de transport des ions chlorure à l'intérieur de l'enrobage de béton sous charge de traction et sous charge de compression différente.

La corrosion de l'acier d'armature dans le béton dû à la pénétration des chlorures peut se traduire en deux phases distinctes, l'étape d'initiation et celle de propagation. La phase d'initiation de la corrosion englobe le processus de dépassivation de l'acier due aux ions de chlorure, ça implique principalement les processus de diffusion couplée du chlorure et de l'humidité à travers la couverture poreuse du béton[7], sa durée se réduit de la mise en place des structures jusqu'à la dégradation du film d'oxyde protecteur (film passif) sur la surface de l'acier d'armature [7][16], suivis par la phase de propagation qui renvoie au processus de dégradation mécanique des structures, ce stade peut impliquer des procédures beaucoup plus complexes, telles que les réactions électrochimiques et la fissuration de l'enrobage en béton induite par l'expansion la rouille, la durée de cette phase débute de la création de cellules de corrosion à l'interface acier/béton jusqu'à la condition limite des altérations induites par la corrosion[52].

La dépassivation se résume par la modification de la composition de la couche passive par les ions de chlorures suivant les réactions suivantes;

La formation des ions $FeCl_3$ ou $FeCl_2$, à partir des réactions:

$$Fe + 3Cl^- \rightarrow FeCl_3^- + 2e^- \tag{1.12}$$

ou

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2 \tag{1.13}$$

Selon les réactions ci-dessous, en consommant les hydroxydes présents dans la solution, les ions formés contribuent à l'acidification de la solution entrainant une chute du ph et une régénération des ions de chlorures:

$$FeCl_3^- + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3Cl \tag{1.14}$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \quad (1.15)$$

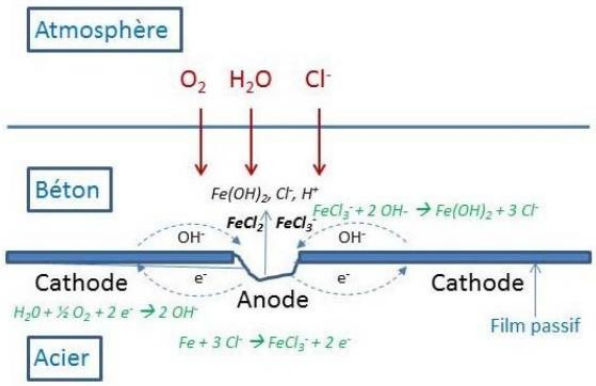


Figure1.9. Représentation schématique des aspects de modélisation de la corrosion induite par le chlorure [41].

Selon Cao et al[16] le processus de corrosion induite par les ions de chlorure, son amorçage peut être divisé en trois phases:

Phase I: *L' état stationnaire du taux de corrosion*: comme l'équilibre entre la consommation d'oxygène et le transport est atteint au début de la phase de propagation, le taux de corrosion reste constant.

Phase II: *L'augmentation du taux de corrosion*: l'élargissement de la fissure du béton facilite l'augmentation de l'apport d'oxygène entrainant la hausse du taux de corrosion.

Phase III: *La stabilité du taux de corrosion* : avec un apport d'oxygène suffisant dans la zone fissurée, le taux de corrosion atteint un état stable.

1.5.2.2.3 L'effet combiné de la carbonatation et de la pénétration du chlorure

Dans des milieux atmosphériques et marins, l'action combinée du CO_2 et des chlorures sur des éléments structuraux en béton armé est assez fréquente, due à l'apport d'ions chlorure et la carbonatation du béton simultanément, il a été démontré qu'une certaine différence existe entre le mécanisme combiné de ces derniers et leurs mécanismes indépendants, en particulier le temps d'initiation de la corrosion des aciers d'armatures qui est considérablement réduit par le mécanisme couplé des deux paramètres [15].

Les structures en béton armé construites dans des milieux marins sont principalement ciblé par la dégradation due à l'action combinée des espèces ioniques en particulier les chlorures présents dans l'eau de mer, le brouillard salin, et le changement de climat incluant la température, l'humidité, ainsi que le dioxyde de carbone provenant de l'air qui peut être particulièrement élevé dans dès les zones

industrielles. Le transport de chlorure et la carbonatation pourraient se produire simultanément, ce qui permettrait leurs pénétrations par la couche poreuse protectrice du béton provoquant la corrosion des aciers d'armature [53].

L'impact de la carbonatation est si complexe qu'il est difficile de définir son influence exacte sur l'accélération ou ralentissement de la dégradation causée par les ions de chlorures [15], cependant il a été déterminé que le processus de carbonatation a un impact considérable sur le transport des ions de chlorure et leur coefficient de diffusion en modifiant la structure des pores du béton ce qui affecte ses propriétés de transport, d'autre part, la carbonatation peut empêcher la liaison des chlorures déclenchant la libération de chlorures liés dans la solution interstitielle du béton qui de base contient une faible quantité de sels de chlorure, aggravant ainsi la nature corrosive de l'électrolyte [51][52].

Li et al. [55] par des analyses expérimentales et théoriques qui traite l'impact de la carbonatation sur la diffusivité du chlorure dans le béton, a trouvé que la carbonatation favorise la diffusion du chlorure, augmentant la diffusivité apparente du chlorure jusqu'à 80 %, ce qui met en évidence l'impact de la modification de la structure des pores sur la diffusivité du chlorure.

1.5.2.2.4 La dépassivation des armatures

La passivité d'un acier peut être considérée comme un faible taux de corrosion causée par la présence d'un film solide interfacial généralement un oxyde sous une forte force motrice anodique, ou potentiel [53][54]. En raison du film d'oxyde lié au degré élevé d'alcalinité du ciment et du béton hydratés formé anodiquement par un mécanisme très similaire à celui du processus de corrosion, les aciers d'armature dans les matériaux cimentaires sont généralement insensibles à la corrosion. La couche passive a une mince épaisseur d'environ 20 nm et comprend principalement deux couches, une interne riche en oxydes/oxyhydroxydes de fer(II), et une couche externe riche en oxydes/ oxyhydroxydes de fer (III) [58].

La chute du pH combinée à des teneurs critiques en chlorures ou carbonate provoque la déstabilisation de la couche passive entrainant la dépassivation de l'acier, en pratique, un pH= 9 est souvent considéré comme étant la valeur critique de dépassivation des aciers. En présence d'humidité et d'oxygène, une fois la carbonatation et/ou la pénétration de chlorure attiennent un certain seuil, la dépassivation prend place accélérant la corrosion des armatures ciblées [58].

La dépassivation ou bien la rupture partielle ou complète de la couche passive peut engendrer des taux de corrosion élevés entrainant la dégradation prématurée des constructions en béton armé [59].

Selon Broomfield [5] il y a une certaine différence entre les mécanismes de dépassivation par attaque de chlorure et par carbonatation. Les pores du béton contiennent beaucoup d'hydroxyde qui peut se dissoudre dans la solution interstitielle permettant le maintien du pH à son niveau habituel de valeurs égale à 12 ou 13, le dioxyde de carbone réagit avec l'eau pour produire de l'acide carbonique, qui réagit avec l'hydroxyde de calcium pour produire du carbonate de calcium. Le pH diminue à la

suite de l'élimination des ions hydroxyles de la solution inertielle déstabilisant la couche passive ce qui permet l'amorçage de la corrosion. Contrairement à la carbonatation les ions de chlorure ciblent la couche passive sans avoir recours à la réduction globale du pH, la corrosion est favorisée par les chlorures qui agissent comme catalyseurs. Les ions de chlorures ne sont pas consommés au cours du processus, mais ils favorisent la décomposition de la couche d'oxyde passif de l'acier ce qui permet au processus de corrosion de se poursuivre plus rapidement.

1.5.1.2. Les facteurs mécaniques

1.5.2.2.1 Influence des fissures

Les structures en béton ne sont pas toujours épargnées des fissures, la plupart des structures en béton armé présentent des fissures dues au retrait, aux gradients thermiques ainsi qu'aux charges mécaniques [60]. Les fissures comme les fissures transversales (fissures de flexion), ou bien les fissures longitudinales dues à la pression exercée sur le béton par la formation de la rouille, ont un impact majeur sur la cinétique de corrosion facilitant l'accès aux agents agressifs, favorisant ainsi la propagation de la corrosion.

Variantes études ont été menée pour but de déterminer le rapport entre les fissures et l'accélération du processus de corrosion.

Puisque la fissure peut être idéalisée comme un grand vide, donc la diffusivité est beaucoup plus grande que celle des matériaux poreux, Hailong Ye et al. [61] ont étudié l'effet des fissures sur la diffusion du chlorure en menant une série d'investigations expérimentales déterminant que la concentration de chlorure à la surface de la fissure a tendance à être plus élevée, pour un béton fissuré le coefficient de diffusion du chlorure est ainsi lié à la largeur et au schéma de la fissure, M.otiento et al. [62] ont montré que le taux de corrosion augmente avec l'augmentation de la largeur des fissures en réalisant des expériences expérimentales en laboratoire avec la largeur des fissures comme variable ainsi que dans des conditions naturelles (zone marine de marée) H.Z. Lopez-Calvo et al. [60] ont mené aussi une investigation sur l'influence de la largeur des fissures de l'enrobage en béton sur la corrosion de l'acier, ils ont constaté que la fissuration était un facteur qui favorisait la corrosion de ce dernier, ils ont aussi cité que l'efficacité de l'enrobage du béton dépendait en grande partie de l'épaisseur de la fissure, dans une recherche un peu récente, M. Otiento et al. [40] ont réalisé une étude dans le but de développer une relation empirique pour le temps de fissuration de l'enrobage en béton, le principal objectif était d'étudier l'influence de l'épaisseur du revêtement et de la qualité du béton sur la fissuration du revêtement induite par la carbonatation de l'acier dans les structures en béton armé leurs résultats ont été utilisé pour but d'estimer le temps nécessaire pour la fissuration due à la corrosion de l'acier d'armature.

1.5.2. *Les facteurs affectant la corrosion dans le sol*

Les métaux peuvent être en contact avec des conditions divers tells que les solutions aqueuses d'électrolytes, gaz (oxygène, ozone, oxydes de soufre, oxydes d'azote et sulfure d'hydrogène), sels, acides, alcalis, substances organiques et micro-organisme, qui contribuent et facilite le processus de la corrosion [14], étant des milieux très hétérogènes, les sols sont le siège de mécanismes de corrosion les plus complexes, ce qui rend la corrosion dans les sols l'un des problèmes majeurs qui touchent les structures géotechniques qui sont partiellement ou totalement enterrées. La corrosion des sols est un danger qui menace et affecte les métaux enterrés et les structures qui sont en contact direct avec le sol, selon S. Suganya et al. [63], comme ils définissent aussi la corrosivité du sol comme la capacité de produire et de développer les phénomènes de corrosion dans lesquels le sol agit comme un milieu électrolytique propice à la corrosion des métaux due à son humidité élevée et l'eau interstitielle qui y circule chargée parfois de nombreux sels.

De nombreuses études ont été réalisées, sur le processus de la corrosion de l'acier et ses interactions avec les paramètres du sol.

Les principaux facteurs de corrosion du sol sont [10][63]:

- La nature du sol (Sable, argile...etc.).
- La texture du sol (perméabilité à l'oxygène).
- Les propriétés géotechniques du sol.
- La teneur en eau du sol (présence d'une nappe phréatique à proximité).
- La répartition de la taille des particules du sol.
- La résistivité électrique du sol (teneurs en sels dissous). La résistivité du sol est considérée par certains comme un prédicateur suffisant de la corrosivité, tandis que d'autres considèrent le type et la structure du sol comme des facteurs déterminants, quelle que soit sa position par rapport à la nappe phréatique [64].
- Les composants minéraux, la nature des sels présents (chlorures, sulfates, sulfures, …etc.)
- Le pH, acidité, alcalinité du sol.
- La présence de bactéries, ainsi que les microbes (en milieu désaéré, accélèrent la corrosion de l'acier).
- La présence de courants vagabonds (voies ferrées, lignes à haute tension, protection cathodique de structures situées à proximité, …)

En raison de ces derniers, la plupart des structures géotechniques métalliques en contact ou enterré totalement ou partiellement dans le sol restent un problème technique et économique sérieux.

Caractéristiques	Circonstances	Exemples de critères
Type de sol	Sol naturel	Présence de tourbes, de lignite, de charbon. Zone telles que marais, étangs marécageux. Zone de marées Présence d'une nappe phréatique saumâtre ou d'eau de mer. Sols anaérobies (possibilité de corrosion microbienne induite).
	Sol artificiel	Sols contenant des cendres, des scories, des sous-produits industriels, des résidus de déchets domestiques. Zones remblayées par des sous-produits industriels (tout type). Matériaux recyclés non contrôlés.
Perturbations électriques	Dispositif à courant continu (CC)	Proximité de chemins de fer à CC, de tramways, de métros. Proximité d'une structure à protection cathodique ou d'anodes,
	Dispositif à courant alternatif (CA)	Proximité de lignes électriques à CA, de réseaux ferroviaires à CA. Proximité de prises de terre à CA
Pollution	Sol contaminé	Contamination par des sels de dégivrage, du fumier, des fertilisants, des rejets industriels ou des effluents d'égouts perméables
Autres	Topographie et hydrographie	Présence, sur le chemin d'une canalisation, d'un point bas, d'une traversée de ruisseau ou de rivière.
	Toponymie	Indications, données par les noms de villages, relatives aux caractéristiques particulières de la nature de sol
	Interface triple	Nappe phréatique fluctuante

Tableau1.1. Conditions de sol pouvant suggérer une force corrosive élevée [10]

1.6. Les impacts de la corrosion

1.6.1. *influence de la corrosion sur l'adhérence acier/béton*

La rugosité à la surface des barres en acier et la présence d'oxydes autour améliore le comportement de l'adhérence, la réaction de corrosion est un processus électrochimique qui se manifeste par la transformation graduelle du fer en oxydes de fer, la hauteur des nervures diminue jusqu'à leur disparition complète, influençant le frottement entre la barre d'armature et le béton favorisant les glissements, et peut provoquer la formation de fissures radiales, et le mécanisme de liaison entre l'armature et le béton est influencé avec perte d'adhérence, le développent de la corrosion active provoque une expansion volumétrique des armatures, les oxydes occupent un volume de 2 à 4 fois environ par rapport à la barre saine, ce qui génère une contrainte de traction sur le béton environnant entraînant une perte de liaison fissuration et écaillage de la couverture en béton [65][66][67].

1.6.2. *Influence de la corrosion sur les propriétés mécaniques des aciers*

De nombreuses recherches ont été menées sur l'impact de la corrosion sur les propriétés mécaniques de l'acier en particulier la contrainte et la déformation finales, une perte de sections transversales peut être engendrer par la corrosion ainsi qu'une réduction des propriétés mécaniques, notamment la limite d'élasticité, la résistance à la rupture et la ductilité, la réduction des propriétés mécaniques peut aussi être entrainée par l'interaction entre la contrainte et la corrosion [68][69], la corrosion a un effet limité sur la limite d'élasticité et la résistance ultime selon Li et al.[68], mais elle peut entraîner une réduction significative de la ductilité de l'acier.

1.7. Protection contre la corrosion

La connaissance de l'état des structures est une condition nécessaire à une bonne gestion, pour que des mesures correctes peuvent être prises, une étude du mécanisme de corrosion et de la manière dont les métaux réagissent avec le milieu environnant, les facteurs affectant le processus, et le comportement des métaux dans différents milieux doivent être pris en considération, ainsi que les phénomènes de différents types de corrosion [14], pour avoir une évaluation complète selon Broomfield [5] une étude préliminaire pour bien caractériser la nature du problème pour but d'avoir une planification d'un sondage détaillé afin de confirmer la cause et quantifier l'ampleur du problème.

Dans le domaine du génie civil ils ont tendance à prendre des mesures qui pèse lourd sur le budget, englobant des interventions d'entretien, de réparation...etc. Tout en maintenant l'état de service des ouvrages à réaliser et les exigences de leurs utilisateurs [70]

Que ça soit des parois de palplanches, éléments métalliques de renforcement de remblai, les supports d'ancrage...etc., tous les ouvrages ciblés par la corrosivité des sols ont un entretien régulier minime, même s'ils ont consacré un investissement considérable dans les éléments métalliques souterrains tels que les pipelines, les installations de stockage, les tubages de puits, les supports de

structure, vu qu'il est impossible de modifier la nature des sols, afin des prendre les mesures appropriées, bien déterminer le type du processus de la corrosion et une étape nécessaire[10][23], des tentatives ont été faites pour surmonter ce problème en utilisant différentes méthodes résumées en six groupes [14]:

- Les revêtements (métalliques -organiques- inorganiques).
- Choix des matériaux: métaux et alliages résistants à la corrosion, (polymères matériaux-céramiques-composites.. etc.)
- Les méthodes électrochimiques: protection cathodique et anodique.
- Modification de l'environnement: (utilisation d'inhibiteurs - désaération neutralisation...etc.).
- Mesures technologiques, c'est-à-dire changements des conditions de procédé(température - vitesse d'écoulement...etc.).
- La conception correcte: bonne construction des structures métalliques pour faciliter le nettoyage, drainage...etc.)

1.7.1. *Protection cathodique*

La base de cette méthode c'est l'application des principes électrochimiques, le procédé souvent utilisé consiste à réaliser une connexion électrique entre l'acier et un bloc d'un métal moins noble (comme le zinc), qui se comporte comme une anode[23][71].

1.7.2. *Inhibiteur de corrosion*

Considérés eux-mêmes comme un film protecteur sur la surface du métal ces inhibiteurs ont pour but la réduction du taux d'oxydation anodique, de réduction cathodique où des deux ces derniers sont adsorbés sur la surface métallique soit par adsorption physique (électrostatique) soit par absorption chimique [23].Les pigments inhibiteurs sont des poudres de métaux ou d'oxydes métalliques des métaux électro-chimiquement actifs, ils sont ajoutés aux résines organiques pour conférer une protection cathodique sacrificielle aux substrats plus nobles[72], les deux sources courantes d'inhibition:

1- Les composants présents dans le pétrole brut.

2- L'ajout d'inhibiteurs de corrosion [73].

Les inhibiteurs peuvent être classés selon:

- Leur nature chimique (substances organiques ou inorganiques)
- Leurs caractéristiques (composés oxydants ou non oxydants)
- Leur domaine d'application technique (décapage, nettoyage acide.. etc.) [23]

1.7.3. *Les revêtements*

Que ça soit monocouche et autonome où des systèmes de revêtement multicouches plus complexes, les principales caractéristiques des revêtements c'est leurs imperméabilités aux espèces agressives corrosives et l'humidité en formant une barrière leur protection cathodique, assure une protection contre l'usure et une résistance à la corrosion des matériaux techniques [74].

Passant de revêtements modifiés avec des additifs spécialisés, à des ingrédients inertes pour conférer des propriétés uniques que l'on ne trouve normalement pas dans les revêtements classiques, à

ceux qui peuvent détecter leur environnement et y répondre de manière cohérente et prévisible appelée revêtements intelligents dus à leurs réactions à des stimuli externes, l'évolution de ces derniers a pris une certaine ampleur [75][76][77].

1.7.3.1. Les revêtements de prétraitement de surface

C'est la première ligne de défense pour inhiber la corrosion, leurs buts c'est d'assurer une certaine protection de base contre la corrosion du métal ou de l'alliage sous-jacent afin de favoriser l'adhérence et la compatibilité entre le prétraitement et le revêtement primaire[75], ils peuvent être soit de bases inorganiques ou organiques.

1.7.3.2. Revêtements de prétraitement non métallique-inorganique

Ils sont composés de matériaux de revêtement céramiques, de conversion et de revêtements anodisés. L'anodisation a pour but de générer une couche d'oxyde passive, épaisse et dense sur la surface métallique en causant l'oxydation d'une surface métallique par voie chimique ou électrochimique.

- **Revêtements de conversion:**

Utilisés pour augmenter la dureté de la surface [75], les procédés de ces derniers sont classés en fonction de leur constituant primaire(Revêtements de conversion au chromate, au phosphate, ou bien à base de lanthanide ... etc.)

1.7.3.3. Revêtements de prétraitement organiques

En raison des problèmes environnementaux causés par des chromates et des métaux lourds dans les revêtements, les stratégies de revêtement organique avec des polymères intrinsèquement conducteurs prend une certaine ampleur [78]. Il existe différents types de revêtements intelligents organiques: polymères conducteurs, films auto-assemblés, multicouches de poly- électrolytes, bio-films ... etc.[75]

B.Ramezanzadeh et al.[79] ont montré que l'incorporation d'oxyde de graphène revêtu d'oxyde de polyaniline et de cérium (PAni-CeO2) améliore les performances de protection contre la corrosion des revêtements époxy sur l'acier doux en améliorant propriétés de protection de la barrière de revêtement et inhibition active de la corrosion.

S.Sathiyanarayanan et al.[78] ont étudié le comportement du revêtement contenant des composites poly aniline-TiO2 (PTC) sur l'acier, ce dernier est avéré qu'il est capable de maintenir le potentiel de l'acier en région passive grâce à sa propriété redox.

1.7.3.4. Les revêtement métalliques sacrificiels

Ce type de revêtement est basé sur le sacrifice de ce dernier pour la protection du métal du substrat, empêchant donc la corrosion du substrat en acier jusqu'à ce qu'une fraction importante du revêtement soit consommée[80].

1.7.3.5. Résines époxy

caractérisées par leurs bonnes propriétés mécaniques, ils couvrent un grand champ d'utilisation dans le domaine de protection et sont extrêmement polyvalentes[72].

1.7.3.6. Vinyles

Les résines vinyliques sont caractérisées par leur haute résistance chimique, dans les applications de revêtement les composées les plus utilisées sont les suivants: le vinyle, le chlorure de vinyle, l'acétate, le butyral de vinyle, l'éther vinylique, ou des mélanges de copolymères de ceux-ci [72].

1.7.3.7. Caoutchoucs chlorés

Fabriqués par chloration de composés de caoutchouc naturel, leur application est courante dans le service maritime et comme marquage routier, ces derniers se forment par évaporation de solvant, des ajouts de résines acryliques participent à la plastification de ces résines et peuvent être stabilisés par des ajouts d'époxy [72].

1.8. Conclusion

La corrosion des aciers est une des causes majeures de la détérioration prématurée des structures, principalement observée dans les structures marines et l'industrie chimique, elle est également très présente dans le secteur des routes, ponts et structures de stationnement. Des défaillances structurelles énormes peuvent être entrainées par les aspects visibles de la corrosion, telle les fissurations l'éclatement du béton conduisant vers une diminution de la capacité portante des ouvrages.

L'importance de cette pathologie prend de l'ampleur et défie de nombreuses industries financièrement, ce phénomène naturel complexe est toujours considéré comme un ennemi industriel redoutable dû aux pertes financières massives.

Selon les secteurs concernés, le type d'agressivité de l'environnement le choix des solutions des différents aspects de la corrosion varie et aboutit souvent d'un compromis tout à la fois technique, économique et souvent maintenant environnemental.

Prédire le comportement à long terme du métal dans les structures, en évaluant les dommages qu'il est susceptible de subir au fil du temps sous l'action de la corrosion est un défi important en termes économiques et scientifiques, d'où l'importance de l'étude de la complexité de ce phénomène pour but du développement des solutions de protection et contrôle appropriés contre la dégradation de l'environnement.

Chapitre 2 :Revue bibliographique sur la méthode probabiliste et couplage multiphysique

2.1. Introduction

La corrosion est l'une des principales raisons de la défaillance des ouvrages géotechniques et de leurs détériorations, elle est considérée comme l'un des facteurs les plus critiques qui menacent la vie des structures, le domaine du génie civil et construction a connu des progrès considérables en matière de conception technique, des stratégies utilisées, et de technique de maintenance, au cours des dernières décennies, afin qu'un compromis soit assuré entre la maximalisation de la sécurité et la minimisation des coûts, les techniques de construction en géotechnique ont généralement des coûts importants englobant ceux de la construction, la gérance du chantier au cours de la construction et la maintenance qui suit après, ce qui impose une bonne gestion des risques dès le début de conception, la présence d'une défaillance dans ces dernières représente une menace pour la vie humaine ainsi qu'une atteinte à l'environnement, et à l'économie.

La conception d'une structure géotechnique avec une certaine fiabilité durant sa durée de vie toute en surveillant son état de vieillissement afin de prévoir les accidents reste la priorité de l'ingénieur; Sachant que les incertitudes sont inévitables, leur quantification peut mener à l'anticipation des risques associés à ces dernières [81], prédire le comportement à long terme du métal dans les structures, en évaluant les dommages qu'il est susceptible de subir au fil du temps sous l'action de la corrosion est un défi important, notamment en termes économiques et scientifiques, ce qui fait de la modélisation probabiliste, une étape importante dans l'estimation des risques, la nature électrochimique de la corrosion, et le comportement complexe des impacts liés à cette pathologie (non-linéaire, dynamique, fatigue, mécanique de la rupture... etc.) qui se manifeste par différentes manières telles des épaufrures locales ou une perte de section de l'acier pouvant entrainer sa rupture et une altération de la structure nécessitent l'utilisation d'outils numériques pour effectuer une modélisation par des techniques de couplages. Afin de bien exploiter tous les paramètres, coupler des modèles numériques et des données incertaines (étude fiabiliste) est pratique, cela permet de bien cerner le problème et étudier la fiabilité des composants ou des systèmes d'une part, et d'autre part

l'influence de la variabilité des paramètres (géométrie, propriétés des matériaux) ou l'environnement, et charges mécaniques appliquées sur le comportement des systèmes structuraux.

2.2. La modélisation fiabiliste

Qu'il s'agisse du vieillissement (naturel) ou de la dégradation due aux actions environnementales sévères (corrosion, érosion, fatigue,...etc.) la maintenance des ouvrages géotechniques nécessite une bonne connaissance des propriétés des matériaux et des chargements qui leur sont appliqués au cours de leur vie de service, tous en prenant en compte des aléas, et leurs variabilités tout au long de la durée de vie de la structure [82].

La plupart des phénomènes observables dans le monde ne peuvent être prédits avec certitude, la répétition des mesures d'un phénomène physiques génèrent des résultats multiples, il y en a qui sont plus fréquents que d'autres, l'apparition multiple de ces derniers sans schéma et appeler caractère aléatoire ou stochasticité [83].

Les incertitudes en géotechniques ont deux sources principales:

1- l'évaluation des propriétés du sol de conception, elle dépend de la variabilité inhérente au sol, le contrôle des procédures maintenu pendant l'étude du site.

2- Les modèles de calcul géotechnique. Pour but d'avoir une prévision raisonnable du comportement d'interaction sol/structure, des calibrages empiriques sont exigés.[81].

La figure (2.1) explique les incertitudes d'un problème stochastique général dans un modèle de calcul.

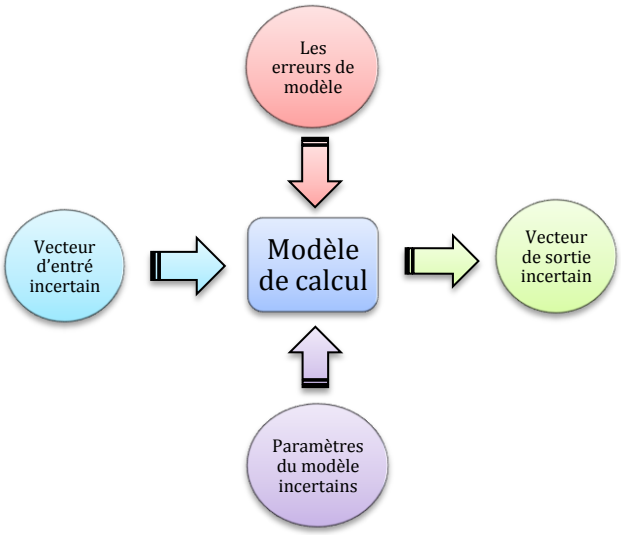


Figure 2.1. Problème stochastique général [81]

Une fiabilité absolue est inachevable en présence d'incertitude, la fiabilité d'une structure est basé sur sa capacité à effectuer la fonction pour laquelle elle a été conçue, c'est la probabilité qu'un système ou un composant remplisse une fonction requise pendant une période de temps donnée lorsqu'il est utilisé dans des conditions d'exploitation données [84]. Une étude probabiliste apporte la

rationalité à la prise en compte de l'incertitude dans la conception, elle vise à calculer la probabilité de défaillance d'un système mécanique la probabilité qu'il ne réponde plus à ses fonctions par rapport à un critère de défaillance prescrit en tenant compte des incertitudes liées à la description du modèle (géométrie, propriétés des matériaux) ou à l'environnement (charge) [85], cette analyse fournit des informations sur influence de différentes variables incertaines sur le rendement du système, son comportement, et l'interaction entre ses différentes composantes [83] .

Bien que de nombreux progrès en matière de recherche théorique ont été achevés, en pratique de sérieux obstacles informatiques surgissent tell que la multitude des modes de défaillance des structures [86] et chacun peut contribuer à la défaillance d'un système, la nature complexe des multiples modes de défaillance du système et de leurs interactions, ainsi que les coûts de calcul élevés de l'évaluation de la fiabilité du système ont fait que la recherche dans le domaine de l'analyse de la fiabilité du système a stagné malgré les énormes progrès aient été réalisés dans l'analyse de la fiabilité des composants et l'optimisation de la conception [87].

En géotechnique la fiabilité du système est liée à la fois à la probabilité de défaillance de chaque mode de défaillance et aux corrélations entre eux[88].

Les défis soulevés par la méthode probabiliste représentent deux catégories: les comportements du système mécanique et de son interaction avec son environnement (souvent avec des modèles éléments finis), qui pose certaines difficultés pour une modélisation réaliste et plus fiable, et les coûts prohibitifs de calcul de ces modèles, dans le cas des systèmes complexes, qui représente un défi technique et numérique.

2.2.1. *L'analyse de fiabilité dépendante du temps*

La nécessité d'introduire la dépendance au temps dans une analyse de fiabilité rigoureuse est importante pour accroitre sa précision vue que les fonctionnements des sollicitations extérieures aux quels les ouvrages sont soumis peuvent dépendre explicitement du temps [82], ça doit tenir compte du caractère aléatoire des propriétés, de la géométrie et des charges des matériaux ainsi que de leur variabilité dans le temps, ce qui rend l'analyse de fiabilité dépendante du temps plus prometteuse.

Selon Sudret [85], il peut s'agir de deux types de dépendance temporelle, la charge pouvant varier aléatoirement et la détérioration des propriétés des matériaux de la structure au fil du temps, en pratique d'ingénierie les deux principales causes de l'apparition de problèmes de fiabilité variant dans le temps se résument dans l'inclusion de la charge aléatoire comme un processus aléatoire[89]**.**

Une formulation mathématique générale de la variable de probabilité de défaillance sur un certain intervalle de temps [t_0, t_s] peut être exprimée comme suit:

$$P_f(t_{0,}t_s) = P_{r,}\{G(X, Y(t), t) \geq e, \exists t \in [t_{0,}t_s]\} \quad (2.1)$$

$$X = [X_1, X_2 \dots\dots\dots\dots, X_n]$$

$$Y(t) = [Y_1(t), Y_2(t) \dots\dots\dots\dots, Y_m(t)]$$

$$R(t_{0,}t_s) = 1 - P_f(t_{0,}t_s) \quad (2.2)$$

G: est la fonction d'état limite, *X:* est un vecteur de n variables aléatoires, *Y(t):* est défini comme les processus m stochastiques s'accumulant dans la réponse pratique, et *e:* est un seuil prédéfini, P_f :(t_0,t_s) la probabilité de défaillance [90].

2.2.2. *Les méthode d'analyse fiabiliste*

Pour effectuer une évaluation probabiliste diverses tentatives ont été faites afin de fournir une perspective plus rationnelle qui diffère de l'analyse déterministe traditionnelle[88].

Pour le traitement rationnel des incertitudes dans les ouvrages géotechniques, le choix d'une méthode de fiabilité structurelle appropriée est la base de l'étude.

La variation de la fonction d'état limite est considérée comme un défi, afin de le surmonter, deux catégories de base pour l'analyse de fiabilité variable dans le temps ont été conçues dans la littérature: les méthodes de performance extrême ([91]-[85]) et les méthodes de franchissement ([92][93])[94]

Proposée en premier lieu par Rice[95], l'approche des franchissements est la méthode la plus couramment utilisée, les recherches dans le domaine du franchissement ont été approfondies comme le montrent les travaux de Weiqi Du et al[90], la méthode PH2 qui a été développée par Andrieu-Renaud et al.[92] en utilisant FORM (first-order reliability) pour estimer le taux de croisement à tout moment, cette dernière a été améliorée par Sudret [85], Lutes et Sarkani [96], ont réalisé un travail en appliquant la méthode des franchissements dans un processus gaussien stationnaire, dans le but de réduire l'estimation du premier croisement, Singh et al. [97] ont présenté dans leur article une technique d'échantillonnage préférentiel efficace[98], en combinant la méthode des franchissements et FORM Hu et Xu [99] a développé une méthode plus précise.

Bien que leur efficacité dans l'exécution de l'analyse puisse être problématique dans le cas des fonctions d'état limite non linéaires, pour surmonter ce problème, nous passons à la deuxième catégorie, qui est résumée dans les méthodes de performance extrême, qui vise à rechercher et à définir la probabilité cumulative d'échec comme la probabilité que la valeur extrême dépasse un seuil prescrit([84][100][101])[91].

Les méthodes d'analyse de fiabilité basée sur la simulation sont en nette évolution pour l'analyse de fiabilité des systèmes, telles que la simulation directe de Monte Carlo (MCS), l'échantillonnage préférentiel, l'échantillonnage de ligne, la simulation de Subset (SS)[102].

2.2.2.1. Monte-Carlo(MCS)

Pour effectuer une analyse de fiabilité la méthode la plus directe est la simulation de Monte-Carlo (MCS). elle se résume à générer un grand nombre d'échantillons pour les variables aléatoires d'entrée et les processus stochastiques, puis évalue la fonction d'état limite aux points d'échantillonnage [100]. La distribution des probabilités des résultats possibles est obtenue à partir de différents ensembles de valeurs échantillonnées aléatoirement à partir des distributions des probabilités des paramètres d'entrée. Pour chaque paramètre d'entrée la distribution des probabilités est spécifiée, et les valeurs d'entrée sélectionnées au hasard sont utilisées pour simuler le plus large nombre de valeurs de sortie possibles [103].

Sachant que la défaillance se produit si:

$$g(X, Y(t), t) \leq 0 \tag{2.3}$$

g(X,Y(t),t) est la fonction d'état limite dépendant du temps, soit N_f le nombre de cycles de simulation lorsque g (X,Y(t),t) est inférieur à zéro c.à.d. (désigne le nombre de trajectoires défaillantes sur l'intervalle [0, t]), et soit N le nombre total de cycles de simulation(le nombre de trajectoire total simulé), (P_f) la probabilité de défaillance, une estimation de la probabilité de défaillance peut être exprimée comme suit:

$$P_f(0, t) = \frac{N_f}{N} \tag{2.4}$$

Le coefficient de variation COV est calculé comme suit:

$$COV(P_f) = \sqrt{\frac{1 - P_f}{N \times P_f}} \tag{2.5}$$

La méthode MCS est gourmande en temps de calcul, son principal inconvénient se résume dans son besoin a une grande quantité de ressources de calcul, et des fonctions de distribution de probabilités explicites qui sont requises pour les variables d'entrée [104].

2.2.2.2. La simulation Subset (SS)

La pratique de la conception géotechnique souvent implique de faible probabilité ainsi que des problèmes de fiabilité variable dans le temps qui sont généralement des événements de faible probabilité, ce qui réduit l'efficacité de la méthode de simulation Monte-Carlo (MCS) en raison du coût élevé de l'analyse et du temps de calcul.

Une méthode MCS avancée modifiée connue sous le nom de simulation de subset (SS) a été proposée par Au et Beck en 2001[105]**,** pour résoudre les problèmes de calcul des petites probabilités, c'est un outil efficace qui utilise la probabilité conditionnelle et Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC) afin de calculer efficacement ces faibles probabilités [106].

L'idée de base c'est qu'un événement de défaillance rare avec une faible probabilité peut être exprimé comme le produit des probabilités conditionnelles d'une séquence d'événements de défaillance intermédiaires, avec un choix approprié d'événements conditionnels afin que la difficulté d'évaluer une faible probabilité de défaillance dans l'espace de probabilité initiale soit remplacée par des événements plus fréquents dans l'espace de probabilité conditionnelle[102][105].

L'événement F est exprimé comme un produit d'événements intermédiaire m:

$$F = \cap_{i=1}^{m} F_i \tag{2.6}$$

Les évènements intermédiaires sont imbriqués, c'est-à-dire:

$$F_1 \supset F_2 \supset \cdots \supset F_m \tag{2.7}$$

m événements inclusivement ordonnés tels que:

$$\forall i \in \{1, \dots, m\}, F_i = \{g(X) \leq 0\} \tag{2.8}$$

où, $x_i = (x_1, \dots x_n)$ est le vecteur n-dimensionnel des variables aléatoires de base, g_i est une fonction de performance, F_m les événements les plus faibles, $\{F_1, \dots, F_m\}$, comme $P(F_m) \leq P(F_{m-1}) \leq \cdots \leq P(F_1)$, il est choisi pour coïncider avec l'événement de défaillance F du problème, c'est-à-dire $F_m = F$, avec $F = \prod_{1=1}^{m} F_i$. La probabilité de défaillance est estimée comme un produit des probabilités conditionnelles :

$$P_f = P_r(F) = P_r(\cap_{i=1}^{m} P_r(F_i \mid F_{i-1}) \tag{2.9}$$

La probabilité $P_r(F)$ est calculée en utilisant une procédure de Monte-Carlo standard.

La simulation par Subset reste une méthode efficace et robuste pour estimer les probabilités de défaillance à de faibles niveaux de probabilité pour un seul mode de défaillance défini par la réponse du système concerné. Cependant, l'estimation des probabilités de défaillance de réponses stochastiques multiples demeure une tâche assez difficile dans l'analyse de la fiabilité structurelle en utilisant une seule série de simulation de subset [107].

2.2.3. *Les méthode d'analyse fiabiliste en géotechnique*

L'utilisation de l'analyse fiabiliste a pris de l'ampleur dans le domaine de géotechnique, car les incertitudes concernant les paramètres, l'environnement, les matériaux doivent être explicitement prises en compte dans la conception, diverses tentatives ont été faites pour but d'effectuer une évaluation probabiliste des ouvrages géotechniques partiellement ou entièrement enterrer dans le sol en utilisant différentes méthodes avec un seul ou multiple mode de défaillance en considérant les variabilités spatiales des propriétés des masses rocheuses et des sols ainsi que les cavités rocheuses souterraines voir ([108]-[109]-[110]), multiples analyses de fiabilité du système de pente ont été réalisées aussi ([111]-[109]-[112]-[113]-[114]), ainsi que les évaluations de la stabilité des tunnels et optimisation de leur conception ([115]-[116]- [117]). Comme la corrosion est l'une des principales

raisons de la défaillance des ouvrages et leurs détériorations; elle est considérée comme l'un des facteurs les plus critiques qui menacent la vie des structures, L'analyse de la fiabilité des structures est le meilleur moyen de comprendre sa complexité, pour prédire les dommages qui peuvent survenir afin de les éviter ou de les contrôler, plusieurs approches probabilistes ont été présentées dans la littérature pour évaluer la fiabilité des ouvrages géotechniques ciblés de la corrosion soumis à des charges, et des pressions internes et externes en particulier les pipelines, les palplanches, et murs de quai...etc. Pour une estimation de la détérioration des infrastructures en acier soumis à diverses agressions, les travaux suivants traitent différents ouvrages ciblés de corrosion par multiple méthode probabiliste optimisée pour une prévention contre ce phénomène et une maintenance de la structure durant sa durée de vie ([118]-[119]-[120]-[121]-[122]-[123]-[123]-[124]-[125]).

Afin d'évaluer les dommages que le métal est susceptible de subir tout au long de la durée de vie des structures sous l'action de la corrosion, la modélisation probabiliste a une importance considérable, cependant la nature électrochimique de la corrosion, et l comportement complexe des impact liée à cette pathologie se manifestant par multiple forme de dégradation, ce qui nécessite l'utilisation d'outils numériques pour effectuer une modélisation par des techniques de couplages afin de bien exploiter tout les paramètres.

2.3. Le couplage multiphysique

Le but d'une étude d'un système en géotechnique, c'est étudier la réponse de ce dernier qu'elle soit (mécanique, chimique, biologique ou autres) sous certaines excitations chargement ou, un changement dans les conditions de l'environnement extérieur, cela exige une connaissance des caractéristiques du système étudié. Les différents phénomènes physiques associés aux composants qui régissent la réponse du système restent éventuellement en interaction mutuelle, ils sont non linéaires et agissent sur des échelles de temps et des domaines spatiaux différents. Le couplage est inhérent aux relations d'équilibre qui régissent les relations spécifiées par certaines lois constitutives décrivant les différents phénomènes physiques[126].

2.3.1. *Modélisation numérique*

Dans le domaine de l'ingénierie afin de prévoir la durabilité d'une structure en géotechnique, il est important de disposer d'un outil numérique capable de simuler de manière réaliste les processus complexes de corrosion et les impacts de ce dernier sur la sécurité et durée de vie de l'ouvrage[127], la modélisation numérique ,est considérée comme un outil puissant pour la conception des systèmes de protection contre la corrosion afin d'optimiser la conception de nouveaux systèmes de protection ce qui permettrait d'obtenir des systèmes de protection contre la corrosion plus efficaces et plus performants.

Les simulations numériques permettent de saisir un plus large spectre des processus fondamentaux qui se produisent sur les parois des ouvrages géotechniques attaqués par la corrosion afin de mieux prévoir les paramètres de fonctionnement risqué et les endroits critiques de corrosion sur les surfaces exposées[64].

L'étude de la corrosion et même l'installation des systèmes de protection contre la corrosion implique une multitude de domaine, la distribution du courant électrique, distribution du potentiel, placement des anodes , ...etc. qui nécessite d'être représenté visuellement basée sur la forme de la structure et la conception du système a travers une modélisation numérique qui fournit une illustration tridimensionnelle de tous les paramètres et leurs distributions et la susceptibilité à la corrosion, pour but d'une évaluation prédictive des infrastructures dans des conditions et des scénarios de charge spécifiques définis, les trois méthodes de modélisation numérique sont comme suit: la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (MEF), et la méthode des éléments finis de frontière (BEM) [128].

2.3.2. *Définition de la multiphysique:*

Les chercheurs sont de plus en plus confrontés à des défis impliquant des systèmes physiques et techniques complexes caractérisés par de multiples processus physiques en interaction [129].

Quand différentes techniques de discrétisation sont utilisées pour des problèmes individuels sur différents domaines spatiaux (éventuellement coïncidant) où les variables de champ individuelles représentent des phénomènes physiques distinctement différents mais en interaction mutuelle on parle d'un problème multiphysique couplé qui nécessite plusieurs modèles ou phénomènes physiques traités simultanément[130], l'évolution des capacités de calcul et des aspirations accrues à la simulation dans les domaines de la prévision scientifique et de la conception technique, donne à la simulation multiphysique une nouvelle évaluation [129].

La complexité des problèmes de corrosion en géotechnique sur le plan mécanique, chimique, électrochimique, physique, en tenant compte des différentes interactions avec l'environnement agressif sur des multitudes d'échelles, exige les techniques de couplage multiphasique et le développement continue des méthodes pour fournir des solutions numériques afin de résoudre ces problèmes dans un temps de calcul raisonnable.

Pour étudier l'effet de la corrosion sur les propriétés mécano-électrochimiques des ouvrages géotechniques le modèle numérique reste un outil indispensable en utilisant l'approche de couplage multiphysique,.les modèles développés ont pour but de simuler et prédire l'interaction entre contraintes er corrosion sur les parois métalliques des ouvrages géotechniques.

2.3.3. *Les techniques de couplages de corrosion*

Les aspects multiphysiques des processus de corrosion nécessitent des méthodes multidisciplinaires combinant plusieurs approches avec différentes expertises techniques (telles que les techniques de couplage) pour simuler les différents phénomènes impliqués [4].

La performance des aciers des systèmes géotechniques ainsi que leur dégradation chimique est fortement affectée par les propriétés physico-chimiques du sol. La corrosivité du sol, qui dépend de l'espace et du temps, est liée à de nombreuses propriétés physico-chimiques, notamment: le type de sol, la position de la nappe phréatique, le pH du sol, la teneur en humidité, la résistivité du sol, la teneur en sel soluble, le potentiel structure-sol, le potentiel d'oxydoréduction, les micro-organismes présents dans le sol et les courants vagabonds qui accroit la complexité de l'études de cette pathologie [64].

Les processus de corrosion sont des phénomènes de surface décrits comme la combinaison de divers constituants de réactions chimiques apparentées et la manifestation d'une action mécanique hétérogène sur ces réactions chimiques [131].

Les mécanismes de corrosion peuvent être induits ou accélérés par un impact mécanique. L'effet mécano-électrochimique est décrit comme l'interaction entre la réactivité électrochimique à la corrosion de la surface de l'acier et les contraintes internes ou externes appliquées à sa couche superficielle [132].

Une analyse complète du comportement mécanique des systèmes corrodés et de leurs interactions avec l'environnement est une étape fondamentale dans l'évaluation de la durabilité des infrastructures[3], d'où la nécessité de comprendre comment la corrosion et les processus complexes associés se produisent du niveau moléculaire au niveau des composants affectant le comportement global du système en raison des liens inhérents entre les différentes échelles par des techniques de couplage multiphasiques [133].

Chapitre 3 : Analyse fiabiliste de la corrosion dans les ouvrages géotechniques

3.1. Introduction

La première étape d'une conception d'un ouvrage géotechnique, c'est une analyse rigoureuse des sols, cette étude géotechnique permet d'identifier la composition des sols ainsi que leurs propriétés qui varient dans le temps et l'espace.

L'analyse géologique et physico-mécanique du sol est une étape critique avant la construction d'une infrastructure, c'est une opération qui nécessite des moyens adaptés pour but de déterminer les différents constituants, l'homogénéité et propriétés des sols, ainsi que les éléments variant de la formation des sols composant le terrain impliqué dans la construction.

Les études géotechniques impliquent non seulement l'analyse du sol mais aussi des eaux souterraines ainsi que tous les paramètres qui affectent la stabilité des infrastructures. L' analyse géotechnique ce fait par des mesures directes ou indirectes sur le terrain ou dans les laboratoires.

L'interprétation des résultats pour définir le type d'exécution approprié, adapté à l'ouvrage et à l'environnement, est une étape importante pour maximiser l'exploitation des infrastructures au long de leur durée de vie de service.

L' interprétation des résultats, ainsi que les observations de l'analyse géotechnique permettent d'évaluer le comportement des sols ainsi que les impacts environnementaux affectant le processus de construction et le comportement des systèmes infrastructuraux.

Les différents paramètres du sol ainsi que les propriétés des matériaux utilisés dans la construction des systèmes infrastructuraux montrent souvent un comportement variable cette variabilité tend à introduire de l'incertitude dans les résultats des analyses déterministes.

Au cours de la durée de vie d'un ouvrage, le sol est soumis à un certain champ de contrainte variable dans le temps et l'espace. L'impact de l'environnement avoisinant, l'agressivité des sols, les cycles de gel-dégel, les niveaux de nappe phréatique, type de zone de construction (remblai, terrain glissant, zone décomprimée... etc.), ainsi que les propriétés des matériaux de construction utilisés ont un comportement variable dans le temps et l'espace, pour cette cause les hypothèses proposées dans l'analyse géotechnique contiennent des incertitudes, ce qui nécessite une étude probabiliste afin de traiter le problème d'une façon adéquate.

Une analyse déterministe considère une seule hypothèse lors de l'analyse des paramètres d'une étude, tandis qu'une analyse probabiliste considère le comportement variable des paramètres dans le temps et dans l'espace, permettant ainsi d'inclure tous les scénarios possibles de l'analyse pour but de développer un modèle plus réaliste.

L'objectif de ce chapitre est la description de l'importance de l'analyse fiabiliste dans l'étude des ouvrages géotechniques soumis à la corrosion présentant une modélisation d'une poutre corrodée en utilisant une méthode probabiliste pour prendre en compte les caractères aléatoires des ouvrages en béton armés sous l'action de la corrosion et l'impacte des chargements appliqués.

3.2. L' incertitude dans les ouvrages géotechniques

Le processus de conception des ouvrages géotechniques peut être très difficile en raison de l'incertitude et du caractère aléatoire des propriétés, des géométries et des charges impliquées des matériaux utilisés.

Les sols, comme les charges appliquées aux systèmes d'infrastructure ont un comportement variable le temps et l'espace cela implique souvent de l'incertitude, afin de prendre en compte ces derniers dans l'analyse géotechnique, l'approche déterministe utilise des facteurs de sécurités. Ce type d'approche revient très couteux en plus des couts de construction, les ingénieurs ont tendance à surestimer le facteur de sécurité utilise pour assurer le bon fonctionnement de la construction au long de sa durée de vie de service.

Pour but de mettre en place des méthodes plus fiables et économiser en temps de calcul, exécution et cout, beaucoup d'efforts sont investis dans l'analyse géotechnique, afin de pouvoir étudier la propagation des incertitudes et le comportement variable des sols, matériaux, chargements appliques sur les infrastructures, et les paramètres environnementaux ainsi que leur impact sur le comportement des ouvrages géotechniques.

Les sources d'incertitude en géotechnique comprennent la variabilité naturelle du sol, ses propriétés et les erreurs dans les modèles rhéologiques [134] (figure.3.1)

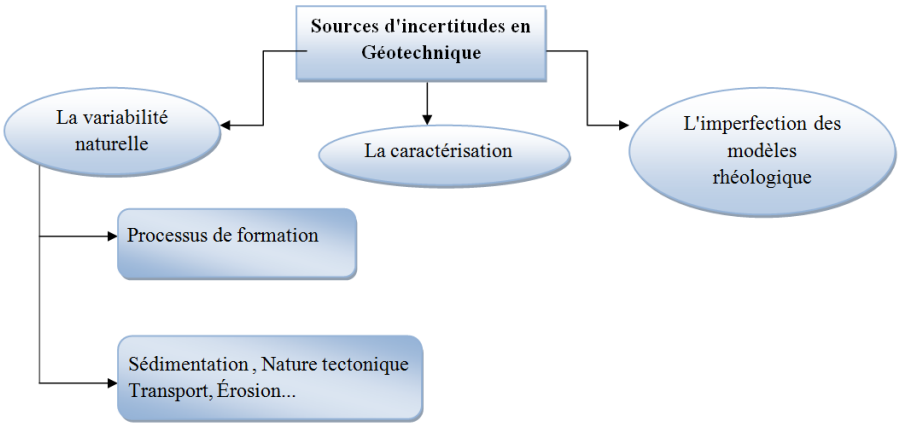


Figure.3.1.Les incertitudes en géotechnique

3.2.1. *La variabilité naturelle*

La variabilité naturelle joue un rôle très important dans la construction des infrastructures, la variabilité du comportement des paramètres du sol a un poids important dans le dimensionnement des infrastructures.

Les propriétés physiques et mécaniques des sols subissent constamment une variation dans le cadre spatio-temporel, ce comportement affecte les constructions au cours de leur vie de service, conduisant à une défaillance prématurée, des fissures favorisant la pénétration des agents agressifs déclenchant et accélérant le processus de corrosion des armatures.

La variabilité naturelle des sols comprend deux éléments principaux, le processus de formation, le mouvement de la matière de la surface du sol (Sédimentation les propriétés tectoniques, l'érosion...).

Les sols sont formés par la transformation de différents types de matériaux aux propriétés variables sous l'influence de différents facteurs.

Le processus de formation des sols varie d'une zone a l'autre dépendant des conditions climatiques (Gel-dégel...), la nature de ses composants(Plantes, matière organique...), l'environnement avoisinant, Drainage, le type de processus(Processus chimique et mécanique).

Les incertitudes associées aux paramètres du sol, du béton et de l'environnement sont des facteurs importants dans la construction d'infrastructures, pour comprendre la nature de ces phénomènes incertains, il est indispensable de choisir des méthodologies appropriées pour réduire les incertitudes dans la prédiction du comportement de l'infrastructure au cours de sa durée de vie.

Certains des phénomènes naturels fréquemment appliqués aux ouvrages géotechniques, tels que les séismes, le vent, les charges des vagues et les forces thermiques, sont des phénomènes aux comportements aléatoires. Des approches de fiabilité basée sur des données probabilistes sont nécessaires pour étudier l'impact de ces derniers sur le comportement structurel.

Assurer une haute fiabilité des systèmes géotechniques en concevant des ouvrages qui garantissent performance et sécurité tout au long de leur durée de vie avec un coût minimal est une préoccupation majeure en génie civil. Il est évident qu’il est souvent difficile de concevoir un système pratique pour lequel la probabilité de défaillance est nulle.

3.3. l'approche probabiliste en géotechnique

L`approche probabiliste désigne préalablement le caractère aléatoire des paramètres sous forme d'hypothèse exprimant la probabilité que certains cas se produisent.

Un modèle probabiliste est un outil prédictif qui évalue des phénomènes en créant des modèles assez réalistes.

Les incertitudes des paramètres du sol sont généralement modélisées par des variables aléatoires mais dues au processus complexe de la formation des sols et ses propriétés qui varient d'un point a un autre sur le plan spatio-temporel, une modélisation par champs aléatoires est nécessaire.

Les sols représentent un milieu constamment humide et l'eau interstitielle présente dans les sols contient des éléments qui favorisent la corrosion des matériaux en acier utilisés dans les ouvrages géotechniques.

La corrosion des armatures en béton armé est l'une des principales cause de la dégradation l'altération de la performance des infrastructures. Les conséquences de la corrosion sur le comportement structurel peuvent prendre de nombreuses formes.

La modélisation de ces impacts est une étape cruciale dans l'évaluation des risques menaçant les infrastructures et la prévision des méthodes d'entretien et de protection.

Prédire le comportement à long terme de l'acier dans les infrastructures en évaluant les dégradations qu'il peut subir dans le temps sous l'impact de la corrosion est un enjeu majeur sur le plan économique et scientifique, faisant de la modélisation probabiliste une étape importante dans l'évaluation et l'estimation des risques.

L'analyse de fiabilité est le moyen le plus approprié pour prédire les dommages qui peuvent être causés pendant la durée de vie d'un ouvrage. Le caractère aléatoire des propriétés, de la géométrie, des charges, des matériaux et leurs variabilités dans le temps, et la performance des composantes ou du système lui-même généralement dynamique fait que l'analyse de fiabilité en fonction du temps semble plus prometteuse.

3.3.1. *La méthode de simulation de Monte-Carlo classique (MCS)*

Pour un calcul fiable, de multiples évaluations du modèle mécanique décrivant le comportement de la structure sous l'action de la corrosion pour différentes simulations des paramètres d'entrée est nécessaire, dans ce cadre la méthode de Monte-Carlo classique (MCS) est couramment utilisée pour les problèmes impliquant des variations spatiales des matériaux utilisés dans la construction des infrastructures ainsi que des propriétés des sols concernés, pour évaluer l'impact de certaines variations de ces dernières sur le comportement du système structurel global.

Monte-Carlo (MCS) est l'une des méthodes d'estimation de probabilité de défaillance les plus précises mais conteuse en temps de calcul sur tout pour les défaillances à faible probabilité.

La probabilité de défaillance est évaluée en définissant des paramètres d'entrée par le biais d'une simulation d'échantillon composée d'un certain nombre de Tirages N. Une fonction d'état limite est calculée pour chaque simulation d'échantillon, par l'évaluation des paramètres des variables aléatoires ainsi que propriétés probabilistes de toutes les variables aléatoires sous forme de fonction de densité. les simulations ayant abouti à la défaillance sont enregistrées. La probabilité de rupture est donc

calculée à partir du rapport entre le nombre d'échantillons dans la zone de défaillance et le nombre total de simulations réalisées.

g(X,Y(t),t) est la fonction d'état limite dépendant du temps. Une trajectoire est défaillante sur l'intervalle [0, t] si cette fonction est inférieure à un seul prédéfini (inférieur ou égale à zéro):

$$g(X, Y(t), t) \leq 0 \tag{3.1}$$

L'estimation de la probabilité de défaillance est formulée comme suit:

$$P_f(0, t) = \frac{N_f}{N} \tag{3.2}$$

N_f le nombre de cycles de simulation défaillant, *N:* le nombre total de cycles de simulation;
le coefficient de variation COV est calculé comme suit:

$$COV(P_f) = \sqrt{\frac{1 - P_f}{N \times P_f}} \tag{3.3}$$

Les problèmes de fiabilité variant dans le temps sont généralement des événements de faible probabilité, malgré sa robustesse, la simulation de Monte-Carlo (MCS) est gourmande en temps de calcul ce qui réduit son efficacité. L'optimisation de la méthode MCS, qui est l'objectif de ce travail, est obtenue par l'introduction de la méthode de franchissement dans le calcul de la probabilité de défaillance.

3.3.2. *La technique de franchissement*

Une analyse fiabiliste doit tenir compte du caractère aléatoire des matériaux, des géométries, des charges, des propriétés environnementales naturelles et de leurs variabilités dans le temps. La dépendance du temps peut être introduite dans le calcul en utilisant des techniques de fiabilité à variation temporelle.

La dépendance du temps et la variation de la fonction d'état limite sur le pan spatio-temporel reste une problématique, deux catégories de base d'analyses de fiabilité à variation temporelle sont connues dans la littérature: les méthodes de performance extrême et les méthodes de franchissement.

Proposée en premier lieu par Rice [95] l'approche des franchissements est la méthode la plus couramment utilisée, les recherches dans ce domaine ont été approfondies [90].

Plusieurs recherches ont été effectuée sur le calcul des taux de franchissement en utilisant plusieurs méthodes, une formulation de la fiabilité du système parallèle pour le calcul du taux de franchissement a été proposée par Hagen [135]. pour estimer le taux de franchissement à tout moment. FORM (First-Order Reliability Method) a été utilisée par Andrieu-Renaud pour le développent d`une analyse de fiabilité à variation temporelle avec la méthode PHI2 [92]. Pour but de perfectionner la

méthode d'Andrieu-Renaud, Sudret [85] a travaillé sur le développement d'une nouvelle formule basée sur le PHI2 original afin de stabiliser l'étape des calculs de fiabilité impliquant la variation dans le temps. La technique de franchissement a aussi été utilisée dans un processus gaussien fixe par Lutes et Sarkani [96], pour but d'introduire une notion simple de techniques d'approximation pour appliquer des méthodes gaussiennes à l'analyse du premier franchissement dans le contexte de processus non gaussiens. Mejri [136] a travaillé sur la réduction de l'estimation des premiers franchissements, par la modification de la méthode PHI2 de base, cela a permis l'utilisation de l'approche de fiabilité du premier ordre (FORM); cette méthode modifiée est également utilisée dans les travaux de Yan et al.[137]. Toujours dans le cadre de la réduction de l'estimation des premiers franchissements, Singh et al.[97] [138] opte pour une méthode d'échantillonnage préférentiel efficace qui combine la méthode de franchissement et FORM. Hu et Xu étendent la méthode de calcul taux de franchissement en développant une méthode plus précise utilisant une analyse fiabiliste du taux de franchissements conjoints en fonction du temps [99].

Le taux de franchissement est identifié par le nombre moyen de passages de la zone de sécurité à la zone de défaillance par unité de temps [90]:

$$\lambda(t) \approx \lim_{\Delta t \to 0} \frac{Pr\{G(X,Y(t),t) < e \cap G(X,Y(t+\Delta t),t) \geq e, t+\Delta t\}}{\Delta t} \tag{3.4}$$

Pour chaque instant (t) le taux de franchissement est formulé comme suit :

$$P_f(t_0,t_s) = 1 - R(t_0) exp\left\{-\int_{t_0}^{t_s} \lambda(t) d_t\right\} \tag{3.5}$$

3.3.3. *La méthode MCS optimisée*

La méthode MCS optimisée utilise le concept du taux de défaillance, le but est d'introduire le calcul du taux de franchissement dans l'estimation de la probabilité de défaillance. L'optimisation dans cette méthode consiste à déterminer les temps des premiers franchissements et de tous les franchissements quand le système est dans la zone de défaillance en définissant les intervalles dans lesquels la dégradation dépasse zéro. La probabilité de défaillance est calculée en introduisant ce processus dans un programme réalisé sous Matlab.

La procédure du programme de la méthode MCS optimisée s'exécute selon les démarches suivantes:

a - Création d'une boucle dans le programme de Matlab pour la détermination des temps de franchissement fonctionnant dans le cas où tous les systèmes sont défaillants.

b - Définition du seuil d'attribution de la valeur zéro.

c - Création de la matrice des écarts entre la dégradation et le seuil en chaque point.

d - Création de la matrice de dépassement.

e - Détermination des intervalles dans lesquels la dégradation dépasse zéro.

f - Création du vecteur des temps de franchissement.

g - Initialisation des instants de franchissement à zéro.

h - Détermination pour chaque trajectoire le temps de franchissement.

i - Génération du nombre d'échantillons par la méthode MCS.

j - Calcul de la probabilité de défaillance avec tous les franchissements:

Pf1 =(sum(sum([temps_f_j>0])))/N.

k - Calcul de la probabilité de défaillance avec tous les franchissements pour chaque temps: Pf2 =(sum([temps_f_j>0]))/N.

l - Calcul de la probabilité de défaillance avec les premiers franchissements:

Pf =(sum([temps_f>0])./N.

Avec: temps_f: Le vecteur des temps des premiers franchissements.

temps_f_j: La matrice des temps de tous les franchissements.

L'évaluation du coefficient de variation est effectuée comme suit :

$$COV(P_f) = \sqrt{\frac{1-P_f}{N \times P_f}} \tag{3.6}$$

3.3.4. *Cas d'étude (Poutre corrodée)*

L'étude est effectuée sur une poutre en acier, l'évolution de la fiabilité de la poutre métallique corrodée soumise à une force variable dans le temps est évaluée par la méthode de MCS optimisée. Le modèle choisi est dérivé du travail d'Andrieu et al. [92] qui ont utilisé ce modèle de poutre en acier pour calculer la probabilité de défaillance à l'aide d'une méthode appelée PHI2 qui permet de résoudre les problèmes de fiabilité variable dans le temps en utilisant des outils classiques de fiabilité non variable dans le temps comme les méthodes de fiabilité de premier et de second ordre FORM/SORM. Le même modèle de poutre est utilisé dans le travail de Hawchar et al. [93] dans une analyse de fiabilité dépendante du temps par l'approche chaos polynomial.

La poutre en acier est caractérisée par les paramètres suivants: Longueur (L =5 m), section transversale rectangulaire (b_0 = 0,2m, h_0=0,04m).

La poutre est attaquée sur ces quatre faces par une corrosion isotrope évoluant linéairement dans le temps. La corrosion commence à t=0, augmente linéairement dans le temps entre ti=0 et tf=10 ans avec un coefficient de corrosion (c = 0,05 mm/an).

Paramètres	Distribution	Moyenne	Coefficient de variation
b_0 (m)	Log-normale	0.20	5%
h_0 (m)	Log-normale	0.04	10%
$f_y(Mpa)$	Log-normale	240	10%
Processus			
F	Gaussienne	36500N	20%

Tableau.3.1. Variables et paramètres aléatoires de la poutre corrodée [93]

La poutre métallique est soumise à son propre poids $W = \rho_{st} b_0 h_0$(N/m), $\rho_{st} = 78\,500\ \mathrm{N/m^3}$ et à une force concentrée F appliquée à mi-portée voir (Figure.3.2)

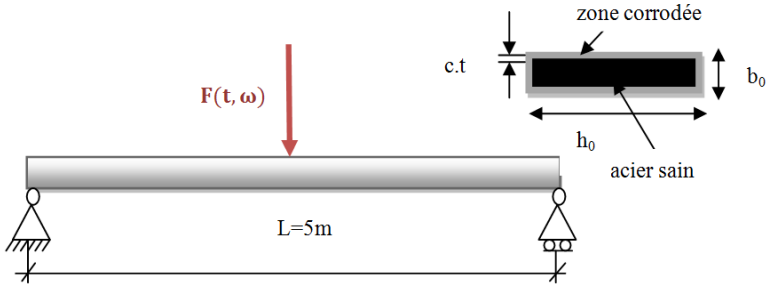


Figure. 3.2. Poutre corrodée sous charge aléatoire à mi-travée [92] [93]

Le chargement considéré variable dans le temps, est modélisé par un processus stochastique F(t) dont la longueur d'autocorrélation (l vaut 1 an).

Les paramètres du processus stochastique Gaussien et stationnaire(normale) sont comme suit: une moyenne μ=5800N, un écart type σ = 1160N.

Les variables et les paramètres aléatoires de la poutre corrodée sont résumés dans (Tableau.3.1).

La fonction de coefficient d'autocorrélation exponentielle carrée est exprimée comme suit:

$$\rho_F(t_1, t_2) = \exp\left(-\left(\frac{t_2 - t_1}{l}\right)^2\right) \tag{3.7}$$

Le moment de flexion maximal au milieu de la poutre (M_{max}) est considéré comme la grandeur d'intérêt dans le calcul.

La fonction de performance G(t) est donc formulée comme suit:

$$G(t) = \frac{(b_0 - 2ct)(h_0 - 2ct)^2}{4} f_y - \left(\frac{F(t)L}{4} + \frac{\gamma b_0 h_0 L^2}{8}\right) \tag{3.8}$$

Le (Tableau.3.2) résume les paramètres décrivant la charge .

Distribution	Moyenne (N)	Ecart-type(N)	Fonction d'autocorrélation
Gaussienne	5800	1160	$\exp(-(\frac{\Delta_t}{l})^2)$

Tableau. 3.2. Les paramètres du processus stochastique

Afin de décomposer le processus stochastique F (t) variant dans le temps en des fonctions déterministes pour but de faciliter le calcul, le présent travail adopte la méthode d'expansion de Karhunen-Loève (K-L), cette méthode est basée sur les expansions en séries.

Dans ce but, l'intervalle de temps de l'étude de la poutre est discrétisé en 41 instants ($\Delta_t = 3\ mois \ \leftrightarrow 0.25\ an$).

Le cas de la poutre métallique cité est traité par la méthode MCS optimisée en ajoutant le calcul du taux des premiers franchissements P_f 1 et celui de tous les franchissements P_f.

Le nombre d'échantillons utilisé est de 10^3, 10^4, 10^5 pour un intervalle de 10 ans.

Les résultats trouvés par MCS classique sont utilisés comme référence dans cette étude comme dans le travail de Hawchar et al.[93]

L'évolution de la probabilité de défaillance sur un intervalle de 10 ans pour un nombre de simulations égales à 10^3, 10^4, 10^5 est traduite par les graphes suivants:

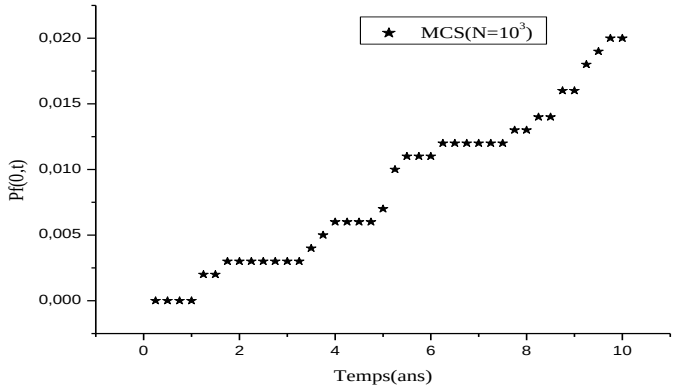


Figure. 3.4. L'évolution de la probabilité de défaillance pour 10^3 simulations

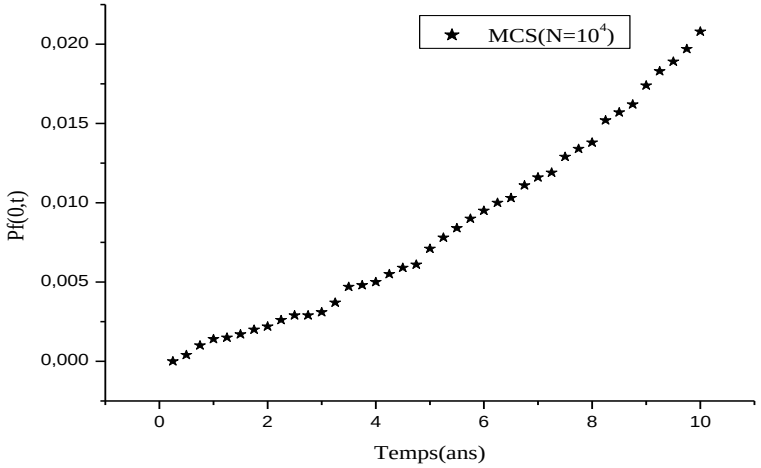


Figure 3.5. L'évolution de la probabilité de défaillance pour 10^4 simulations

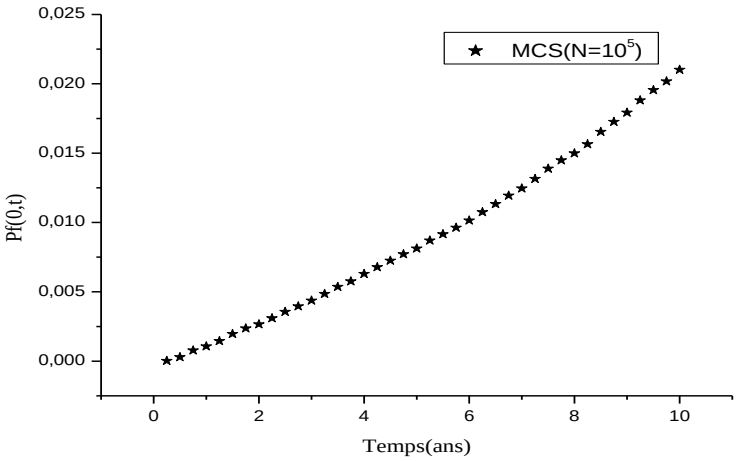


Figure. 3.6. L'évolution de la probabilité de défaillance pour 10^5 simulations

(Tableau.3.3) classe les résultats trouvés par nombre de simulations effectuées 10^3, 10^4, 10^5

Nombre de simulation	**P_f 1**	**P_f**	**COV**	**MCS classique (article)** [93]
10^3	0.0160	0.0200	0.2479	0.0220
10^4	0.0152	0.0208	0.0804	
10^5	0.0153	0.0210	0.0253	

Tableau. 3.3. Les probabilités de défaillance calculées pour 10^3 $10^4 10^5$ avec MCS optimisée

3.4. Conclusion

De l'analyse effectuée dans ce chapitre, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Le caractère aléatoire des propriétés des matériaux, et géométrie des éléments infrastructuraux et les contraintes internes et externes appliquées sur ces derniers, leur comportement dans le temps ainsi que le comportement du système lui-même est généralement dynamique, et variable dans le temps faisant de l'analyse de fiabilité à variation temporelle une approach plus prometteuse.

La robustesse de la méthode de simulation Monte-Carlo(MCS) n'empêche pas qu'elle perd son efficacité dans les problèmes de fiabilité variant dans le temps.

Les résultats montrent qu'avec un temps de calcul minime et un nombre réduit de simulations, cette méthode introduisant l'évaluation des taux de franchissement dans le calcul contribue à la création d'un programme de calcul plus précis qui fournit une meilleure estimation de la probabilité de défaillance en fonction du temps. L'intérêt de la mise en œuvre de cette méthode d'implémentation du calcule du taux de franchissement se trouve dans l'hypothèse de l'indépendance des événements de franchissement.

Les aléas et tous les facteurs influant le comportement structurel, les propriétés et géométrie des matériaux ainsi que les charges est la variabilité de l'environnement naturel rend l'utilisation de cette méthode importante dans une analyse e fiabilité variable dans le temps.

Les avantages de la combinaison de la méthode de MCS et le calcul du taux de franchissement se résument dans le faible coût numérique . L'application de cette approche dans l'évaluation du modèle étudiée donne des résultats confirmant la robustesse de son application dans l'évaluation des problèmes de fiabilité des infrastructures variant dans le temps.

Chapitre 4 : Analyse multiphysique numérique couplée

4.1. Introduction

Les infrastructures peuvent être exposées à diverses conditions environnementales constituées de différents facteurs agressifs variant sur le plan spatio-temporel, augmentant leur vulnérabilité à plusieurs types de corrosion.

Le caractère électrochimique de la corrosion peut se traduire sous différentes formes, y compris fissures, rouille, perte de section transversale des barres d'armature, déstabilisant l'interface acier-béton et affectant la stabilité, la résistance et l'état de service des systèmes infrastructuraux.

Quelle que soit la nature d'électrolyte, béton, sol, eau, la corrosion est un processus multiphysique complexe qui se produit à l'interface de l'acier. La complexité du mécanisme de la corrosion se traduit par une à une série de phénomènes inter-reliés couplés.

La résistance et la stabilité des éléments en béton armé sont assurées par l'adhérence entre ces deux matériaux. L'interface entre ces deux composants des systèmes infrastructuraux où la microstructure est transformée est appelée la zone de transition (ITZ). L'ITZ entre les barres d'armature et le béton est la zone la plus vulnérable qui se caractérise par une adhérence entre les deux matériaux avec des microstructures variables.

Le taux et la vitesse de la corrosion déterminent en grande partie le taux de détérioration générale des infrastructures, de nombreuses études sont principalement portées sur le comportement des infrastructures à la corrosion, ainsi que le comportement dynamique de leur système complexe dans différents milieux (sol, eau et air), en utilisant de multiples techniques et méthodes de modélisation, en raison des limitations de la méthode analytique dans le calcul et l'estimation des taux de corrosion, les méthodes numériques ont fait leurs preuves, et sont couramment utilisées pour calculer numériquement les taux de corrosion à l'aide de modèles numériques et pour évaluer l'état de surface des aciers dans de multiples conditions.

Dans ce chapitre une technique de couplage mécano-électrochimique utilisée pour but d'analyser le comportement d'une poutre en béton armée sous l'effet de la corrosion soumise à une charge aléatoire variable dans le temps.

Le comportement de la zone de transition sous effets mécano-électrochimiques couplés est également évalué pour comprendre le comportement des armatures, principalement l'interface acier/béton vue que c'est la zone la plus vulnérable à la corrosion.

Le béton étant un matériau poreux, la vitesse de corrosion est étudiée en fonction de la saturation des pores du béton en incluant la diffusion de l'oxygène et l'impact mécanique des charges appliquées sur l'élément corrodé en fonction du temps.

4.2. La modélisation numérique mécano-électrochimique couplée

La modélisation numérique est principalement basée sur la méthode des éléments finis (MEF). Le développement et le raffinement des outils numériques ont ajouté plusieurs modules et diverses fonctions pour simplifier les calculs, notamment, l'électrochimie l'utilisation de différentes formes géométriques et les variant conditions aux limites[3].

L'aspect multiphysique des processus de corrosion complexes nécessite de combiner plusieurs approches, impliquant des techniques de couplage, pour simuler les divers phénomènes d'interface connectés.

L'interaction entre l'effet électrochimique du processus de la corrosion et l'action mécanique interne ou externe appliquant une contrainte sur la surface de l'élément en béton armé , est connue sous le nom de l'effet mécano électrochimique. L'analyse de la propagation et la vitesse des réactions électrochimiques du processus de la corrosion sous l'effet mécanique, est un paramètre important dans la maintenance des infrastructures.

Les principales caractéristiques de la modélisation des mécanismes de corrosion électrochimique sont résumées comme suit[139][3]:

- Simplifier la modélisation de la corrosion à l'interface acier/béton: la corrosion dans l'acier se traduit en une série de réactions électrochimiques et d'interactions cinétiques entre l'acier en dissolution, les produits de corrosion et l'électrolyte.
- Décrit l'interaction entre les paramètres électrochimiques, les propriétés des matériaux et les différents facteurs affectant le mécanisme de corrosion, tel que la température, l'oxygène, l'humidité et la concentration de chlorure considérée comme variable sur un plan spatio-temporel.
- Décrit les aspects de la corrosion de l'acier qui varie sur le plan spatio-temporel en tenant compte de diverses conditions aux limites environnementales.

4.2.1. *La porosité du béton (diffusivité de l'oxygène et transport de charge)*

L'étude de la corrosion des éléments en béton armé, doit inclure les propriétés mécaniques du béton, ainsi que sa porosité. La répartition granulométrique du réseau poreux, la taille des pores la répartition de l'eau circulante dans ce dernier, l'effet capillaire, sa composition chimique , ainsi que les conditions atmosphériques affect en grande partie la diffusion de l'oxygène et le transport de charge.

4.2.1.1. La porosité et la diffusivité de l'oxygène

Le béton est un matériau multiphasique poreux, la porosité, la teneur en humidité, les niveaux de saturation du béton, et la diffusion d'oxygène à l'interface acier/béton à travers les réseaux poreux ont un impact significatif sur le processus complexe de corrosion et la diffusivité des paramètres chimiques impliqués dans les réactions électrochimiques de ce dernier.

Des études ont montré que dans diverses conditions climatiques, l'augmentation des niveaux d'oxygène dissous à l'interface acier/béton entraîne une augmentation significative des taux de corrosion [140], d`ou l'importance de la mesure du coefficient de diffusion de l'oxygène dans le réseau poreux du béton.

Selon les lois de Fick, la vitesse de diffusion de l'oxygène est proportionnelle au gradient de concentration de l'oxygène, l'équation suivante exprime la première loi de diffusion de Fick:

$$\Delta.\left(D_i \Delta_{ci}\right) = R_i \tag{4.1}$$

$$N_i = D_i \Delta_{ci} \tag{4.2}$$

Où, N_i: est le flux molaire pour les espèces i (mol $m^{-2}s^{-1}$); D_i: est le coefficient de diffusion (m^2s^{-1}); et ci: la concentration (mol m^{-2}).

L'équation déterminante le transport de l'oxygène est formulée comme suit:

$$\nabla.D_{o_2}\left(\nabla C_{o_2}\right) = 0 \tag{4.3}$$

Où (DO_2): est la diffusivité effective de l'oxygène, et (∇CO_2): est le gradient de concentration d'oxygène.

Dans des conditions stables, l'équation (4.3) doit être égale à zéro (=0) pour chaque nœud du béton dans l'espace.

4.2.1.2. La porosité et le transport de charge

Le transport de charge est un facteur clé des mécanismes complexes de corrosion. Dans la littérature, le transport de charge est évalué de deux manières:

La première est l'équation de Nernst-Planck décrivant le transport de charge en matière de concentration d'espèces ioniques, de diffusivités et de mobilités électriques.

La deuxième consiste à considérer le béton comme un conducteur et utiliser la loi d'Ohm en reliant le courant (I), la différence de potentiel (V) et la résistance (R) comme suit [141][142]:

$$I = V \diagup R \tag{4.4}$$

Où les valeurs de résistivité sont dérivées d'expériences

4.3. Processus de modélisation

Dans cette analyse, on a utilisé un outil puissant d'analyse numérique sur les plans de deux et trois dimensions. Le modèle est créé et évalué par le logiciel de modélisation multiphysique COMSOL/Multiphysics, qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique (contraintes, déformations et les déplacements), chimique, physique et le couplage entre ces derniers

4.3.1. *Cas d'étude I :(Poutre en béton armé sous chargement aléatoire)*

Ce cas d'étude concerne l'analyse du comportement d'une poutre en béton armé corrodée sous des charges variant de manière aléatoire au cours d'un processus complexe de corrosion.

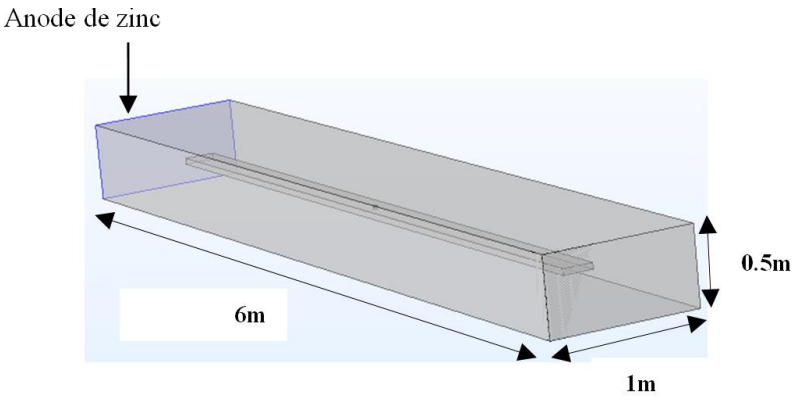
L'évaluation du modèle est effectuée pour différents niveaux de saturation des pores afin de démontrer l'impact de la teneur en humidité sur le mécanisme de corrosion, le présent cas démontre l'efficacité des techniques de couplage mécano-électrochimique.

Le choix du modèle de poutre en flexion (Figure (4.1)(a)) est basé sur sa géométrie simple et les propriétés des matériaux utilisés, facilitant la modélisation et l'implémentation de ce système mécanique dans les analyses numériques.

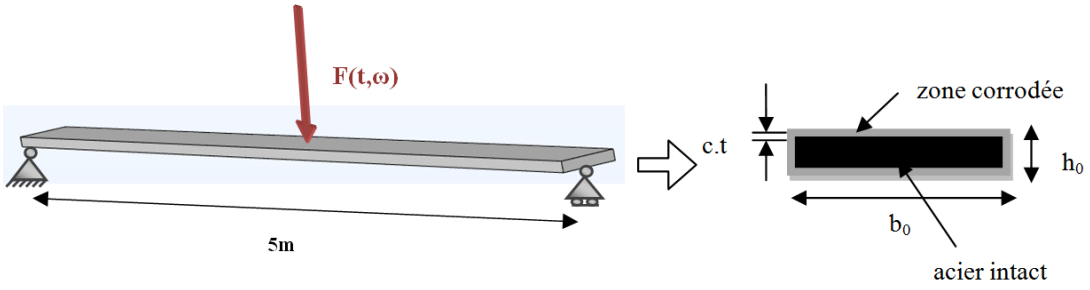
L'étude est divisée en deux parties: la première partie concerne le comportement de poutre à une corrosion uniforme soumise à des diverses sollicitations (des contraintes variables). Pour mieux comprendre l'impact de la perte de section due à la corrosion sur le comportement de la poutre, l'étude mécanique prend uniquement en compte la partie métallique de la poutre. La deuxième partie c'est une analyse électrochimique dans laquelle l'évaluation du modèle est effectuée pour différents niveaux degré de saturation afin de démontrer l'impact de la teneur en humidité sur le mécanisme de corrosion.

Cette partie, considère la modélisation de l'ensemble de la poutre en béton armée en incluant la simulation de béton comme électrolyte. La vitesse de la corrosion est évaluée à divers degrés de saturation du béton. L'efficacité de la mise en place de l'anode de zinc dans la protection contre la corrosion de la surface en acier est démontrée. En raison de l'insuffisance des données, dans la seconde partie les propriétés du béton simulé et les paramètres des conditions de modélisation sont dérivés des travaux de Muehlenkamp et al.[141] qui a travaillé sur la prédiction de l'uniformité spatiale de la protection cathodique de l'acier dans le béton sous l'impact de l'humidité, utilisant une coupe transversale bidimensionnelle d'une unité répétitive en béton armé.

Figure (4.1)(b), la géométrie du modèle en acier est dérivée de [92][3].



(a) La géométrie de la poutre en béton armée



(b) La géométrie de l'acier corrodé

Figure 4.1. Le modèle 3D de la poutre corrodée flexion en béton armée

La figure (4.1) illustre la poutre flexion en béton armée simplement appuyée.

La géométrie de la poutre est de paramètres suivants:

La longueur (L = 6 m), la largeur (B = 1 m), la hauteur (H = 0,5 m).

4.3.1.1. Partie I (Étude mécanique)

Une étude mécanique est effectuée sur la partie en acier corrodée de la poutre (Figure (4.1)(b)).

Les paramètres de modélisation:

a. La géométrie:

La longueur (L= 5 m), une section rectangulaire (b0= 0,2 m, h0= 0,04 m), b_0 et h_0 sont les dimensions initiales de la section (avant corrosion).

b. Le chargement:

La poutre est soumise à son propre poids $W=\rho s t b_0 h_0$ (N/m). Le poids propre est représenté par une charge uniformément répartie.

La densité de l'acier est égale à ρst = 78500 N/m3.

La poutre est aussi soumise à une force concentrée F appliquée mi-travée (voir figure (4.1)(b)).

La charge F (t) est considérée comme variable dans le temps. F (t): un processus stationnaire suivant une distribution gaussienne stochastique (normale) avec les paramètres suivants:

Moyenne	μ =5800N
Déviation-type	σ=1160N
Fonction de coefficient d'autocorrélation exponentielle carrée:	$\exp\left(\left(\frac{\Delta_t}{l}\right)^2\right)$
La longueur de corrélation	**l** = 1 an

Tableau.4.1. Les paramètres du processus stochastique F(t)

Un vecteur de charge contenant 41 valeurs aléatoires est généré en utilisant les paramètres du Tableau.(4.1).

c. *L'intervalle de temps*:

La corrosion commence à t=0, augmente linéairement dans le temps entre t_i=0 et t_f=10 ans avec un coefficient de corrosion c=0,05mm/an.

L'intervalle de temps est discrètement divisé en 41 instants. Le pas de discrétisation Δt= 3 mois↔ 0,25 année.

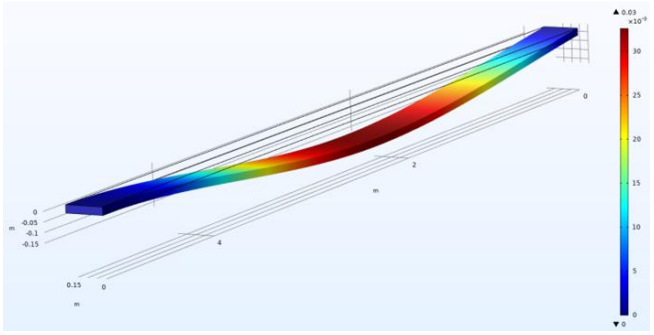
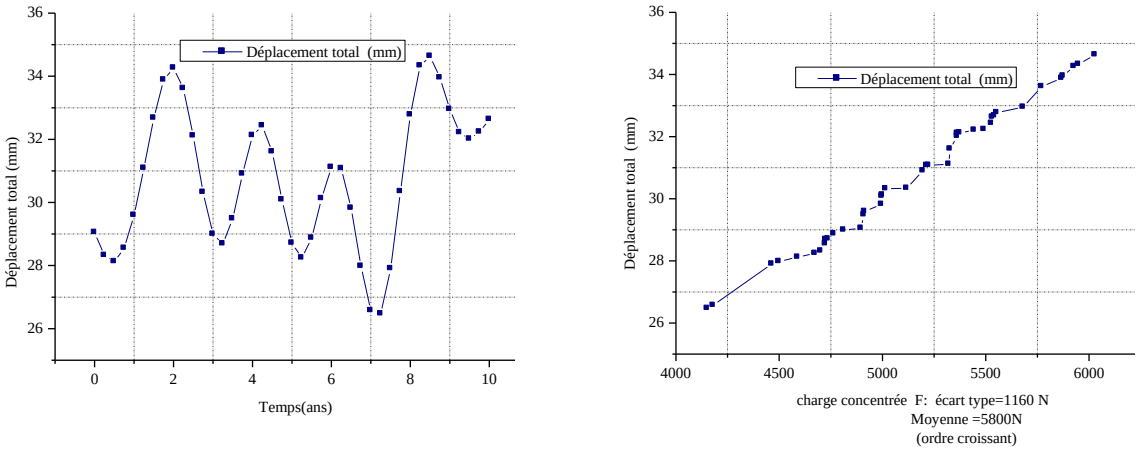


Figure 4.2. Déplacement total de la poutre corrodé

La figure(4.2) représente un modèle 3D illustrant le déplacement global de la poutre en acier sous l'impact d'une perte de section due à la corrosion sur une période de 10 ans. Le modèle montre que les valeurs de déflexion les plus élevées sont au niveau du point de charge appliquée (mi- portée). donnant un déplacement maximal d'environ≈35 mm.

Le mécanisme de rupture des poutres est généralement en flexion; les Figures (4.3)(4.4) illustrent l'évolution du déplacement du modèle de poutre étudié; les graphes représentent le comportement de

déflexion de la poutre sous la contrainte appliquée et l'impact de la dégradation par corrosion (perte de section) évoluant linéairement au cours des 10 années.



(a) Charges variables aléatoires (b) Charges par ordre croissant

Figure 4.3.Déplacement total de la poutre sous des charges aléatoires , et perte de section sur une période de 10 ans

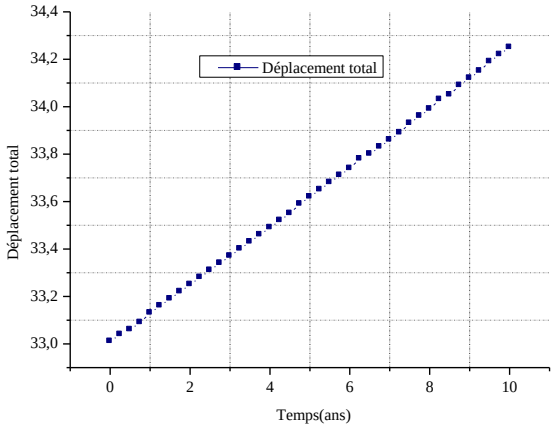


Figure 4.4.Déplacement total de la poutre sous la charge(moyenne) F=5800 N, et une perte de section sur 10 ans

Le vecteur de temps (T) est créé par la discrétisation de l'intervalle de temps égale à 10 ans en un nombre fini de nœuds de temps (41 instants) avec un pas Δt égal à 0.25 ans, donnant le vecteur suivant: T=[0, 0.25, 0.5,0.75...10 ans].

La figure (4.3) montre le déplacement total de la poutre étudiée sous le vecteur de contrainte appliquée F(t) qui contient 41 valeurs générées en utilisant les paramètres (moyenne μ =5800 N, écart type σ =1160 N) et le poids propre de la poutre ρst = 78,5 KN/m^3; la flèche est tracée en fonction de des charges et du temps. Le premier cas, Figure (4.3)(a), représente la variation de charge dans le temps; on remarque que la déformation de l'interface varie avec la variation de charge à chaque nœud temporel.

Le graphique de la figure (4.3)(b) illustre mieux la corrélation positive entre la charge croissante, le déplacement total de la poutre dans le temps et la perte de section.

Pour démontrer plus précisément l'impact de la charge sur la déflexion, dans le second cas la figure (4.3)(b), la charge est classée en ordre croissant de F_{Min} à F_{Max}; plus la contrainte augmente, plus la déflexion de la poutre augmente.

Afin de représenter les pertes de section séparément et de souligner l'effet des pertes de section due à la corrosion sur le déplacement de la poutre, la charge a été fixée à une moyenne F= 5800 N pour que la poutre soit soumise à une charge constante de F = 5800 N, et une corrosion isotrope évoluant linéairement dans le temps avec un taux de c= 0,5 x 10-4 m/an.

La figure (4.4) montre l'augmentation linéaire du déplacement total dans l'intervalle du temps étudié. Les résultats montrent l'impact significatif de la section transversale due à la corrosion sur le comportement de poutre.

4.3.1.2. Partie II (Etude électrochimique)

Dans cette partie, la vitesse de corrosion est évaluée à différents degrés de saturation des pores.

La migration des ions dans le béton détermine également le processus de corrosion. Il existe une relation importante entre la concentration en oxygène, le transport de charge et le contrôle électrochimique de la corrosion.

Le contrôle électrochimique de la corrosion dans ce cas est effectuée par l'implémentation d'une anode de zinc (Figure (4.1)(a)).

La protection cathodique:

Le contrôle de la corrosion via la protection cathodique (CP) dépend de plusieurs paramètres et conditions aux limites, tels que la résistivité du béton, la position de l'anode, la porosité du béton et les propriétés mécaniques et chimiques des composants du béton.

Transformer la totalité de la surface métallique en cathode en appliquant suffisamment de courant pour qu'aucun courant électrique ne s'échappe du métal est l'une des principales méthodes de protection de la surface métallique des infrastructures qu'elle soit totalement ou partiellement enfouie dans les sols, plonger dans l'eau, ou en contact avec l'atmosphère.

La procédure est basée sur deux procédés principaux: la protection sacrificielle de l'anode, comme le zinc, ou la protection à courant forcé, la principale différence entre les deux méthodes c'est la source du courant l'acier.

Dans ce notre cas une anode de zinc est mise en place pour étudier la corrosion de l'acier, les distributions du potentiel, et l'impact de l'anode ainsi que son emplacement sur l'évolution de la vitesse de corrosion (Figure (4.1)(a)).

L'évaluation locale de la densité du courant est exécutée à trois emplacements distincts sur la surface de l'acier: (1) le côté droit (près de l'anode de zinc), (2) mi-travée (l'emplacement de la charge appliquée), (3) le côté gauche (loin de l'anode de zinc).

Création du modèle:

le modèle représente une simulation numérique 3D d'une cellule de corrosion(Figure (4.1)).

La cellule est composée des paramètres suivants:

(a) béton en tant qu'électrolyte conducteur, (b) la surface d'acier de la poutre (c) l'anode en zinc implantée sur le côté droit de la poutre (avec la même porosité que le béton).

Le modèle numérique nécessite:

- La définition des conditions limites.
- L'intégration de la cinétique de réaction à la surface de l'acier.
- L'évaluation de l'uniformité de la corrosion de l'acier.
- La résolution des équations différentielles du transport de charge dans le réseau poreux du béton en incluant la densité de courant appliquée, la résistivité du béton, la position de l'anode de zinc et la porosité du béton.

Le voltage électrique de la cellule est contrôlée par un potentiostat reliant électriquement l'anode et la surface de l'acier.

Les propriétés de transport des ions et le réseau poreux du béton varient en fonction de la teneur en humidité(la saturation du béton).

Les valeurs de résistivité du béton et de diffusivité de l'oxygène ont été obtenues de [141].

Les conditions aux limites:

L'électrochimie décrit les réactions des électrodes en termes des différents paramètres tels que la thermodynamique, la cinétique et la stœchiométrie.

Les réactions électrolytiques impliquent l'échange d'électrons avec l'électrode et la concentration des réactifs à l'interface acier-béton (électrolyte-électrode). Ces facteurs dépendent de la différence de potentiel entre deux phases et deux réactions.

Le surpotentiel de réactions à l'interface acier/béton s'exprime comme suit:

$$\eta_m = \Phi_s - \Phi_i = -E_{eq,m} \tag{4.5}$$

Où: ϕ_s: le potentiel électrique de l'électrode; ϕ_l: le potentiel d'électrolyte; $E_{eq,m}$: le potentiel d'équilibre.

La loi de Tafel relie la vitesse d'une réaction électrochimique au surpotentiel.

Les équations de Tafel anodique et cathodique, sont implémentées de la manière suivante respectivement:

$$i_{loc} = i_0 . 10^{\frac{\eta}{A_a}} \tag{4.6}$$

$$i_{loc} = i_0 . 10^{\frac{\eta}{Ac}} \tag{4.7}$$

Où A_a: La pente de la tangente anodique ; A_c: La pente de la tangente cathodique; i_0: Densité d'échange de courant.

A_c doit être négatif (en raison du signe négatif des réactions de transfert de charge cathodiques).

La cinétique de l'anode de zinc (Zn) est considérée comme extrêmement rapide, la polarisation est négligée dans ce modèle et le potentiel de l'électrolyte est fixé à:

$$\Phi_{l,Zn} = -E_{eq,Zn} + \Phi_{s,Zn} = -E_{eq,Zn} \tag{4.8}$$

La concentration en oxygène au niveau de l'anode de zinc Zn est adaptée aux conditions atmosphériques comme indiqué de suite:

$$C_{o_2,Zn} = C_{o\ ,ref} \tag{4.9}$$

L'analyse de l'électrolyte du béton tient compte de la diffusion d'oxygène et transport de charge dans les réseaux poreux du béton.

Les réactions impliquées dans le mécanisme électrochimique de la corrosion sont l'oxydation du fer, la réduction de l'eau (évolution de l'hydrogène) et la réduction de l'oxygène. Les trois différentes réactions d'électrode à l'interface de l'acier des armatures sont l'oxydation du fer, réduction de l'oxygène et évolution de l'hydrogène comme formulée ci-dessous respectivement:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \tag{4.10}$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \tag{4.11}$$

$$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2H^{-} \tag{4.12}$$

Le potentiel électrique externe de la barre d'acier est réglé à -1 V, qui est le potentiel appliqué dans de la cellule de corrosion créé.

La cinétique d'électrode des réactions qui sont impliquées à l'interface de la barre d'acier est exprimée par les équations de Tafel suivante:

$$i_{Fe} = i_{0,Fe}.10^{\frac{\eta_{Fe}}{A_{Fe}}} \tag{4.13}$$

$$i_{O_2} = \frac{CO_2}{C_{O_2,ref}} i_{0,O_2}.10^{\frac{\eta_{O_2}}{A_{O_2}}} \tag{4.14}$$

$$i_{H_2} = i_{0,H_2}.10^{\frac{\eta_{H_2}}{A_{H_2}}} \tag{4.15}$$

où, η: est le surpotentiel pour chaque réaction, sa valeur est estimée la formule suivante:

$$\eta = \Phi_{s,steel} - \Phi_l - E_{eq} \tag{4.16}$$

Les valeurs des paramètres des réactions de l'électrode citée sont résumées dans le tableau suivant tableau (4.2), les valeurs sont dérivées de [141].

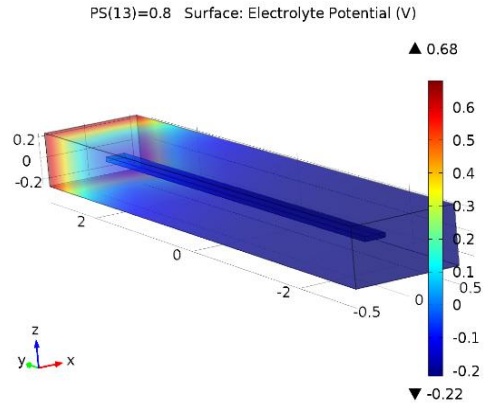
Paramètres	**Unité**	**Zn**	**Fe**	**O_2**	**H_2**
*E*eq	V	-0.68	-0.76	0.189	-1.03
i_0	A/m^2	-	7.1 x10^{-5}	7.7 x10^{-7}	1.1x 10^{-2}
A	V/decade	-	0.41	-0.18	-0.15

Tableau 4.2. Valeurs des paramètres des réactions des électrodes

L'impacte du degré de saturation du béton:

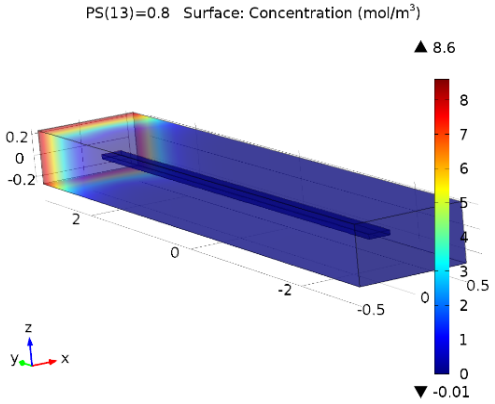
Le modèle est résolu pour différents niveaux de saturation, un intervalle allant de 20% à 80% est utilisé.

L'intervalle de niveaux de saturation utilisé dans l'analyse 40% à 80% est descriptif des conditions naturelles auxquelles on peut s'attendre pendant les cycles de séchage et d'humidification, selon Muehlenkamp et al. [141].



Surface :Electrolyte Potential (V): Surface: Potentiel électrolytique (V)

Figure 4.5. Potentiel électrolytique pour un degré de saturation de 80%



Surface: concentration(mol/m^3) :Surface: concentration(mol/m^3)

Figure 4.6. Concentration en oxygène pour un degré de saturation de 80%

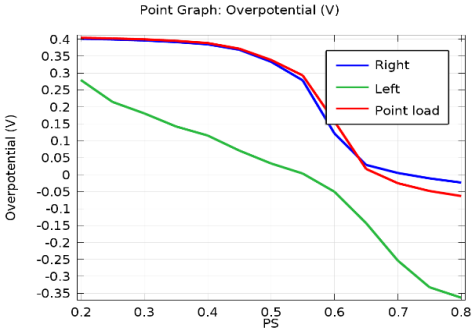
L'étude électrochimique a été réalisée sur trois parties du modèle étudié: le côté droit de la poutre près de l'anode de zinc, le point de la charge appliquée (la mi-portée), et le côté gauche de la poutre .

l'évaluation du taux de corrosion est effectuée à divers niveaux de saturation du béton modélisé. La première analyse est effectuée pour le niveau de saturation le plus élevé 80%.

La figure (4.5) montre l'impact de l'anode de zinc implémentée sur le potentiel électrolytique du béton simulé à un degré de saturation de 80%; les résultats montrent une baisse sensible des potentiels électrolytes vers le côté droit de la poutre.

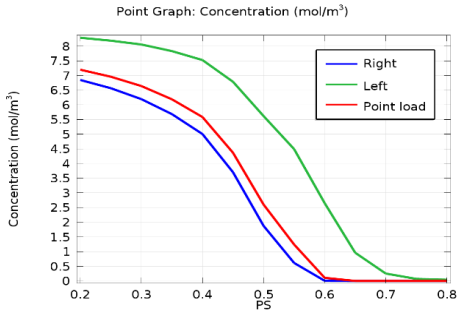
Dans ce cas d'étude la conductivité électrolytique simulée et le coefficient de diffusion de l'oxygène varient avec la saturation du béton.

Basée sur la simulation 3D de la figure (4.6) le modèle montre la concentration d'oxygène à un niveau de saturation des pores du béton modélisé fixé à 80%. Une faible concentration d'oxygène est perceptible sur toute la surface métallique de la poutre en béton armé.



point graph :graphique en points; Overpotential (V) : surpotentiel (V)
Right: Droite ;Left: Gauche ; Point load: point de charge

Figure. 4.7. Le potentiel d'électrode au



point graph :graphique en points; concentration (mol/m^3) :concentration(mol/m^3)
Right: Droite ;Left: Gauche ; Point load: point de charge

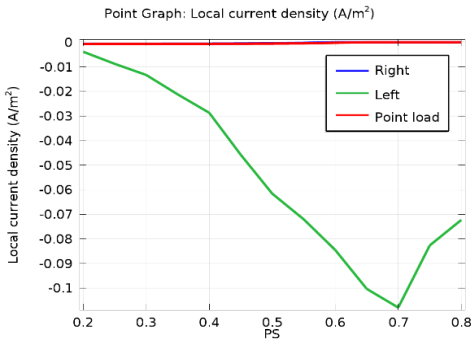
Figure. 4.8. Concentration locale d'oxygène

niveau des points étudiés à l'interface de béton à l'interface acier/béton

Le potentiel de l'électrode a un impact significatif sur la vitesse et le taux de corrosion de la poutre d'acier.

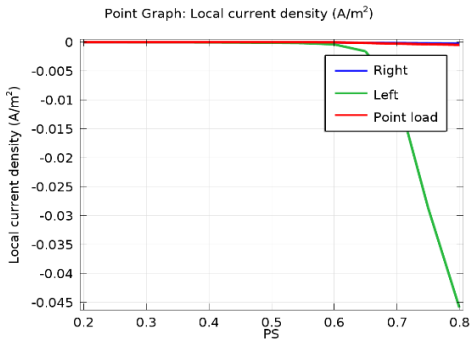
La figure (4.7) montre les niveaux de potentiel de l'électrode en fonction de différentes valeurs de degrés de saturation du béton à trois parties distinctes de la surface d'acier de la poutre en béton armée (droite, emplacement de la charge concentrée et gauche) l'intervalle de saturation varie de 20, 40, 50, 60, 70 et 80%. À 65% de saturation, les courbes montrent une chute de potentiel significative. À des niveaux de saturations inférieurs, on observe une baisse substantielle du potentiel pour un potentiel appliqué de -1 V dans la cellule étudiée.

La présence d'oxygène à l'interface acier est critique pour le processus d'activation de la corrosion, d'où l'effet significatif de la concentration d'oxygène. La figure (4.8) montre la concentration locale en oxygène à l'interface de l'acier à différents degrés de saturation. On remarque une chute considérable de concentration vers des niveaux de saturation élevés. Les résultats montrent une diminution du taux de consommation d'oxygène, entraînant un pic de concentration d'oxygène à des niveaux de saturation interstitielle plus faibles.



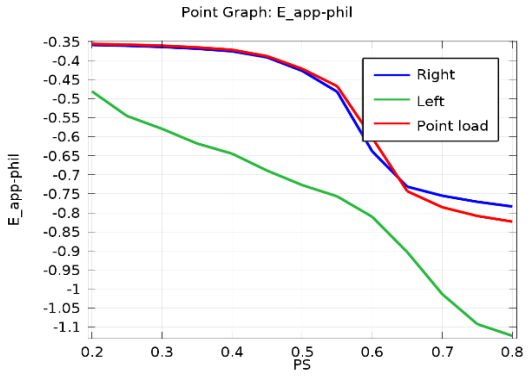
point graph :graphique en points; Local curent density (A/m²): Densité locale du courant(A/m²)
Right: Droite ;Left: Gauche ; Point load: point de charge

Figure.4.9. Densités de courant locales de réduction de l'oxygène à l'interface acier/béton



point graph :graphique en points; Local curent density (A/m²): Densité locale du courant(A/m²)
Right: Droite ;Left: Gauche ; Point load: point de charge

Figure.4.10. Densités locales de courant d'évolution de l'hydrogène à l'interface acier/béton



point graph :graphique en points
Right: Droite ;Left: Gauche ; Point load: point de charge

Figure.4.11. Densités de courant de corrosion de l'acier à l'interface acier/béton

La figure (4.9) décrit l'impact des degrés de saturation sur l'évolution de la densité du courant de réduction de l'oxygène pour les trois emplacements considérés du modèle étudié; les graphes illustrent les côtés à proximité de l'anode de zinc implémentée indiquant une certaine stabilité. La courbe représentant le côté gauche de la poutre montre que l'amplitude de la densité du courant de réduction de l'oxygène est optimale pour un Ps = 20%.

La figure(4.10) décrit les densités du courant de l'évolution de l'hydrogène à l'interface acier/béton; la désorption des molécules de la surface de la cathode peut limiter le développement de l'hydrogène. Les graphs illustrant les résultants montrent que l'évolution de l'hydrogène est relativement limitée en dessous d'un niveau de saturation de 65% (≈0). Pour la réaction d'évolution de l'hydrogène, 65% est le niveau de saturation du béton dans lequel le potentiel d'électrode dérivé de la différence de potentiel à l'interface acier/béton chut en dessous du potentiel d'équilibre.

La variation de la densité du courant de corrosion est illustrée dans la figure(4.11) . Les graphes montrent une augmentation significative des densités de courant de corrosion pour de faibles degrés de saturation . Alors que la surface de l'acier subit un taux de corrosion plus élevé dans un intervalle de saturation variante de 20 à 60%, où les densités de courant de corrosion sont optimales, une diminution considérable est perceptible pour des niveau de saturation plus élevés de 60 à 80%.

4.3.2. *Cas d'étude II: (étude de la zone de transition sous la corrosion et charge mécanique)*

Ce cas étudie le comportement d'une poutre en béton renforcée d'une seule barre soumise à la corrosion.

Le modèle réalisé cible le comportement de la zone de transition acier/béton (ITZ) sous l'impact de la corrosion. Le développement de ce modèle vise à mieux comprendre l'importance de la modélisation des zones de transition dans l'évaluation des interactions entre les systèmes d'infrastructures multi-matériaux, l'évaluation du comportement mécanique de la poutre sous les effets

de la corrosion dans le temps ainsi que l'apport des techniques de couplage dans la modélisation numérique des infrastructures corrodées.

Le modèle de poutre choisie est dérivé de [143], il est caractérisé par une géométrie simple (Figure (4.12)). Le modèle de la poutre étudiée est choisi pour sa structure géométrique simple et ses matériaux de composition, ce qui facilite l'intégration de ses propriétés mécaniques dans l'analyse numérique, permettant une analyse plus efficace et plus rapide de l'interface acier/béton dans le temps.

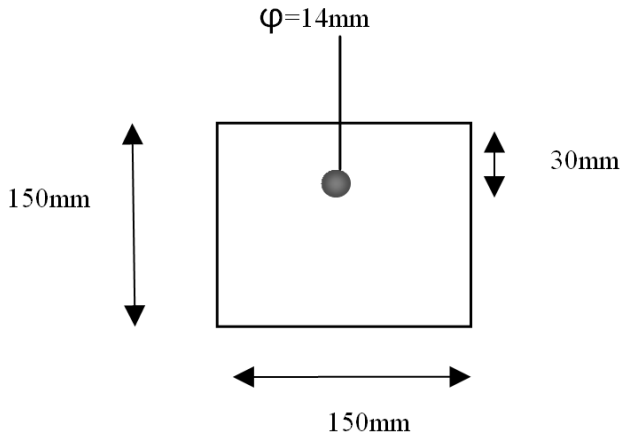


Figure.4.12. Schéma de la section transversale de la poutre étudiée.

La géométrie du modèle 2D étudié est une section transversale carrée de 150x150 mm (figure(4.12)). La poutre est renforcée par une barre cylindrique en acier de 14 mm de diamètre, l'épaisseur du revêtement en béton est de 30 mm.

Le modèle de poutre choisie est dérivé de [145], L'étude est exécutée en trois étapes: (1) Analyse mécanique, (2) Une étude stationnaire portée sur le processus électrochimique de la corrosion dans le béton (3) Utilisation des techniques de couplage combinant la corrosion dans une étude mécano électrochimique.

4.3.2.1. Partie I (Analyse mécanique)

La poutre en béton renforcée est soumise à son poids propre, et une charge uniformément répartie sur sa surface supérieure, d'une valeur maximale de 50 kN/m2.

Pour modéliser le comportement du béton dans des conditions de chargement, on fait appel soit à des modèles de plasticité, ou des modèles d'endommagement. Ottosen et Mazars sont généralement les modèles plus couramment utilisés.

Le modèle d'endommagement Mazars est l'un des premiers modèles d'endommagement du béton à être intégré dans de telles analyses. Il consiste en une combinaison de deux variables

d'endommagement, les effets de traction et de compression, permettant de concevoir un modèle d'endommagement élastique isotrope[144][145].

L'étude mécanique s'effectue en trois étapes:

(1) Poutre élastique sans barre d'acier (la poutre est modélisée comme un matériau élastique isotrope).

(2) L'effet de déformation plastique dans le béton est considéré avec une barre d'acier utilisant le critère Ottosen.

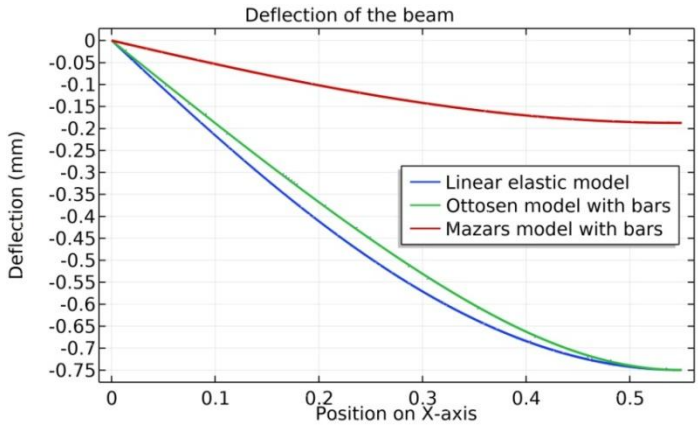
(3) Un modèle d'endommagement selon la théorie de Mazars est implémenté.

Les propriétés principales des matériaux utilisés sont tirées des paramètres par défaut de la bibliothèque des matériaux du logiciel utilisé et résumées dans le tableau(4.3).

	Paramètres	**Valeurs**	**Unité**
	Densité	2300	kg/m^3
	Le module de Young	$25x10^9$	Pa
	le coefficient de poisson	0.2	1
Béton	Résistance à la traction	$2x10^6$	Pa
	Paramètre de l' Ottosen a	1.3	1
	Paramètre de l' Ottosen b	3.2	1
	Facteur de taille K1	11.8	1
	Facteur de forme K2	0.98	1
	Densité	7850	kg/m^3
	Le module de Young	$200x10^9$	Pa
Acier	le coefficient de poisson	0.30	1
	Contraintes initiales d'élasticité	$100x10^6$	Pa
	Module tangent isotrope	$20\ x10^9$	Pa
	Densité	7850	kg/m^3

Tableau.4.3. Les propriétés des matériaux.

Les déplacements résultants des trois approches utilisées dans l'étude mécanique du déplacement de poutre sont comparés dans la figure (4.13).



Deflection of the beam: Déviation de la poutre

Linear elestic model: Modèle élastique linéaire;Ottosen model with bars: Modèle Ottosen avec barres; Mazars model with bars: Modèle Mazars avec barres

Position on X-axis: Position sur l'axe des X

Figure.4.13. Le déplacement de la surface supérieure de la poutre due à la charge extérieure appliquée.

Le graphe montre que dans la déformation plastique utilisant le modèle d'Ottosen, la déflexion est moins importante que dans le modèle élastique linéaire sans barres.

La rigidité totale en flexion de la section en béton n'est pas significativement affectée par la rigidité en flexion de la barre. À cet effet, la barre d'armature est modélisée comme élément en treillis (truss éléments) dans ce cas d'étude.

4.3.2.2. Partie II (Modélisation de L'électrochimie de la corrosion)

L'électrochimie du processus de corrosion implique divers paramètres, dont la thermodynamique, la cinétique et la stœchiométrie.

La densité de courant liée au potentiel de surface de l'acier est utilisée pour déterminer le taux de corrosion de l'acier dans le béton. La vitesse de corrosion lors d'une réaction électrochimique impliquant un transfert de charge est calculée en matière de courant équivalent ou de vitesse de transfert de charge [146].

Pour obtenir des conditions aux limites adaptées, la modélisation numérique de la corrosion du béton nécessite de résoudre simultanément deux équations: l'équation de transfert de charge et la loi d'Ohm.

Les réactions d'électrode considérées impliquées sont: (1) oxydation du fer (2) réduction de l'oxygène (3) évolution de l'hydrogène.

En utilisant les expressions de Tafel, la cinétique des électrodes des réactions considérées est décrite comme suit:

$$i_{Fe} = i_{0,Fe}.10^{\eta Fe/AFe} \quad (4.17)$$

$$i_{O2} = -CO_2 / C_{O2,}ref\ i0_{,O2}\ .10^{\eta O_2/AO_2} \quad (4.18)$$

$$i_{H2} = i_{0,O2}\ .10^{\eta H_2/AH_2} \quad (4.19)$$

$$H = \phi_{s,steel} - \phi_l - E_{eq} \quad (4.20)$$

Où: A: Pente de la tangente (Tafel); i_o: La densité de courant d'échange; η: Le surpotentiel pour chaque réaction; ϕ_s: Le potentiel électrique dans l'électrode; ϕ_l: Le potentiel d'électrolyte.

La première loi de diffusion de Fick incluant le gradient de concentration et le changement de vitesses de concentration de l'équation gouvernante pour le transport de l'oxygène à l'état d'équilibre est formulée comme suit:

$$\nabla.D_{O2}(\nabla C_{O2}) = 0 \quad (4.21)$$

Où: ∇C_{O_2} est le gradient de concentration de l'oxygène; (D_{O_2}) est la diffusivité effective de l'oxygène. Dans un béton ordinaire, la diffusivité effective de l'oxygène (D_{O_2}) s'exprime comme suit:

$$D_{O2} = 2{,}183 \text{ x } 10^{-9} (w/c)^{2,346}\ J^{0.423}\ H^{-3,247} \quad (4.22)$$

Où: w/c: Le rapport eau/ciment; T (°C): Représente la température du béton; H: L'humidité relative.

Pour évaluer l'impact de la saturation des pores sur les paramètres du mécanisme de corrosion, le modèle est résolu pour différents niveaux de saturation des pores allant de: 20% à 80 % .

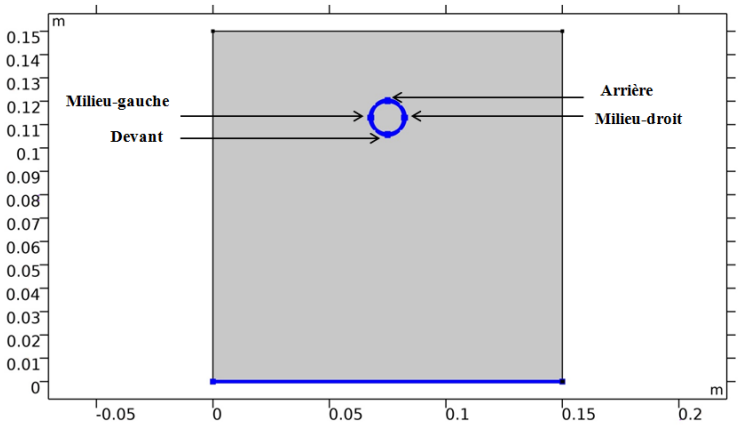
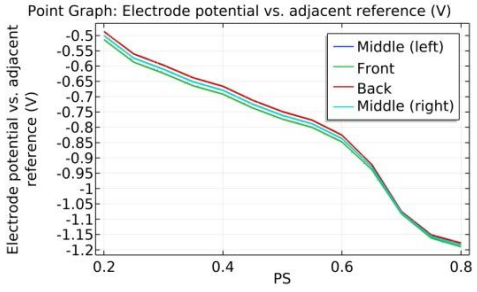


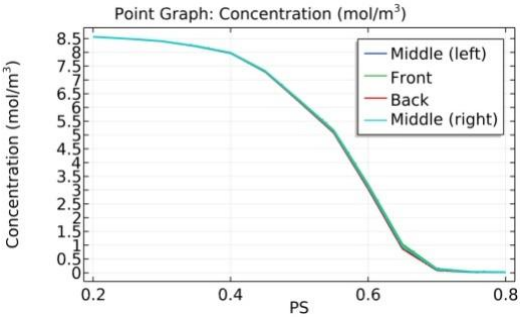
Figure.4.14. Les quatre points étudiés de la zone de transition ITZ

Cette analyse porte sur quatre emplacements dans l'interface ITZ (Figure.(4.14)): milieu-gauche, devant, arrière et milieu-droit.



point graph :graphique en points
Electrode potential VS.adjacente reference(V): Potentiel d'électrode VS. référence adjacente (V):
Middle(left):Milieu (gauche); Front: devant ; Back: arrière; Middle(right: Milieu (droit)

Figure.4.15. Potentiel d'électrode au niveau des points à l'interface acier/béton



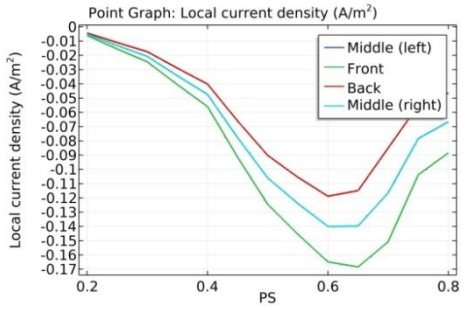
point graph :graphique en points
Concentration (mol/m^3): Concentration (mol/m^3)
Middle(left):Milieu (gauche); Front: devant ; Back: arrière; Middle(right: Milieu (droit)

Figure.4. 16. Concentration locale d'oxygène à l'interface acier/béton

La figure (4.15) représente une courbe du potentiel de l'électrode en fonction d'une saturation variable de valeurs allant de 20, 40... à 80% au niveau des quartes points considérés de la surface de la barre d'acier. Les sites au niveau de l'interface acier/béton (ITZ) qui affiche des résultats sont (le devant, le milieu droit et l'arrière).

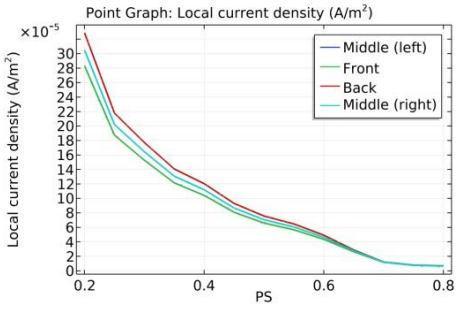
Une baisse considérable du potentiel peut être observée à un niveau de saturation égale à 65%.

La figure (4.16) présente la concentration locale en oxygène à l'interface acier/béton pour différents niveaux de saturation de 20 % à 80 %. Les graphes représentant les quatre points évalués montre que la diffusivité de l'oxygène diminue avec des niveaux de saturation plus élevés conduisant à une chute considérable de La concentration en oxygène.



point graph :graphique en points
Local curent density (A/m^2): Densité locale du courant(A/m^2)
Middle(left):Milieu (gauche); Front: devant ; Back: arrière; Middle(right: Milieu (droit)

Figure.4.17. le courant de densité local de la réduction d'oxygène à l'interface acier/béton

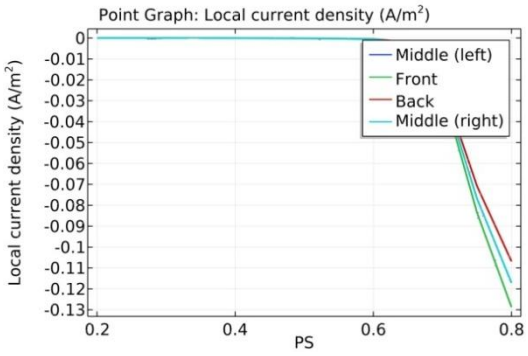


point graph :graphique en points
Local curent density (A/m^2): Densité locale du courant(A/m^2)
Middle(left):Milieu (gauche); Front: devant ; Back: arrière; Middle(right: Milieu (droit)

Figure.4.18. le courant de densité local de l'évolution d'hydrogène à l'interface acier/béton

La figure (4.17) montre la variation de la densité de courant de réduction locale de l'oxygène à l'interface de la barre d'acier. La densité de courant de réduction d'oxygène est élevée dans des niveaux de saturation allant de 20 % à 45 % jusqu'à un niveau de saturation égal à 45 % où l'on constate une baisse significative. Cependant, il y a une baisse significative de l'intervalle de saturation qui varie de 45% à 70%.

La figure (4.18) montre que l'évolution d'hydrogène est limitée autour de zéro en faible saturation des pores jusqu'à atteindre un dégrée de saturation égale à 65 %.



point graph :graphique en points

Local curent density (A/m²): Densité locale du courant(A/m²)

Middle(left):Milieu (gauche); Front: devant ; Back: arrière; Middle(right: Milieu (droit)

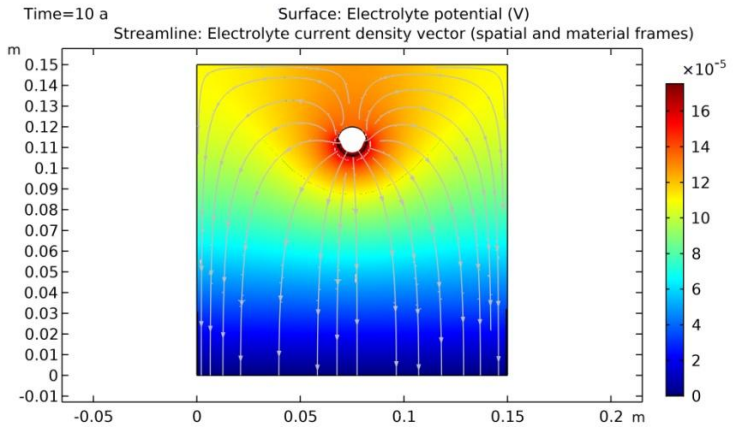
Figure.4.19. Densités de courant de corrosion à l'interface acier/béton.

La figure (4.19) illustre la densité de courant de corrosion. Les graphiques représentant les points examinés. Dans ce cas, les graphs montrent des densités de courant de corrosion élevées à de faibles niveaux de saturation, alors qu'une nette diminution est observée dans des conditions de saturation élevée, démontrant le lien significatif entre les degrés de saturation des pores, la diffusion de l'oxygène et la résistance aux transports de masse.

Le potentiel et la densité du courant à l'interface électrolyte-électrode:

L'activité électrochimique de la surface de l'acier est mesurée par son potentiel, la différence de potentiel entre l'anode et la cathode contrôle la cellule électrochimique, le courant généré est la magnitude déterminée par la résistance du circuit électrochimique.

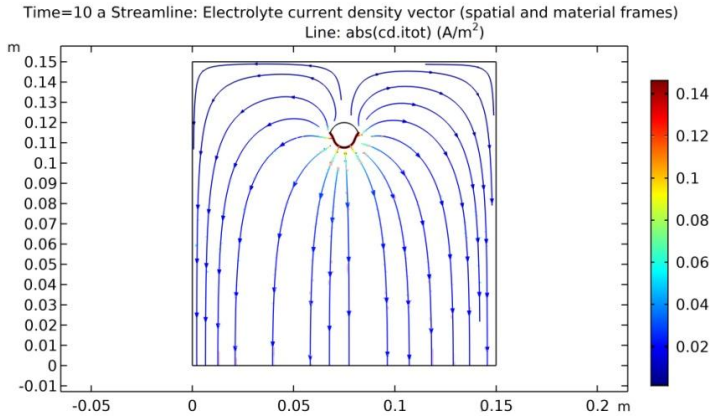
L'immersion de la barre d'acier dans le béton cause un enchainement des réactions d'oxydation et de réduction sur sa surface entraînant la migration des ions pour maintenir l'électro-neutralité jusqu'à ce qu'elle atteigne un état stable (équilibre).



Time: Temps; Surface:Electrolyte potential(V): Surface:Potentiel électrolytique (V)
Streamline:Electrolyte current density vector(spatialand material frames): Streamline:Vecteur de densité de courant des électrolytes (cadres de matériaux spatiaux)

Figure.4.20. Potentiel électrolytique et la déformation de la géométrie de l'ITZ

La figure (4.20) montre le potentiel électrolytique et la déformation des électrodes après 10 ans. On peut voir que la déformation principale se produit dans la zone autour de la barre d'acier (ITZ), l'interface acier/béton présente le taux de déformation le plus élevé. Les pertes potentielles sont faibles pour la majeure partie de l'électrolyte (partie béton).



Time: Temps;
Streamline:Electrolyte current density vector(spatialand material frames) Line:abs(cd.itot)(A/m²): Streamline:Vecteur de densité de courant d'électrolyte (spatial et cadre matériel)
Ligne:abs (cd.itot) (A/m2)

Figure.4.21. Densité de courant de corrosion le long de la surface de l'électrolyte

L' électrolyte de la cellule créé a une haute conductivité. Cependant les densités de courant de corrosion sont supposée être faibles, pour cela l'utilisation la distribution du courant secondaire peut être considérée. Le domaine d'électrolyte est utilisés pour modéliser le transfert de charge d'électrolyte à conductivité constante. La densité de courant de corrosion le long de la surface de l'électrolyte et de l'interface acier/béton ITZ est illustrée dans la figure 4.21. Selon la loi d'Ohm, la chute de tension dans une cellule de corrosion est directement proportionnelle au courant qui circule. Les concentrations les plus élevées sont observées près de l'interface acier/béton

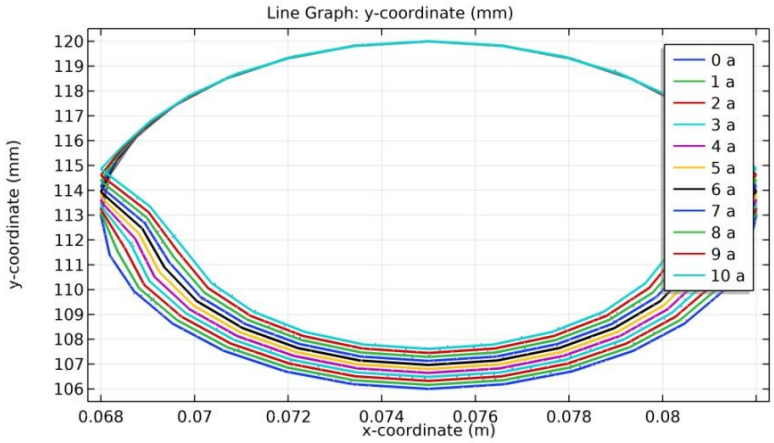
La déformation de l' ITZ sous le processus de corrosion:

Pour démontrer la déformation de l'électrode au cours du processus de corrosion, nous utilisons une étude en fonction du temps pour déterminer l'évolution spatiale et temporelle de la déformation induite au cours du processus de corrosion à l'ITZ.

L'étude a été réalisée sur une période de 10 ans devisée en des intervalles avec un pas de temps Δt=1 an.

Le cas d'étude comprend deux étapes de solveur:(1) Phase d'initialisation du courant en utilisant un solveur stationnaire pour résoudre le problème des potentiels séparément.

(2) Phase dépendante du temps afin de résoudre tout le problème pour la période de 10 ans.



Line Graph:y-coordinate(mm): Graphique linéaire: coordonnée y (mm)
x-coordinate(mm): coordonnée x (mm)

Figure.4.22. Déformation de l'électrode à différents instants sur une période de 10 ans

La figure (4.22) montre la déformation de l'ITZ sur une période de 10 ans, aux différents instants considérés dans l'intervalle de temps de t=0 à t=10 ans, avec un pas de 1 an.

4.3.2.3. Partie III (La modélisation mécanique et électrochimique couplée)

L'accélération des réactions chimiques due à l'action mécanique, l'accélération des endommagements mécaniques dus à la corrosion, ainsi que l'augmentation de la plasticité à proximité de la surface due aux réactions électrochimiques, doivent être rigoureusement prises en compte pour éviter une défaillance prématurée des infrastructures dues à la corrosion.



Les interactions entre la réactivité électrochimique de la corrosion sur une surface d'acier et la contrainte interne ou externe appliquée à ces couches de surface représentent l'effet mécano-électrochimique.

En raison de la symétrie du modèle, la géométrie de la poutre est simplifiée en un modèle 2D, comme l'illustre la Figure (4.12).

Les conditions aux limites électrochimiques:

(a) Un nœud de surface d'électrode limite est ajouté pour modéliser la déformation de la surface de l'acier.

(b) La condition d'électrolyte limite du potentiel est implémentée pour appliquer un potentiel d'électrolyte de 0 V le long de du reste des limites de la surface.

(c) La condition d'isolation par défaut est appliquée à toutes les autres limites.

(d) Pour la géométrie déformée, sur les limites non mobiles, le modèle est résolu avec la limite non-déformante par défaut.

Les conditions aux limites mécaniques:

(a) Une contrainte fixe dans le segment inférieur de la section.

(b) La charge prescrite est appliquée sur la limite supérieure (charge uniformément répartie) d'une valeur maximale de 50 kN/m^2).

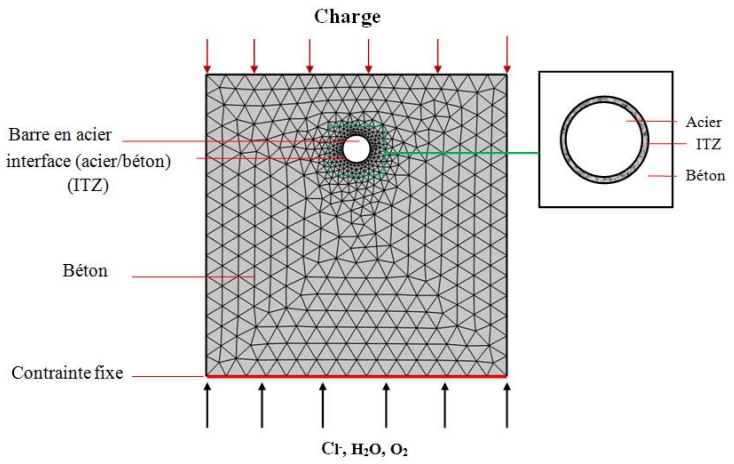


Figure.4.23. La structure géométrique et technique de maillage du modèle

Le logiciel utilisé, dispose d'outils uniques pour définir et afficher des éléments géométriques, des maillages triangulaires libres avec des tailles d'élément minimales et maximales de 0,027 à 6,03

respectivement sont générés . Il fournit des algorithmes qui génèrent des maillages automatiquement. Le facteur de courbure est de 0,3, engendrant un taux de croissance maximal de l'élément égale à 1,3.

La figure (4.23) montre le maillage du modèle étudié, le maillage est représenté par un modèle d'éléments finis composés d'éléments nodaux. En raison de la concentration des contraintes autour de la zone de transition, un maillage d'éléments finis plus fin a été utilisé à l'interface acier/béton, le reste de la surface en béton est constitué par un maillage plus grossier.

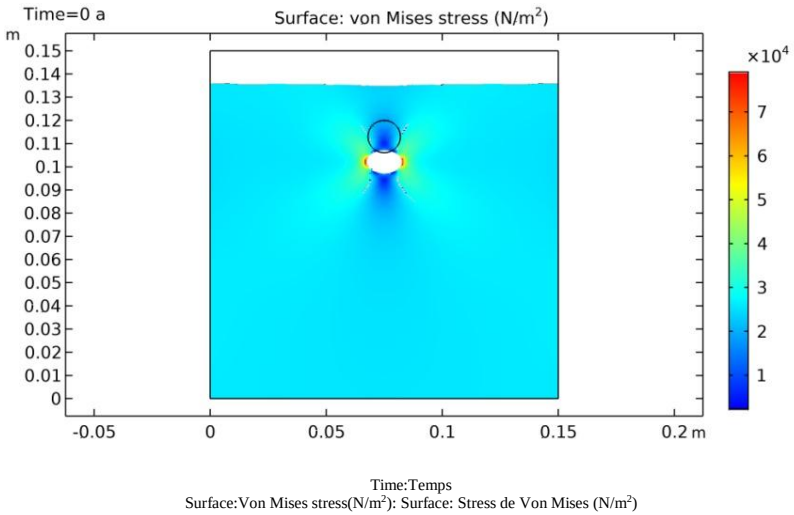


Figure.4.24. La contrainte effective de Von Mises de la poutre déformée dans des conditions normales

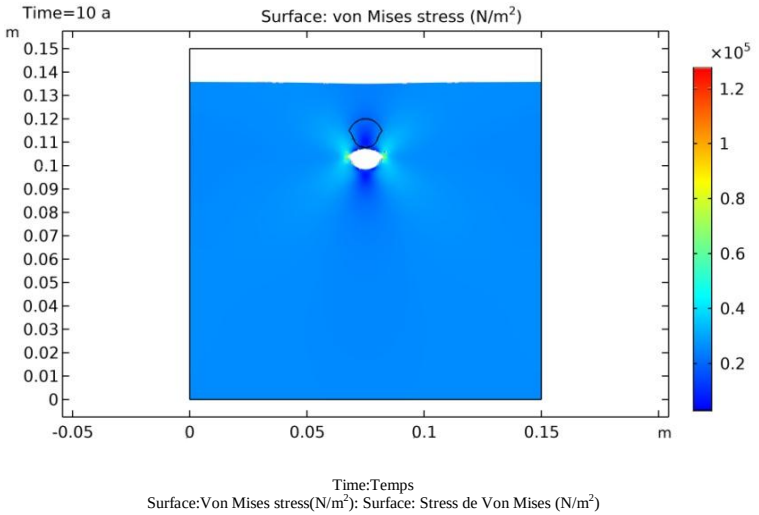


Figure 4.25. La contrainte Von Mises effective de la poutre déformée en conditions de corrosion

Dans cette partie, l'impact des processus électrochimiques de corrosion sur les contraintes induites par les charges appliquées est évalué. Le comportement de la poutre sous de très grandes déflexions est modélisé dans des conditions normales et de corrosion.

Les figures (4.24) et (4.25), démontre la répartition des contraintes dans une poutre en béton armé dans des conditions normales et de corrosion respectivement.

Dans les deux cas, les niveaux de contraintes locales de Von Mises sont répartis symétriquement à l'interface acier/béton.

Bien que les contraintes ne soient pas du même ordre de magnitude dans les deux cas étudiés, leurs valeurs optimales se situent à des endroits similaires autour de l'interface acier/béton (ITZ).

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, le problème fondamental du mécanisme de corrosion et de sa complexité dans les structures en béton armées sous de multiples conditions, ainsi que le comportement de la zone de transition (ITZ) sont définis en faisant varier le degré de saturation du béton sous des charges alternées, en introduisant la protection cathodique.

La présence des barres d'armature réduit la déflexion des éléments en béton armée recevant la contrainte transmise au béton par des charges externes, prolongeant ainsi la durée de vie des infrastructures. En pratique la perte de la section transversale de l'acier peut caractériser l'étendue du degré de corrosion. La déflexion de la poutre augmente en fonction du temps et la réduction linéaire de la section d'acier dû à la corrosion. La perte isotrope de la section des armatures en acier a un impact significatif sur le déplacement global qui affecte le comportement des éléments structuraux au fil du temps.

La limite d'élasticité et la résistance ultime de la poutre en béton armée ont tendance à diminuer avec l'augmentation du degré de corrosion à cause de la réduction de la ductilité de l'élément en acier corrodé dû à la réduction de sa section transversale.

Pour un potentiel de corrosion donné, les conditions sèches (faibles niveaux de saturation) entraînent des taux de corrosion plus élevés que les conditions humides (forte saturation du béton). Le taux de corrosion est en grande partie déterminé par le degré de saturation du béton. L'uniformité de corrosion dépend de l'humidité relative du béton près de l'interface de l'acier. La concentration en oxygène devient négligeable pour des niveaux de saturation interstitielle élevés à proximité de l'interface acier/béton, indiquant un flux d'oxygène plus faible à l'interface de l'acier des éléments en béton armées en raison de la diffusivité réduite de l'oxygène.

Le taux de corrosion dépend de la densité du courant et de la conductivité de l'électrolyte. La densité du courant diminue en fonction de la réduction de la diffusivité de l'oxygène, qui est principalement proportionnel à la saturation du béton. La densité du courant de réduction de l'oxygène est à sa vitesse optimale pour une haute conductivité électrolytique.

Les taux de densité de courant optimaux sont observés à proximité de la barre d'acier, principalement à l'interface acier/béton, indiquant que l'ITZ est la zone la plus faible présentant des

dommages de corrosion. En chargeant dans des conditions normales, l'intensité de contrainte du béton est faible par rapport à l'état corrodé d'acier en combinant au processus de corrosion la charge mécanique appliquée, ce qui augmente le niveau de contrainte du béton.

La formation de produits de corrosion à l'interface béton/acier entraîne une perte d'adhérence entre les deux matériaux, fragilisant la zone de transition d'interface (ITZ) et réduisant sa capacité portante. La déformation de l'ITZ est plus significative sous les effets combinés de la corrosion et de la charge appliquée.

L'importance de la protection cathodique par implémentation d'anode de zinc est aussi démontré dans ce chapitre. La mise en place de l'anode de zinc démontre l'importance de la méthode de protection par revêtement de zinc pour prévenir la corrosion des barres d'armature en acier. L'impact de l'anode diffère en fonction de la position sur la poutre en béton armé et de la teneur en humidité du béton.

Ce chapitre illustre l'importance de la modélisation numérique dans l'interprétation de la migration d'humidité du béton autour de la zone de transition acier /béton et son impact sur les niveaux de corrosion. Une démonstration de l'apport des techniques numériques couplées pour fournir une perspective détaillée des réactions électrochimiques impliquées dans les processus de corrosion combinés avec les contraintes mécaniques appliquées sur les éléments en béton armés dans diverses conditions est mise en évidence.

Chapitre 5 : Résultats et interprétations

5.1. Introduction

Le processus de planification et construction des ouvrages géotechniques peut être problématique en raison de l'incertitude et du caractère aléatoire des propriétés des matériaux utilisés, de leurs géométries et des contraintes associées.

Une analyse déterministe considère une seule hypothèse lors de l'analyse des paramètres d'un cas d'étude, tandis qu'une analyse probabiliste considère le comportement variable des paramètres dans le temps et dans l'espace, permettant ainsi toutes les analyses possibles, ainsi tous les cas de figure possibles peuvent être inclus dans l'étude pour développer des modèles plus réalistes.

Les conditions environnementales sont caractérisées pas différents facteurs agressifs variant sur le plan spatio-temporel, augmentant leur vulnérabilité à plusieurs types de corrosion.

Les méthodes numériques sont couramment utilisées pour calculer numériquement les taux de corrosion à l'aide de modèles numériques afin d'évaluer l'état de la surface des aciers dans de multiples conditions.

Dans les chapitres 3 et 4 un modèle de poutre en béton armée corrodée a été analysée dans plusieurs cas d'étude par différentes approches, tout d'abord par une analyse fiabiliste en introduisant une nouvelle méthode combinant le calcul des taux de franchissement et la méthode de Monte-Carlo (MCS) classique.

Le comportement de la poutre est aussi évalué par une modélisation numérique en utilisant une approche mécano-électrochimique pour but d'étudier l'impact de la corrosion sur le comportement de la poutre et la zone de transition acier/béton sous différents degrés de saturation du béton en ajoutant un chargement. L'impact de protection par implémentation d'anode de zinc est aussi souligné.

Dans ce chapitre chaque partie des résultats trouvée est interprétée, expliquée, et détaillée .

Le chapitre est divisé en 3 parties,(1) l'analyse fiabiliste (MCS optimisé) (2): Analyse numérique mécano-électrochimique couplée de la poutre en béton armée,(3) la modélisation numérique couplée de la zone de transition(ITZ).

5.2. Partie(I): Analyse fiabiliste (MCS optimisée)

Dans cette partie les résultats de l'analyse fiabiliste sont soulignés.

La probabilité de défaillance est calculée en utilisant la méthode de MCS optimisée qui combine le calcule de franchissement a la méthode de MCS classique. La simulation est exécutée pour les nombres de simulations suivantes: 10^3 10^4 10^5.

Les probabilités de défaillance calculées sont ensuite comparées à la probabilité de défaillance calculée par la méthode de MCS classique dans le travail de Hawchar et al. [93]qui sert de référence dans le cas gaussien et stationnaire.

Tableau (3.3) résume les résultats trouvés par nombre de simulations 10^3 10^4 10^5.

Les probabilités de défaillance trouvées sont classées est comparée à la probabilité de défaillance utilisée comme référence trouvée par MCS classique pour (10^6 simulations).

Nombre de simulation ***(N_{sim})***	**P_f 1**	**P_f**	**COV**	**Pf MCS classique (Réf)** [93]
10^3	0.0160	0.0200	0.2479	0.0220
10^4	0.0152	0.0208	0.0804	
10^5	0.0153	0.0210	0.0253	

Tableau.5.1. Comparaison entre les résultats de probabilité de défaillance pour 10^3 $10^4 10^5$ simulations trouvées et ceux calculés dans l'article

Le coefficient de variation (COV):

Pour comparer le degré de variabilité entre les simulations exécutées, le coefficient de variation(COV) est calculé pour chaque nombre de simulation, le COV c'est le rapport de l'écart type à la moyenne exprimé en pourcentage.

Les valeurs trouvées montrent que diminue jusqu'à une valeur de 3% en fonction de l'augmentation du nombre de simulation pour $\boldsymbol{N}_{sim} = 10^3$ le COV ≈ 25 % alors que pour 10^5 le COV≈3%.

La probabilité de défaillance:

L'analyse est effectuée pour un intervalle de temps de 10 ans .

Les probabilités de défaillance sont calculée avec les premiers franchissements Pf1 et tous les franchissements P_f pour $\boldsymbol{N_{sim}} = 10^3, 10^4, 10^5$.

Pour un nombre de simulations de $\boldsymbol{N}_{\boldsymbol{sim}} = 10^5$ la probabilité de défaillance $P_f = 0.0210$, le résultat est assez proche du P_f (Réf) =0.0220 qui est exécuté pour un nombre d'échantillons égale à 10^6 .

Pour prouver la robustesse de la méthode de MCS optimisé le nombre de simulation est réduit jusqu'à la valeur de $\boldsymbol{N}_{\boldsymbol{sim}} = 10^3$ donnant une probabilité de défaillance $P_f = 0.0200$, le résultat est assez satisfaisant comparé à un nombre de simulation de 10^6.

Les graphes des figures (3.2) (3.3) (3.4) dans le chapitre 3 appuient les résultats trouvés, l'évolution de la probabilité de défaillance sur l'intervalle de 10 ans pour les différents nombres de simulations $\boldsymbol{N}_{\boldsymbol{sim}} = 10^3, 10^4, 10^5$ montres qu'en introduisant le calcul taux de franchissement le programme de calcul, on constate qu'avec l'augmentation du nombre de simulation la précision des résultats estimés augmente. Avec un nombre minimum d'échantillons de 10^3, les résultats sont tout à fait satisfaisants.

Dans les résultats de cette partie, d'étude l'introduction du calcul des taux de franchissement montre que pour un nombre de simulations réduit en gagnant un temps de calcul énorme, l'approche de MCS optimisé conduit à un programme plus précis qui apporte une meilleure estimation de la probabilité de défaillance en fonction du temps comparé a la méthode de MCS classique qui n'est pas économique en temps de calcul avec un nombre d'échantillons énormes pour les petites probabilités de défaillance.

5.3. Partie (II): Analyse numérique mechano-électrochimique couplée

Dans cette partie les résultats de l'analyse du comportement de la poutre en béton armé corrodée étudié dans le premier cas du chapitre 4 sont justifiés.

L'évaluation du modèle est effectuée sous des charges variant aléatoirement au cours d'un processus complexe de corrosion pour différents niveaux de saturation des pores afin de démontrer l'impact de la teneur en humidité sur le mécanisme de corrosion, le présent cas démontre l'efficacité des techniques de couplage mécano-électrochimique.

Les résultats de l'étude sont divisée en deux parties: la première partie (1) c'est l'analyse mécanique, cette analyse concerne le comportement de poutre à une corrosion uniforme soumise à des contraintes variables, l'étude mécanique prend uniquement en compte la partie métallique de la poutre.

La seconde partie(2), considère la modélisation de l'ensemble de la poutre en béton armée en incluant la simulation de béton comme électrolyte. La vitesse de la corrosion est évaluée à divers degrés de saturation du béton. L'efficacité de la mise en place de l'anode de zinc dans la protection contre la corrosion de la surface en acier est démontrée.

5.3.1. *Première partie (1): analyse mécanique*

5.3.1.1. Déplacement de la poutre

Le déplacement global de la poutre en acier est illustré au chapitre 4 par un modèle 3D (figure. (4.2)). Les déplacements sont modélisés sous l'action de la contrainte et une perte de section due à la corrosion en fonction du temps (10 ans).

Un déplacement maximal $D_{max} \approx 35$ mm est détecté. La flèche maximale (D_{max}) est au centre de la portée de la poutre(mi-travée) le point d'application de la charge concentrée.

Le mécanisme de rupture des poutres est souvent en flexion, le comportement de déflexion de la poutre sous la contrainte appliquée et l'impact de la dégradation par corrosion (perte de section) évoluant linéairement au cours des 10 années sont analysés.

Fréquemment en pratique le degré de corrosion est caractérisée par la perte de section. La réduction isotrope de la section d'acier due à la corrosion a un impact critique sur le déplacement total.

L'évaluation du comportement du modèle étudié sous l'action combinée de la corrosion traduite par une perte de section et la contrainte variable est illustrée dans les graphes des Figures (4.3)(4.4) dans le premier cas d'étude du chapitre 4.

La figure (4.3) démontre le déplacement total de la poutre en fonction de l'intervalle de temps [0,10 ans]. Deux graphes sont tracés (a) sous l'impact de la charge aléatoirement générée,(b) les valeurs de la charge sont classées par ordres croissant pour démontrer plus précisément l'impact de la charge sur la déflexion.

Le premier graphe (a) montre que la déformation interfacial change avec le changement de charge à chaque nœud temporel.

Dans le second cas(b) la classification de charge est en ordre croissant de F_{Min} à F_{Max} pour faciliter à comprendre l'impact de la charge sur le déplacement de la poutre; on remarque une corrélation positive entre l'augmentation de la valeur de la charge et le déplacement plus la contrainte augmente plus la déflexion de la poutre augmente illustrant mieux le rapport entre la charge croissante et le déplacement total en fonction du temps et la perte de section.

Figures (4.4) démontre le déplacement total de la poutre sous la charge F=5800 N (moyenne) et perte de section sur les dix années pour but d'évaluer séparément l'impact de la perte de section sur le déplacement, la charge est fixé à sa valeur moyenne F=5800N. Figure (4.4) illustre le déplacement de la poutre en fonction du temps sous une corrosion isotrope évoluant linéairement dans le temps à la vitesse de c = 0,5x10-4 m/an. On note une augmentation linéaire du déplacement total sur l'intervalle de temps étudié. Les résultats indiquent un impact significatif de la perte transversale dû au processus électrochimique de la corrosion sur le comportement mécanique de la poutre.

5.3.1.2. L'électrochimie de la corrosion et l'impact de la porosité du béton

L'étude électrochimique a été réalisée sur trois parties du modèle étudié: le côté droit près de l'anode de zinc, le point de la charge concentré (la mi-portée) et le côté gauche de la poutre.

Dans cette partie le modèle est résolu pour différents niveaux de saturation variant dans un intervalle [20%, 80%].

le Potentiel électrolytique:

Un niveau de saturation égale à 80 % est utilisé dans la première analyse.

Dans ce cas d'étude la conductivité électrolytique simulée et le coefficient de diffusion de l'oxygène varient avec la saturation du béton.

Le résultat de la première analyse du modèle montre l'effet de l'anode de zinc mise en place sur le potentiel électrolytique du béton simulé à 80 % de saturation voir (Figure (4.5) chapitre 4).

Le résultat montre une baisse significative du potentiel de l'électrolyte vers le côté droit de la barre qui est l'emplacement de l'anode de zinc.

Concentration d'oxygène:

La cinétique des réactions ou les limitations de transport à l'interface acier/béton peuvent limiter l'effet du transport de masse sur la vitesse des réactions chimiques. Il s'agit, dans le cas présent, du problème d'interaction de la diffusion et la porosité du béton.

Le résultat de l'analyse de la concentration de l'oxygène montre l'effet de la saturation du béton sur la diffusion de l'oxygène dans le béton simulé à 80 % de saturation voir (Figure (4.6) chapitre 4. Une faible concentration d'oxygène est perceptible sur toute la surface métallique de la poutre en béton armée, ce qui indique que le transport d'oxygène affecte la limitation des réactions du système.

Dans des conditions de haute saturation du béton pour les niveaux de saturation élevé il y a une mauvaise diffusion de l'oxygène à travers le réseau d'électrolyte poreux, pour cela très peu d'oxygène circule dans les pores du béton simulé ce qui entraîne une baisse significative de la concentration d'oxygène à proximité de l'interface de l'acier.

La concentration en oxygène est négligeable à des niveaux de saturation élevés. En raison de la vitesse de réaction élevée et du potentiel électrolytique, la vitesse de réduction doit être limitée par le transfert de masse. Cependant, une faible diffusion d'oxygène limite les réactions interraciales dans le système, indiquant un lien entre le transfert de masse et les mécanismes de réaction de surface.

- *Le potentiel opérationnel de l'électrode*

Le voltage électrique de la cellule est contrôlée par un potentiostat reliant électriquement l'anode et la surface de l'acier.

Le potentiel d'électrode, dans le processus électrochimique de la corrosion est la force électromotrice de la cellule.

La cellule de corrosion construite dans cette étude consiste d'une anode de zinc, le béton, agissant comme électrolyte, et la surface de l'acier. Les potentiels électriques de la cellule de corrosion sont le potentiel appliqué par le potentiostat contrôlant la tension de cette dernière et le potentiel électrolytique.

Le potentiel opérationnel de l'électrode a un impact significatif sur la vitesse de corrosion de la partie en acier de la poutre. La variation du potentiel opérationnel de l'électrode en fonction de la porosité du béton a été étudiée, les résultats sont illustrés dans le graphe (la figure (4.7) chapitre 4).

les courbes représentent les niveaux du potentiel de l'électrode à chaque point étudié à l'interface du béton(la gauche, mi-travée et droite) en fonction de la saturation du béton, l'intervalle des degrés de saturation varie de 20, 40, 50, 60, 70 et 80%. À un degré de saturation égale à 65 % une chute significative du potentiel est notée. À un potentiel de -1 V appliqué par le potentiostat pour de faibles degrés de saturation, on observe une baisse considérable du potentiel. Plusieurs études expérimentales ont montré que le béton à faible saturation (béton sec) a un taux de corrosion plus élevé que le béton avec une saturation relativement élevée (béton humide). Plus le potentiel opérationnel d'électrode élevé, plus le taux de corrosion est faible[147].

- *Concentration locale d'oxygène*

La présence d'oxygènes à l'interface acier est critique pour le processus d'activation de la corrosion. Par conséquent, l'impact de la variation de la concentration d'oxygène est significatif.

L'analyse de la concentration de l'oxygène démontre l'influence de la concentration d'oxygène sur la corrosion de l'acier dans le béton étant un matériau poreux. La corrosion dans le béton, est fortement liée ses propriétés telles que la porosité et les variations du degré d'humidité qui sont influencées par les différents facteurs environnementaux.

La concentration de l'oxygène au niveau de la cellule de corrosion construite est évalué pour différents degrés de saturation [20%....80%], les résultats de la concentration d'oxygène au niveau des trois points étudiés sont démontrés dans (la figure (4.8) chapitre 4). Une baisse considérable de concentration vers des niveaux élevés de saturation est perceptible. Les résultats indiquent une diminution du taux de consommation d'oxygène, entraînant un pic de concentration d'oxygène à des niveaux de saturation interstitielle plus faibles.

On conclut deux points importants de l'analyse combinée de la concentration d'oxygène et de la variation de saturation du béton: (a) à faible degré de saturation, il y a un pic de concentration d'oxygène dû à une consommation limitée d'oxygène. (b) à des niveaux élevés de saturation, la

diffusivité de l'oxygène diminue en raison de la limitation du flux, elle diminue graduellement jusqu'à zéro.

- *Densités du courant locales de réduction de l'oxygène*

Une évaluation de l'impact de la saturation sur l'évolution de la densité de courant de réduction d'oxygène est faite pour les trois emplacements considérés du modèle de poutre étudié .

Il impacte la variation de la saturation du béton sur le courant local de réduction d'oxygène est résumée dans les graphes illustrés dans la figure (la figure (4.9) chapitre 4).

Les courbes représentant le côté droit et le point de la charge appliqué sont presque identiques, indiquant un certain degré de stabilité.

La courbe représentante du côté gauche de la poutre montre que l'amplitude de la densité du courant de réduction d'oxygène est optimale au niveau de saturation Ps = 20 %.

Dans l'intervalle de saturation [20% , 45%], la densité de courant est maximisée en raison de l'augmentation de la conductivité électrolytique.

En raison du faible niveau de la diffusivité de l'oxygène à des niveaux de saturation élevés, l'intervalle [45 % , 70 %] montre une diminution significative de la conductivité électrolytique entrainant une baisse de la densité de courant.

On conclut que, le taux de corrosion est directement lié à l'augmentation de la densité de courant due à un degré de conductivité électrolytique élève jusqu'à un certain point de saturation dans notre cas Ps ≈ 0,6-0,65, ensuite une diminution significative du courant de réduction est observée à des niveaux plus élevés de saturation interstitielle.

- *Le courant de densité local de l'évolution d'hydrogène*

Les réactions impliquées dans le mécanisme électrochimique de la corrosion à l'interface de l'acier des armatures sont l'oxydation du fer la réduction de l'oxygène et l'évolution de l'hydrogène. La diffusion d'hydrogène dans la surface de l'acier peut modifier et altérer les microstructures du métal.

Au cours du processus de corrosion les réactions de réduction et d'oxydation (Red/Ox) se produisent évidemment à l'interface de l'acier, pour cela il est essentiel de suivre les réactions d'évolution de l'hydrogène. Lorsque l'activité Red/Ox des réactifs chimiques impliquées dans la réaction d'électrode est égale à leur concentration, le potentiel est a son état d'équilibre.

Les densités de courant d'évolution de l'hydrogène à l'interface acier/béton sont évaluées en fonction des degrés de saturation étudiés.

(La figure (4.9) chapitre 4) résume l'impact de la saturation du béton sur l'évolution de l'hydrogène dans les trois points de la poutre étudiée.

La désorption des molécules de la surface de la cathode peut limiter le développement de l'hydrogène. Les courbes résultantes représentant chaque point montrent que l'évolution de l'hydrogène est relativement limitée en dessous d'un niveau saturation de 65% (≈0). On déduit que pour la réaction d'évolution de l'hydrogène, 65% est le niveau de saturation des pores auquel le potentiel d'électrode dérivé de la différence de potentiel à l'interface acier/béton chut en dessous du potentiel d'équilibre.

- *Densités de courant de corrosion de l'acier*

La conductivité de l'électrolyte et le coefficient de diffusion de l'oxygène varient en fonction des niveaux de saturation du béton étudié, entraînant une variation de la vitesse de corrosion mesurée.

En dernière position de l'analyse électrochimique du modèle étudié, la densité du courant de corrosion est évaluée en fonction de la variation de la porosité

(La figure (4.9) chapitre 4) illustre l'impact de la porosité sur la densité du courant de corrosion à l'interface acier/béton pour les trois points étudiés.

Les courbes montrent une considérable augmentation des densités de courant de corrosion pour des faibles degrés de saturation, une augmentation significative est notée dans un intervalle de saturation variant de [20%, 60%] où les densités de courant de corrosion sont optimales, ce qui démontre que la surface de l'acier subit un taux important de corrosion dans des niveaux de saturation élevés.

Par contre une chut considérable de la densité du courant est perceptible pour des niveaux de saturation élevés [60%, 80%].

- *L'impacte de l'anode de zinc*

L'analyse électrochimique du modèle est effectuée en trois points à différentes distances de la position de l'anode de zinc selon différents degrés de saturation.

Les résultats de l'évaluation du potentiel électrolytique, la diffusion et concentration d'oxygène, l'évolution de l'hydrogène ainsi que la densité du courant de corrosion en fonction de la saturation du béton démontrent que les potentiels d'électrolyte de la cellule de corrosion sont plus faibles vers le côté gauche de la poutre en s'éloignant de l'anode de zinc.

L'amplitude de la densité de courant d'oxydation pour l'acier est nettement inférieure aux densités de courant de réduction d'oxygène et d'évolution d'hydrogène à l'interface acier/béton, indiquant l'influence de l'anode de zinc ajoutée comme protection cathodique au côté droit de la poutre sur l'évolution du taux de corrosion.

On déduit que l'impact de l'anode de zinc comme protection cathodique diffère en fonction de sa position sur la poutre en béton armée et de la saturation du béton.

5.4. Partie (III): La modélisation numérique couplée de la zone de transition(ITZ)

Dans cette partie les résultats de l'analyse du comportement d'une poutre en béton renforcée d'une seule barre soumise à la corrosion sont évalués.

Le modèle créé définit plus précisément le comportement de la zone de transition acier-béton (ITZ) sous l'influence des processus de corrosion électrochimique. Le développement de ce modèle vise à évaluer à temps le comportement mécanique de la poutre sous les effets électrochimiques, soulignant davantage l'importance de la modélisation des zones de transition dans l'évaluation des interactions entre les systèmes d'infrastructures multi-matériaux.

Les résultats de l'étude sont divisée en trois parties: (1) Analyse mécanique démontrant le comportement du béton sous un chargement appliqué uniformément sur la surface de la poutre en utilisant les modèles dés d'endommagement cités(Ottosen et Mazars) (2) Les résultats de l'analyse du processus électrochimique de la corrosion par une étude stationnaire (3) Les résultats de l'étude mécano-électrochimique par l'utilisation des techniques de couplage combinant l'impact de la corrosion sur le comportement mécanique de la zone de transition.

5.4.1. *Première partie (1) : analyse mécanique de la poutre*

Dans cette partie du déplacement de la surface supérieure de la poutre due à la charge extérieure appliquée est évaluée dans trois cas: (1)Poutre élastique sans barre d'acier (2)avec une barre d'acier utilisant Critère Ottosen (3) implémentation d'un modèle d'endommagent selon la théorie de Mazars.

La poutre en béton armé d'une seule barre en acier est soumise à:

1- Poids son poids propre.

2- une charge uniformément répartie sur la surface supérieure d'une valeur maximale de 50 kN/m.

Les résultat du déplacement des trois cas sont illustrés est comparée par les graphe de la figure (4.13).

- *Comparaison des déplacement selon les cas étudiés*

La courbe représentante le premier cas ou le modèle est modélisée comme un matériau élastique isotrope le comportement de poutre élastique sans barre d'acier affiche la plus grande flèche au chargement uniformément réparti.

L'effet de déformation plastique dans le béton est considéré dans ce modèle par une barre d'acier utilisant Critère Ottosen. La déformation plastique dans ce cas indique une faible déflexion.

la déflexion de la courbe représentant la déformation plastique selon le modèle d'Ottosen montre un déplacement moins important que le modèle élastique linéaire sans barres, affirmant comment la barre d'armature en acier reçoit la force transmise par le béton.

En comparant la flèche de déplacement du modèle pour les deux cas avec et sans barres, une légère différence est remarquée.

L'écart faible des deux déflexions est dû au petit diamètre de l'unique barre d'acier utilisés dans cette étude.

Étant donné que le diamètre de la barre d'armature est petit par rapport aux dimensions de la poutre en béton, la rigidité totale en flexion de l'ensemble de la section en béton n'est pas significativement affectée par la rigidité en flexion de la barre d'armature, pour cela la barre d'armature en acier est supposée être seulement capable de transmettre des forces axiales.

5.4.2. *Deuxième partie (2) : analyse électrochimique (étude stationnaire)*

Pour évaluer l'impact de la saturation du béton sur les paramètres du mécanisme de corrosion, le modèle est résolu pour le même intervalle de degré de saturation que le premier cas d'étude [20%,80 %]. Cette analyse porte sur quatre emplacements dans la zone de transition ITZ (milieu- gauche, devant, arrière et milieu-droit.

Les résultats démontrent l'évaluation du potentiel électrolytique, la diffusion et concentration d'oxygéné, l'évolution de l'hydrogène ainsi que la densité du courant de corrosion en fonction de la saturation du béton.

5.4.2.1. L'impacte de la saturation du béton sur le processus électrochimique de la corrosion

- *Potentiel opérationnel de l'électrode*

La vitesse de corrosion de la barre d'acier est contrôlée par le potentiel opérationnel de l'électrode,(la figure (4.15) chapitre 4) représente la valeur du potentiel de l'électrode dans des variantes Valeurs de saturation aux quatre points considérés sur l'acier. Les sites de l'ITZ qui manifestent des résultats sont (l'avant, le milieu droit et l'arrière), où l'on observe une baisse considérable du potentiel à un niveau PS de 65%. On conclut que pour un potentiel de corrosion donné, la vitesse de corrosion du béton sec est plus élevée que le béton humide. Une augmentation du potentiel de l'électrode engendre un faible taux de corrosion.

- *Concentration locale d'oxygène*

Les courbes de (la figure (4.16) Chapitre 4) sont associé à quatre points de mesure représentant la concentration locale en oxygène au niveau de la zone de transition (l'interface acier/béton) en fonction de la saturation du béton.

La diffusivité de l'oxygène diminue avec des niveaux de saturation plus élevés, ce qui réduit la concentration en oxygène. La présence d'oxygènes à l'interface de l'acier est un facteur important dans l'activation du processus de corrosion.

Les résultats montrent que la concentration en oxygène chut significativement vers un niveau de saturation de 80%, ce qui met en évidence le rôle important de l'oxygène dans les processus de corrosion électrochimique et son évaluation dans l'étude de la zone de transition dans les environnements corrosifs.

- *Densités de courant locales de réduction de l'oxygène*

La variation des densités locale de réduction de l'oxygène au niveau des quatre points étudiés de la zone de transition (ITZ) est illustrée à (la figure (4.17) chapitre 4).

La densité de courant de réduction d'oxygène est plus élevée à des niveaux de saturation variant de [20%, 45%]. Une baisse significative est constatée à un niveau de saturation de 45 %.

La faible diffusivité de l'oxygène dans des conditions de saturation élevée entraîne une réduction de la densité de courant due à la limitation du flux. Ceci indique que la densité de courant de réduction d'oxygène est optimale lorsque la conductivité électrolytique est élevée.

La saturation du béton a un effet significatif sur la diffusion de l'oxygène, entraînant une réduction significative de la concentration en oxygène, conduisant à des densités de courant plus faibles.

- *Le courant de densité local de l'évolution d'hydrogène*

Les courbes illustrant l'évolution de l'hydrogène au niveau de la zone de transition (la figure (4.18) chapitre 4), montre que l'évolution de l'hydrogène est limitée autour du zéro dans des faibles degrés de saturation jusqu'à ce qu'un niveau de saturation égale à 65% soit atteint. À partir de là, on estime qu'un niveau de saturation de 65% est le niveau dans lequel le potentiel d'électrode résultant de la différence de potentiel dans la zone de transition (ITZ) est inférieur au potentiel d'équilibre.

- *Densités de courant de corrosion de l'acier*

Les graphes illustrant les densités du courant de corrosion au niveau des points de la zone de transitions étudiées figure (4.19) chapitre 4) affichent un degré élevé de densités de courant de corrosion dans faibles niveaux de saturations.

À des niveaux de saturation élevés, une baisse significative a été observée, indiquant le lien significatif entre la saturation, la diffusion de l'oxygène et la résistance au transfert de masse. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la saturation du béton et de la résistance à la conductivité électrique.

On déduit que les vitesses de corrosion varient en raison des variations de la conductivité des électrolytes et le coefficient de diffusion de l'oxygène, qui sont à leur tour affecté par le degré de saturation du béton.

5.4.2.2. La déformation de l'ITZ sous le processus de corrosion

Dans des conditions normales, les armatures transmettent les forces appliquées au béton par adhérence entre les deux matériaux, augmentant la résistance à la flexion et à la compression des éléments en béton armé.

L'activité de la surface de l'acier est mesurée par le potentiel généré à l'interface due à la couche électrique formée par les réactions électrochimiques sur la surface de l'acier permettant un transfert de charge vers la zone de transition (ITZ) l'interface métal (électrode)/électrolyte (béton).

L'interface acier/béton perd de son adhérence au fur et à mesure que la corrosion progresse. Le diamètre de la barre d'armature diminue en raison de la perte de section transversale et le béton commence à se détériorer à l'interface autour de la barre d'armature au niveau de ITZ, cela explique le fort potentiel d'ITZ par rapport au centre de la barre d'acier.

L'analyse de l'évolution de la déformation de l'ITZ sous le processus électrochimique de la corrosion dans un cadre spatio-temporel est effectuée deux étapes de solveur: (1) Phase d'initialisation de courant en utilisant un solveur stationnaire pour résoudre le problème des potentiels séparément. (2) la dépendance du temps et inclus pour résoudre tout le problème pour une période de 10 ans.

- *Potentiel électrolytique et la déformation de la géométrie de l'ITZ*

Le potentiel électrolytique et la déformation de la géométrie de l'ITZ (la figure (4.20) chapitre 4) montre que la déformation majeure se produit au niveau la zone autour de la barre d'acier (l'ITZ), l'interface acier/béton affiche une potentille élevée, donc un degré significatif de déformation, dans la majorité de la surface du béton(l'électrolyte), une potentielle assez faible est noté comparé à la zone de transition.

- *Densité de courant de corrosion le long de la surface de l'électrolyte*

La cellule de corrosion a un électrolyte hautement conducteur, ce qui fait que les densités de courant de corrosion doivent être faibles. Les résultats de l'analyse de la densité de courant de corrosion le long de la surface du béton et de l'ITZ (la figure (4.21) chapitre 4) démontre que la chute de tension à travers la cellule de corrosion est directement proportionnelle au flux de courant selon la loi d'Ohm. Les concentrations les plus élevées sont observées dans l'ITZ autour de l'interface acier/béton.

Lorsque le courant traverse l'ITZ, le potentiel se déplace en raison des pertes ohmiques en fonction de la chute de tension à travers la cellule de corrosion. La réaction de corrosion de la barre d'acier passe de la phase passive à la phase active, ce qui entraîne des courants de corrosion plus élevés.

- *Déformation de L'ITZ sur une période de 10 ans*

Sous l'impact du processus de la corrosion une certaine déformation de la géométrie de l'interface acier/béton est observée (la figure (4.22) chapitre 4). Les résultats de la déformation de l'ITZ sur une période de 10 ans, aux différents instants considérés dans l'intervalle de temps de t=0 à t=10 ans, démontrent qu'en fonction du temps avec la formation de produits de corrosion la géométrie de l'ITZ subit un changement considérable ce qui entraîne la perte d'adhérence.

5.4.3. *Troisième partie (3): l'étude mécano-électrochimique*

Cette partie évalue l'effet des processus de corrosion électrochimique sur la tension induite par la charge appliquée

Les éléments infrastructuraux en béton armés sont constamment exposés à des sollicitations externes, ou des contraintes internes, la combinaison de cette action mécanique au processus électrochimique de corrosion, entraîne une accélération des réactions chimiques due à l`action mécanique ce qui a un impact significatif sur le taux de corrosion et le comportement mécanique des éléments structuraux.

Les résultats de l'analyse de la mécanique de la poutre sous l'impact de la corrosion comparent le comportement de la poutre dans deux conditions, (1) dans des conditions normales (sans corrosion); (2) dans des conditions de corrosion.

Le critère d'élasticité de Von Mises est utilisé pour la simulation élastoplastique une contrainte est appliquée uniformément sur le segment supérieur de la poutre.(Les figures (4.24) et (4.25) chapitre 4). Les résultats illustraient la répartition des contraintes dans des conditions normales et dans des conditions de corrosion, respectivement.

Lorsque des charges sont appliquées dans les deux cas, que ça soit dans des conditions normales ou sous l'impact de la corrosion les résultats sont convertis en contraintes de Von Mises au niveau de la zone de transition . Le niveau de contrainte de Von Mises est distribué symétriquement à l'interface acier-béton.

La magnitude de la contrainte dans le béton est minime du fait de l'absence de corrosion dans le premier cas. Dans le second cas, le niveau de contrainte est élevé en raison de l'effet mécano-électrochimique couplé. Bien que les contraintes dans les deux cas étudiés ne soient pas du même ordre de grandeur, leurs valeurs optimales se situent à des endroits similaires sur le plan ITZ autour de l'interface acier/béton.

La déformation de l'ITZ sous l'effet mécano-électrochimique couplé (effet combiné de l'action mécanique et des processus de corrosion électrochimique) est importante par rapport au premier cas, qui n'a subi que des contraintes mécaniques.

L’effet mécano-électrochimique couplé de la corrosion et la charge appliquée entrainent des endommagements importants, en accélérant le processus de dégradation des éléments structuraux en béton armé, ce qui réduit la durée de vie des infrastructures, la détermination de la capacité portante ultime des éléments structuraux, ainsi que la quantification du taux d'endommagement structura dus à la corrosion, et la prévision de la dégradation en fonction du temps, est une étape cruciale dans l'évaluation de la durabilité infrastructures

Conclusion générale

L’intérêt croissant porté sur les différends les approche modélisations conduites à proposer de nouveaux modèles numériques et analytiques pour prédire l’évolution processus de corrosion sur le plan spatio-temporel.

L'incertitude existe dans le caractère aléatoire des propriétés des matériaux utilisés dans la construction des ouvrages géotechniques, ainsi que dans la géométrie des éléments infrastructuraux et les contraintes mécaniques appliquées, ce qui nécessite l'utilisation des techniques de couplage dans les modèles numériques.

La corrosion des infrastructures se manifeste sous différentes formes, le processus complexe de la corrosion résulte de plusieurs mécanismes et interactions électrochimiques, ce dernier est principalement affecté par divers paramètres tels que les conditions du milieu environnant en contact avec la structure (teneur en eau, oxygène, le Ph, teneure en chlorures, le CO2...etc.), les propriétés des matériaux utilisés dans la construction des ouvrages géotechniques, les contraintes mécaniques appliquées.

Cette étude, nous conduits à déduire ces principales conclusions:

- La présence de barres d'armature prolonge la durée de vie des infrastructures en réduisant la déflexion des éléments en béton armé, par la réception des contraintes transférées au béton par les charges externes.
- Étant un phénomène surfacique la distribution de la corrosion en surface dépend de plusieurs facteurs pour comprendre le mécanisme de dégradation, une modélisation couplée est nécessaire pour avoir une prédiction plus précise afin d'optimiser la maintenance des ouvrages géotechniques.
- Les aléas et tous les facteurs affectant le comportement structurel, ainsi que les charges et la variabilité environnementales naturelles nécessitent l'utilisation de la méthode fiabiliste, l'implémentation de l'approche fiabiliste dans l’étude de la corrosion a démontré son rôle prometteur dans l'identification du caractère aléatoire des propriétés des matériaux, des géométries des éléments d'infrastructure, des contraintes internes et externes qui leur sont appliquées, et leur comportement dynamique dans le temps, qui ont un impact important sur le comportement des structures corrodées.
- Étant l'une des principales indicateur de des étendues dues dégrée de corrosion la perte isotrope de la section des armatures en acier à un impact significatif sur le déplacement global qui affecte le comportement des éléments structuraux au fil du temps. La déflexion de la poutre augmente en fonction du temps et la réduction linéaire de la section d'acier dû à la corrosion.

- La limite d'élasticité et la résistance ultime des éléments en béton armé ont tendance à diminuer avec l'augmentation du degré de corrosion en raison de la ductilité réduite due à la réduction de la section transversale des éléments en acier corrodés.
- Le taux de corrosion est principalement déterminé par la saturation du béton et sa densité de courant ainsi que sa conductivité. La densité de courant diminue principalement avec la diminution de la diffusivité de l'oxygène, qui est proportionnelle à la saturation du béton, a densité de courant de réduction de l'oxygène est à sa vitesse optimale pour une haute conductivité électrolytique. L'uniformité de la corrosion dépend de l'humidité relative du béton près de l'interface acier/béton. Des conditions sèches de béton (niveaux de saturation plus faibles) entraînent des taux de corrosion plus élevés que des conditions humides (niveaux de saturation plus élevés du béton.
- La diffusion d'oxygène à travers le réseau poreux du béton jusqu'à l'interface acier/béton a un impact significatif sur le processus de corrosion. La densité de courant de réduction d'oxygène est le taux optimal pour une conductivité électrolytique élevée.
- Il est très important d'intégrer l'hétérogénéité des matériaux tels que la porosité, la teneur en oxygène, la distribution non uniforme de la diffusivité de l'oxygène et le coefficient de diffusion de l'oxygène dans la création du modèle électrochimique.
- Une perspective détaillée des réactions électrochimiques impliquées dans les processus de corrosion combinés avec les contraintes mécaniques appliquées sur les éléments en béton armée dans diverses conditions est mise en évidence dans ce travail. Les ouvrages géotechniques sont constamment exposés à des contraintes internes et externes, la corrosion n'agit jamais seule, et les processus de corrosion s'accompagnent souvent d'action mécanique, ce qui augmente la complexité de l'analyse de cette attaque combinée, dans ce cas les techniques couplées de modélisation numérique deviennent un outil important pour prévoir les dégâts que peut engendrer la corrosion aux infrastructures au cours de leur vie de service.
- La zone de transition interfacial (ITZ) est la zone la plus faible manifestante les endommagent due à la corrosion. La migration de l'humidité du béton autour de la zone de transition acier/béton est un phénomène assez complexe qui a un impact important sur les niveaux de corrosion. La formation de produits de corrosion à l'interface béton/acier entraîne une perte d'adhérence entre les deux matériaux, fragilisant l'ITZ et réduisant sa capacité portante.
- Les taux de densité de courant optimaux sont observés à proximité de l`ITZ. L'intensité de la contrainte du béton est faible sans corrosion, et à l'état corrodé en raison de la combinaison du processus de corrosion et de la contrainte mécanique, le niveau de contrainte du béton augmente principalement dans la zone de transition.
- Ces résultats peuvent être utiles pour les chercheurs pour la conception des ouvrages géotechniques résistants. De plus, les techniques de modélisation numérique couplée sont une solution appropriée pour cerner l'effet mécano-électrochimique de la combinaison du

processus électrochimique de la corrosion, ainsi que les contraintes mécaniques appliqué aux éléments structuraux des ouvrages géotechniques, pour but de prédire le scénario de la corrosion dans différents environnements sous des conditions variables pour obtenir une maintenance plus appropriée des ouvrages géotechniques, et amélioraient leurs performances au cours de leur vie de service.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Fujimoto, S.(2014).Numerical modeling for corrosion," The Electrochemical Society Interface. 23: 45.

[2] Chen, Y., Huang, H., Zhang, Y., Wang, C.,Fan, W.(2018) .A method of atmospheric corrosion prediction for aircraft structure. Materials and Corrosion. 70:79–90.

[3] Meterfi, Y. Trouzine, H., Houmadi, Y.(2022).Corroded RC Beam Behavior Subjected to Random Loading in Various Pore Saturation Levels : Coupled Numerical Analysis. Science des Matériaux. 46: 173–183.

[4] Taylor, C. D.(2015).Corrosion informatics: An integrated approach to modelling corrosion. Corrosion Engineering, Science and Technology,50: 490–508.

[5] Broomfield, J. P.(2007). Corrosion of Steel in Concrete :understanding investigation and repair .2nd Edition. 270 Madison Ave, New York, NY 10016: Taylor & Francis e-Library.

[6] Bréchet, Y., Charle, J.(2014).La corrosion des métaux Passivité et corrosion localisée. Dunod, Paris.

[7] Cheung, M. M. S., Zhao, J. , Chan, Y. B. (2009).Service Life Prediction of RC Bridge Structures Exposed to Chloride Environments. Journal of bridge engineering ,164–178.

[8] Oguzie, E. E., Li, Y., Wang, G., Wang, F.(2011).Understanding corrosion inhibition mechanisms -experimental and theoretical approach. RSC Advances,1: 866–873.

[9] 8044 ISO.(2015). International Standard ISO Corrosion of metals and alloys.

[10] CSTC(2006), Les Dossiers du CSTC ;Cahier n° 6 ;L'acier dans la construction Partie 1 : Corrosivité des milieux et nuances d'acier.

[11] Cresson R., Gudin, T., Tache, G.(1998). Catalogue des produits du bâtiment.Corrosion et protection des métaux dans le bâtiment. cated.

[12] Marcus,P.,Mansfeld, F.B. (2006). Analytical Methods in corrosion science and engineering. Taylor & Francis

[13] Richard, B.(2010).Modélisation d ' éléments de structure en béton armé dégradés par corrosion : la problématique de l ' interface acier / béton en présence de corrosion. Université Paris-Est.

[14] Groysman, A.(2010). Corrosion for everybody. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

[15] Zhu, X. , Zi, G., Cao, Z., Cheng, X. (2016).Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. Construction and Building Materials, 110: 369–380.

[16] Cao,C., Cheung, M. M. S., Chan, B. Y. B.(2013).Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate. Corrosion Science, 69: 97–109.

[17] Du, X., Jin L.(2014). Meso-scale numerical investigation on cracking of cover concrete induced by corrosion of reinforcing steel. Engineering Failure Analysis, 39: 21–33

[18] Hawchar, L.(2017).Développement de méthodes fiabilistes dépendant du temps pour l'analyse de durabilité des structures Application au problème de conception fiabiliste dépendant du temps. Département de Génie Civil , Université de Nantes,France.

[19] Wu, K., Mosleh, A.(2019).Effect of temporal variability of operating parameters in corrosion modelling for natural gas pipelines subject to uniform corrosion. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 69: 102930.

[20] Larignon, C. (2011).Mécanismes d'endommagement par corrosion et vieillissement microstructural d'éléments de structure d'aéronef en alliage d'aluminium 2024-T351. Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

[21] Helie,M. Materiaux metalliques phenomenes de corrosion. Département Sciences des Matériaux, Université d'Evry - Val d'Essonne,France

[22] Obot, I. B. (2014).Recent Advances in Computational Design of Organic Materials for Corrosion Protection of Steel in Aqueous Media.

[23] Schweitzer, P. A.(2010). Fundamentals of Corrosion Mechanisms, Causes, and Preventative Methods. Taylor & Francis.

[24] Ployhar, S. J., Gopalapillai,B., Teodoros,L.C., Orco, G. D.,Kumar, A.,Gupta, D.,Patel, N.,Jadhav, M.ahesh A.(2015). ITER components cooling: Satisfying the distinct needs of systems and components. Fusion Engineering and Design, 0–4.

[25] Zhao, Y., Xu, X., Wang, Y., Dong, J.(2019).Characteristics of pitting corrosion in an existing reinforced concrete beam exposed to marine environment. Construction and Building Materials, 234: 117392.

[26] Xiang, Y., Li,C., Hesitao,W., Long, Z., Yan, W.(2018). Understanding the pitting corrosion mechanism of pipeline steel in an impure supercritical CO2 environment. The Journal of Supercritical Fluids.

[27] Makhlouf,A.S.H.,Botello, M.A.(2018). Failure of the metallic structures due to microbiologically induced corrosion and the techniques for protection. Handbook of Materials Failure Analysis, 1-18.

[28] Zeng, Y.,Gaskey, B.,Benn, E.,Mccue, I.,Greenidge, G.,Livi, K.,Zhang, X.,Jiang, J.,Elebacher, J. (2019). Electrochemical dealloying with simultaneous phase separation. Acta Materialia, 171: 8–17.

[29] Mccue, I., Benn,E., Gaskey, B. , Erlebacher, J. (2016). Dealloying and Dealloyed Materials. Annual Review of Materials Research,46: 1–24.

[30] Wang, H., Han,E.(2013).Simulation of metastable corrosion pit development under mechanical stress. Electrochimica Acta, 90:128–134.

[31] Grimault,B.(2011).Evaluation vis-à-vis de la corrosion sous contrainte et de la fragilisation par hydrogène de l'emploi de câbles de précontrainte en acier inoxydable. École doctorale Sciences Pour l'Ingénieur Géosciences Architecture, Nantes, France.

[32] Katini, M., Gelo, I., Damjanovi,D.(2019).Corrosion fatigue failure of steam turbine moving blades : A case study. Engineering Failure Analysis, 106: 104136.

[33] Wu, J., . Diao, B., Xu,J., Zhang,R. , Zhang, W.(2019).Effects of the reinforcement ratio and chloride corrosion on the fatigue behavior of RC beams. International Journal of Fatigue, 105299.

[34] Liu, F., Zhou, J.(2018).Experimental Research on Fatigue Damage of Reinforced Concrete Rectangular Beam. KSCE Journal of Civil Engineering , 22(9): 3512–3513.

[35] Kip, N., Veen, J. A. V.(2014).The dual role of microbes in corrosion. The ISME Journal, 1–10.

[36] Cai, A. Y., Zhao, Y., Ma, X., Zhou, K. (2018).Influence of environmental factors on atmospheric corrosion in dynamic environment. Corrosion Science, 137:163-175.

[37] Song, Y. S. Ã, L., Zhao, G.(2004).Factors affecting corrosion and approaches for improving durability of ocean reinforced concrete structures. Ocean Engineering, 31: 779–789.

[38] FARÍAS, J. P. (2015). Corrosion of steel in cracked concrete chloride microanalysis and service life predictions. Ph.D. dissertation. Civil Engineering, Delft University of Technology, Monterrey, México.

[39] Ho, D.W.S., Lewis, R.K. (1987).Carbonation of concrete and its prediction. Cement and Concrete Research ,17: 489–504.

[40] Otieno, M., Ikotun,J. , Ballim, Y. (2019).Experimental investigations on the influence of cover depth and concrete quality on time to cover cracking due to carbonation-induced corrosion of steel in RC structures in an urban, inland environment. Construction and Building Materials, 198: 172–181.

[41] MAI-NHU, J.(2015).Corrosion des armatures :intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi durant la vie de l'ouvrage. Études et Recherches - Cerib.

[42] Hussain,R. R., Ishida, T., Wasim, M. (2011).Experimental investigation of time dependent non-linear 3D relationship between critical carbonation depth and corrosion of steel in carbonated concrete. Corrosion Engineering, Science and Technology, 46(5).

[43] Anstice, D. J., Page, C. L. , Page, M. M.(2005). The pore solution phase of carbonated cement pastes. Cement and Concrete Research ,35: 377–383.

[44] Ramezanianpour, A. A., Ghahari,S. A., Esmaeili, M.(2014).Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials, 58: 138–146.

[45] Chi, J. M., Huang, R., Yang, C. C.(2002).Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. Journal of Marine Science and Technology, 10(1):14–20.

[46] Dias,W. P. S.(2000).Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation. Cement and Concrete Research, 30(8) :1255–1261.

[47] Thomas, D. S., Aurela, S., Frederik, V.(2014).Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars. 9th International Masonry Conference, Guimarães,1–12.

[48] Belda, A., Weerdt, K.D., Hornbostel, K., Rica, M.(2018).Carbonation-induced corrosion : Investigation of the corrosion onset. Construction and Building Materials, 162: 847–856.

[49] Techniques de l'ingénieur - La corrosion des aciers-Techniques du bâtiment : l'enveloppe du bâtiment. https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaitre-les-materiaux-de-la-construction-43804210/la-corrosion-des-aciers-tba1054/(2004).

[50] Shi, J., Ming, J., Sun, W., Zhang,Y.(2017).Corrosion performance of reinforcing steel in concrete under simultaneous flexural load and chlorides attack. Construction and Building Materials, 149: 315–326.

[51] Glass, G. K., Buenfeld, N. R.(1997).The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. Corrosion Science. 39 (5): 1001–1013.

[52] Beatriz, M.P.(1999).Service life modelling of RC highway structures exposed to chlorides. Ph.D. dissertation. Department of Civil Engineering, University of Toronto.

[53] Shen, X. h., Liu, Q.f., Hu, Z., Jiang, W. q., Lin, X., Hou, D., Hao, P.(2019).Combine ingress of chloride and carbonation in marine-exposed concrete under unsaturated environment: A numerical study. Ocean Engineering,189:106350.

[54] Geng, J., Easterbrook, D., Liu, Q. F., Li, L. Y.(2016). Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete. Magazine of Concrete Research,68(7): 353–363.

[55] Li,K., Zhang, Y., Wang, S., Zeng, J.(2018). Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application. Materials and Structures, 51(6): 1–15.

[56] Wagner C.(1965).Passivity and inhibition during the oxidation of metals at elevated temperatures. Corrosion Science,5(11):751–764.

[57] Burstein, G. T., Sazou,D.(2016). Passivity and Localized Corrosion. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 1-43.

[58] Liu, G., Zhang,Y., Wu,M., Huang,R.(2017).Study of depassivation of carbon steel in simulated concrete pore solution using different equivalent circuits. Construction and Building Materials, 157:357–362.

[59] Ghods, P., Isgor, O. B., McRae, G. A., Gu, G. P.(2010).Electrochemical investigation of chloride-induced depassivation of black steel rebar under simulated service conditions. Corrosion Science,52(5):1649–1659.

[60] Lopez-Calvo, H. Z., Montes-García, P., Jiménez-Quero, V. G. , Gómez-Barranco, H., Bremner, T. W., Thomas, M. D. A.(2018).Influence of crack width, cover depth and concrete quality on corrosion of steel in HPC containing corrosion inhibiting admixtures and fly ash. Cement and Concrete Composites,88: 200–210.

[61] Ye, H., Tian, Y., Jin, N., Jin, X., Fu,C.(2013). Influence of cracking on chloride diffusivity and moisture influential depth in concrete subjected to simulated environmental conditions. Construction and Building Materials, 47: 66–79.

[62] Otieno, M., Beushausen, H., Alexander, M.(2016).Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete - Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. Cement and Concrete Research,79:373–385.

[63] Suganya, S., Jeyalakshmi, R., Rajamane, N. P.(2017).Corrosion behavior of mild steel in an in-situ and ex- situ soil. Materials Today: Proceedings, 5(2): 8735–8743.

[64] Gadala, I. M., Abdel Wahab, M., Alfantazi, A.(2016).Numerical simulations of soil physicochemistry and aeration influences on the external corrosion and cathodic protection design of buried pipeline steels. Materials & Design, 97: 287–299.

[65] Zhang, Y., DesRoches, R., Tien, I.(2019).Impact of corrosion on risk assessment of shear-critical and short lap-spliced bridges. Engineering Structures, 189: 260–271.

[66] Coccia, S., Imperatore, S., Rinaldi, Z.(2016).Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete. Materials and Structures, 49(1–2):537–551.

[67] Lundgren, K.(2002).Modelling the effect of corrosion on bond in reinforced concrete. Magazine of Concrete Research, 54(3):165–173.

[68] Li, L., Mahmoodian, M., Li, C. Q. (2018). Effect of corrosion on mechanical properties of steel bridge elements. Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges. 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, 1783–1790.

[69] Garbatov, Y., Guedes Soares, C., Parunov, J., Kodvanj, J.(2014).Tensile strength assessment of corroded small scale specimens. Corrosion Science, 85: 296–303.

[70] Meziani, F., Kahil, A., Gabi, S., Boutiba, A.(2012).Méthodes de protection contre la corrosion des ouvrages portuaires de génie civil. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil : 741–748.

[71] Leleyter, L., Rousseau, C., Gil, O., Baraud, F.(2007). Répartition des métaux lourds dans les différentes fractions des sédiments marins : influence de la protection cathodique. Comptes Rendus. Géoscience,339(1): 31–39.

[72] Buchheit, R. G.(2018). Corrosion resistant coatings and paints. Handbook of Environmental Degradation Of Materials: Third Edition, Elsevier Inc.

[73] Abd El-Lateef, H. M., Abbasov, V. M., Aliyeva, L. I., Ismayilov, T. A.(2012). Corrosion Protection of Steel Pipelines Against CO 2 Corrosion-A Review. Chemistry Journal,02(02): 52–63.

[74] Hoche, H., Pusch, C., Oechsner, M.(2020). Corrosion and Wear Protection of Mild Steel Substrates by Innovative PVD Coatings. Surface and Coatings Technology, 125659.

[75] Baghdachi, J.(2009). Smart coatings. ACS Symposium Series, 1002: 3–24.

[76] Brady, R. F.(2007).Twenty-First Century Materials: Coatings That Interact with Their Environment. ACS Symposium Series; American Chemical Society, 3–11.

[77] Zarras P., Stenger-Smith, J. D.(2015). Smart Inorganic and Organic Pretreatment Coatings for the Inhibition of Corrosion on Metals/Alloys. Intelligent Coatings for Corrosion Control, Elsevier Inc.

[78] Sathiyanarayanan, S., Azim, S. S., Venkatachari, G.(2007). A new corrosion protection coating with polyaniline – TiO 2 composite for steel. Electrochimica Acta, 52: 2068–2074.

[79] Ramezanzadeh,B., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, M.(2018).Polyaniline-cerium oxide (PAni-CeO2) coated graphene oxide for enhancement of epoxy coating corrosion protection performance on mild steel. Corrosion Science, 137:111-126

[80] Hihara, L. H.(2015). Electrochemical Aspects of Corrosion-Control Coatings. Elsevier Inc.

[81] Phoon, K. K.(2008). Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering. Taylor & Francis

[82] Hawchar, L.(2017) Développement de méthodes fiabilistes dépendant du temps pour l'analyse de durabilité des structures. (GeM-UMR 6183), Université de Nantes.

[83] Haldar A., Mahadevan, S.,(2000).Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design. John Wiley & Son, 77(5): 379–379.

[84] Wang, Z., Wang, P.(2013). A new approach for reliability analysis with time-variant performance characteristics. Reliability Engineering & System Safety,115: 70–81.

[85] Sudret, B.(2008).Analytical derivation of the outcrossing rate in time-variant reliability problems Analytical derivation of the outcrossing rate in time-variant reliability problems. Structure and Infrastructure Engineering, 4, (5):353–62.

[86] Sudret, B.(2008).Analytical derivation of the outcrossing rate in time-variant reliability problems Analytical derivation of the outcrossing rate in time-variant reliability problems. Structure and Infrastructure Engineering, 4, (5):353–62.

[87] Wang,P.(2016). A Generalized Complementary Intersection Method (GCIM) for System Reliability Analysis. Journal of Mechanical Design, 133: 1–13.

[88] Xiao, Z., Lü, Q., Zheng, J., Liu, J., Ji, J.(2020). Conditional probability-based system reliability analysis for geotechnical problems. Computers and Geotechnics, 126: 103751.

[89] Andrieu-renaud, C., Sudret, B., Lemaire, M.(2004). The PHI2 method : a way to compute time-variant reliability. Reliability Engineering and System Safety 84(1):75–86.

[90] Du, W., Luo, Y., Wang, Y.(2019).Time-variant reliability analysis using the parallel subset simulation. Reliability Engineering & System Safety,182: 250–257.

[91] Hawchar, L., El Soueidy, C. P., Schoefs, F.(2018).Global kriging surrogate modeling for general time-variant reliability-based design optimization problems. Structural and Multidisciplinary Optimization, 58(3): 955–968.

[92] Andrieu-Renaud, C., Sudret, B., Lemaire, M.(2004). The PHI2 method : a way to compute time-variant reliability. Reliability Engineering & System Safety, 84: 75–86.

[93] Hawchar,L., Soueidy, C. E. L., Schoefs, F.(2016).Analyse de fiabilité dépendante du temps par chaos polynomial et processus stochastiques non gaussiens et non stationnaires. JFMS 2016, 1–7.

[94] Hawchar, L., El Soueidy, C.(2015). Time-Variant Reliability Analysis using Polynomial Chaos Expansion. in 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12 Vancouver, Canada.

[95] Rice, S. O.(1944). Mathematical Analysis of Random Noise. The Bell System Technical Journal, 23(3): 282–332.

[96] Lutes, L. D., Sarkani, S.(2009). Reliability Analysis of Systems Subject to First-Passage Failure. NASA Center for AeroSpace Information. Langley Research Center Hampton, Virginia.

[97] Singh, A., Mourelatos, Z. P., Li, J.(2010). Design for Lifecycle Cost Using Time-Dependent Reliability. Journal of Mechanical Design, 132(9):091008.

[98] Zuev, K. M., Beck, J. L., Au, S., Katafygiotis, L. S.(2012).Bayesian post-processor and other enhancements of Subset Simulation for estimating failure probabilities in high dimensions. Computers & Structure., 92–93: 283–296.

[99] Hu, Z., Du, X.(2013).Time-dependent reliability analysis with joint upcrossing rates. Structural and Multidisciplinary Optimization, 48: 893–907.

[100] Hu, Z., Du, X. (2015). Mixed Efficient Global Optimization for Time- Dependent Reliability Analysis. Journal of Mechanical Design, 137(5): 051401.

[101] Wang, Z., Chen, W.(2017).Confidence-based adaptive extreme response surface for time-variant reliability analysis under random excitation. Structural Safety , 64: 76–86.

[102] Yang, Z., Cao, Z., Feng, X., Li, D., Au, S.(2017). Robustness of Subset Simulation to Functional Forms of Limit State Functions in System Reliability Analysis : Revisiting and Improvement. IEEE Transactions on Reliability ,99:1-13 .

[103] Lu, H., Kim, E., Gutierrez, M.(2019). Monte Carlo simulation (MCS)-based uncertainty analysis of rock mass quality Q in underground construction. Tunnelling and Underground Space Technology, 94: 103089.

[104] Cai, M.(2011).Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and cavern design. Rock Mechanics and Rock Engineering, 44(4): 379–399.

[105] Au, S., Beck, J. L.(2001). Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation. Probabilistic engineering mechanics, 16: 263–277.

[106] Li, D., Shao, K., Cao, Z., Tang, X., Phoon, K.(2016). A generalized surrogate response aided-subset simulation approach for efficient geotechnical reliability-based design. Computers and Geotechnics, 74: 88–101.

[107] Li, H. S., Ma,Y. Z., Cao, Z.(2014).Subset Simulation for Reliability Assessment of Multiple Stochastic Responses. Vulnerability, Uncertainty, and Risk,19(1):91–97.

[108] Chen,F., Wang, L., Zhang, W.(2019). Reliability assessment on stability of tunnelling perpendicularly beneath an existing tunnel considering spatial variabilities of rock mass properties. Tunnelling and Underground Space Technology, 88: 276–289.

[109] Li, D. Q., Jiang, S. H., Cao, Z. J., Zhou, W., Zhou, C. B., Zhang, L. M.(2015). A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties. Engineering Geology, 187: 60–72.

[110] Zhang, W. G., Goh, A. T. C.(2015).Regression models for estimating ultimate and serviceability limit states of underground rock caverns. Eng. Engineering Geology, 188:68–76.

[111] Ji, J., Zhang, C., Gui, Y., Lü, Q., Kodikara, J.(2017).New Observations on the Application of LS-SVM in Slope System Reliability Analysis. Journal of Computing in Civil Engineering, 31 (2): 1–9.

[112] Wang, L., Tang, L., Wang, Z., Liu, H., Zhang, W.(2020).Probabilistic characterization of the soil-water retention curve and hydraulic conductivity and its application to slope reliability analysis. Computers and Geotechnics, 121: 103460.

[113] Wang, L., Wu, C., Tang, L., Zhang, W., Lacasse, S., Liu, H., Gao, L. (2020). Efficient reliability analysis of earth dam slope stability using extreme gradient boosting method. Acta Geotechnica, 15(11):3135 - 3150.

[114] Mishra, M., Gunturi, V. R., Miranda, T. F. D. S.(2019).Slope stability analysis using recent metaheuristic techniques: a comprehensive survey. SN Applied Sciences, 1(12) .

[115] Lü, Q., Xiao, Z. P., Ji, J., Zheng, J.(2017). Reliability based design optimization for a rock tunnel support system with multiple failure modes using response surface method. Tunnelling and Underground Space Technology, 70: 1–10.

[116] Martínez-Rojas, M., Marin, N., Amparo Vila, M.(2012).The Role of Information Technologies to Address Data Handling in Construction Project Management. Journal of Computing in Civil Engineering, 30(4):1–11.

[117] X. Li, X. Li, and Y. Su, "A hybrid approach combining uniform design and support vector machine to probabilistic tunnel stability assessment," *Struct. Saf.*, vol. 61, pp. 22–42, 2016. Li, X., Li, X., Su, Y.(2016). A hybrid approach combining uniform design and support vector machine to probabilistic tunnel stability assessment. Structural Safety, 61: 22–42.

[118] Bhardwaj,U., Teixeira, A. P., Guedes Soares, C.(2020).Uncertainty in reliability of thick high strength pipelines with corrosion defects subjected to internal pressure. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 188: 104170.

[119] Bisaggio, H. D. C., Netto, T. A.(2015). Predictive analyses of the integrity of corroded pipelines based on concepts of structural reliability and Bayesian inference. Marine Structures, 41: 180–199.

[120] Gong, C., Zhou, W.(2018). Importance sampling-based system reliability analysis of corroding pipelines considering multiple failure modes. Reliability Engineering & System Safety, 169: 199–208.

[121] Khan, L. R., Tee, K. F.(2016). Risk-cost optimization of buried pipelines using subset simulation. Journal of Infrastructure Systems, 22(2).

[122] Koch, G., Ayello, F., Khare, V., Sridhar, N., Moosavi, A.(2015). Corrosion threat assessment of crude oil flow lines using bayesian network model. Corrosion Engineering, Science and Technology,50(3): 236–247.

[123] Mahmoodian, M., Li, C. Q.(2017).Failure assessment and safe life prediction of corroded oil and gas pipelines. Journal of Petroleum Science and Engineering, 151: 434–438.

[124] Roubos, A. A., Allaix, D. L., Schweckendiek, T., Steenbergen, R. D. J. M., Jonkman, S. N.(2020). Time-dependent reliability analysis of service-proven quay walls subject to corrosion-induced degradation. Reliability Engineering & System Safety, 203: 107085.

[125] Chaves, I. A., Melchers, R. E., Peng, L., Stewart, M. G.(2016).Probabilistic remaining life estimation for deteriorating steel marine infrastructure under global warming and nutrient pollution. Ocean Engineering, 126: 129–137.

[126] Markert, B.(2013).A survey of selected coupled multifield problems in computational mechanics. Journal of Coupled Systems and Multiscale Dynamics, 1(1): 22–48.

[127] Ožbolt, J., Balabanić, G., Kušter, M.(2011). 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. Corrosion Science, 53(12): 4166–4177.

[128] Kelly, R., Plaseied, A.(2017). Numerical Modeling of Corrosion and Cathodic Protection for Reclamation Water Storage and Conveyance Infrastructure. Technical Memorandum No. 8540-2017-027.

[129] Keyes D. E., Mcinnes, L.C., Woodward, C., Gropp, W., Myra, E., Pernice, M., Bell, J., Brown, J., Clo, A., Connors, J., Constantinescu, E., Estep, D., Evans, K., Farhat, C., Hakim, A., Hammond, G., Hansen, G., Hill, J., Isaac, T., Jiao, X., Kaushik, D., Kaxiras, E., Koniges, A. Lee, K., Lott, A., Lu, Q., Magerlein, J., Maxwell, R., McCourt, M., Mehl, M., Pawlowski, R., Randles, A. P., Reynolds, D., Rivière, B., Rüde, U., Scheibe, T., Shadid, J., Sheehan, B.,

Shephard, M., Siegel, A., Smith, B., Tang, X., Wilson, C., Wohlmuth, B.(2013). Multiphysics simulations: Challenges and opportunities International Journal of High Performance Computing Applications.27(1):4–83.

[130] Felippa, C. A., Park, K. C., Farhat, C.(2001). Partitioned analysis of coupled mechanical systems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 190(24–25):3247–3270.

[131] Gutman, E. M.(1994). Mechanochemistry of Solid Surfaces. World Scientific Publication, Singapore.

[132] Bogdanov, R. I., Unigovski, Y. B., Gutman, E. M., Ryakhovskikh, I. V. Shneck, R. Z.(2019). Stress corrosion cracking of pipeline steels in near-neutral pH solutions: The role of mechanochemical and chemomechanical effects. AIMS Materials Science, 6(6): 1065–1085.

[133] Gunasegaram, D. R., Venkatraman, M. S., Cole, I. S.(2014). Towards multiscale modelling of localized corrosion. International Materials Reviews, 59(2):84–114.

[134] Houmadi, Y.(2011). Prise en compte de la variabilité spatiale des paramètres géotechniques. uiversité aboubekr belkaid Tlemcen.

[135] Hagen, O., Tvedt, L.(1991).Vector process out-crossing as parallel system sensitivity measure. Journal of Engineering Mechanics,117(10):2201-2220.

[136] Mejri, M., Cazuguel, M., Cognard, J. Y.(2011).A time-variant reliability approach for ageing marine structures with non-linear behaviour. Computers & Structures, 89(19–20):1743–1753.

[137] Yan, M., Sun, B., Liao, B., Ren, Y., Yao, J., Wei, M. (2018).FORM and Out-Crossing Combined Time-Variant Reliability Analysis Method for Ship Structures. IEEE Access, 6: 9723–9732.

[138] Singh, A., Mourelatos, Z. P., Nikolaidis, E.(2011). An Importance Sampling Approach for Time-Dependent Reliability. Proceedings of the ASME 2011, IDETC/CIE, Washington, DC, USA: 1077–1088.

[139] Zhang, G., Zhu, Y., Lin, X., Tian, Y., Ye, H., Jin, X., Jin, N., Yan, D., Xiao, F., Yao, K., Chen, J. (2021). Numerical simulation of electrochemical mechanism of steel rebar corrosion in concrete under natural climate with time-varying temperature and humidity. Construction and Building Materials, 306:124873.

[140] Yan, X., Wang, Y., Du, Q., Jiang, W., Shang, F., Li, R.(2019). Research progress on factors affecting oxygen corrosion and countermeasures in oilfield development. E3S Web of Conferences, 131.

[141] Muehlenkamp, E. B., Koretsky, M. D., Westall, J. C.(2005). Effect of moisture on the spatial uniformity of cathodic protection of steel in reinforced concrete. Corrosion, 61(6): 519–533.

[142] Luchetti, M.(2020). From successful measurement to the birth of a law: Disentangling coordination in Ohm's scientific practice. Studies in History and Philosophy of Science, 84: 119–131.

[143] Zhang, W., Chen, J. Luo, X.(2019). Effects of impressed current density on corrosion induced cracking of concrete cover. Construction and Building Materials, 204: 213–223.

[144] Mazars, J.(1986). A description of micro- and macroscale damage of concrete structures. Engineering Fracture Mechanics, 25: 729–737.

[145] Mazars, J., Hamon, F., Grange, S.(2015). A new 3D damage model for concrete under monotonic , cyclic and dynamic loadings. Materials and Structures,48: 3779–3793.

[146] Sohail, M. G.(2019).Corrosion of Steel in Concrete: development of an Accelerated Test by Carbonation and Galvanic Coupling. Université Toulouse III-Paul Sabatier.

[147] Goyal, A., Olorunnipa, E. K., . Pouya, H. S., Ganjian, E., Olubanwo, A. O.(2020). Potential and current distribution across different layers of reinforcement in reinforced concrete cathodic protection system- A numerical study. Construction and Building Materials, 262:120580.

ANNEXES

valorisation scientifique