

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master  
Domaine : Sciences et Technologies  
Filière : Travaux Publics  
Spécialité : Voies et Ouvrage d'art  
Thème

**Utilisation de la méthode des réseaux de neurones artificiels pour la  
prédiction du potentiel de corrosion**

**Présenté Par :**

Melle. LAGHA Imane

**Devant le jury composé de :**

Mm .DOUNANE Nawel

MAB UAT.B.B (Ain Temouchent) Président

Mr . AISSA MAMOUNE Sidi Mohammed

Pr UAT.B.B (Ain Temouchent ) Examineur

Mm.CHERIFI Wafa Nor El Houda

MCB UAT.B.B (Ain Temouchent ) Encadrant

*Année Universitaire 2023/2024*

# Remerciement

Cette thèse a pu être réalisée grâce à l'aide précieuse de plusieurs personnes, à qui je tiens à exprimer toute ma gratitude.

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la force de mener à bien ce travail.

Après cela, je voudrais exprimer ma gratitude à Mme CHERIFI W. N.H. pour son encadrement efficace, son soutien et sa disponibilité. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie également toute l'équipe du Laboratoire de Génie Civil de l'Université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent, en particulier M. KADDOU .A, dont je partage le quotidien avec un grand plaisir.

J'exprime ma profonde gratitude à Mr. AISSA MAMOUNE .S.M, Professeur à l'Université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent, et à Mme DOUNANE.N pour avoir accepté de présider le jury chargé d'étudier cette thèse.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à l'élaboration de cette thèse, ainsi que ceux qui ont répondu à mes questions. Ils trouvent ici l'expression de mon profond respect et de mon appréciation.



## DÉDICACE



*Chaque début a une fin, et la beauté réside dans l'accomplissement des objectifs.*

*Je prends un moment pour exprimer ma profonde gratitude envers chacun de vous alors que je marque cette étape importante de ma vie académique. Mon parcours universitaire n'aurait pas été possible sans le soutien insassable et l'amour constant de ma famille, en particulier de ma mère bien-aimée, qui n'est malheureusement plus parmi nous. C'est à elle que je dédie ce succès, car c'était aussi son rêve de me voir accomplir de grandes choses. Son esprit continue de m'inspirer chaque jour.*

*Maman, tu es et seras toujours présente dans mon cœur et dans mes pensées. Chacun de mes pas est guidé par ton amour et ton exemple.*

*À mon cher père, mon pilier et mon plus grand soutien, je te remercie du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi.*

*À mes frères et sœurs, qui ont été mes compagnons de route, je vous suis reconnaissant pour votre soutien constant et votre présence réconfortante. Votre encouragement et votre soutien ont été la lumière qui a éclairé mon chemin.*

*À mes amis, qui ont partagé mes joies, mes peines et mes succès. Votre amitié est un trésor que je chérirai toujours. à tous ceux que j'aime.*

*Imane*

# Résumé

La prévention de la corrosion dans les structures en béton armé est un défi majeur pour l'industrie de la construction. L'utilisation de méthodes non destructives telles que Canin+ a représenté une avancée significative pour évaluer l'intégrité structurelle. Cependant, la prédiction précise du potentiel de corrosion reste un objectif crucial pour assurer la durabilité des infrastructures.

Bien que les méthodes non destructives aient progressé, prédire la corrosion demeure un défi en raison de sa complexité. Les modèles mathématiques traditionnels ne saisissent pas toujours les interactions complexes impliquées. Ainsi, des approches plus élaborées sont nécessaires pour une prédiction précise du potentiel de corrosion dans les structures en béton armé.

Cette recherche, menée au laboratoire de Génie Civil et Travaux Publics de l'université de Aïn Témouchent, a développé plusieurs dispositifs d'essais pour évaluer le risque de corrosion, notamment à travers des méthodes non destructives comme Canin+ sur des échantillons de béton à l'état durci.

Les données expérimentales sur le potentiel de corrosion ont été soumises à une analyse statistique, notamment à l'aide de la régression linéaire multiple, pour évaluer leur fiabilité. Par la suite, les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été exploités pour élaborer un modèle visant à prédire le potentiel de corrosion des armatures dans les échantillons de béton. Le modèle basé sur les réseaux neuronaux artificiels parvient à prédire le potentiel de corrosion avec un niveau de précision satisfaisant.

**Mot clés :** Durabilité , corrosion , les ions chlorure, béton armé, Canin+ , prédiction, les réseaux de neurone artificiels .

# Abstract

Preventing corrosion in reinforced concrete structures is a major challenge for the construction industry. The use of non-destructive methods such as Canin+ has marked a significant advancement in assessing structural integrity. However, accurately predicting corrosion potential remains a crucial goal to ensure the durability of infrastructures.

Although non-destructive methods have made progress, predicting corrosion remains challenging due to its complexity. Traditional mathematical models do not always capture the intricate interactions involved. Therefore, more sophisticated approaches are needed for precise prediction of corrosion potential in reinforced concrete structures.

This research, conducted at the Civil Engineering and Public Works Laboratory of Aïn Témouchent University, developed several test devices to evaluate the risk of corrosion, notably through non-destructive methods like Canin+ on hardened concrete samples.

Experimental data on corrosion potential were subjected to statistical analysis, including multiple linear regression, to assess their reliability. Subsequently, artificial neural networks (ANNs) were utilized to develop a model aimed at predicting the corrosion potential of reinforcements in concrete samples. The model based on artificial neural networks successfully predicts corrosion potential with a satisfactory level of accuracy.

**Keywords :** Durability, corrosion, chloride ions, reinforced concrete, Canin+, prediction, artificial neural networks

## ملخص

يعد منع التآكل في هياكل الخرسانة المسلحة تحدياً كبيراً لصناعة البناء والتشييد. لقد مثل استخدام الأساليب غير المدمرة مثل +Canin تقدماً كبيراً في تقييم السلامة الهيكلية. ومع ذلك، تظل التنبؤ الدقيق بإمكانيات التآكل هدفاً حاسماً لضمان متانة البيئة التحتية.

على الرغم من تقدم الأساليب غير المدمرة، لا يزال التنبؤ بالتآكل يمثل تحدياً نظراً لتعقيده. لا تلتقط النماذج الرياضية التقليدية دائماً التفاعلات المعقدة المعنية. لذلك هناك حاجة إلى نهج أكثر تطوراً للتنبؤ الدقيق بإمكانيات التآكل في الهياكل الخرسانية المسلحة.

أجري هذا البحث في مختبر الهندسة المدنية والأشغال العامة بجامعة عين تموشنت، حيث تم تطوير العديد من أجهزة الاختبار لتقييم خطر التآكل، لا سيما من خلال الأساليب غير المدمرة مثل +Canin على عينات الخرسانة المتصلدة. تم تحليل البيانات التجريبية لإمكانيات التآكل باستخدام التحليل الإحصائي، بما في ذلك الانحدار الخطي المتعدد، لتقييم دقته.

بعد ذلك، تم استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) لتطوير نموذج يهدف إلى التنبؤ بإمكانيات التآكل في عينات الخرسانة. تمكن النموذج القائم على الشبكات العصبية الاصطناعية من التنبؤ بإمكانيات التآكل بمستوى دقة مرضٍ.

**الكلمات المفتاحية:** المتانة، التآكل، أيونات الكلوريد، الخرسانة المسلحة، +Canin، التنبؤ، الشبكات العصبية الاصطناعية

# SOMMAIRE

Remerciement .....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
ملخص .....	IV
Abstrac .....	V
Sommaire .....	VI
Liste des figures .....	X
Liste des tableaux.....	XIV
Liste des abréviations.....	XV
Introduction générale .....	1

## **CHAPITRE I : Phénomène de corrosion dans les structures en béton armé**

I. Introduction.....	3
II. Le matériau étudié .....	3
II.1 Le béton.....	3
II.2 Le béton armé.....	4
II.3 Les armatures (l'acier) .....	4
III. La dégradation du béton.....	5
III.1 La dégradation mécanique.....	6
III.2 La dégradation physique .....	6
III.3 La dégradation chimique .....	7
IV. Le phénomène de corrosion .....	8

IV.1	Définition de la corrosion.....	8
IV.2	Importance économique .....	8
IV.3	Les facteurs de la corrosion.....	9
IV.4	Classification de la corrosion .....	10
IV.4.1	La corrosion sèche .....	10
IV.4.2	La corrosion humide .....	10
IV.5	Types de corrosion .....	11
IV.5.1	Corrosion chimique (sèche) .....	11
IV.5.2	Corrosion électrochimique (humide) .....	11
IV.5.3	Corrosion biochimique ou corrosion bactérienne .....	12
IV.6	Formes de la corrosion .....	12
IV.6.1	Corrosion uniforme (généralisée) .....	12
IV.6.2	Corrosion localisée.....	13
IV.7	Processus et mode de corrosion du béton armé.....	18
IV.7.1	Corrosion de l'acier dans le béton.....	18
IV.7.2	Les étapes de corrosion des armatures .....	18
IV.7.3	Les mécanismes de corrosion des aciers .....	19
IV.7.4	Amorçage de la corrosion par carbonatation .....	20
IV.7.5	Amorçage de la corrosion par pénétration des ions chlorures .....	27
V.	Méthodes de surveillance de la corrosion par CANIN+.....	32
V.1	Généralités sur la méthode CANIN+ .....	32
V.2	Principe de la méthode de CANIN+.....	33
VI.	Conclusion .....	34

## **CHAPITRE II : Utilisation des réseaux de neurone artificiels en génie civil**

I.	Introduction.....	35
II.	L'intelligence artificielle .....	35
III.	Neurone.....	35
III.1	Neurone biologique .....	35
III.2	Neurone artificiel (formel) .....	36
IV.	Les réseaux de neurones .....	37
IV.1	Historique.....	38
IV.2	Architecture des réseaux de neurones .....	39
IV.2.1	Types de couches .....	39
IV.2.2	Les classes du réseau de neurone artificiel .....	39
IV.2.2.1	Les réseaux de neurones non bouclés (statiques).....	39
IV.2.2.2	Les réseaux de neurones bouclés (dynamiques ou récurrents).....	41
IV.3	Aspects mathématiques d'ANN.....	42
IV.3.1	Coefficient de pondération .....	42
IV.3.2	Fonctions d'activation .....	43
IV.4	Apprentissage des réseaux de neurones.....	45
IV.4 .1	Les types d'apprentissage des réseaux de neurones .....	46
IV.5	Application de l'analyse neuronale en génie civil .....	47
IV.5.1	Étude du comportement des matériaux de construction.....	48
IV.5.2	En génie géotechnique .....	48
IV.5.3	En hydrologie .....	49
IV.5.4	Le phénomène de corrosion.....	49
V.	Conclusion .....	50

## **Chapitre III : Partie expérimentale et résultats**

I.	Introduction.....	51
II.	Programme expérimentale .....	51
II.1.	Composants du béton utilisé.....	52
II.1.1	Type de granulats utilisés.....	52
II.1.2	Type de ciment.....	52
II.1.3	Eau de Gâchage.....	53
II.1.4	Acier.....	53
II.2.	Formulation de béton.....	53
II.3.	Condition expérimentale .....	54
II.3.1	Les matériaux utilisés.....	54
II.3.2	Procédure expérimentale .....	56
II.4.	Résultats et discussion.....	58
III.	Analyse statistique des données de potentiel de corrosion .....	61
III.1	Modèles proposés pour le potentiel de corrosion.....	62
IV.	Modélisation artificielle du réseau neuronal.....	64
IV.1.	Optimisation des couches cachées : une analyse des pourcentages dans l'étude .....	64
IV.2.	Évaluation des performances des modèles entraînés .....	67
V.	Conclusion .....	70
	Conclusion générale .....	72

# **LISTE DES FIGURES**

## **CHAPITRE I : Phénomène de corrosion dans les structures en béton armé**

Figure I.1. Schéma représente les forces subies par un ouvrage sans armature et avec armature .....	4
Figure I.2. Les armatures pour béton armé .....	4
Figure I.3. Dégradation du béton armé .....	5
Figure I.4. Corrosion des métaux .....	8
Figure I.5. Exemple de corrosion uniforme .....	11
Figure I.6. Schéma représente la Corrosion uniforme .....	11
Figure I.7. Corrosion localisée .....	11
Figure I.8. Exemple de corrosion par piquûre .....	14
Figure I.9. Schéma représente la corrosion par pique .....	14
Figure I.10. La corrosion galvanique .....	15
Figure I.11. Schéma représente la corrosion galvanique .....	15
Figure I.12 . La corrosion caverneuse .....	16
Figure I.13. Schéma représente la corrosion carveneuve .....	16

Figure I. 14. Fissuration par corrosion sous contrainte d'un assemblage après 4 ans dans une piscine intérieure .....	18
Figure I.15.Schème illustrant la fissuration par corrosion sous contrainte .....	17
Figure I.16.Exemple de corrosion intergranulaire .....	17
Figure I.17. Schéma illustrant la Corrosion intergranulaire .....	17
Figure I. 18. Dégradation schématique de des armatures au cours du temps selon le diagramme de Tuuti.....	18
Figure I.19. Evolution du niveau de corrosion des armatures .....	19
Figure I.20. Les phases de l'amorçage de la corrosion par carbonatation.....	21
Figure I. 21. Mécanisme de carbonatation au niveau de la solution interstitielle du béton .....	23
Figure I.22.Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et rapport E/C.....	23
Figure I.23. Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment.....	24
Figure I.24. Vitesse de carbonatation d'un matériau cimentaire en fonction de l'humidité relative d'équilibre du milieu environnant .....	24
Figure I.25. Influence de la température sur la vitesse de carbonatation .....	25
Figure I.26. La relation entre résistance à la compression à 28 jours et profondeur carbonatée .....	26
Figure I. 27. Coefficient de carbonatation suivant la nature de ciment .....	26

Figure I.28. Processus électrochimique de corrosion par les chlorures .....	28
Figure I. 29. Influence des additions .....	29
Figure I.30. Différentes propriétés d'un béton en fonction de sa teneur en laitier.....	28
Figure I. 31. Les différents types d'expositions de l'environnement marin .....	31
Figure I. 32. Appareil CANIN + .....	31

## **Chapitre II : Utilisation des réseaux de neurones artificiels**

### **en génie civil**

Figure II.1 similitude entre un neurone biologique et artificiel .....	37
Figure II.2. Réseaux de neurone non bouclé.....	40
Figure I.3. Réseau à alimentation avant a une seule couche .....	40
Figure II.4. Réseau à alimentation avant à plusieurs couches .....	41
Figure II.5. Réseaux de neurone bouclé .....	42
Figure II.6 . Diagramme schématique d' un nœud typique.....	43
Figure II.7. Fonctions d'activations: (a)du neurone « seuil » ;(b)neurone « linéaire » ,(c) neurone « sigmoïde ».....	44
Figure II.8. Schéma bloc de l'apprentissage non supervisé d'un réseaux de neurone .....	46
Figure II.9. Schéma bloc de l'apprentissage supervisé d'un réseaux de neurone .....	47

## **CHAPITRE III : Parties Expérimentales et Résultats**

Figure III. 1. Nettoyage des aciers avant et après le nettoyage.....	53
Figure III. 2. Diagramme géométrique des échantillons (D=8cm).....	55
Figure III. 3. Diagramme géométrique des échantillons (D=11cm).....	55
Figure III. 4. Photo réelle des échantillons d'éprouvettes .	55
Figure III. 5. Différent type des milieux utiliser pour les éprouvettes .	56
Figure III.6. Éprouvettes de béton ordinaire avec un diamètre de 8cm et 11 cm	57
Figure III.7. La mesure de potentiel de corrosion a été réalisée a été à l'aide de l'appareil CANIN+	57
Figure III.8. Les résultats de mesures de potentiel dans différents milieux avec un enrobage de 35 et 50 mm ...	59
Figure III.9. Les mesures potentiel de différents milieu d'enrobage de 3.5cm.....	60
Figure III.10. Les mesures potentiel de différents milieu et d'enrobage de 5 cm	61
Figure III.11. La corrélation entre les valeurs de potentiels prédis et mesurés.....	63
Figure III.12. L'architecture de réseau neuronal utilisée pour le potentiel de corrosion.....	67
Figure III.13. Apprentissage, validation et test du modèle ANN pour l'estimation du du potentiel de corrosion a)Training b) Validation c)Test d) All	69
Figure III.14. Résultats d'erreur entre les cibles et les sorties pour le potentiel de corrosion.....	70

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **Chapitre II : Utilisation des réseaux de neurones artificiels en génie civil**

Tableau II.1. Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel ..	37
Tableau II.2. Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.....	44

## **Chapitre III : Partie expérimentale et résultats**

Tableau III.1. Dosage des différents constituants pour 1m <sup>3</sup> de béton .....	54
Tableau III.2. Valeurs des potentiels citées dans ASTM C-876-09.....	58
Tableau II.3. Analyse statistique du potentiel de corrosion des données des matériaux étudiés .....	61
Tableau III.4. Analyse statistique des données sur le potentiel de corrosion des matériaux étudiés.	61
Tableau III.5. Estimation du coefficient de régression. ....	62
Tableau III.6. Estimation du R <sup>2</sup> par rapport au temps .....	62
Tableau III.7. Variation du nombre de couches cachées avec une répartition de 70% pour l'entraînement, 15% pour la validation et 15% pour les tests.....	64
Tableau III.8. Variation du nombre de couches cachées avec une répartition de 80% pour l'entraînement, 10% pour la validation et 10% pour les tests .....	65

## Liste des Abréviations

$\text{CCl}_4$	le tétrachlorure
$\text{O}_2$	Oxygène
$\text{H}_2\text{S}$	le sulfure d'hydrogène
$\text{CO}_2$	dioxyde de carbone
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	l'oxyde de fer(III)
$\text{CaO}$	l'oxyde de calcium
C-S-H	Les silicates de calcium hydratés
Cl <sup>-</sup>	Les ions chlorures
Fe	Le fer
$\text{Fe}^{+2}$	Les ions ferreux
$\text{Fe}^{+3}$	Les ions ferreux
OH <sup>-</sup>	Les ions hydroxydes
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	L'hydroxyde de fer(II)
H <sup>+</sup>	Un ion hydrogène
$\text{CO}_2$	Dioxyde de carbone
$\text{CaCO}_3$	Calcite
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hydroxyde de calcium
$\text{H}_2\text{O}$	Eau
$\text{H}_2\text{CO}_3$	L'acide carbonique
$\text{Ca}^{2+}$	Un ion calcium
$\text{C}_3\text{A}$	La tri-calcium aluminate.
$\text{CaCl}_2$	Le chlorure de calcium
$\text{FeCl}_3$	chlorure ferrique
$\text{FeCl}_2$	Le chlorure de fer(II)
$\text{NaCl}$	Le chlorure de sodium

RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
ANN	Analyse Neuronale Network
IA	Intelligence Artificielle
SNN	Les neurones simulés
E	Potentiel mesuré
Ep	Potentiel de polarisation
E <sub>corr</sub>	Potentiel de corrosion

# *Introduction générale*

## Introduction générale

---

L'industrie de la construction s'appuie fortement sur le béton armé en raison de sa résistance et de sa durabilité. Néanmoins, malgré les avantages de ce matériau, il est vulnérable aux effets néfastes de la corrosion. La corrosion, un phénomène électrochimique naturel, représente une menace sérieuse pour la durabilité des structures en béton armé.

La corrosion des armatures métalliques à l'intérieur du béton est souvent causée par la pénétration de l'eau et des agents agressifs tels que les chlorures. Ce processus corrosif peut être accéléré dans des environnements marins ou industriels, où les niveaux d'humidité et de pollution sont élevés. Lorsque les armatures métalliques se corrodent, elles se dilatent, exerçant une pression sur le béton environnant et provoquant des fissures et des dégradations structurelles. Par conséquent, il est impératif de développer des méthodes efficaces pour prédire et prévenir la corrosion dans les structures en béton armé.

Les méthodes non destructives sont cruciales pour prévenir la dégradation des structures en béton armé, notamment dans des environnements similaires à celui de la Méditerranée (3 % de NaCl). La technique de Canin+, utilisant des détecteurs acoustiques, révèle les fissures et les zones de corrosion. Elle permet une évaluation précise de l'intégrité structurelle.

Les résultats obtenus ne sont pas totalement fiables car plusieurs facteurs peuvent influencer leur précision. La corrosion, en tant que phénomène électrochimique, constitue un système complexe et non linéaire, dont le comportement dépend de divers paramètres. L'évaluation et la mesure des processus de corrosion nécessitent un investissement important en temps, et les modèles mathématiques traditionnels ne parviennent pas à prédire avec précision ces phénomènes non linéaires.

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) se révèlent être des outils prometteurs pour la prédiction du potentiel de corrosion. Ces modèles d'apprentissage machine peuvent analyser de vastes ensembles de données, y compris des paramètres environnementaux, des caractéristiques du béton et des armatures. En entraînant un RNA avec ces données, il devient possible de prédire avec précision le potentiel de corrosion d'une structure donnée et de prendre des mesures préventives avant que des dommages ne se produisent.

Le travail présenté comporte plusieurs objectifs. Dans un premier temps, il vise à comprendre l'importance du phénomène de corrosion. De plus, il inclut une analyse de la technique de mesure non destructive du potentiel de corrosion. Enfin, il envisage de prédire ces paramètres en utilisant des corrélations ou des réseaux de neurones.

## **Introduction générale**

---

La thèse est constituée de trois chapitres :

- Chapitre 1 : Ce chapitre se concentre sur le phénomène complexe de corrosion affectant les structures en béton armé et offre une étude approfondie de ce problème. En scrutant ses origines, ses effets et ses différents types, il met en lumière les enjeux majeurs de ce défi dans le domaine du génie civil.
- Chapitre 2 : Ce chapitre plonge profondément dans l'exploration de l'application des réseaux de neurones dans le domaine du génie civil. En examinant de près comment ces réseaux sont utilisés pour résoudre divers problèmes et défis spécifiques, il offre un aperçu complet des avancées technologiques qui façonnent l'avenir de ce domaine crucial.
- Chapitre 3 : Ce chapitre présente des résultats expérimentaux obtenus à partir des tests et des prédictions réalisés avec les RNA, en mettant l'accent sur leur précision et leur fiabilité.
- Une synthèse globale est présentée à la clôture de ce travail de recherche.

# CHAPITRE 1

*Phénomène de corrosion dans les  
structures en béton armé*

## I. Introduction

La corrosion, phénomène naturel, est insidieuse. Elle représente un défi majeur dans la construction, notamment dans les structures en béton armé. Sa manifestation se traduit par une dégradation progressive des matériaux métalliques, menaçant la durabilité et la stabilité des ouvrages. Ce phénomène crucial résulte de l'altération des armatures métalliques en raison de divers facteurs environnementaux et chimiques, nécessitant une analyse approfondie des causes et des types de corrosion pour élaborer des stratégies de prévention et de traitement adéquates.

L'impact de la corrosion est significatif, tant sur le plan économique que sur celui de la sécurité. Non seulement elle compromet la durabilité des infrastructures, mais elle peut également entraîner des risques pour la vie humaine. Ainsi, la compréhension des mécanismes de ce phénomène complexe et la mise en place de stratégies de prévention et de traitement adaptées sont essentielles pour assurer la pérennité des structures en béton armé.

Cette étude vise à fournir un aperçu complet de la corrosion dans les structures en béton armé, tout en mettant en lumière les défis et la méthode la plus utilisée de mesure pour aborder ce problème croissant.

## II. Le matériau étudié

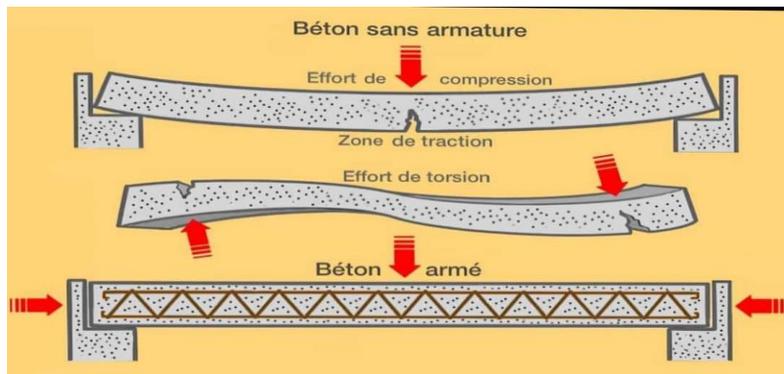
### II.1 Le béton

Le béton est un matériau de construction constitué d'un mélange de granulats, de sable et d'eau, liés par un agent liant hydraulique, tel que le ciment. Il peut être enrichi avec des adjuvants et des additifs pour améliorer ses propriétés spécifiques selon les besoins de la construction. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est modulable ; il durcit progressivement pour former finalement un monolithe [1]. Selon le type de ciment utilisé et sa proportion par rapport au granulat, la forme du granulat et les adjuvants pouvant être incorporés, les propriétés du béton obtenu peuvent varier considérablement, offrant une large gamme de propriétés adaptées aux besoins de chaque construction. exigeance spécifique au projet.

Le béton est connu pour sa robustesse en compression mais est fragile en traction, ce qui incite les chercheurs à rechercher des solutions. L'acier est alors devenu la réponse. En ajoutant des barres d'acier au centre du béton, on obtient un matériau plus résistant. C'est du béton armé.

## II.2 Le béton armé

Le béton armé, un matériau composite de béton et d'acier, combine la résistance à la compression du béton avec la résistance à la traction de l'acier [1]. Des armatures primaires sont placées dans les zones de tension du béton pour compenser la faible résistance à la traction du béton (Figure I.1). Les règles relatives au béton armé concernent la quantité de béton et la mise en place des barres d'acier dans le béton. Le béton armé nécessite un peu plus de ciment que le béton traditionnel.



**Figure I.1.** Schéma représente les forces subies par un ouvrage sans armature et avec armature [2]

## II.3 Les armatures (l'acier)

Les armatures du béton armé sont des pièces en acier lisses ou à reliefs haute adhérence (HA) placées à l'intérieur du béton pour le rendre plus résistant à la traction [2]. Elles peuvent être des fils métalliques, des barres ou des treillis. Leur rôle est de supporter la force de traction, de maintenir la structure en place et d'empêcher le béton de se fissurer. Les caractéristiques des aciers utilisés sont définies par des règles strictes. On utilise parfois de l'acier inoxydable pour éviter la corrosion. Il est important de placer les armatures correctement pour qu'elles soient bien recouvertes de béton et puissent supporter les charges comme prévu.



**Figure I.2.** Les armatures pour béton armé [3]

Les armatures sont :

- Soit assemblées en usine, puis livrées sur le chantier ;
- Soit livrées sur chantier sous forme de pièces coupées, façonnées et assemblées sur le site, à proximité de l'ouvrage ou directement à l'intérieur du coffrage [3].

Les armatures sont mises en place dans les coffrages :

- Forme de barre (droite ou coupée, façonnée selon la forme décrite dans le plan d'exécution),
- Le treillis soudé (réseau maillé plat, généralement rectangulaire, constitué de fils ou de tiges assemblés par soudage, la résistance au cisaillement de ses composants est garantie) est fabriqué en usine et livré sous forme de plaques.

Les armatures peuvent également être préassemblées en usine sous forme de cages ou de panneaux, prêtes à être installées dans le coffrage une fois livrées [3].

Afin de garantir la solidité de la structure, le béton doit envelopper intégralement son armature, sans laisser de zones vides ni de bulles d'air [2].

### III. La dégradation du béton

Le béton est un formidable matériau de construction. Cependant, au cours du temps, il peut être amené à se dégrader [4]. La dégradation du béton est un phénomène complexe influencé par divers facteurs environnementaux et structurels, qui peuvent être classées en trois catégories principales : mécaniques, physiques et chimiques.



Figure I.3. Dégradation du béton armé [4]

#### III.1 La dégradation mécanique

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

- **Abrasion** : L'usure progressive de la surface du béton due au frottement avec des matériaux solides, tels que des particules en suspension dans l'eau ou des charges transportées.
- **Chocs** : Les impacts soudains et violents sur la surface du béton, pouvant entraîner des fissures, des éclats ou même des ruptures de la structure.
- **Explosions** : Les détonations explosives, telles que celles causées par des accidents industriels ou des attaques terroristes, peuvent causer des dommages graves au béton, y compris des déformations et des fractures.
- **Fatigue en surcharges ou vibrations** : Les charges répétées ou les vibrations excessives peuvent provoquer une fatigue du béton, entraînant des fissures et une dégradation progressive de sa résistance.
- **Déplacement (tassements de sol)** : Les mouvements du sol, tels que les tassements différentiels ou les glissements de terrain, peuvent exercer des contraintes sur la structure en béton, entraînant des déformations et des dommages.
- **Usure** : La détérioration progressive de la surface du béton due à une exposition prolongée à des conditions environnementales ou à une utilisation intensive, entraînant une perte de matériau et une diminution de la résistance [4].

### III.2 La dégradation physique

Les facteurs de dégradation physique du béton comprennent divers éléments environnementaux et mécaniques qui peuvent altérer la structure et les propriétés du matériau. Parmi ces facteurs, on peut citer :

- **La cristallisation saline** : Lorsque de l'eau contenant des sels pénètre dans le béton et s'évapore, les cristaux de sel restants peuvent exercer une pression sur les pores du béton, entraînant sa fissuration.
- **L'érosion** : L'action mécanique de l'eau, du vent ou d'autres agents peut éroder progressivement la surface du béton, réduisant ainsi son épaisseur et affaiblissant sa structure.
- **L'exposition aux cycles gel-dégel** : L'eau qui pénètre dans les pores du béton peut geler lorsqu'elle est soumise à des températures froides, ce qui entraîne une expansion et une contraction du matériau et peut conduire à des fissures.
- **Le retrait** : Pendant le processus de durcissement du béton, il peut se produire un retrait volumétrique, entraînant la formation de fissures de retrait.

- **Les phénomènes thermiques, y compris les incendies** : Les hautes températures peuvent affaiblir le béton et altérer ses propriétés mécaniques, ce qui peut être exacerbé en cas d'incendie.
- **Les défauts de conception ou d'exécution du béton** : Des erreurs lors de la conception ou de la mise en œuvre du béton peuvent aussi entraîner sa détérioration physique, en générant des zones de fragilité ou en compromettant sa durabilité [4].

### III.3 La dégradation chimique

Certains agents chimiques agressifs, tels que les acides, les solvants ou les produits chimiques industriels, peuvent corroder le béton et compromettre sa résistance. Les dégradations chimiques du béton comprennent divers processus :

- **Corrosion des aciers** : Les armatures métalliques peuvent se corroder en raison de l'exposition à l'humidité et à des agents corrosifs, affaiblissant ainsi la structure.
- **Dissolution de la matrice cimentaire** : Des agents chimiques peuvent dissoudre la matrice cimentaire du béton, réduisant ainsi sa résistance et son intégrité structurelle.
- **Alcali-réaction** : Une réaction chimique entre les alcalis du ciment et certains minéraux présents dans les granulats peut provoquer un gonflement et des fissures dans le béton.
- **Réaction sulfurique interne** : Les sulfates présents dans le sol ou dans l'eau peuvent réagir avec les composants du béton, entraînant un gonflement et une détérioration de la structure [1].
- **Biodégradation** : Des organismes biologiques tels que les bactéries et les algues peuvent attaquer le béton, contribuant à sa détérioration.
- **Exposition aux sels de déneigement, industriels ou marins** : Les sels utilisés pour le déneigement des routes, les effluents industriels ou les environnements marins peuvent provoquer des dommages chimiques au béton lorsqu'ils pénètrent dans sa structure.

Ces processus de dégradation chimique peuvent se produire individuellement ou en combinaison, affectant la durabilité et la performance du béton dans diverses applications.

Parmi tous ces facteurs de dégradation, la corrosion demeure le plus important.

## IV. Le phénomène de corrosion

### IV.1 Définition de la corrosion

La corrosion peut être définie comme le processus naturel par lequel un matériau, généralement un métal, se détériore suite à une réaction chimique ou électrochimique avec son environnement. Ces réactions entraînent une perte progressive de matière et peuvent compromettre les propriétés mécaniques et structurelles du matériau, le rendant moins fiable et moins durable [5].

Elle représente la première cause de dégradation des structures en béton, évaluée à 47 % des typologies relevées selon une enquête menée à l'échelle européenne auprès des gestionnaires de parcs d'ouvrages en béton [1].

La corrosion est une dégradation du matériau où de ses propriétés, entraînée par une interaction physicochimique sous forme d'une réaction inter faciale irréversible du matériau avec son environnement [5]. Ce processus peut se produire dans divers environnements, tels que l'air, l'eau, ou en présence de substances corrosives telles que des acides ou des sels.



**Figure I.4.**Corrosion des métaux [6]

### IV.2 Importance économique

La corrosion, un phénomène touchant divers matériaux (métaux, céramiques, polymères) et se produisant dans des environnements variés (milieu aqueux, atmosphère, hautes températures, etc.), engendre d'importants dommages dans plusieurs secteurs tels que le bâtiment, le génie civil, le transport, ainsi que les industries chimique et pétrolière.

Elle reste la cause de détérioration la plus coûteuse en termes de maintenance. Elle est à l'origine de nombreux défauts apparents qui s'ils n'engendrent pas de capacité portante de la structure, se révèlent nuisibles à l'exploitation de l'ouvrage [7].

La corrosion coûte cher, elle a une importance économique significative, coûtant environ 3 à 4% du PIB des pays industrialisés, selon l'Organisation Mondiale de la Corrosion [8]. Elle entraîne des coûts directs et indirects, affectant la durée de vie des équipements et des structures, et a un impact négatif sur l'environnement, provoquant des pollutions et des accidents [9]. Par exemple, la corrosion des aciers au carbone dans le béton est la cause de détérioration la plus coûteuse en termes de maintenance dans les ouvrages de Génie civil [10].

La prévention de la corrosion est donc essentielle pour réduire ces coûts économiques et environnementaux. Des mesures telles que le choix de matériaux résistants, une meilleure conception et l'utilisation de revêtements peuvent aider à lutter contre la corrosion [5].

### IV.3 Les facteurs de la corrosion

Les facteurs de la corrosion sont nombreux et peuvent varier en fonction de l'environnement dans lequel les matériaux métalliques sont exposés. Voici certains des principaux facteurs influençant la corrosion :

- **Humidité** : La présence d'eau est l'un des facteurs cruciaux de la corrosion. L'eau favorise la conductivité électrique et permet la réalisation de réactions électrochimiques responsables de la corrosion.
- **Oxygène** : L'oxygène de l'air joue un rôle majeur dans la corrosion électrochimique. Il agit souvent en tant qu'agent oxydant, facilitant la réaction d'oxydation sur la surface métallique.
- **PH** : L'acidité ou la basicité de l'environnement, mesurée par le pH, peut influencer les réactions de corrosion. Certains métaux sont plus sensibles à la corrosion dans des milieux acides ou basiques [6].
- **Température** : Les taux de corrosion peuvent être sensibles à la température. Une élévation de celle-ci peut accélérer les réactions chimiques et électrochimiques associées à la corrosion[11].
- **Concentration d'ions** : La concentration d'ions dans l'eau, tels que les ions chlorure, sulfate, ou autres, peut influencer la corrosion. Certains ions peuvent agir comme catalyseurs ou accélérer les processus de corrosion.
- **Composition chimique** : La nature du métal et son alliage influent sur sa résistance à la corrosion. Certains métaux, comme l'aluminium et l'acier inoxydable, développent des couches protectrices qui réduisent leur sensibilité à la corrosion.
- **Facteurs atmosphériques** : L'exposition aux polluants atmosphériques, aux gaz industriels, aux sels marins, ou à d'autres substances peut accélérer la corrosion, en particulier dans les environnements agressifs.

- **Micro-organismes** : La présence de bactéries, d'algues ou d'autres micro-organismes peut entraîner une corrosion biologique, produisant des produits chimiques corrosifs ou favorisant la formation de biofilms.
- **Contraintes mécaniques** : Les contraintes mécaniques, telles que la tension ou la flexion, peuvent favoriser des formes spécifiques de corrosion, comme la corrosion sous contrainte.

### IV.4 Classification de la corrosion

La corrosion, en tant que processus de détérioration des matériaux métalliques, peut se développer selon deux principaux processus [5] :

- La corrosion sèche.
- La corrosion humide.

Chacun de ces processus présente des caractéristiques distinctes et peut être influencé par différents facteurs environnementaux.

#### IV.4.1 La corrosion sèche

Également connue sous le nom de corrosion atmosphérique, la corrosion sèche se produit en l'absence d'humidité liquide. Elle est principalement causée par des gaz corrosifs présents dans l'atmosphère, tels que le dioxyde de soufre, les oxydes de carbone et les oxydes d'azote. Ces gaz réagissent avec la surface métallique pour former des composés corrosifs, entraînant ainsi la dégradation du matériau [6]. La corrosion sèche est souvent observée dans les environnements industriels, les zones urbaines fortement polluées et les régions sujettes à la pollution atmosphérique.

La détérioration des matériaux se produit lorsqu'ils sont exposés à des gaz à des températures où toute humidité a été éliminée. Ce processus est particulièrement crucial dans les équipements fonctionnant à haute température [5].

#### IV.4.2 La corrosion humide

Contrairement à la corrosion sèche, la corrosion humide implique la présence d'eau ou d'humidité liquide, ce qui accélère le processus de corrosion. L'eau agit comme un électrolyte, facilitant la réaction électrochimique entre le métal et son environnement, généralement l'oxygène présent dans l'air.

Les conditions de corrosion humide peuvent varier considérablement, allant des environnements marins salins aux structures exposées à des conditions météorologiques humides et pluvieuses. La corrosion humide peut être particulièrement préoccupante car elle peut se produire de manière souterraine ou à l'intérieur des structures, rendant la détection et la prévention plus difficiles.

### IV.5 Types de corrosion

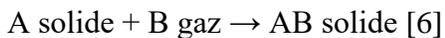
En fonction de l'environnement et du comportement du métal, différents types de corrosion peuvent être définis. Globalement, les divers processus de corrosion peuvent être résumés comme suit :

#### IV.5.1 Corrosion chimique (sèche)

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce processus se produit dans une solution non électrolyte ou sous l'action de gaz tels que l'O<sub>2</sub>, le H<sub>2</sub>S et le CO<sub>2</sub>. Lorsque cette corrosion se produit dans un environnement gazeux ou à des températures élevées, elle est appelée corrosion sèche ou corrosion à haute température [11].

L'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non aqueuse (Al dans CCl<sub>4</sub>) peut être considérée comme une corrosion chimique. Elle est généralement rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides [12].

La réaction qui se produit est de la forme :



#### IV.5.2 Corrosion électrochimique (humide)

La corrosion électrochimique, est le phénomène de corrosion le plus important. Elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition [6], c'est-à-dire produit lorsque deux métaux différents sont en contact dans un environnement conducteur (comme l'eau salée).

L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Pour une corrosion électrochimique on a :



En général, les métaux ne sont jamais parfaitement purs ; ils présentent toujours des imperfections physiques ou chimiques qui peuvent avoir un potentiel de corrosion différent de celui de la matrice métallique. Autrement dit, les métaux ne sont pas monophasés lorsqu'ils sont plongés dans le réactif [12]. Même pour un alliage, si ces éléments d'addition sont en solution solide, on ne peut pas les considérer comme parfaitement monophasés, car ils présentent toujours des inclusions telles que des oxydes, sulfures, etc., ou des régions écrouies.

Ainsi, les légères différences de propriétés chimiques ou physiques entre les différentes parties du métal déterminent une électrode composite (cellule électrochimique) qui contient des microcathodes et des micro-anodes en court-circuit, formant ainsi des couples électriques (piles). Lorsqu'une électrode composite est plongée dans un électrolyte, ce qui est toujours le cas, elle est donc le siège d'un

phénomène de corrosion électrochimique et les anodes sont attaquées avec une vitesse qui dépend de l'intensité du courant débité par les piles locales [11].

### IV.5.3 Corrosion biochimique ou corrosion bactérienne

La corrosion biochimique ou bactérienne est un processus de détérioration des matériaux métalliques causé par des micro-organismes tels que les bactéries [13]. Des bactéries peuvent produire des composés corrosifs tels que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), l'anhydride sulfureux ( $\text{SO}_2$ ), l'hydrogène sulfureux ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ou des acides organiques qui peuvent attaquer les métaux. Dans ce cas de figure, on parle de corrosion bactérienne [14].

### IV.6 Formes de la corrosion

Le processus de corrosion des métaux présente diverses formes, principalement classées en fonction de l'apparence observable à la surface affectée par :

- ❖ La corrosion uniforme,
- ❖ La corrosion localisée.

#### IV.6.1 Corrosion uniforme (généralisée)

La corrosion uniforme, également appelée corrosion généralisée, se produit de manière uniforme sur toute la surface d'un matériau. C'est la forme de corrosion la plus classique et la plus facile à repérer [15]. Elle est due à l'oxydation et à la réduction sur toute la surface du métal. Ce type de corrosion est moins courant que la corrosion localisée, mais il est important de le prendre en compte dans la prévention de la corrosion des métaux. La vitesse de corrosion uniforme peut être mesurée par la perte d'épaisseur du matériau sur une période donnée, ou par la perte de masse du matériau exposé par unité de surface et de temps. Des matériaux résistants à la corrosion uniforme, tels que l'acier inoxydable, sont souvent utilisés pour prévenir ce phénomène.

La corrosion uniforme peut être provoquée par des facteurs tels qu'une teneur élevée en dioxyde de soufre ou une concentration en ions hydrogène. En général, la corrosion généralisée progresse sur l'ensemble de la surface du métal exposé au milieu corrosif. Lorsque cette progression se fait à une vitesse constante sur toute la surface, on parle alors de corrosion uniforme [16].



Figure I.5. Exemple de corrosion uniforme [15]

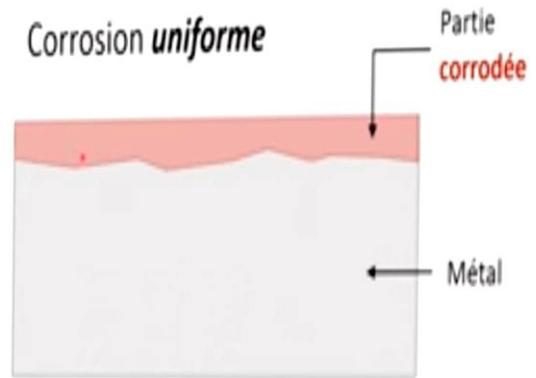


Figure I.6. Schéma représente la Corrosion Uniforme [17]

#### IV.6.2 Corrosion localisée

La corrosion localisée est un type de corrosion qui se produit à des endroits spécifiques sur un matériau, souvent là où des conditions favorables à la corrosion sont réunies, comme des micro-environnements différents. Ces conditions peuvent inclure des variations locales de composition chimique, d'humidité, de température ou de contrainte mécanique. La localisation d'une des demi-réactions anodique ou cathodique génère une corrosion localisée (Figure I.7).

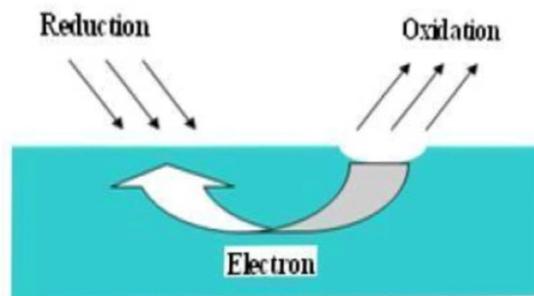


Figure I.7. Corrosion localisée [5]

##### IV.6.2.1 Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûres est une forme extrêmement localisée de corrosion conduisant à la création d'un ou plusieurs petits trous ou creux à la surface du métal [17]. L'amorçage de la corrosion par piqûres s'effectue généralement sur des singularités de la surface, comme des inclusions réactives,

des précipités ou des défauts consécutifs à la mise en œuvre (rayures, pollution, etc) mais pas exclusivement. Elle peut également s'amorcer suite à une instabilité de la couche passive [18].

La piqûre commence toujours par une rupture locale du film passif, souvent au niveau des hétérogénéités du métal, et peut être entretenue par deux phénomènes : l'intérieur de la piqûre est dépassivé et contient un milieu désaéré, alors que l'extérieur est passivé et en milieu aéré, créant un effet de pile entre l'intérieur et l'extérieur. Il s'agit en fait d'une corrosion galvanique localisée [19]. L'amorçage de la piqûre est ainsi reconnu comme un phénomène ayant une composante aléatoire, c'est la raison pour laquelle il est parfois difficile à prédire. Il est important de prendre en compte ce type de corrosion lors du choix des matériaux pour prévenir son apparition.



Figure I.8. Exemple de corrosion par piqûre [15]

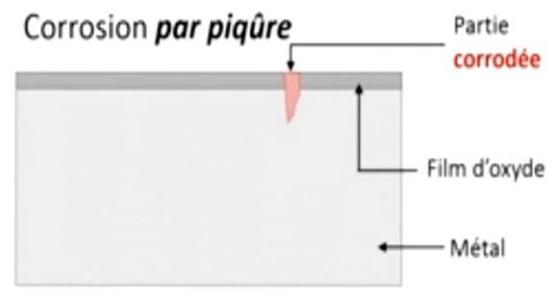


Figure I.9. Schéma représente la corrosion  
Par piqûre [17]

### IV.6.2.2 Corrosion Galvanique

La corrosion galvanique est un type de corrosion électrochimique qui se produit lorsque deux métaux différents sont en contact dans un environnement électrolytique [20], créant une pile galvanique. L'un des métaux, appelé anode, se corrode plus rapidement que l'autre, appelé cathode [17]. La corrosion galvanique peut être accélérée par la présence d'un électrolyte, comme l'eau salée, et peut causer des dommages importants aux métaux. Les métaux placés plus haut dans la série galvanique sont plus nobles et ont tendance à être la cathode, tandis que les métaux placés plus bas sont plus actifs et ont tendance à être l'anode. Par exemple, si du zinc et de l'acier inoxydable sont en contact, le zinc sera l'anode et se corrodera plus rapidement que l'acier inoxydable, qui sera la cathode (Figure I.11) [20].

Pour réduire la corrosion galvanique, il est recommandé de choisir des métaux avec des potentiels proches, de minimiser les différences de surface et d'éviter les zones humides ou en contact avec l'eau est également possible de limiter la corrosion galvanique en minimisant les interactions métal sur métal lors de l'assemblage, par exemple en utilisant un isolant [17] [21]. Il est important de

prendre en compte la corrosion galvanique lors du choix des matériaux pour éviter les dommages causés par ce phénomène.

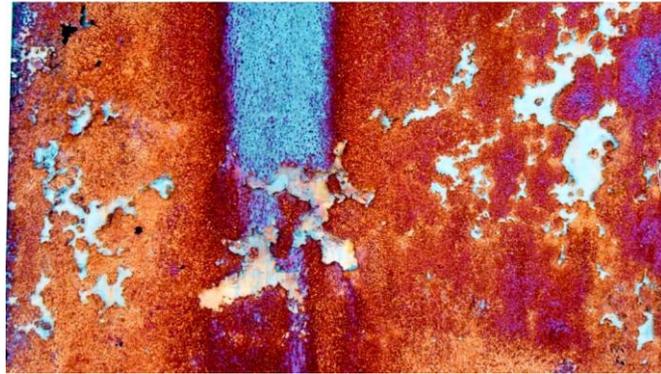


Figure I.10. La corrosion galvanique [20]



Figure I.11. Schéma représente la corrosion galvanique [17]

### IV.6.2.3 La corrosion cavernueuse

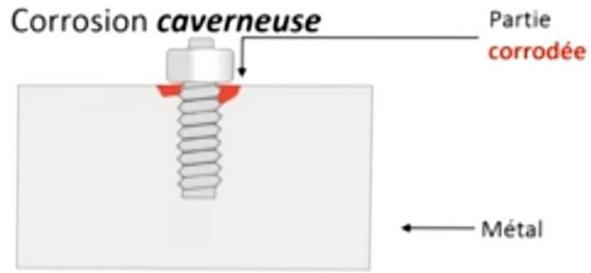
La corrosion cavernueuse, ou corrosion par crevasses, est une forme de corrosion localisée qui peut se produire dans des matériaux tels que l'acier inoxydable. Elle se caractérise par la formation de cavités ou de crevasses à la surface du matériau en raison de réactions chimiques ou électrochimiques. [22]. Elle est causée par des conditions locales qui favorisent la concentration d'agents corrosifs, comme l'humidité ou certains produits chimiques, ce qui accélère la dégradation du matériau.

La première recommandation pour éviter la corrosion cavernueuse est d'optimiser la conception de la pièce afin d'éviter toute formation de cavernes artificielles. Ces cavernes peuvent être créées par un joint mal fixé, une soudure non polie ou mal réalisée, des dépôts, des interstices entre deux tôles,

etc....[23]. Il est également important de choisir des matériaux et des alliages résistants à la corrosion en milieux confinés pour améliorer la durabilité des structures et des infrastructures.



**Figure I.12 .** La corrosion caverneuse [8]



**Figure I.13.** Schéma représente la corrosion caverneuse [17]

#### IV.6.2.4 La corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte (CSC) est un phénomène de corrosion localisée qui peut affecter toutes les structures et les composants métalliques soumis à des contraintes sous un environnement corrosif [15]. Elle résulte d'un processus synergique entre une dégradation chimique d'un matériau par corrosion localisée et l'effet d'une contrainte mécanique, résiduelle ou appliquée, conduisant à l'amorçage d'une ou plusieurs fissures fragiles, à leur propagation au sein du matériau ductile et à la ruine finale possible de la pièce, résulte généralement, pour un matériau sensible, de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique et d'un milieu agressif [24]. Les fissures peuvent se propager rapidement et causer des défaillances catastrophiques. Ce qui peut compromettre sa résistance et sa durabilité.



**Figure I.14.** Fissuration par corrosion sous contrainte d'un assemblage après 4 ans dans une piscine intérieure [20]

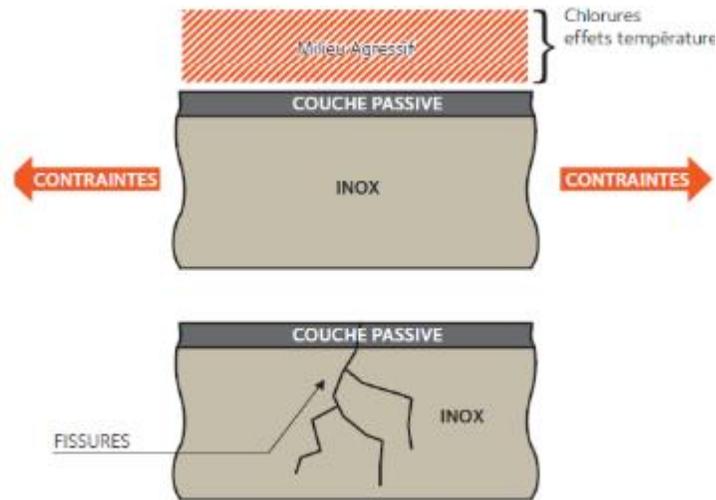


Figure I.15. Schéma illustrant la fissuration par corrosion sous contrainte [22]

#### IV.6.2.5 Corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire est un phénomène de corrosion qui se produit le long des joints de grains dans les matériaux métalliques, tels que les aciers inoxydables. Elle peut résulter de divers facteurs, notamment la sensibilité du matériau, la composition chimique, les contraintes mécaniques et les conditions environnementales. Ce type de corrosion peut être problématique car il affaiblit la structure du matériau sans nécessairement altérer sa surface de manière visible. La prévention de la corrosion intergranulaire implique l'utilisation de matériaux résistants, le contrôle de la composition chimique, l'élimination des contraintes mécaniques, et la mise en place de conditions environnementales appropriées [17].

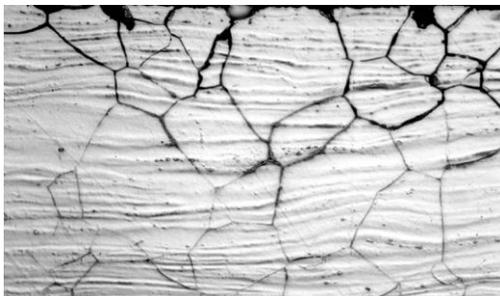


Figure I.16. Exemple de corrosion intergranulaire [12]

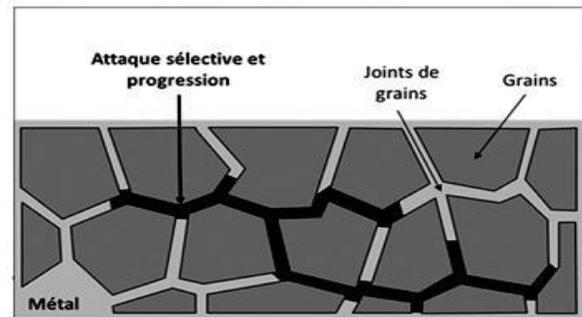


Figure I.17. Schéma illustrant la Corrosion intergranulaire [22]

## IV.7 Processus et mode de corrosion du béton armé

### IV.7.1 Corrosion de l'acier dans le béton

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ( $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$  et de calcium  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ [23].

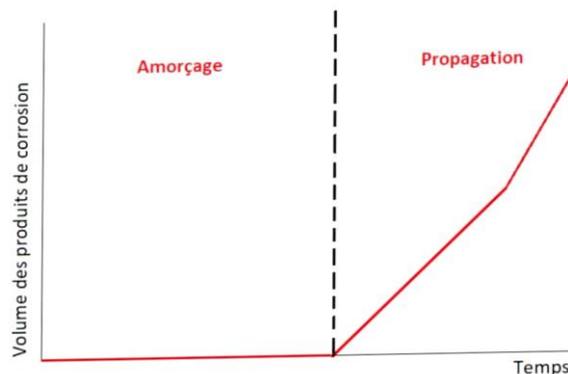
Tous ces produits autour de l'acier confèrent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13. Il est à noter qu'au contact de la rouille initiale, l'hydratation du ciment est perturbée : il se forme localement une zone de transition, au-delà de laquelle le béton présente des caractéristiques plus homogènes[7].

L'eau de gâchage du béton permet donc de former autour de l'acier des produits qui le protègent par passivation. Plus précisément, sous la rouille, une armature est recouverte d'une fine couche protectrice de produits blancs, composée de ferrite et d'hydroxyde de calcium. Une telle protection disparaît si la solution interstitielle a disparu (comme dans le cas des grandes fissures qui atteignent les armatures) ou si elle ne correspond plus à un béton sain.

### IV.7.2 Les étapes de corrosion des armatures

Le béton est un matériau poreux et réactif, susceptible de se dégrader physiquement et chimiquement au contact de son environnement. En général, on considère que la corrosion ne débute que lorsque les agents agressifs ont pénétré le béton sain et atteint les armatures [25] .

Dans la durée de vie d'une structure en béton armé, on peut distinguer deux périodes [27] :



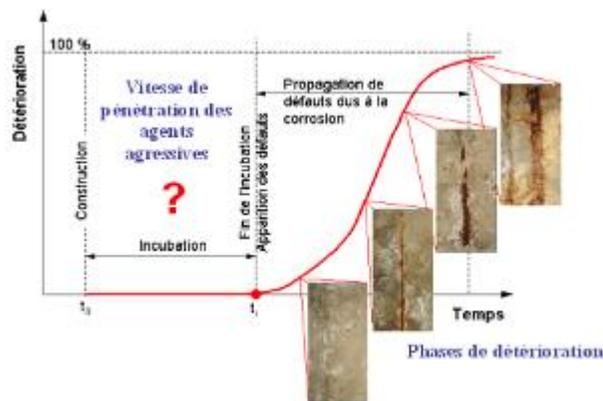
**Figure I. 18.** Dégradation schématique des armatures au cours du temps selon diagramme de Tuuti [25]

**Une période d'amorçage :** dite aussi « période dormante », d'« incubation » ou d'« initiation », durant laquelle la stabilité du système, composé de l'armature métallique immergée dans la matrice cimentaire du béton, diminue progressivement. C'est également durant cette période que se créent les conditions favorables au développement de la corrosion [13].

La durée de la première période est déterminée par la vitesse de neutralisation du béton d'enrobage ou la vitesse de pénétration de substances agressives telles que les ions chlorures. Lorsque la concentration en chlorures au niveau de la barre d'acier est suffisamment importante, la période de propagation commence [26].

### Une période propagation :

On observe, en premier lieu, la formation de produits issus de la corrosion de l'armature. Les phénomènes électrochimiques de corrosion conduisent à la formation d'oxydes et d'hydroxydes de volumes supérieurs et celui de l'acier sain [10], ce qui peut entraîner des contraintes provoquant la fissuration du béton d'enrobage et diminuer l'adhérence acier /béton.



**Figure I.19.** Evolution du niveau de corrosion des armatures [26]

En pratique, il doit être fait en sorte que la période d'amorçage (incubation) soit la plus longue possible. Pour cela, il faut prévoir des épaisseurs d'enrobage suffisantes et choisir une formulation de béton permettant de diminuer sa perméabilité à l'eau et aux gaz [26].

### IV.7.3 Les mécanismes de corrosion des aciers

La corrosion des aciers se produit lorsqu'ils sont soumis à des milieux agressifs, principalement composés d'humidité et d'oxygène [27]. Les mécanismes de corrosion impliquent généralement une réaction électrochimique où le fer s'oxyde en ions ferreux  $Fe^{2+}$  (réaction anodique) tandis que le dioxygène se réduit en eau (réaction cathodique) [28].

Dans la zone anodique, l'acier se dissout :



Les ions ferreux  $Fe^{2+}$  peuvent s'oxyder ultérieurement en ions ferrique  $Fe^{3+}$ .

La réaction correspond à la réduction de l'oxygène dissous dans l'eau :



La réaction (3) correspond à la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène :



Les ions hydroxydes  $OH^-$  formés dans la solution se combinent aux ions ferreux  $Fe^{2+}$  et forment de l'hydroxyde ferreux à la surface de l'acier :



Pour que cette réaction ait lieu, un contact électrique (échange d'électrons) et un contact électrolytique (échange d'ions) entre les zones anodiques et cathodiques sont requis. Ainsi, la présence d'eau sur la

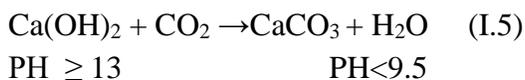
Les facteurs qui aggravent la corrosion comprennent le niveau de salinité dans l'air, le travail à froid du métal, ainsi que les conditions alternées d'humidité et de sécheresse. L'acier, en raison de sa forte réactivité, est particulièrement vulnérable à la perte de ses propriétés mécaniques dans ce processus. [27].

La couche de passivation du fer dans le béton peut être altérée par divers composés, mais deux principaux phénomènes accélèrent la corrosion des structures : la carbonatation et la présence d'ions chlorures.

### IV.7.4 Amorçage de la corrosion par carbonatation

#### IV.7.4.1 Généralité

La carbonatation du béton est un processus chimique au cours duquel le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) présent dans l'air réagit avec les composés alcalins du béton, tels que l'hydroxyde de calcium, pour former du carbonate de calcium [28].

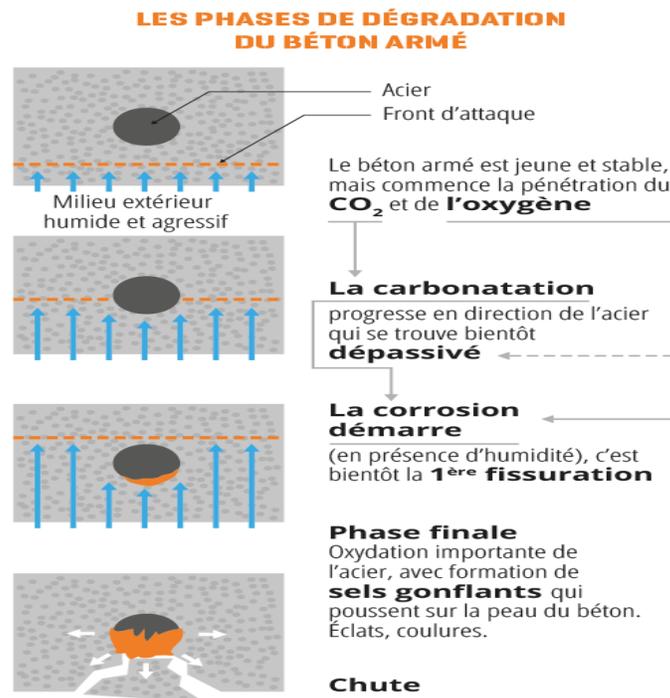


Dans le béton non armé, la carbonatation n'a pas d'impact négatif sur la durabilité. A l'inverse, la formation de  $\text{CaCO}_3$  insoluble entraîne une diminution de la porosité .

Cette réaction ne se produit qu'en milieu aqueux. Premièrement, le dioxyde de carbone doit se dissoudre dans l'eau au niveau des pores, ce qui fait chuter le pH (d'environ 13 à 9).

Une diminution du pH peut également entraîner la dissolution de l'hydroxyde de calcium. Les deux

produits réagissent alors et précipitent sous forme de carbonate de calcium. Si les barres d'armature ne sont pas correctement protégées, une corrosion des barres d'armature peut en résulter [29].



**Figure1.20.** Les phases de l'amorçage de la corrosion par carbonatation [29]

#### IV.7.4.2 Les réactions physico-chimiques

La réaction de carbonatation dans le béton se produit lorsque le dioxyde de carbone atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ) interagit avec les composés alcalins du béton, tels que l'hydroxyde de calcium, pour former du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ).

Cette réaction peut être décrite comme une neutralisation, où le  $\text{CO}_2$  agit en tant qu'acide, réagissant avec les bases présentes dans le béton pour produire des carbonates. Pratiquement, tous les composants du ciment, qu'ils soient anhydres ou hydratés, sont susceptibles de subir ce processus, à

l'exception du gypse. Les mécanismes dominants impliquent la carbonatation de la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) et des silicates de calcium hydratés (C-S-H).

La dissolution du  $\text{CO}_2$  dans la solution interstitielle s'écrit selon la réaction [26] :



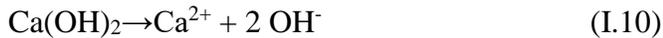
Dans l'eau, l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) se comporte comme un diacide faible dont la dissociation a lieu en deux phases désignées par la réaction :



Les ions  $\text{OH}^-$  dans les équations d'équilibre (I.7) et (I.8) proviennent de l'autoprotolyse de l'eau qui s'écrit :



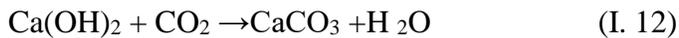
La dissolution du  $\text{CO}_2$  entraîne une baisse de la concentration en  $\text{OH}^-$  dans la solution interstitielle, ce qui réduit le pH. Pour rétablir la basicité du milieu, la portlandite se dissout suivant la réaction :



Ainsi les ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  libérés au cours de la réaction (I.10) réagissent avec les ions carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  provenant de la réaction (I.11) pour former du carbonate de calcium :



Les différences étapes du mécanisme de carbonatation de la portlandite (Figure I.21) peuvent être représentées par l'équation simplifiée :



Quant au C-S-H, ils se carbonatent et donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydraté (qualifié de gel de silice) et éventuellement de l'eau libre [30].

La carbonatation de la portlandite entraîne une diminution du pH dans le béton. Les composés C-S-H constituent la phase hydratée prédominante dans la pâte de ciment et sont responsables de la majeure partie de sa résistance mécanique. Cependant, leur capacité à maintenir le pH de la solution interstitielle est moindre par rapport à la portlandite.

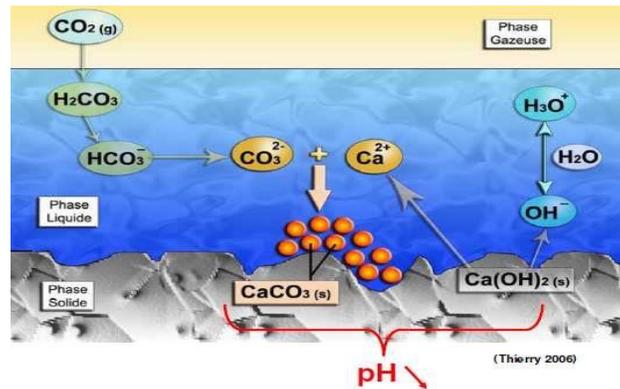


Figure I. 21. Mécanisme de carbonatation au niveau de la solution interstitielle du béton [26]

#### IV.7.4.3 Les facteurs influencent vitesse de carbonatation

- **Le rapport E/C :** Le rapport eau -ciment a une importance considérable sur l'interconnexion du réseau poreux (la porosité des matériaux à base de ciment) et donc pour la perméabilité du béton et la diffusivité des espèces gazeuses ou ionique [31].

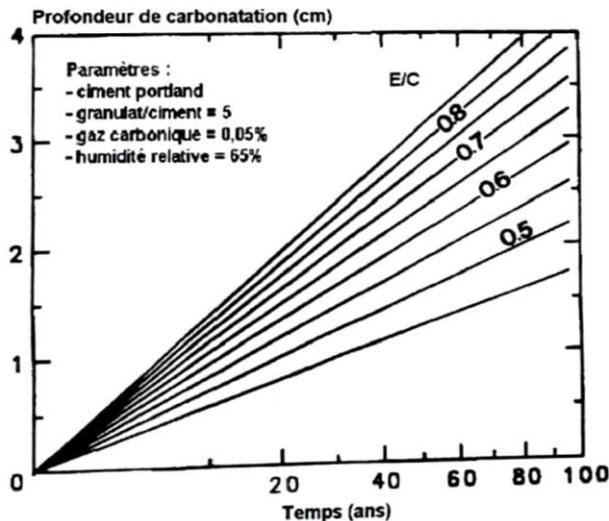


Figure I.22. Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et du rapport E/C [31]

- **Le dosage en ciment :** En général, une augmentation du dosage de ciment peut augmenter la quantité de portlandite disponible pour réagir avec le dioxyde de carbone atmosphérique, accélérant ainsi le processus de carbonatation. Et puisque la carbonatation provoque une diminution de la porosité [30], Cependant, cela peut également augmenter la quantité de C-S-H,

qui a un pouvoir tampon sur le pH, limitant ainsi l'abaissement du pH dans le béton. Donc, l'effet net dépend de divers facteurs comme la composition du béton, les conditions environnementales et le temps.

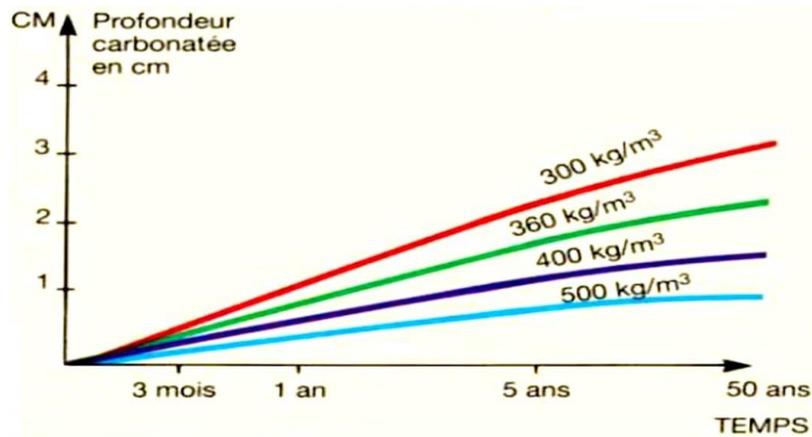


Figure I.23. Evolution de la carbonatation dans le béton en fonction du dosage en ciment [30]

- **L'humidité relative :** L'humidité atmosphérique joue un rôle crucial dans la vitesse de carbonatation, atteignant son maximum lorsque l'humidité relative se situe entre 50 et 70 %. Cette vitesse est pratiquement nulle en cas d'atmosphère sèche ou lorsque les bétons sont complètement saturés en eau. En effet, la diffusion du CO<sub>2</sub> sous forme gazeuse devient quasiment impossible lorsque la porosité du béton est saturée ou en présence d'une atmosphère trop sèche [3].

Une humidité élevée favorise généralement la carbonatation en fournissant plus d'eau pour la réaction chimique

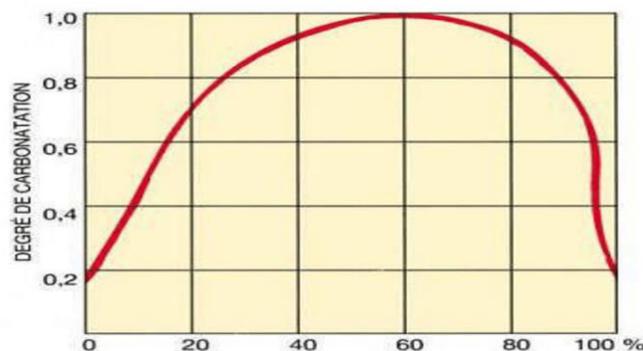


Figure I.24. Vitesse de carbonatation d'un matériau cimentaire en fonction de l'humidité relative d'équilibre du milieu environnant [32]

### ▪ La température :

L'influence de la température sur la vitesse de carbonatation du béton est complexe et peut varier en fonction de divers facteurs.

Les effets de la température sur les processus de carbonatation sont complexes. D'un côté, la solubilité des principaux réactifs de la carbonatation, tels que la portlandite, les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et le CO<sub>2</sub>, diminue également avec l'augmentation de la température. D'un autre côté, l'élévation de la température réduit la solubilité de la calcite, un produit de la réaction. Cependant, elle favorise les transports tels que la diffusion gazeuse et ionique des réactifs dans la solution interstitielle[33].

Des températures plus élevées peuvent accélérer la réaction de carbonatation, tandis que des températures plus basses peuvent la ralentir.

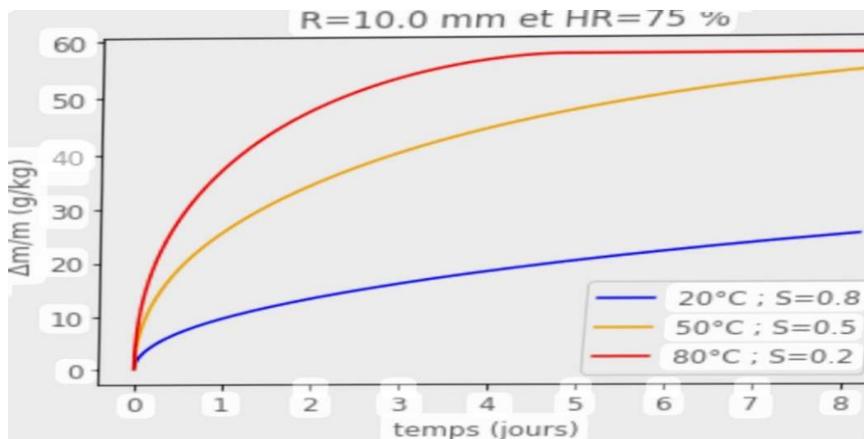


Figure I.25. Influence de la température sur la vitesse de carbonatation [33]

- **La résistance à la compression :** L'effet de la résistance à la compression sur la carbonatation du béton armé est complexe et bidirectionnel. Une résistance à la compression plus élevée peut être associée à une carbonatation plus lente, car un béton plus dense et moins poreux résiste mieux à la pénétration du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) [34]. Cependant, la carbonatation peut également améliorer la résistance à la compression en réduisant la porosité du béton et en augmentant sa densité [35].

En général, des bétons de haute résistance peuvent avoir une densité plus élevée et une porosité réduite, ce qui peut ralentir le taux de carbonatation.

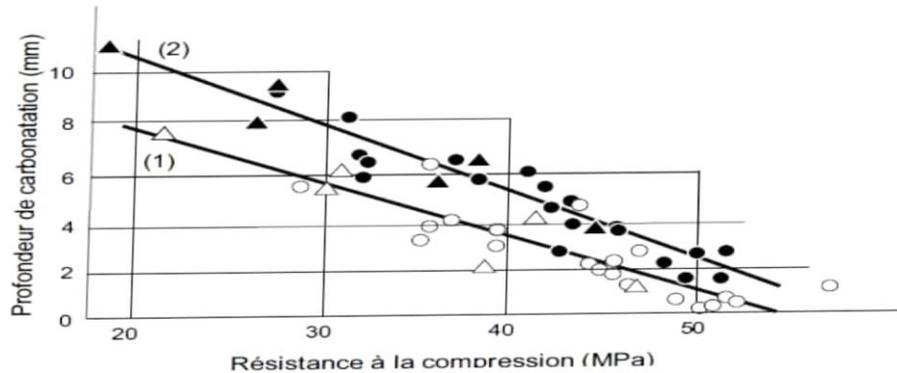


Figure I.26. La relation entre résistance à la compression à 28 jours Et profondeur carbonatée [36]

- **Le type de ciment :** Différents types de ciment peuvent avoir des réactivités différentes à la carbonatation. Par exemple, les ciments à faible teneur en alcalins peuvent être moins sensibles à la carbonatation que les ciments ordinaires.

C'est à dire que les bétons de ciment à base de laitier de haut fourneau se carbonatent beaucoup plus vite que les bétons de ciment portland pour un rapport E/C identique. On notera également qu'aux faibles E/C, seuls les bétons de ciment à base de laitier de haut fourneau se carbonatent [31].

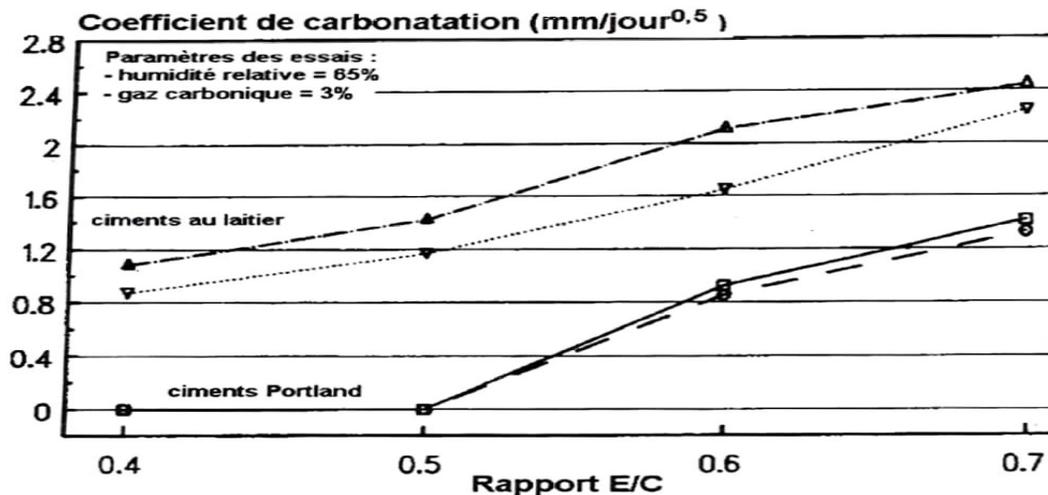


Figure I. 27. Coefficient de carbonatation suivant la nature du ciment [31]

- **La concentration en dioxyde de carbone :** L'impact de la concentration en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) sur la carbonatation du béton armé influe de manière complexe sur sa résistance à la compression. Une augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  peut accélérer la carbonatation, ce qui, en réduisant la porosité du béton et sa perméabilité aux gaz et aux agents corrosifs, peut potentiellement améliorer sa résistance mécanique [35].

### IV.7.5 Amorçage de la corrosion par pénétration des ions chlorures

#### IV.7.5.1 Généralités

L'action des chlorures est particulièrement observée dans certains environnements auxquels le béton peut être exposé, tels que les structures confrontées aux sels de déverglaçage ou situées dans des zones maritimes (comme les zones de marnage ou les surfaces exposées aux embruns).

Les ions chlorures présents dans le béton peuvent avoir été introduits par l'eau de gâchage ou par des agrégats contaminés. Les chlorures peuvent exister dans le béton sous les deux formes suivantes :

- Les chlorures libres, qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
- Les chlorures piégés ou liés résultent de la réaction chimique avec les hydrates du ciment, de leur combinaison avec des agrégats ou encore de leur adsorption physique sur les parois des pores du béton [30].

La corrosion débute dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassement. Ce seuil dépend du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment [26].

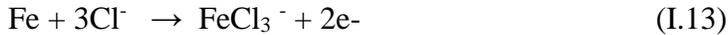
#### IV.7.5.2 Les réactions physico-chimiques

Comparé au mécanisme induit par la carbonatation, le mécanisme de corrosion électrochimique en présence de chlorures diffère en ce sens que la corrosion n'est plus généralisée mais devient locale sous forme de piqûres .

Les ions chlorures qui pénètrent dans le béton réagissent chimiquement avec l'aluminate tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  (un composant du ciment) pour former des monochloroaluminates hydratés ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) relativement stables dans le béton.

Les ions chlorure se combinent avec les ions hydrogène de l'eau pour produire de l'acide chlorhydrique, qui est ensuite régénéré en continu.

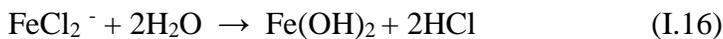
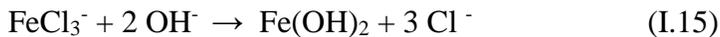
Les chlorures contribuent à la dépassivation de l'acier en modifiant la composition de la couche passive par formation des ions des ions  $FeCl_3^-$  ou  $FeCl_2$ , à partir des réactions : [37]



Ou



Ensuite, les ions formés consomment les hydroxydes présents, selon les réactions :



Ces réactions acidifient la solution, entraînent une diminution du pH et une régénération des ions chlorures (Figure I. 28)

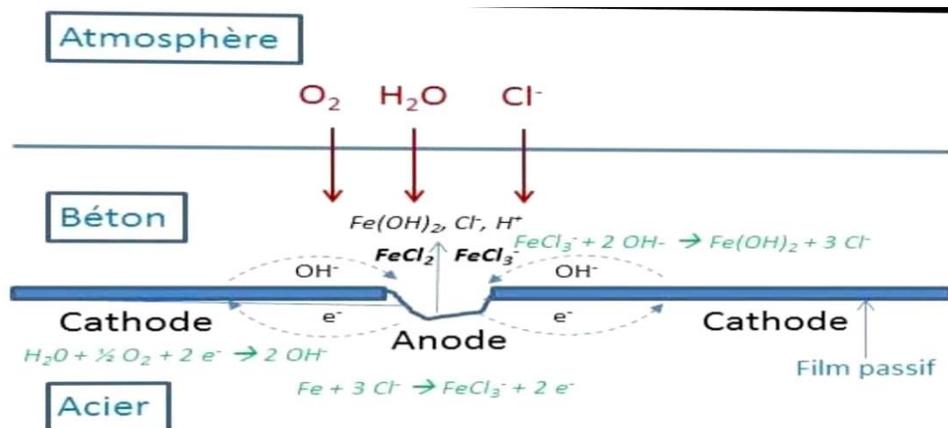


Figure I.28. Processus électrochimique de corrosion par les chlorures [37 ]

#### IV.7.5.3 Facteurs influant sur la pénétration des chlorures

- **Le rapport E/C**

Comme pour le phénomène de carbonatation, Le rapport eau/ciment (E/C) joue un rôle crucial dans la vitesse de pénétration des chlorures dans le béton. En général, une augmentation du rapport E/C conduit à une porosité accrue dans le béton, ce qui favorise la migration des ions chlorure à travers les pores. Ainsi, un rapport E/C plus élevé est souvent associé à une vitesse de pénétration des chlorures

plus rapide, ce qui peut potentiellement entraîner une corrosion accélérée des armatures métalliques à l'intérieur du béton[37]. En revanche, un rapport E/C plus faible peut réduire la perméabilité du béton aux chlorures, retardant ainsi le processus de corrosion.

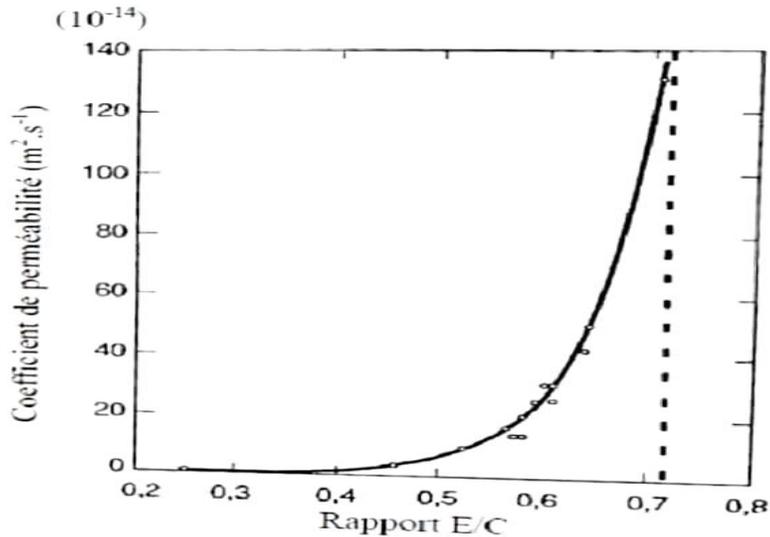


Figure I.29. Influence des additions [37]

### ▪ Influence du type de ciment

La teneur en aluminates du ciment influence fortement la capacité de fixation des ions chlorure. À teneur en chlorures totaux dans le béton équivalente, les chlorures libres seront moins nombreux dans un béton à base de ciment riche en C<sub>3</sub>A, ce dernier ayant la capacité de fixer les chlorures [38].

Le type de ciment utilisé peut influencer la réaction des ions chlorure dans le béton. Par exemple, les ciments contenant des quantités élevées de C<sub>3</sub>A (tricalcium aluminate) favorisent une réactivité accrue avec les chlorures, augmentant ainsi le risque de corrosion des armatures métalliques. En revanche, les ciments à faible teneur en C<sub>3</sub>A, tels que certains ciments résistants aux sulfates, peuvent réduire la réactivité avec les chlorures et donc aider à protéger le béton contre la corrosion. Ainsi, le type de ciment choisi peut jouer un rôle important dans la durabilité du béton face à la pénétration des ions chlorure.

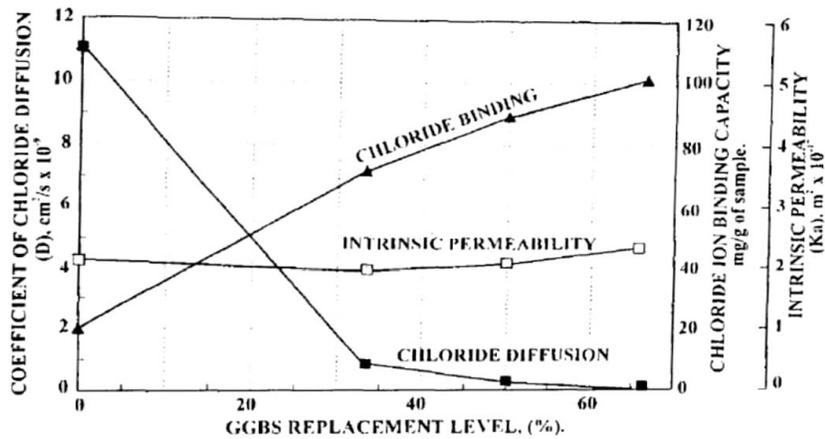


Figure I.30. Différentes propriétés d'un béton en fonction de sa teneur en laitier [38]

- **Influence du traitement thermique et de la cure**

Le traitement thermique modifie la microstructure du béton et donc sa capacité à répondre aux agressions chimiques. Une hydratation du ciment à 20 °C conduit à la formation de C-S-H de faible densité, tandis qu'une hydratation à 60 °C favorise la formation de C-S-H ayant une structure de forte densité (une couche d'hydrates se forme autour des grains de ciment, plus dense), ce qui peut réduire la capacité de fixation des chlorures. De plus, le traitement thermique conduit à une augmentation de la porosité entre les grains de ciment. Les pores des bétons ayant subi un traitement thermique seront en moyenne plus grands [38].

- **Influence des additions**

Les additions utilisées dans la formulation du béton, telles que les fillers minéraux ou les adjuvants, peuvent avoir une influence sur la pénétration des ions chlorure. Par exemple, l'ajout de fillers minéraux tels que le laitier de haut fourneau ou les cendres volantes peut réduire la perméabilité du béton, limitant ainsi la migration des ions chlorure à travers les pores. De même, l'utilisation d'adjuvants de réduction d'eau peut permettre d'abaisser le rapport eau/ciment, ce qui contribue également à réduire la perméabilité et donc la pénétration des chlorures. En conséquence, le choix et la quantité d'additions utilisées peuvent jouer un rôle crucial dans la protection du béton contre la corrosion induite par les chlorures.

- **Influence de l'environnement**

L'environnement peut affecter les ions chlorures dans le béton de plusieurs façons. Par exemple, dans les environnements côtiers où le sel est utilisé pour déneiger les routes, les chlorures peuvent pénétrer dans le béton par diffusion à travers les pores et les fissures, ce qui peut entraîner la corrosion des armatures métalliques et la détérioration du béton. Les conditions environnementales telles que l'humidité, la température et la présence d'autres substances chimiques peuvent également influencer la vitesse à laquelle les ions chlorures se déplacent à travers le béton.

Les ions chlorure peuvent pénétrer dans la matrice cimentaire de diverses manières en fonction du type d'exposition de la structure en béton. Dans les environnements marins en particulier, quatre zones distinctes sont identifiées. La méthode de pénétration des ions chlorure dans le béton exerce une influence significative sur le temps de dépassivation, même pour deux bétons identiques mais exposés différemment [38].

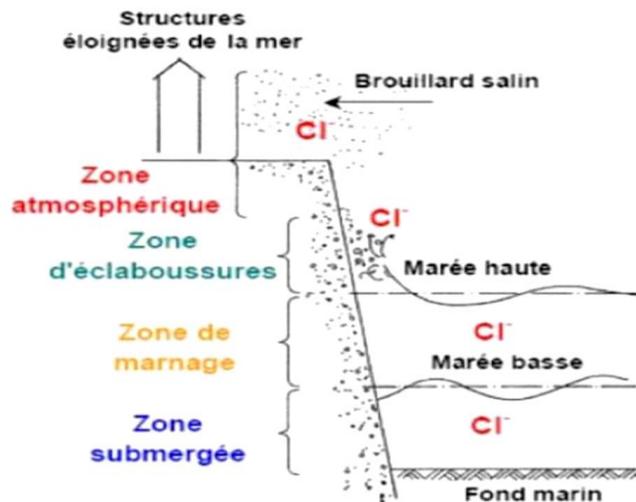


Figure I.31. Les différents types d'expositions de l'environnement marin [38]

- **Les zones soumises à des cycles humidification/séchage (marnage, éclaboussures et atmosphérique)** : les ions chlorure pénètrent d'abord dans le béton partiellement saturé par absorption capillaire (10 - 20 mm), puis par convection (via la phase liquide) et diffusion dans la partie saturée du béton. Lorsque le béton s'assèche (marée basse), l'eau s'évapore du béton, ce qui entraîne l'accumulation des ions chlorure dans le matériau [38].

En conséquence, la durabilité et la résistance du béton peuvent être compromis dans des environnements contenant des concentrations élevées d'ions chlorure .

- **La zone submergée :** chlorures pénètrent par diffusion sous gradient de concentration dans la matrice cimentaire car le béton est saturé en eau.

### V. Méthodes de surveillance de la corrosion par CANIN+

Dans les structures de génie civil en béton armé, la corrosion des armatures représente 80% des pathologies observées, ayant ainsi des conséquences importantes sur la capacité portante des ouvrages [39].

La caractérisation électrochimique de la corrosion implique le suivi de l'évolution du potentiel de l'acier. La mesure du potentiel de corrosion, largement utilisée en génie civil, est une technique non destructive qui permet d'estimer l'état de corrosion des structures en béton armé par rapport à une électrode de référence [25].

Pour mesurer le potentiel de corrosion, notamment dans le contexte de la corrosion des armatures en béton armé, on peut utiliser des méthodes telles que la mesure du potentiel électrochimique. Cette méthode permet d'estimer le degré de rouille des aciers dans le béton en mesurant le potentiel électrochimique de l'acier par rapport à une électrode de référence. Selon la norme ASTM C-876-91, différents seuils de potentiel sont associés à des probabilités de corrosion spécifiques.

Une autre approche consiste à utiliser des dispositifs comme CANIN+ pour mesurer le potentiel de corrosion des armatures directement dans le béton. Ces mesures permettent d'évaluer l'état de corrosion des armatures et d'anticiper les besoins en termes d'entretien et de réparation des structures en béton armé. Ces méthodes offrent des moyens précis pour évaluer et surveiller la corrosion des armatures, contribuant ainsi à maintenir l'intégrité et la durabilité des structures en béton armé.

#### V.1 Généralités sur la méthode CANIN+

La méthode CANIN+ (Capacité des structures de béton armé à la rupture - Norme+) est une approche avancée qui combine des modèles analytiques et probabilistes pour évaluer la capacité portante et la durée de vie résiduelle des structures en béton armé. Elle prend en compte divers facteurs influençant la durabilité et la sécurité des structures, tels que la corrosion des armatures, les fissures, la charge structurelle, les conditions environnementales, etc.

Cette méthode intègre des données d'inspection détaillées ainsi que des données sur la conception et la construction de la structure et des données sur l'environnement pour évaluer son état actuel et prédire son comportement futur

En utilisant des techniques avancées d'analyse de données et des modèles de fiabilité, elle permet aux ingénieurs et aux gestionnaires des infrastructures de prendre des décisions éclairées concernant la maintenance, la réhabilitation ou le remplacement des structures en béton armé.

CANIN+ est conçu pour être un outil complet de gestion des actifs d'infrastructures, permettant une évaluation précise de la durabilité et de la sécurité des structures tout au long de leur cycle de vie. Son utilisation peut contribuer à prolonger la durée de vie des infrastructures, à réduire les coûts de maintenance et à garantir la sécurité des usagers

### V.2 Principe de la méthode de CANIN+

L'instrument d'analyse de la corrosion CANIN+ fournit deux méthodes de recherche et d'évaluation de la corrosion de l'acier dans le béton : Méthode de mesure du potentiel à demi-cellule et la méthode de la résistivité du béton. Cette combinaison des mesures de résistivité et de potentiel vous permet d'obtenir des informations aussi précises que possible sur l'état de corrosion des barres d'armature [40].

Pour évaluer la corrosion de la surface métallique dans le béton ou le mortier, une méthode courante est l'utilisation de mesures de potentiel de demi-cellules, une approche non destructive. Cette méthode quantifie la différence de potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) entre l'armature et le béton par rapport à une électrode de référence. Initialement développée par Stratful, cette technique utilise une demi-cellule constituée d'un tube avec une extrémité poreuse contenant une tige métallique immergée dans une solution saturée de son propre sel.

Pour CANIN+, une demi-cellule Cu/CuSO<sub>4</sub> est souvent utilisée comme électrode de référence, connectée à un voltmètre à haute impédance. Cette configuration offre une évaluation précise de la corrosion, permettant aux ingénieurs de prendre des décisions éclairées sur la maintenance et la réparation des structures en béton armé, assurant ainsi leur durabilité et leur sécurité à long terme [41].

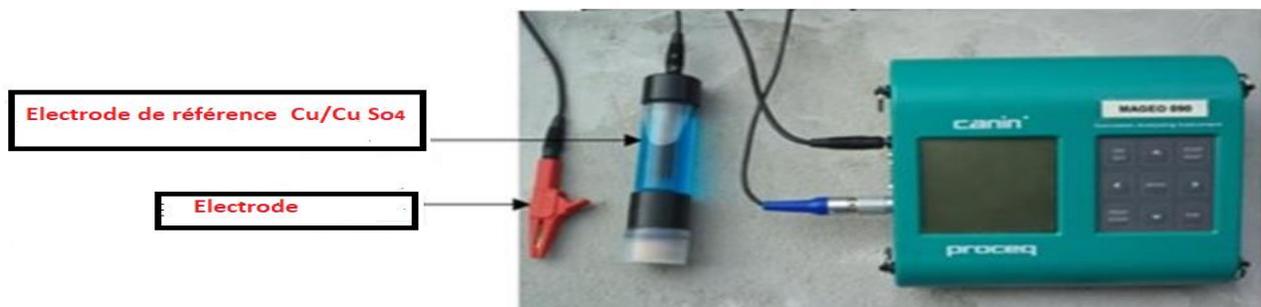


Figure 1.32. Appareil CANIN+

### VI. Conclusion

Le phénomène de corrosion dans les structures en béton armé constitue un défi crucial dans l'industrie de la construction. Ce chapitre a mis en lumière les différents types et formes de corrosion, ainsi que les mécanismes sous-jacents à ce processus destructeur, notamment la carbonatation et la pénétration d'ions chlorures. Ces facteurs contribuent à compromettre la durabilité et la sécurité des structures en béton armé. Comprendre ces phénomènes est crucial pour mettre en place des stratégies de prévention et d'intervention efficaces.

Mesurer le potentiel de corrosion à l'aide d'instruments comme le CANIN + offre la possibilité de repérer et d'évaluer le degré de corrosion sans causer de dommages à la structure. Cette approche permet d'intervenir précocement et de manière ciblée afin de limiter les dommages potentiels, assurant ainsi la longévité des ouvrages. Dans le chapitre suivant, nous explorerons l'utilisation des réseaux de neurones artificiels dans le domaine du génie civil.

# CHAPITRE 2

*Utilisation des réseaux de  
neurones artificiels en génie  
civil*

### I. Introduction

Dans le domaine du génie civil, les défis de prise de décision sont souvent amplifiés par la complexité des systèmes et des environnements. Les méthodes traditionnelles, basées sur des calculs mathématiques et l'expérience pratique, montrent parfois leurs limites lorsqu'il s'agit de modéliser et de prédire avec précision le comportement des structures et des matériaux.

C'est ici que les réseaux de neurones, une branche de l'intelligence artificielle inspirée du fonctionnement du cerveau humain, interviennent. Ils offrent une approche prometteuse pour surmonter les défis du génie civil grâce à leur capacité à apprendre à partir de données, à détecter des schémas complexes et à généraliser ces modèles pour prendre des décisions ou prédire des résultats. Dans ce qui suit, nous examinerons en détail l'utilisation des réseaux de neurones dans le domaine du génie civil.

### II. L'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est un système spécialisé pour comprendre les entités intelligentes, les construire et rendre le processus de prise de décision simple, rapide et efficace [42].

Il se réfère à la capacité des machines ou des programmes informatiques à effectuer des tâches qui nécessiteraient normalement l'intelligence humaine. Cela inclut des domaines tels que la résolution de problèmes, la reconnaissance de formes, l'apprentissage, la compréhension du langage naturel et la prise de décision. L'IA utilise souvent des algorithmes et des modèles mathématiques pour analyser des données et trouver des solutions à des problèmes complexes.

Dans le domaine du génie civil, l'intelligence artificielle couvre une vaste zone pour les avantages humains, notamment dans la conception en ingénierie, la gestion de la construction et la prise de décisions de programme, et peut résoudre des problèmes complexes au niveau des experts en imitant ces derniers [42].

Les réseaux neuronaux artificiels illustrent un sujet interdisciplinaire contemporain qui contribue à résoudre une variété de problèmes d'ingénierie auparavant insolubles par les méthodes traditionnelles de modélisation et statistiques.

### III. Neurone

#### III.1 Neurone biologique

Un neurone est une cellule spécialisée du système nerveux, responsable de la transmission des signaux électriques et chimiques. Les neurones sont les unités fonctionnelles de base du système nerveux et sont essentiels à la communication entre les différentes parties de l'organisme. Ils sont composés d'un corps cellulaire contenant le noyau et divers organites, de dendrites qui reçoivent les signaux provenant d'autres neurones ou de cellules sensorielles, et d'un axone qui transmet les signaux à d'autres neurones ou à des cellules effectrices comme les muscles ou les glandes [43].

Les neurones communiquent entre eux au niveau des synapses, où des neurotransmetteurs chimiques sont libérés pour transmettre les signaux d'un neurone à l'autre. Cette communication entre les neurones permet la perception sensorielle, le traitement de l'information et la régulation des fonctions physiologiques et comportementales. Ils ont deux propriétés physiologiques : l'excitabilité, c'est-à-dire la capacité de répondre aux stimulations et de les convertir en impulsions nerveuses, et la conductivité, c'est-à-dire la capacité de transmettre les impulsions. [43].

Les processus à l'intérieur des réseaux neuronaux biologiques sont très complexes il est donc presque impossible de créer un modèle mathématique qui sera absolument identique au réseau neuronal biologique [44].

### III.2 Neurone artificiel (formel)

Un neurone artificiel, également appelé neurone formel dans certains contextes, est une unité fondamentale dans les réseaux de neurones artificiels (ANN). Sa conception et ses fonctionnalités sont inspirées de l'observation d'un neurone biologique, qui constitue l'élément de base des réseaux neuronaux biologiques comprenant le cerveau, la moelle épinière et les ganglions périphériques [45].

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend des paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie" [46]. Ils sont organisés en couches dans les réseaux de neurones, avec chaque neurone d'une couche recevant des entrées de tous les neurones de la couche précédente.

L'évaluation de la sortie se réalise généralement en combinant de manière pondérée les entrées, suivie de leur passage à travers une fonction non linéaire. Mathématiquement, ce processus peut être représenté par les équations suivantes. [47] :

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0 x_0 \quad (\text{II.1})$$

$$y = f(S) \quad (\text{II.2})$$

$x_i$ : Composantes du vecteur d'entrée.

$w_i$ : Composantes du vecteur poids synaptique.

$S$ : Somme pondérée appelée potentiel

Le terme ( $w_0 \cdot x_0 = \theta_0$  avec  $x_0 = 1$ ) représente la valeur du seuil interne qui doit être dépassée pour l'activation de la sortie du neurone. La non linéarité  $f(\cdot)$  est appelée fonction d'activation.

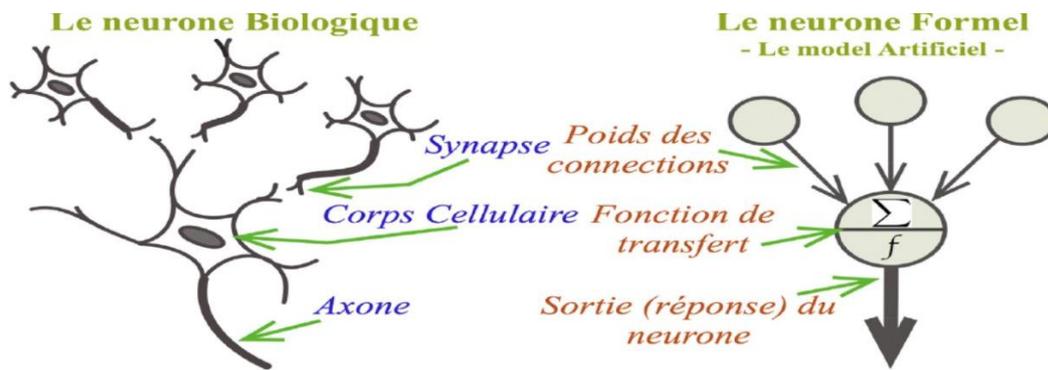
La somme pondérée peut se réécrire sous la forme simple suivante:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (\text{II.3})$$

Il y a une analogie évidente (Tableau II.1) avec les neurones biologiques :

**Tableau.II.1.** Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel [47]

Neurones biologiques	Neurones artificiels
Synapses	Connections pondérées
Axons	Sorties
Dendrites	Entrées
Sommateur	Fonction d'activation



**Figure II.1.** Similitude entre un neurone biologique et artificiel [48]

#### IV. Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones, également appelés réseaux de neurones artificiels (ANN) ou réseaux de neurones simulés (SNN), constituent un sous-ensemble de l'apprentissage automatique, au cœur des algorithmes d'apprentissage en profondeur [49]. Ils sont constitués de structures mathématiques interconnectées, composées de neurones qui échangent des informations via des connexions pondérées. Inspirés par le fonctionnement du système nerveux humain, ces réseaux sont capables de reproduire les caractéristiques essentielles du système nerveux biologique, telles que la collecte, la mémorisation et le traitement de données expérimentales diverses. Leurs principales caractéristiques incluent leur capacité à analyser de vastes ensembles de données, à apprendre à partir d'expériences passées, et à résoudre des problèmes complexes et ambigus pour lesquels il n'existe pas de solution unique [44].

ANN est un modèle mathématique qui tente de simuler la structure et les fonctionnalités des réseaux neuronaux biologiques [50]. Le perceptron multicouche (PM) est le modèle le plus largement utilisé. Il se compose d'une couche d'entrée de neurones, d'une ou plusieurs couches cachées de neurones et d'une couche finale de neurones de sortie. Chaque neurone dans une couche est connecté aux neurones de la couche adjacente avec différents poids [51]. Le neurone accepte des entrées provenant d'une source unique ou multiple et produit des sorties par des calculs simples, en traitant avec une fonction non linéaire prédéterminée [52]. Il se connecte à un autre et possède un poids et un

seuil associés. Si la sortie d'un nœud est supérieure à la valeur de seuil spécifiée, ce nœud est activé et envoie des données à la couche suivante du réseau. Sinon, aucune donnée n'est transmise à la couche suivante du réseau [49].

### IV.1 Historique

L'histoire des réseaux de neurones est plus longue que la plupart des gens ne le pensent, remonte aux années 1940, lorsqu'ils ont été initialement proposés comme un modèle mathématique pour simuler le fonctionnement du cerveau humain. Les premiers travaux dans ce domaine ont été réalisés par Warren McCulloch et Walter Pitts en 1943, qui ont publié un article décrivant un modèle de neurone artificiel simple. Ce modèle de neurone était basé sur des concepts biologiques de neurones, tels que la transmission de signaux électriques entre les cellules nerveuses [50].

Dans les années 1950, le psychologue Donald Hebb a introduit le concept de plasticité synaptique, affirmant que la force des connexions entre les neurones était renforcée lorsque les neurones étaient activés simultanément. Cette idée a jeté les bases de l'apprentissage par association, un principe fondamental dans le développement des réseaux de neurones.

En 1958, Frank Rosenblatt a développé le perceptron, l'un des premiers modèles de réseau de neurones artificiels capables d'apprendre à partir de données. Le perceptron a été largement étudié pour sa capacité à résoudre des problèmes de classification linéaire [53].

Dans les années 1960 et 1970, les recherches sur les réseaux de neurones ont été freinées en raison de limitations techniques et de résultats décevants. Les ordinateurs de l'époque étaient peu puissants pour gérer les calculs complexes nécessaires pour entraîner des réseaux de neurones profonds, et les chercheurs ont commencé à se tourner vers d'autres approches telles que les machines à vecteurs de support (SVM) et les systèmes experts[46].

Cependant, dans les années 1980 et 1990, les réseaux de neurones ont connu un regain d'intérêt avec le développement de nouveaux algorithmes d'apprentissage, tels que la rétropropagation, qui permettent de former des réseaux de neurones à plusieurs couches. Ces avancées ont permis aux réseaux de neurones d'atteindre des performances remarquables dans des tâches telles que la reconnaissance de la parole, la vision par ordinateur et le traitement du langage naturel [46] [50].

Depuis lors, les réseaux de neurones ont continué à évoluer et à se développer, avec des architectures de réseaux plus complexes telles que les réseaux de neurones profonds, qui sont capables d'apprendre des représentations hiérarchiques de données complexes. Aujourd'hui, les réseaux de neurones sont largement utilisés dans de nombreux domaines, notamment l'informatique, la médecine, Ils se sont répandus dans divers domaines, notamment la finance, entre autres, et sont désormais un élément indispensable pour le traitement des données et la résolution de problèmes complexes.

Les réseaux de neurones artificiels ont été appliqués dans divers domaines hiérarchiques, allant de la reconnaissance d'images à la modélisation financière, démontrant ainsi leur utilité dans la résolution de problèmes complexes à différentes échelles de complexité.

### IV.2 Architecture des réseaux de neurones

L'architecture d'un réseau de neurones est l'organisation des neurones entre eux au sein d'un même réseau, c'est-à-dire comment ils sont arrangés et interconnectés. La configuration d'un réseau de neurones est influencée par la nature de la tâche qu'il doit apprendre.

#### IV.2.1 Types de couches

En général, un réseau de neurones artificiels peut être divisé en trois parties:

**1. Couche d'entrée :** Cette couche recueille des informations provenant de sources externes, telles que des données, des signaux, des caractéristiques ou des mesures. Ces entrées sont habituellement normalisées pour se situer dans les limites déterminées par les fonctions d'activation.

**2. Couches cachées :** Les couches cachées sont composées d'un nombre spécifique de neurones chargés d'extraire les motifs liés au processus ou au système en cours d'analyse. Ces couches réalisent la majeure partie du traitement interne du réseau.

**3. Couches de sortie :** Cette couche se compose également d'un certain nombre de neurones et est donc responsable de la production et de la présentation des sorties finales du réseau, qui résultent du traitement effectué par les neurones dans la couche précédente [54].

#### IV.2.2 Les classes du réseau de neurone artificiel

On distingue deux principaux types d'architectures de réseaux de neurones : [46]

- Les réseaux de neurones statiques (également appelés acycliques ou non bouclés),
- Les réseaux de neurones dynamiques (aussi connus sous le nom de récurrents ou bouclés).

Les réseaux bouclés sont principalement employés pour des tâches telles que le traitement du signal, le contrôle ou la régulation. En revanche, les réseaux non bouclés sont utilisés pour des applications comme la reconnaissance, la classification ou la prédiction [55].

L'architecture des réseaux de neurones artificiels, qui prend en compte le positionnement des neurones, leurs interconnexions et la composition de leurs couches, peut être divisée en différentes catégories [53] :

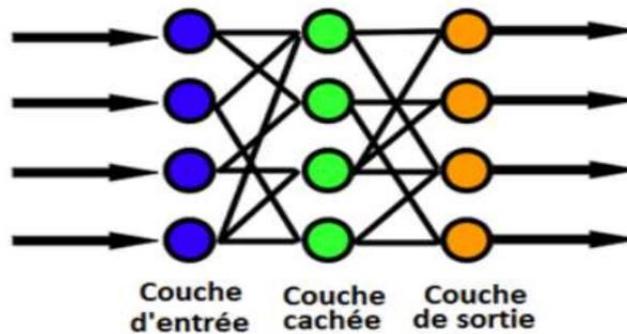
##### IV.2.2.1 Les réseaux de neurones non bouclés (statiques)

Les réseaux de neurones statiques non bouclés, souvent simplement appelés réseaux de neurones classiques ou réseaux de neurones feedforward, sont une forme de réseau de neurones artificiels où l'information circule uniquement dans une direction, de la couche d'entrée à la couche de sortie, sans rétroaction ou boucle interne. Ces réseaux sont caractérisés par une architecture

composée de plusieurs couches de neurones, chaque neurone étant connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante.

Ils sont des formules algébriques dont les valeurs numériques sont calculées par des programmes d'ordinateurs, non des objets physiques (circuits électroniques spécialisés) ; néanmoins, le terme de connexion, issu des origines biologiques des réseaux de neurones [43].

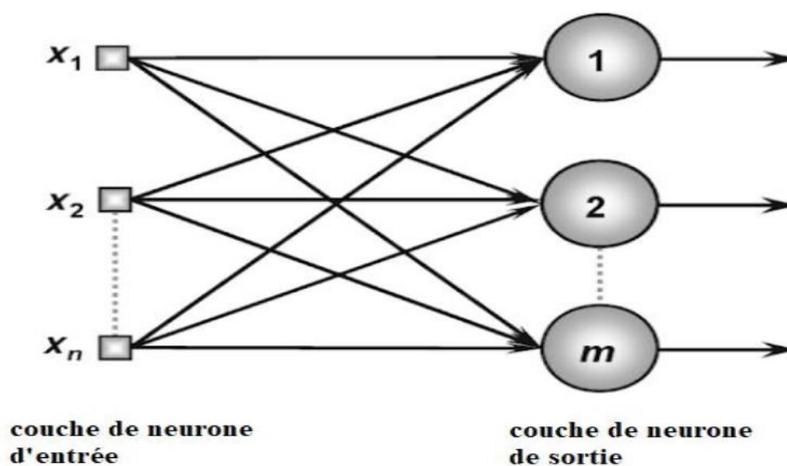
Dans les réseaux de neurones feedforward, il n'y a pas de mémoire interne qui conserve l'état précédent du réseau. Chaque entrée est traitée indépendamment des autres, et les sorties ne dépendent que des entrées actuelles et des poids des connexions entre les neurones.



**Figure II.2.** Réseaux de neurone non bouclé (feedforward) [43]

### **A . Réseau de transmission simple couche**

Ce réseau de neurones artificiels possède uniquement une couche d'entrée et une couche de sortie correspondante. La Figure II.3 illustre un réseau de neurones à alimentation avant à une seule couche, comprenant 'n' entrées et 'm' sorties.



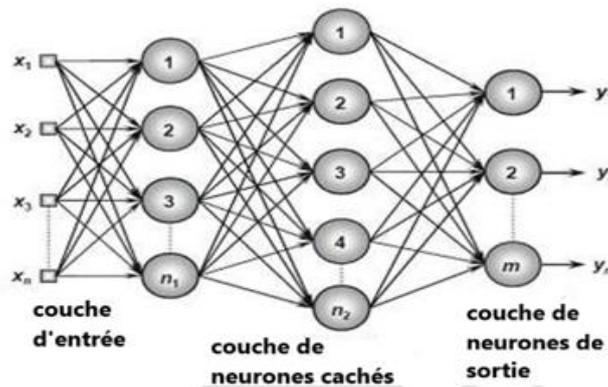
**FigureII.3.** Réseau à alimentation avant à une seule couche [56]

On note aussi que les réseaux multicouches sont beaucoup plus puissants que les réseaux simples à une seule couche. En utilisant deux couches (une couche cachée et une couche de sortie) [46].

**B . Réseau de transfert de donnée à couches multiples**

Ce réseau de neurones artificiels est équipé d'une ou plusieurs couches cachées entre la couche d'entrée et les couches de sortie. Il est typiquement employé pour résoudre des problèmes complexes tels que l'identification de systèmes, le contrôle de processus, l'optimisation, la robotique et bien d'autres encore.

La Figure II.4 montre un réseau à alimentation avant avec plusieurs couches composé d'une couche d'entrée avec 'n' signaux d'échantillonnage, deux couches neuronales cachées constituées respectivement de 'n<sub>1</sub>' et 'n<sub>2</sub>' neurones, et enfin, une couche neuronale de sortie composée de 'm' neurones représentant les valeurs de sortie respectives du problème analysé [54] .



**Figure II.4 . Réseau à alimentation avant à plusieurs couches [56]**

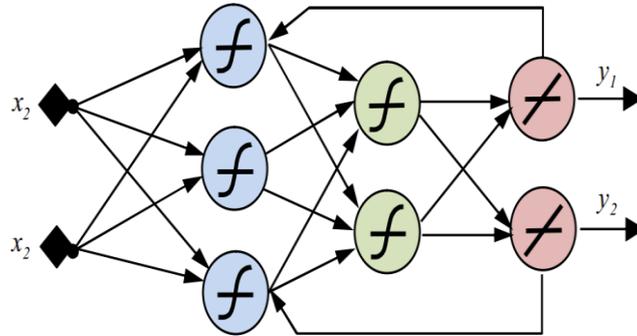
**IV.2.2.2 Les réseaux de neurones bouclés (dynamiques ou récurrents)**

Les réseaux de neurones bouclés, également connus sous le nom de réseaux de neurones récurrents (RNN), Il est similaire à un réseau neuronal à propagation avant, sans limitations concernant les boucles de rétroaction. Dans ces cas, l'information n'est plus transmise uniquement dans une direction, mais elle est également transmise en arrière [45].

Ils sont une classe de réseaux de neurones artificiels spécialement conçus pour traiter des données séquentielles. Contrairement aux réseaux de neurones classiques où l'information circule uniquement de l'entrée vers la sortie, les RNN possèdent des connexions récurrentes qui leur permettent de conserver une forme de mémoire à travers le temps.

Dans un RNN, chaque neurone reçoit non seulement des entrées de la couche précédente, mais également des informations provenant de sa propre sortie à un instant précédent. Cela crée une boucle dans le réseau, ce qui lui permet de prendre en compte le contexte séquentiel dans ses prédictions ou classifications[56].

Les réseaux de neurones bouclés sont largement utilisés dans des tâches telles que la traduction automatique, la génération de texte, l'analyse de séquences temporelles et la reconnaissance de la parole, où la séquentialité des données est cruciale pour la compréhension et la prise de décision.



**Figure II.5.** Réseaux de neurone bouclé [46]

### IV.3 Aspects mathématiques d'ANN

#### IV.3.1 Coefficient de pondération

Le terme "coefficient de pondération" se réfère aux valeurs attribuées aux connexions entre les neurones dans un réseau de neurones artificiels (ANN). Ces coefficients sont utilisés pour pondérer l'importance relative des signaux entrants dans chaque neurone. Ils sont les éléments clés de chaque réseau neuronal. En d'autres termes, ils déterminent l'impact que chaque entrée aura sur la sortie du neurone.

Chaque connexion entre les neurones est associée à un coefficient de pondération, qui peut être positif, négatif ou nul. Ces poids sont ajustés au cours de l'apprentissage du réseau neuronal afin d'optimiser sa capacité à produire des sorties précises en fonction des entrées fournies.

Chacun des neurones d'entrée a son propre coefficient de poids. En multipliant ces coefficients de poids par les signaux d'entrée et en les additionnant, nous calculons le signal d'entrée de chaque neurone [44].

Un vecteur constitué d'un ensemble de variables (données d'entrée)  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  exerce une influence sur le comportement du système. , et le vecteur de pondération ( les coefficients de poids appropriés ) sont  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  [46].

Les impulsions des neurones d'entrée sont  $w_1x_1$ ,  $w_2x_2$  et  $w_3x_3$ . Le neurone enregistre l'impulsion d'entrée sommée qui est égale à la somme de toutes les impulsions d'entrée :  $X = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3$ . L'impulsion reçue est traitée à travers une fonction de transformation appropriée (fonction d'activation),  $f(x)$ , et le signal de sortie du neurone sera :  $Y = f(x) = f(w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3)$  [44].

Le vecteur de sortie du système Y est formé d'un ensemble de variables résultantes, déterminées par les valeurs de la fonction f appliquée au produit scalaire du vecteur X et W, auquel on soustrait b. Ces variables représentent le comportement du système ( $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ). L'équation II.1 décrit cette opération [57].

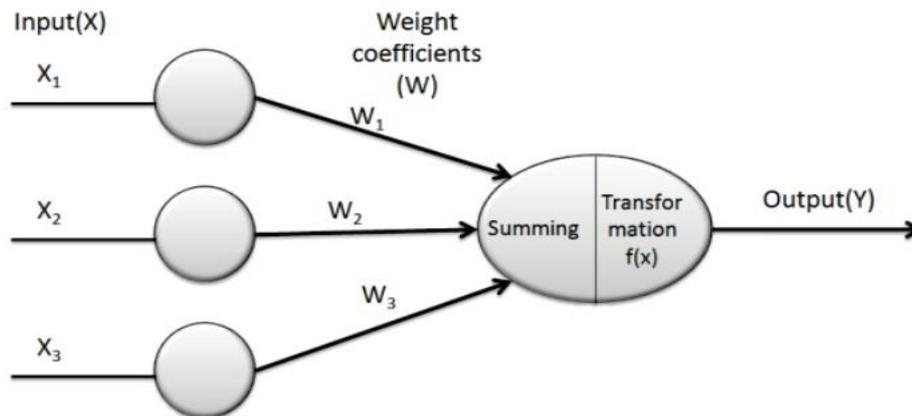
$$y_j = f(X \times w_j - b_j) \quad (\text{II.4})$$

D'où :

b est la valeur de seuil, également appelée polarisation, associée à ce nœud.

La fonction f est appelée fonction d'activation [25].

En langage de réseaux de neurones artificiels, le biais b d'un nœud doit être dépassé avant que celui-ci puisse être activé. Une fois reçue, l'impulsion est traitée par une fonction de transformation appropriée, également connue sous le nom de fonction d'activation f(x).



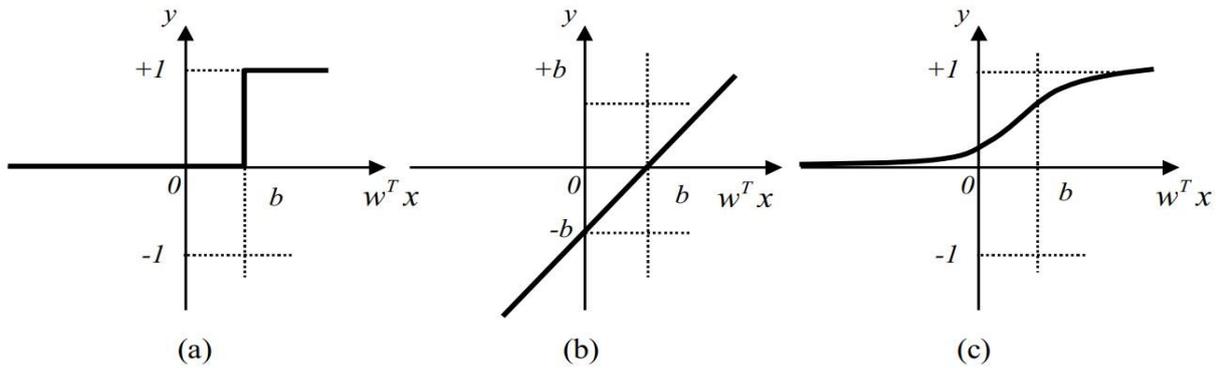
**Figure III. 6 .** Diagramme schématique d'un nœud typique [44]

### IV.3.2. Fonctions d'activation

Les fonctions d'activation sont des fonctions mathématiques appliquées à la sortie de chaque neurone dans un réseau de neurones artificiels. Elles introduisent de la non-linéarité dans le modèle[44], permettant au réseau de capturer des relations complexes entre les données d'entrée et de sortie. Ces fonctions sont choisies en fonction des caractéristiques spécifiques du problème à résoudre et des performances souhaitées, et elles sont utilisées dans différentes parties des réseaux de neurones.

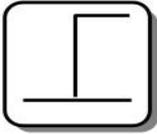
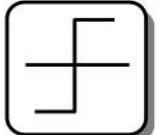
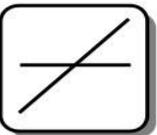
La fonction seuil applique un seuil à son entrée. Plus précisément, une entrée négative ne dépasse pas le seuil, et la fonction renvoie la valeur 0 (interprétée comme faux). En revanche, une entrée positive ou nulle dépasse le seuil, et la fonction renvoie la valeur 1 (interprétée comme vrai).

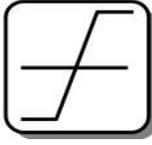
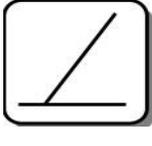
Utilisée dans le contexte d'un neurone, cette fonction détermine si le neurone doit être activé en fonction de l'entrée reçue [46];



**Figure II.7.** Fonctions d'activations: (a) du neurone «seuil» ; (b) du neurone «linéaire», et (c) du neurone «sigmoïde»[46]

**Tableau II.2.** Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA [44]

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	Icône	Nom MATALB
Seuil	$y = 0$ si $s < 0$ $y = 1$ si $s \geq 0$		hardlim
Seuil symétrique	$y = -1$ si $s < 0$ $y = 1$ si $s \geq 0$		hardlims
Linéaire	$y = s$		purelin

Linéaire saturée	$y = 0$ si $s \leq 0$ $y = s$ si $0 \leq s \leq 1$		satlin
Linéaire saturée symétrique	$y = -1$ si $s < -1$ $y = s$ si $-1 \leq s \leq 1$ $y = 1$ si $s > 1$		satlins
Linéaire positive	$y = 0$ si $s \leq 0$ $y = s$ si $s \geq 0$		poslin
Sigmoïde	$y = \frac{1}{1+e^{-s}}$		logsig
Tangente hyperbolique	$y = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$		Tansig
Compétitive	$y = 1$ si $s$ maximum $y = 0$ autrement		compet

#### IV.4 . Apprentissage des réseaux de neurones

Lors de la définition de l'architecture d'un réseau, il est essentiel de procéder à un processus d'apprentissage pour ajuster les poids des paramètres (connexions) afin d'obtenir une sortie qui se rapproche de l'objectif initial.

L'apprentissage automatique, ou machine learning en anglais, est une discipline de l'intelligence artificielle qui permet aux systèmes informatiques d'apprendre à partir de données et de

prendre des décisions ou de faire des prédictions sans être explicitement programmés à cet effet [50]. Il représente une phase essentielle dans le développement d'un réseau de neurones. Pendant cette phase, les poids synaptiques du réseau sont ajustés afin d'optimiser sa capacité à remplir la tâche spécifique pour laquelle il a été conçu.

Au sein de l'apprentissage machine, on distingue principalement trois types d'approches : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement.

### IV.4.1 Les types d'apprentissage des réseaux de neurones

- **L'apprentissage supervisé**

L'apprentissage supervisé consiste à entraîner un modèle sur un ensemble de données étiquetées [58], c'est-à-dire des données pour lesquelles les résultats attendus sont connus. Le modèle apprend à établir des relations entre les entrées et les sorties en se basant sur ces données étiquetées.

Un modèle d'apprentissage supervisé peut être entraîné à reconnaître des images d'animaux en se basant sur un ensemble d'images déjà étiquetées avec le type d'animal correspondant, par exemple, à un réseau de neurones à faire la différence entre des photos de chats ou de chiens en lui montrant des centaines d'images et en lui précisant à chaque fois de quel animal il s'agit de sorte qu'il finira par apprendre ce qui caractérise un chat ou un chien, et saura reconnaître ces caractéristiques sur une photo qu'il n'aura jamais vue [59].

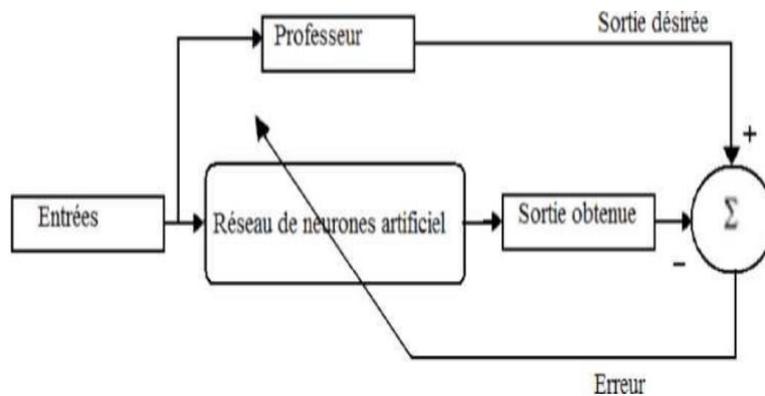


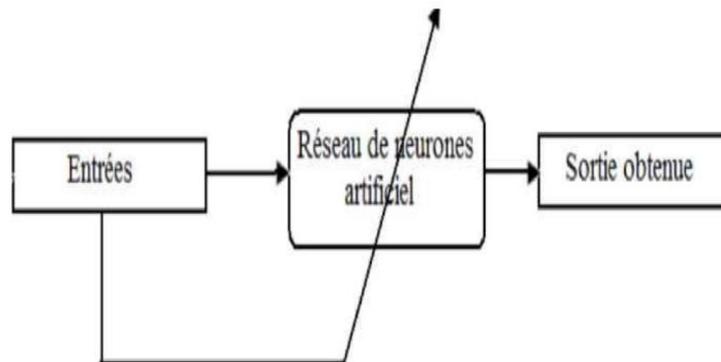
Figure II.7. Schéma bloc de l'apprentissage supervisé d'un réseau de neurone [55]

- **L'apprentissage non supervisé**

L'apprentissage non supervisé implique l'ajustement des poids à partir d'un ensemble de données unique, sans fournir de résultat désiré au réseau. Dans ce cas, le réseau apprend à détecter les similarités et les différences dans l'ensemble de données. Les poids et les sorties du réseau convergent, en théorie, vers des représentations qui capturent les régularités statistiques des données. Ce type d'apprentissage est également appelé compétitif et/ou coopératif [60]. L'avantage de ce

type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation, connue sous le nom d'auto-organisation[47]. L'apprentissage non supervisé est principalement utilisé pour la reconnaissance de motifs, le traitement du signal et l'analyse factorielle.

Il ne nécessite pas de données étiquetées. Dans ce cas, le modèle cherche à découvrir des structures ou des patterns intrinsèques dans les données sans qu'il y ait de résultats attendus explicitement définis. Par exemple, dans le cadre de l'analyse de données, un algorithme d'apprentissage non supervisé peut regrouper des clients en segments homogènes en fonction de leurs comportements d'achat, sans avoir besoin d'étiquettes préexistantes.



**Figure II.8.** Schéma bloc de l'apprentissage non supervisé d'un réseau de neurone [55]

- **L'apprentissage par renforcement**

L'apprentissage par renforcement est un domaine un peu différent des précédents puisqu'on cherche ici à influencer le comportement d'un algorithme d'intelligence artificielle à partir de récompenses si l'algorithme se comporte comme on le souhaite, et de pénalités dans le cas contraire [59]. Il implique un agent qui interagit avec un environnement dynamique en prenant des actions afin de maximiser une récompense cumulative. L'agent apprend à prendre des décisions en fonction de l'état actuel de l'environnement et de ses expériences passées. Ce type d'apprentissage est souvent utilisé dans des domaines comme les jeux, la robotique ou la gestion de systèmes autonomes.

En combinant ces différentes approches, l'apprentissage machine offre un large éventail d'applications dans divers domaines, allant de la reconnaissance d'images à la recommandation de produits en passant par la prise de décision autonome. Le type d'interconnexion entre les couches de neurones et les fonctions de transfert varie selon les besoins spécifiques des tâches à accomplir, et il n'existe pas de procédure standard pour leur configuration, offrant ainsi une grande flexibilité dans la conception des architectures. [62].

### **IV.5. Application de l'analyse neuronale en génie civil**

L'application de l'analyse neuronale en génie civil représente une convergence passionnante entre l'intelligence artificielle et l'ingénierie traditionnelle, offrant de nouvelles perspectives pour la conception, la modélisation, la gestion et la maintenance des infrastructures civiles.

Les réseaux neuronaux, en tant qu'outil puissant d'apprentissage automatique, sont de plus en plus utilisés pour résoudre une variété de problèmes complexes dans le domaine du génie civil.

Ils offrent une approche novatrice pour aborder ces défis en exploitant la capacité des ordinateurs à apprendre à partir de données. En combinant des algorithmes d'apprentissage automatique avec des données d'ingénierie, les réseaux neuronaux peuvent être formés pour reconnaître des modèles complexes, prédire des comportements futurs et prendre des décisions basées sur ces prédictions[63].

Les applications des réseaux neuronaux en génie civil sont vastes et diversifiées.

### IV.5.1 Étude du comportement des matériaux de construction

En raison de sa composition composite et de la diversité des influences qui le façonnent, le béton armé présente des défis dans son comportement structurel. Les approches classiques de conception et d'analyse de ce matériau sont restreintes et souvent imprécises, basées sur des tests expérimentaux coûteux et chronophages. L'utilisation d'une approche alternative, rapide et fiable d'une branche de l'intelligence artificielle appelée Réseaux Neuronaux, en remplacement des tests expérimentaux traditionnels.

La construction utilise des matériaux ou un mélange de matériaux présentant un comportement hétérogène dans la structure, ce qui rend difficile l'établissement d'une formule applicable à divers cas rencontrés. Avec l'aide des réseaux neuronaux, nous pouvons découvrir les différentes propriétés des matériaux [54] .

Il est utilisée pour analyser les différentes propriétés tels que : la résistance à la compression du béton selon les différents mélanges de béton, la valeur d'affaissement du béton [64] la valeur de la force de cisaillement ultime dans les poutres en béton et la valeur de la résistance ultime [65]. Aussi, d'autres propriétés matérielles telles que le module d'élasticité, le rapport de positionnement, la résistance ultime et la limite d'élasticité [66] .

De plus, les réseaux neuronaux peuvent également simuler comment le comportement du béton armé évolue avec le temps et faciliter la modélisation de l'interface entre le béton et l'armature grâce à des calculs macroscopiques.

### IV.5.2 En génie géotechnique

Depuis le début des années 1990, les ANN ont été appliqués avec succès à presque tous les problèmes en génie géotechnique. Les modèles constitutifs classiques basés sur les théories de l'élasticité et de la plasticité ne parviennent pas à simuler correctement le comportement des géomatériaux pour des raisons liées à la complexité de la formulation, à l'idéalisation du comportement des matériaux et à l'abondance de paramètres empiriques [54].

En général, les dommages aux ouvrages civils lors des séismes se produisent selon deux modes de défaillance généraux. Le premier mode est celui de la défaillance structurelle, causée par une forte accélération du séisme, ce qui entraîne des dommages à la structure elle-même. Le deuxième

mode est celui de la défaillance des fondations, causée par la liquéfaction, entraînant l'effondrement de la structure dans son ensemble. [67]. Par conséquent, il est essentiel pour les ingénieurs civils de prédire le potentiel de liquéfaction induite par les séismes lors de la procédure de conception.

D'autres applications des réseaux neuronaux artificiels (ANN) en génie géotechnique comprennent les murs de soutènement, les barrages, le dynamitage, l'exploitation minière [68], la mécanique des roches, la caractérisation des sites, les tunnels et les ouvertures souterraines et l'ingénierie géoenvironnementale.

### IV.5.3 En hydrologie

Les réseaux neuronaux artificiels ont gagné en popularité dans le domaine de l'hydrologie, en particulier pour le problème de la modélisation pluie-débit, qui a attiré l'attention maximale des modélisateurs ANN. Ils ont obtenu un certain succès dans la prédiction des débits d'écoulement [54]. Ils ont également été utilisés pour déterminer les valeurs des paramètres de l'aquifère à partir des données normalisées de rabattement obtenues à partir des essais de pompage, souvent appelés problème inverse en hydrologie des eaux souterraines [69].

De plus, ils ont été employés pour prédire les niveaux de la nappe phréatique dans les terres agricoles drainées en profondeur, bien que leur efficacité dans l'estimation des précipitations ait été limitée.

### IV.5.4 Le phénomène de corrosion

Dans le domaine de la corrosion, les réseaux de neurones ont été largement utilisés. Les travaux de recherche ont montré que les RNA peuvent être utilisés avec succès pour modéliser et prédire divers aspects de la corrosion métallique dans des environnements variés. Par exemple, des modèles de RNA ont été développés pour estimer le potentiel de piqûre, prédire la profondeur de piqûre, analyser le comportement de corrosion atmosphérique, prédire la vitesse de corrosion, évaluer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion, prédire le temps d'initiation de corrosion, et bien plus encore [67].

**1. Modélisation du taux de corrosion :** Les réseaux de neurones ont été utilisés pour prédire le taux de corrosion des matériaux dans différents environnements corrosifs. Cette prédiction peut être basée sur des données expérimentales ou sur des paramètres environnementaux [70]. Il peut être influencé par de nombreux facteurs, notamment la composition chimique du matériau, la température, le pH de la solution, la présence d'impuretés et d'autres composés chimiques dans le milieu corrosif, la vitesse d'écoulement du fluide, la pression, etc. La modélisation du taux de corrosion doit prendre en compte ces facteurs pour être précise et fiable.

La modélisation du taux de corrosion est un domaine interdisciplinaire qui combine des concepts de la science des matériaux, de la chimie, de la physique, des mathématiques et de l'ingénierie pour prédire et comprendre les mécanismes de corrosion.

**2. Évaluation de la résistance à la corrosion :** Les réseaux de neurones ont été appliqués pour évaluer la résistance à la corrosion des matériaux en fonction de leur composition chimique, de

leur microstructure et des conditions environnementales. Cela peut aider à concevoir des alliages plus résistants à la corrosion [71].

**3. Prédiction des potentiels de corrosion :** Les réseaux de neurones ont été utilisés pour prédire les potentiels de corrosion des matériaux, tels que le potentiel de piqûre, en fonction de divers facteurs environnementaux. Cela peut aider à identifier les conditions sous lesquelles la corrosion est plus susceptible de se produire [72].

**4. Analyse des mécanismes de corrosion :** Les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour analyser les mécanismes de corrosion et identifier les facteurs qui influent sur ces processus. Cela peut contribuer à une meilleure compréhension des interactions entre les matériaux et leur environnement corrosif [73].

**5. Optimisation des paramètres de corrosion :** Les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour optimiser les paramètres de corrosion, tels que les conditions de traitement de surface, les propriétés des revêtements de protection, et les compositions des alliages, afin de minimiser le taux de corrosion et d'améliorer la durabilité des matériaux [74].

**6. Détection et surveillance de la corrosion :** Les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour détecter et surveiller la corrosion en temps réel, en analysant les données de surveillance en continu des capteurs de corrosion. Ces modèles peuvent aider à prévenir les défaillances prématurées des équipements et des infrastructures en identifiant les signes précoces de corrosion [75].

**7. Prédiction de la durée de vie des matériaux :** Les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour prédire la durée de vie des matériaux exposés à des environnements corrosifs, en prenant en compte les mécanismes de corrosion et les facteurs de vieillissement des matériaux [76].

## V. Conclusion

Dans de nombreux cas de génie civil, les réseaux de neurones se révèlent être une méthode de calcul supérieure aux approches classiques. Leur capacité à analyser des données erronées, à résoudre des problèmes sans solution évidente et à tirer parti des données antérieures en fait des outils puissants pour l'ingénierie. Par exemple, dans le chapitre III, une analyse neuronale est employée pour interpréter les mesures électrochimiques du potentiel de corrosion, obtenues par la méthode non destructive (demi-cellule), afin d'estimer un indicateur de durabilité pour les structures en béton.

# CHAPITRE 3

*Partie expérimentale et  
résultats*

### I. Introduction

La corrosion des armatures dans les structures en béton armé représente l'une des principales préoccupations dans le domaine de la construction et de l'ingénierie civil. Cette dégradation progressive, résultant de réactions chimiques entre le métal de l'armature et son environnement, compromet la durabilité et la résistance des ouvrages.

L'analyse électrochimique constitue une approche non destructive largement utilisée dans le domaine du génie civil pour évaluer le niveau de corrosion des armatures dans les structures en béton armé. Cette méthode repose sur la mesure du potentiel de corrosion par rapport à une électrode de référence, offrant ainsi des indications précieuses sur l'état de dégradation des armatures. Bien que le potentiel d'électrode ne puisse être directement associé à un état spécifique de conservation des armatures, il permet néanmoins d'identifier les zones les plus susceptibles d'être affectées par la corrosion. En pratique, les valeurs de potentiel les plus négatives sont souvent observées dans les zones présentant les signes les plus avancés de rouille et de dégradation des armatures. Ainsi, malgré ses limites, l'analyse du potentiel de corrosion reste un outil précieux pour évaluer l'état général d'autre des structures en béton armé et guider les interventions de maintenance et de réparation nécessaires.

Dans le but de prédire de manière précise l'évolution de la corrosion des armatures en fonction du potentiel de corrosion, une approche novatrice utilisant les réseaux de neurones artificiels a été élaborée. Cette méthode tire parti de la capacité des réseaux de neurones à traiter des données complexes et à déceler des modèles subtils, permettant ainsi de générer des prédictions pour la prédiction de progression de corrosion.

### II. Programme expérimentale

À la suite de notre travail au laboratoire, en collaboration avec mes collègues de PFE «Prévention contre le phénomène des armatures en acier dans le béton par l'utilisation des inhibiteurs », nous avons obtenu les mesures de potentiel de corrosion. Avant d'arriver à ces résultats, nous avons effectué plusieurs essais et suivi différentes étapes.

### II.1. Composants du béton utilisé

#### II.1.1 Type de granulats utilisés

Les granulats nécessaires à la fabrication du béton doivent favoriser la formation d'une structure granulaire avec le moins de vides possible. Pour ce faire, il est crucial d'utiliser des granulats de différentes tailles afin que les plus petits puissent remplir les espaces laissés par les plus gros. Il est également essentiel que la taille maximale des granulats ( $D_{max}$ ) ne soit pas trop grande, afin de ne pas entraver le déplacement des grains entre les armatures métalliques, garantissant ainsi une mise en place correcte du béton.

Parmi les granulats utilisés en laboratoire pour la formulation du béton, on trouve :

- Le sable grossier 0/4
- Le sable fin 0/2 (sable 0/4 tamisé avec un tamis de 2 mm)
- Le gravier 3/8
- Le gravier 8/16

#### ➤ Les essais concernant les granulats

Les essais en laboratoire réalisés sur les granulats comprennent les suivants :

- Analyse granulométrique des granulats selon la norme EN 933-2 (module de finesse des sables selon la norme NF EN12620)
- Mesure de la masse volumique
  - ✓ Détermination de la masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ )
  - ✓ Détermination de la masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ )
- Essais d'équivalent de sable (norme NA455)

Les résultats de ces essais sont consignés dans l'annexe A.

#### II.1.2 Type de ciment

Le ciment que nous utilisons dans la fabrication de notre béton est un produit de haute qualité provenant de GICA, de la classe II/A-L 42.5 N. Issu du groupe industriel des ciments d'Algérie, sa résistance accrue et sa durabilité supérieure en font un choix idéal pour nos projets de construction. Nous nous engageons à n'utiliser que du ciment de classe II/A afin de garantir la

qualité et la fiabilité de notre béton. (Pour la composition détaillée du ciment, veuillez consulter l'annexe B).

### II.1.3 Eau de Gâchage

L'eau est un composant indispensable du béton, et nous avons utilisé l'eau du robinet de la wilaya d'Ain Témouchent (Algérie).

### II.1.4 Acier

Nous avons utilisé des barres métalliques résistantes, de 1 cm de largeur et de bonne qualité. Après les avoir nettoyées avec une brosse métallique à fils d'acier, nous nous sommes assurés que les barres étaient toutes propres et lisses. Ensuite, nous les avons découpées en petits morceaux de 15cm de longueur pour les utiliser dans la construction.



a) avant le nettoyage



b) après le nettoyage

**Figure III.1.** Les barres métalliques avant et après le nettoyage

## II.2. Formulation de béton

Dans ce travail de recherche de master, nous explorerons l'application de la méthode de Dreux-Gorisse pour déterminer les quantités idéales de différents matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires pour produire un mètre cube de béton conforme. Pour parvenir à la formulation théorique du béton, plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires.

- ✓ Détermination du rapport C/E
- ✓ Détermination de C et E
- ✓ Détermination du mélange optimal à minimum de vides

## CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

---

- ✓ Détermination de la compacité du béton
- ✓ Détermination des masses de granulats

La composition du béton est donnée ci-après :

- Ciment portland CEM II/B 42,5 N ;
- Sable fin 0/2
- Sable gros 0/4
- Gravier 3/8
- Gravier 8/16
- Eau : en litres

La méthode utilisée pour calculer la formulation du béton c'est Dreux Gorisse

**Tableau III. 1.** Dosage des différents constituants pour 1m<sup>3</sup> de béton

Constituants	Quantités de MT (Kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	400
Gravier 3/8	147.85
Gravier 8/16	870.670
Sable fin 0/2	586.55
sable grossier 0/4	67.92
Eau	215 .32

Gravier 8-16 :53% Gravier 3-8 :9% Sable3-8 :38%

### II.3. Condition expérimentale

#### II.3.1 Les matériaux utilisés

Nous avons utilisé deux dimensions différentes d'éprouvettes cylindriques en béton : l'une avec un diamètre de 8 centimètres et l'autre avec un diamètre de 11 centimètres, toutes deux ayant une hauteur de 15 centimètres. Sur ces deux éprouvettes, nous avons placé une armature de type HA 10 pour obtenir respectivement un enrobage de 3,5 centimètres et 5 centimètres.

Ce revêtement est crucial pour préserver le béton des influences néfastes extérieures. Conformément à la norme NF EN206-1, il est recommandé d'avoir un enrobage d'une épaisseur

### CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

entre 25mm et 50mm pour éviter la pénétration de chlorures dans le béton. Cette mesure de protection est primordiale pour les structures en béton armé.

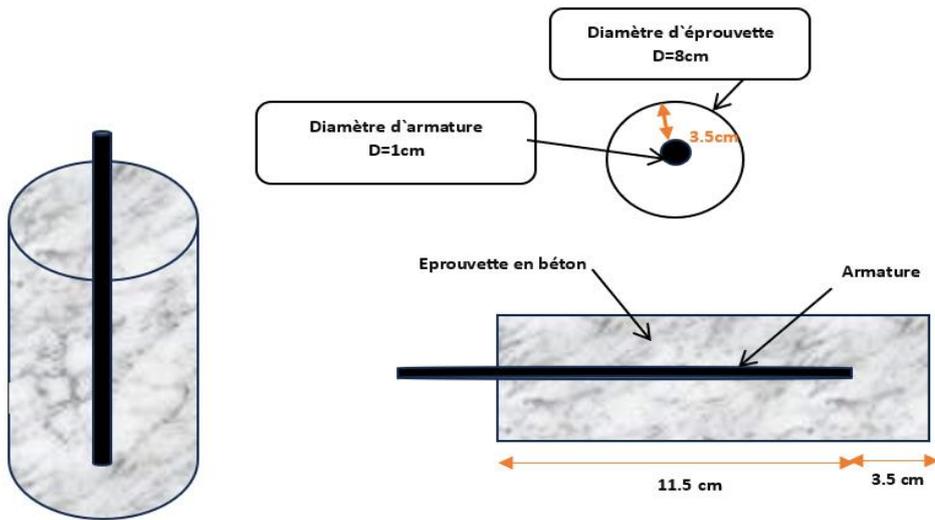


Figure III. 2 . Schéma d'une éprouvette cylindrique en béton armé (D=8cm)

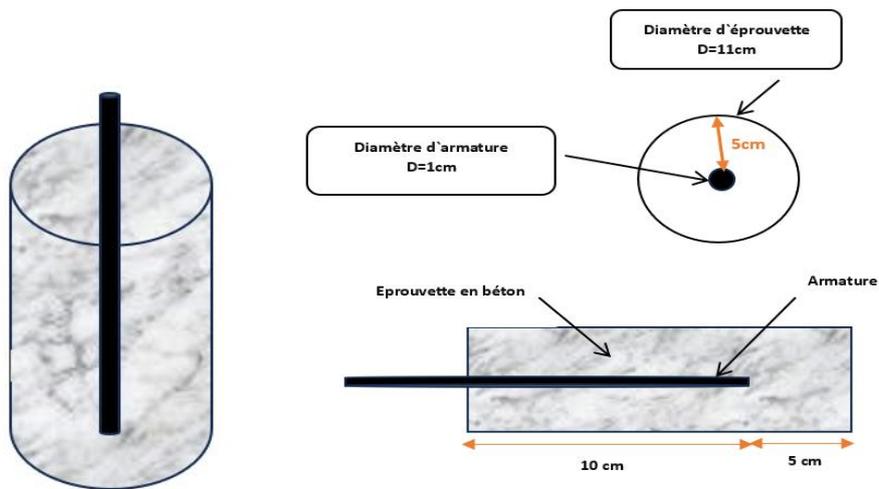


Figure III.3 . Schéma d'une éprouvette cylindrique en béton armé (D=11cm)



**Figure III. 4** .Photo réelle des échantillons d'éprouvettes

### II.3.2 Procédure expérimentale

Après avoir laissé sécher le béton pendant deux jours, nous l'avons démoulé et placé dans un réservoir d'eau. Nous avons ensuite attendu 28 jours pour que le béton atteigne sa résistance maximale, procédant ainsi à sa cure. Ensuite, nous l'avons divisé en 5 milieux distincts.

#### II.3.2.1 Milieux d'étude

Des tests de potentiel de corrosion ont été réalisés dans cinq environnements différents :

- Milieu 1 ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) : une solution de référence contenant de la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  pour reproduire les conditions environnementales d'une structure en béton armé ;
- Milieu 2 (3% NaCl) : une solution contenant 3g/l de chlorures (NaCl), simulant la concentration de sel dans la mer Méditerranée ;
- Milieu 3 (3% NaCl + Inhibiteur armature) : ajout d'un inhibiteur (inhibiteur armature) de type Master Emaco P 5000 Ap dans le troisième milieu contenant des chlorures (3g/l de NaCl) (voir annexe B : Fiche technique de l'inhibiteur) ;
- Milieu 4 (3% NaCl + Inhibiteur surface) : ajout d'un inhibiteur (inhibiteur de surface) de type Master Emaco P 5000 Ap dans le quatrième milieu contenant des chlorures (3g/l de NaCl) (voir annexe B : Fiche technique de l'inhibiteur) ;
- Milieu 5 (air) : disposition dans un espace bien aéré.



**Figure III.5** .Diffèrent type des milieux utiliser pour les éprouvettes



**Figure III.6**. Éprouvettes de béton avec un diamètre de 8 cm et 11 cm

### II.3.2.2. Méthode et mesure

Pour mesurer le potentiel de corrosion, on a utilisé la méthode non destructive des demi-cellules (CANIN+). Cette méthode quantifie la différence de potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) entre l'armature et le béton par rapport à une électrode de référence.



**Figure III.7**. La mesure de potentiel de corrosion a été réalisée à l'aide de l'appareil CANIN+

**Tableau III.2 .** Valeurs des potentiels citées dans ASTM C-876-09 [77]

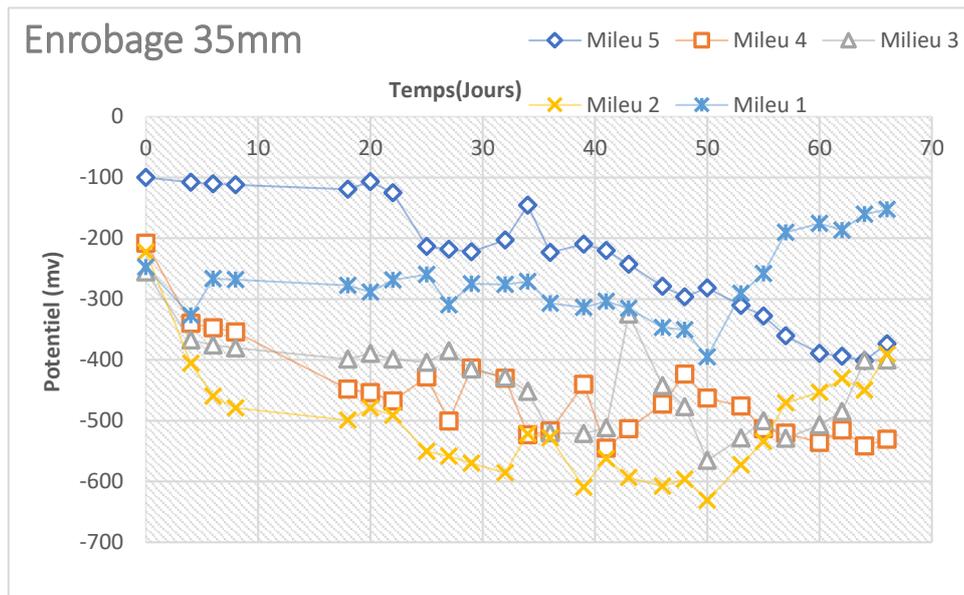
Valeur du potentiel	Activité de corrosion
$E_p \geq -200 \text{ mV}$	Moins de 10% de probabilité de corrosion
$-350 \text{ mV} \leq E_p < -200 \text{ mV}$	Probabilité de corrosion de 50%
$E_p < -350 \text{ mV}$	Entre 50 et 90% de probabilité de corrosion

### II.4. Résultats et discussion

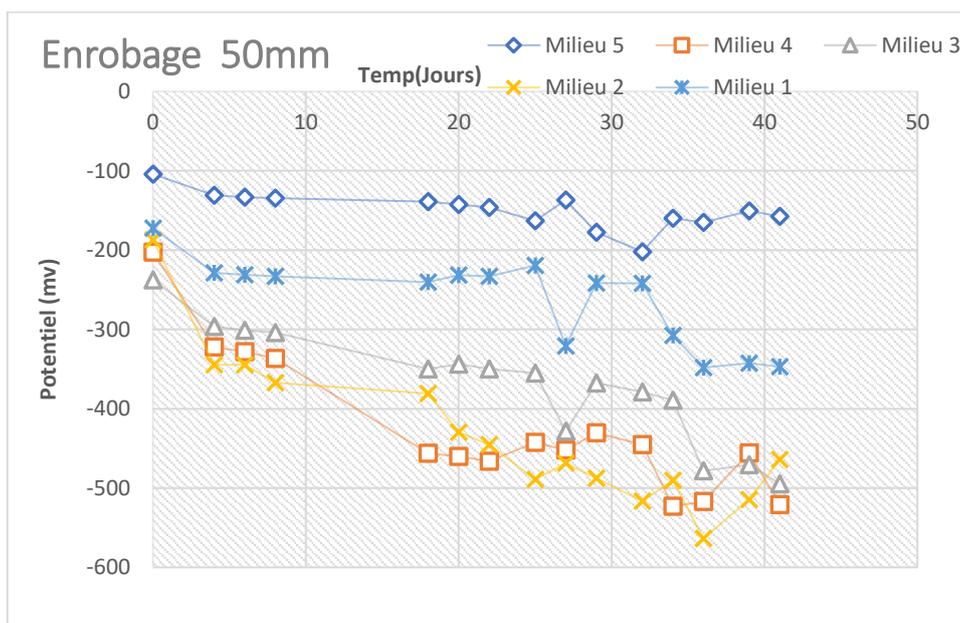
Les figures III.8 a) et (III.8 b) illustrent l'évolution du potentiel de corrosion en fonction du temps pour divers enrobages dans cinq environnements distincts.

Après analyse des figures , nous concluons ce qui suit :

- On peut conclure que la prolongation du temps d'exposition aux chlorures entraîne une diminution du potentiel de corrosion.
- La présence d'agent agressif (ions chlorures) autour du renforcement compromet la stabilité du film passif et accélère la réaction de corrosion.
- Dans le premier environnement, nous avons observé une stabilité presque constante du potentiel de corrosion des échantillons, ce qui peut être attribué à la similitude du pH avec celui du béton.
- Les mesures potentielles pour un enrobage de 50 mm varient entre -100 et -500 mv (Figure III.8 b). À l'inverse, pour un enrobage de 35 mm(Figure III.8 a), les valeurs tendent vers -600 mv. Ces résultats démontrent que, dans un milieu agressif, l'épaisseur de l'enrobage est cruciale : une plus grande épaisseur d'enrobage réduit significativement la diffusion des ions chlorure.
- Les valeurs sont constamment plus négatives pour le béton dans un milieu agressif 3 % NaCl (milieu 2) sans inhibiteur que celles enregistrées avec le système utilisant un inhibiteur (milieu 3 et milieu 4).
- L'efficacité de l'inhibiteur sur les armatures (milieu 3) est plus significative que sur les surfaces (milieu 4).
- En milieu 5, il y a un ralentissement de la propagation de la corrosion, dû à l'absence d'eau qui accélère normalement le processus de réaction.



a) Avec un enrobage de 35 mm



b) Avec un enrobage 50 mm

Figure III.8 .Les résultats de mesures de potentiel dans différents milieux avec un enrobage de 35 et 50 mm

Pour les facteurs affectant la mesure du potentiel de corrosion comprennent :

- **Oxygène** : La présence ou l'absence d'oxygène dans l'environnement peut influencer la réaction de corrosion des matériaux métalliques.
- **Température** : Les variations de température peuvent modifier la vitesse et l'intensité des réactions chimiques impliquées dans le processus de corrosion.

- **Propriétés du béton :** La composition chimique, la porosité, la perméabilité et d'autres caractéristiques du béton peuvent affecter la transmission des agents corrosifs vers les armatures métalliques.
- **Concept d'enrobage :** L'épaisseur et la qualité de l'enrobage autour des armatures métalliques jouent un rôle crucial dans la protection contre la corrosion en fournissant une barrière physique et chimique.
- **Électrode de référence:** Le choix et l'état de l'électrode de référence utilisée pour mesurer le potentiel peuvent avoir un impact important sur la valeur mesurée.
- **Autres paramètres :** Cela peut inclure la composition chimique du milieu environnant, la concentration en ions chlorures, la qualité des matériaux utilisés, les conditions d'exposition, etc.

La base de données de la présente étude a été extraite de notre travail en laboratoire et complétée par des données issues d'un projet de fin d'études de l'année passée 2023 « Mesure du potentiel de corrosion avec des méthodes non destructives » par BENAMARA .R et LYAKA .C, qui incluait deux milieux d'étude. À ces données, nous avons ajouté celles de notre propre milieu d'étude :

Milieu 01 (NAOH) : C'est un milieu de simulation du béton qui inclut l'utilisation de NaOH Afin de reproduire les mêmes conditions environnementales que celles présentes dans une structure en béton armé.

Milieu 02 (%5 NACL) : Contenant 5g /l de sel (5%) [78]

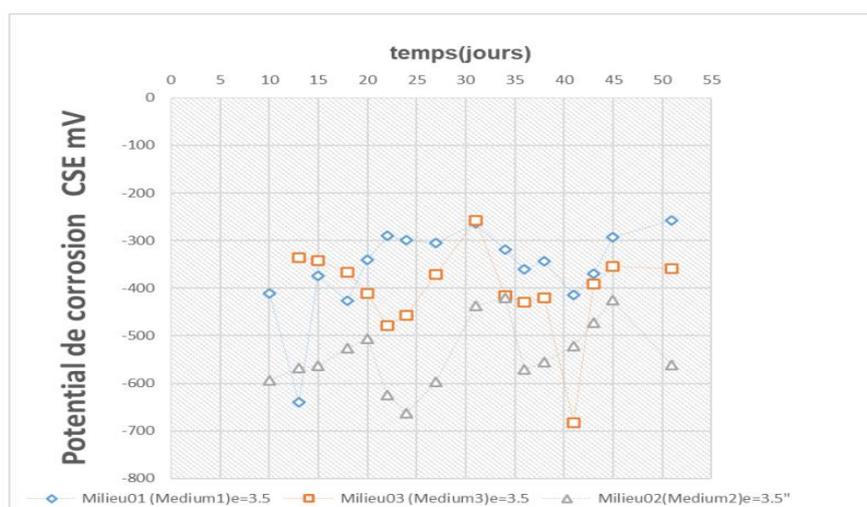
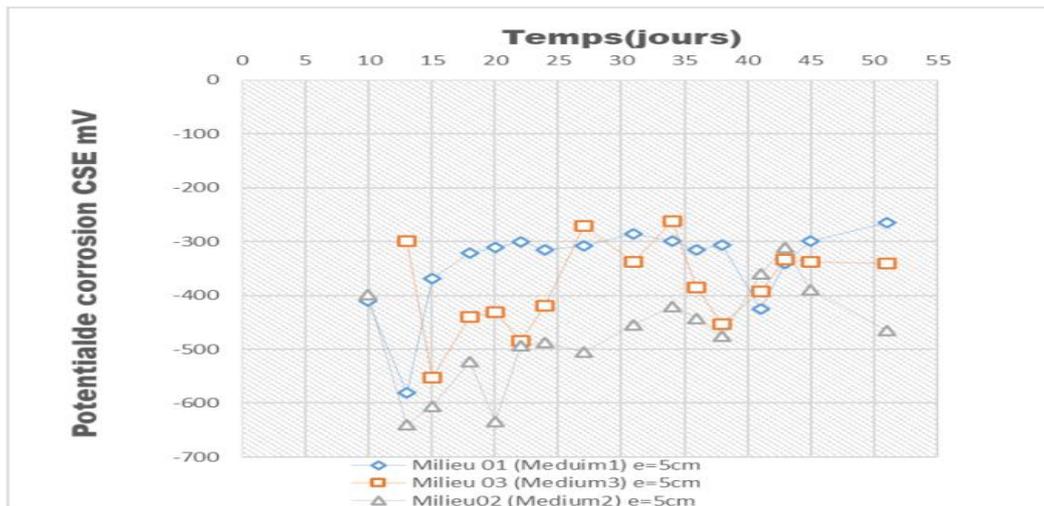


Figure III. 9 .Les mesures potentiel de différents milieu d'enrobage de 3.5cm [78]



**Figure III. 10 .** Les mesures potentiel de différents milieu et d’enrobage de 5 cm[78]

**III. Analyse statistique des données de potentiel de corrosion**

Pour une bonne estimation du potentiel de corrosion de l'acier armé, une base de données contenant les paramètres élémentaires relatifs aux matériaux étudiés a été réalisée. Une analyse statistique des données disponibles a été réalisée afin de tester la représentativité par variable afin de rechercher des modèles spécifiques à cette étude. Le tableau II.3 représente respectivement : Ecorr (mV potentiel), Ti (jours), M (1 : un milieu de référence, 2: un milieu contenant des chlorures 3%, 3 : un milieu contenant des chlorures 3% avec inhibiteur armature ,4 : un milieu contenant des chlorures 3% avec inhibiteur de surface et 5 : un milieu disposer dans un espace bien aéré, 6 : un milieu contenant des chlorures de NaCl 5% ,7 : un milieu sans inhibiteur , 8 :l'ajout d'un inhibiteur au milieu) et C (revêtement 35-50mm).

**Tableau III.3 .** Analyse statistique du potentiel de corrosion des données des matériaux étudiés

	Ti	C	M	I	E <sub>corr</sub>
<b>Nombres</b>	212	212	212	212	212
<b>Minimum</b>	0	35	1	7	-639,27
<b>Maximum</b>	55	50	6	8	-100,11
<b>Moyenne</b>	25 ,21	95	3,12	7,28	-348,35
<b>Ecart type</b>	13,2057843	15,035503	1,81464725	0,45153172	120,515542

**III.1 Modèles proposés pour le potentiel de corrosion**

Le tableau III.4 présente la corrélation entre les différents paramètres étudiés. Nous observons que la corrélation entre le potentiel de corrosion et les paramètres indépendants (temps et milieu) est particulièrement significative. Pour cela, une procédure de corrélation à deux variables calcule le tau-b de Kendall avec un niveau de signification spécifié. Cette procédure évalue les associations par paire pour les variables définies (temps, type de matériau, revêtement et support) et affiche les résultats dans une matrice. Ensuite, des courbes d'estimation du potentiel de corrosion en fonction des autres variables indépendantes (les paramètres mentionnés ci-dessus) sont établies.

**Tableau III.4.** la corrélation entre les différents paramètres étudiés

	Temps (T)	Diamètre (C)	Milieu (M)	Inhibiteur (I)	Potentiel (E <sub>corr</sub> )
Temps	1	0,001	0,092	-0,118	-0,289
Diamètre	0,001	1	0	0	0,110
Milieu	0,092	0	1	0,131	0,129
Inhibiteur	-0,118	0	0,131	1	-0,316
Potentiel	-0,289	0,110	0,129	-0,316	1

**Tableau III. 5.** Estimation du coefficient de régression

	Mode	R	R square R <sup>2</sup>	Adjusted
potentiel	Linear	0,513	0,264	0,249

Tableau III. 6. Estimation du R<sup>2</sup> par rapport au temps

MLR model	Result
$E_{corr} = -3,233 \times T - 102,846 \times I + 14.109 \times M$ $+ 0,881 \times C + 354,418$	R <sup>2</sup> =26,4%

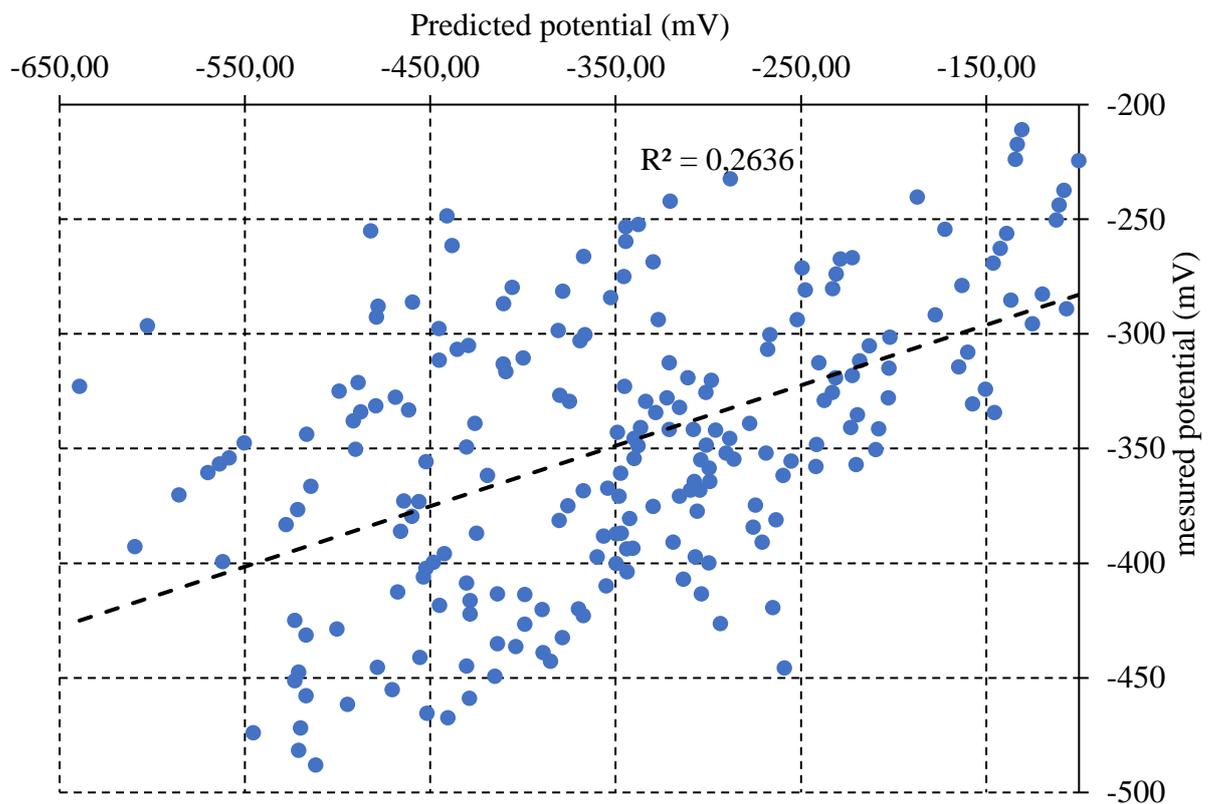


Figure III. 11 . La corrélation entre les valeurs de potentiels prédis et mesurés

Pour le potentiel de corrosion, le modèle développé donne des différences remarquables entre les mesures et les calculs avec R<sup>2</sup> = 26,36% (tableau III.6) (Figure III.11). La modélisation par régression multiple des coefficients du modèle de prévision a permis une légère amélioration des résultats de calcul. La raison en est que le modèle estime le potentiel de corrosion pour quatre paramètres différents en même temps. Cela rend la modélisation plus complexe. Nous notons également que le coefficient de détermination maximal est insuffisant pour l'analyse statistique (R<sup>2</sup> <70%) [79].

Étant donné la complexité du phénomène de corrosion, qui implique l'effet de quatre paramètres sur une seule variable de sortie (le potentiel de corrosion), une analyse de régression non linéaire a été réalisée. Pour mieux ajuster les modèles à la méthode étudiée, la méthode des réseaux de neurones artificiels généralisés a été utilisée.

### IV. Modélisation artificielle du réseau neuronal

Les réseaux neuronaux artificiels (désignés ci-après par réseaux neuronaux), ainsi que la logique floue et les algorithmes génétiques, appartiennent au groupe de méthodes symboliques de calcul intelligent et de traitement des données qui fonctionnent selon les principes du calcul doux[80]. Les types de réseaux étaient différenciés par l'architecture et les règles d'apprentissage et d'organisation.

L'utilisation des Réseaux Neuronaux Artificiels (RNA) a connu une augmentation ces dernières années dans toutes les disciplines scientifiques et technologiques. De plus, les RNA ont été appliqués avec succès à de nombreuses applications [81]. Il fait partie des nombreux outils permettant d'approximer de manière universelle et de comprendre un modèle complexe par exemple la corrosion [25].

L'avantage des Réseaux Neuronaux Artificiels (RNA) en tant qu'outil pour l'analyse des données expérimentales réside principalement dans leur capacité d'apprentissage. Ils peuvent prédire les paramètres de sortie d'un système en fonction de divers ensembles de paramètres d'entrée. En général, les RNA sont entraînés à partir d'un grand nombre de données d'entrée associées à des données de sortie correspondantes (paires entrée/sortie). Les poids des connexions (synapses) entre les neurones sont ajustés pour que les entrées produisent les sorties cibles avec la plus grande précision possible. Cette capacité des RNA à généraliser l'expérience acquise lors de l'apprentissage permet de prédire des situations non incluses dans l'ensemble initial de résultats expérimentaux [44].

#### IV.1. Optimisation des couches cachées : une analyse des pourcentages dans l'étude

Dans le domaine de l'apprentissage automatique, l'optimisation des couches cachées dans les réseaux neuronaux constitue un élément crucial pour améliorer les performances des modèles. Cette étude se concentre spécifiquement sur l'analyse des pourcentages pour déterminer les configurations optimales des couches cachées. En examinant de près les variations des pourcentages dans

### CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

---

différentes configurations, nous cherchons à identifier les combinaisons les plus efficaces pour améliorer les performances des réseaux neuronaux.

Les tableaux suivants représentent les différents choix de nombre de couches cachées, ainsi que les pourcentages correspondants pour l'entraînement, la validation et les tests. Cette étude se concentre sur l'optimisation des couches cachées en analysant les pourcentages associés.

**Tableau III.7.** Variation du nombre de couches cachées avec une répartition de 70% pour l'entraînement, 15% pour la validation et 15% pour les tests

Number of Hidden Layers =5	Samples	T-V-T%	MSE	R
Training	148	70	3625,56434	0,851628
Validation	32	15	3073,37522	0,884863
Test	32	15	11261,5053	0,683805

Number of Hidden Layers =6	Samples	T-V-T%	MSE	R
Training	148	70	2024,21479	0,9247
Validation	32	15	6014,77222	0,71646
Test	32	15	5253,0811	0,8487

Number of Hidden Layers =7	Samples	T-V-T%	MSE	R
Training	148	70	5286,33661	0,81498
Validation	32	15	6924,25493	0,666157
Test	32	15	3595,27818	0,847348

Number of Hidden Layers =8	Samples	T-V-T %	MSE	R
Training	148	70	1684,,57447	0,93854
Validation	32	15	5647,75053	0,75295
Test	32	15	7331,7381	0,72426

Number of Hidden Layers =9					
	Samples	T-V-T%	MSE	R	
Training	148	70	3776,04875	0,86552	
Validation	32	15	4611,3134	0,83343	
Test	32	15	3858,54638	0,836259	

Number of Hidden Layers =10					
	Samples	T-V-T%	MSE	R	
Training	148	70	3092,7555	0,890122	
Validation	32	15	4752,16549	0,836905	
Test	32	15	3160,3029	0,860776	

**Tableau III.8.** Variation du nombre de couches cachées avec une répartition de 80% pour l'entraînement, 10% pour la validation et 10% pour les tests

Nombre of Hidden Layer=5					
	Samples	T-V-T %	MSE	R	
Training	170	80	3007,07024	0,888499	
Validation	21	10	3336,04394	0,899783	
Testing	21	10	3139,03018	0,892349	

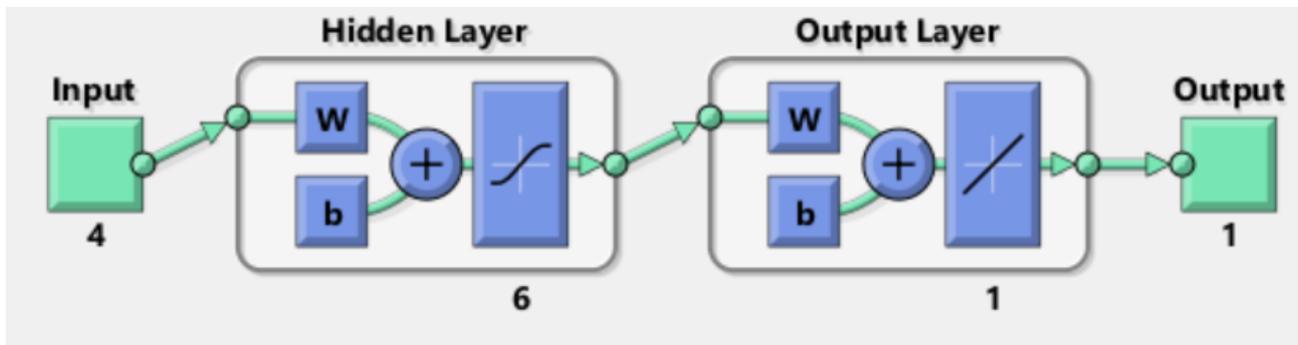
Nombre of Hidden Layer= 6					
	Samples	T-V-T %	MSE	R	
Training	170	80	2263,20	0,894	
Validation	21	10	3839,80	0,901	
Testing	21	10	2818,18	0,928	

Nombre of Hidden Layer=7					
	Samples	T-V-T %	MSE	R	
Training	170	80	1962,63227	0,933023	
Validation	21	10	4979,13028	0,778185	
Testing	21	10	1331,43807	0,95293	

Nombre of Hidden Layer=8					
	Samples	T-V-T %	MSE	R	
Training	170	80	2586,22148	0,904298	
Validation	21	10	1455,11499	0,955831	
Testing	21	10	5066,07365	0,822296	

Nombre of Hidden Layer=9				
	Samples	T-V-T %	MSE	R
Training	170	80	2193,26944	0,914654
Validation	21	10	1196,7448	0,615548
Testing	21	10	2096,54189	0,942508

Nombre of Hidden Layer=10				
	Samples	T-V-T %	MSE	R
Training	170	80	3155,9182	0,889295
Validation	21	10	2912,07941	0,886899
Testing	21	10	3256,24598	0,827503



**Figure III.12 .** L'architecture de réseau neuronal utilisée pour le potentiel de corrosion

**IV.2. Évaluation des performances des modèles entraînés**

Dans ce travail, 212 ensembles de données de mesures expérimentales pour évaluer le potentiel de corrosion , 80 % (170 ensembles) ont été utilisés pour l'entraînement du réseau et les 20 % restants ( 42 ensembles) ont été utilisés pour valider et tester la performance du réseau précédemment entraîné.

Une analyse statistique, incluant l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de corrélation (R), est menée pour évaluer les performances du modèle [81]. Le MSE et R sont calculés en comparant les résultats aux objectifs. Les valeurs inférieures de MSE sont considérées comme meilleures, et un coefficient R proche de 1 indique une meilleure estimation [25].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Y - Y_j)^2 \quad ( III.1)$$

$$R = \frac{\sum_{j=1}^N (Y - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Y - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y}_j)^2}} \quad (\text{III.2})$$

Où :

Y et Y<sub>j</sub> désignent les valeurs observées et les valeurs prédites par ANN;  $\bar{Y}$  et  $\bar{Y}_j$  sont les moyennes de Y, Y<sub>j</sub> respectivement,  
N représente le nombre de données [81] .

**Tableau III. 9** .Résultats de performance du modèle développé

	<b>Échantillons</b>	<b>MSE</b>	<b>R</b>
<b>Entraînement</b>	170	2263,20	0,894
<b>Validation</b>	21	3839,80	0,901
<b>Essai</b>	21	2818,18	0,928

Au cours de la phase d'entraînement, une corrélation améliorée entre les paramètres potentiels de corrosion mesurés et estimés a été obtenue (tableau III.9).

Le réseau de neurones artificiels (ANN) a estimé un coefficient de corrélation élevé (R) de 0,928 associé à une faible erreur quadratique moyenne (MSE) de 2818,18.

### **IV.3. Validation et test des modèles développés**

Les résultats du modèle ANN sont illustrés à la figure III.13, où les mesures sont indiquées en abscisse et les valeurs estimées par les différents modèles en ordonnée. La figure III.14 présente les erreurs entre les cibles et les sorties selon le modèle ANN.

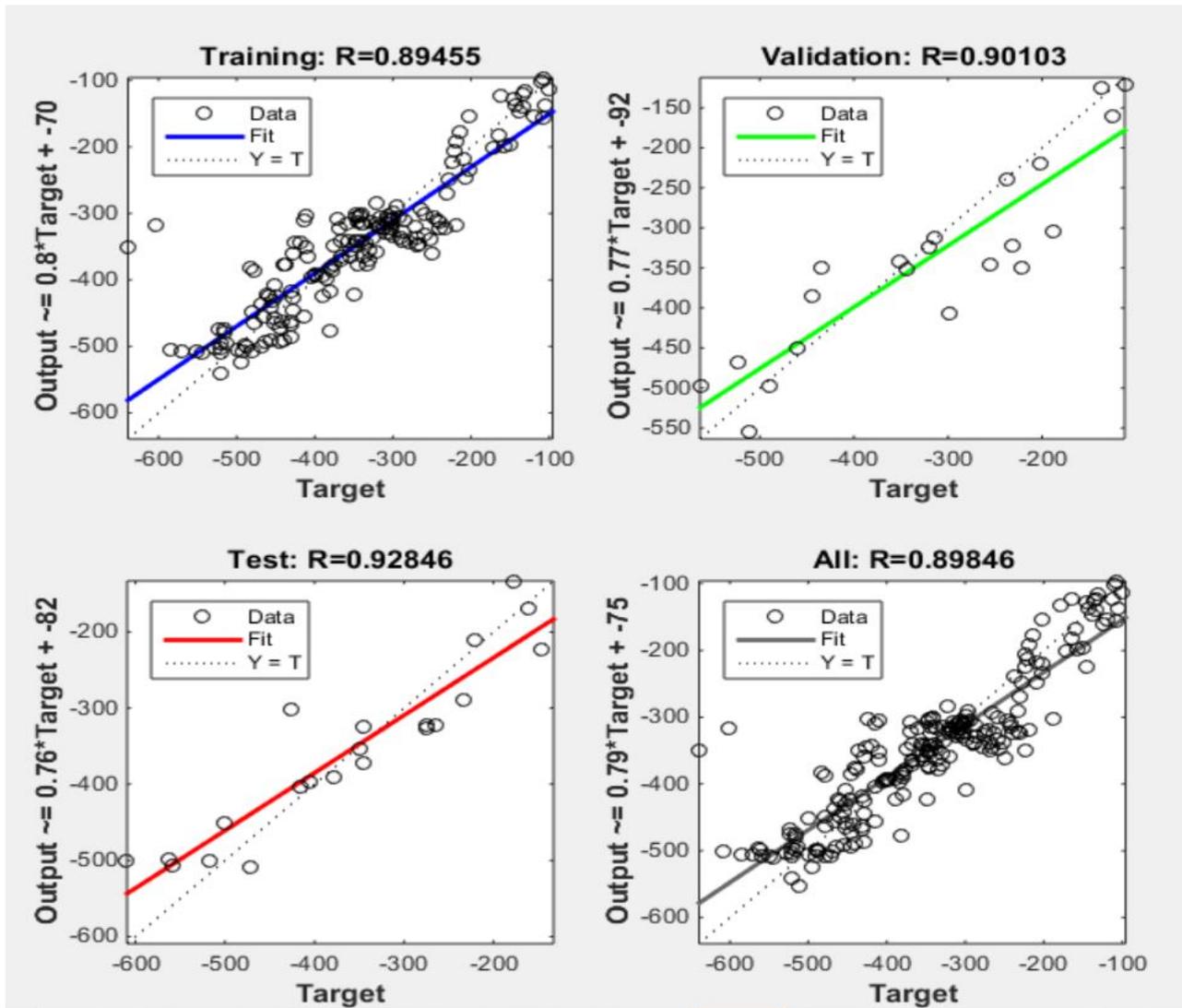


Figure III. 13. Apprentissage, validation et test du modèle ANN pour l'estimation du potentiel de corrosion

- a) Training                      b) Validation                      c) Test                      d) All

La figure III.13(a) montre le potentiel de corrosion obtenu à la fois par l'entraînement et par des expériences. La figure III.13(b) présente le potentiel de corrosion obtenu par validation et par des expériences. De même, la figure III.13(c) illustre les résultats potentiels de corrosion obtenus à partir des données expérimentales et de test. Toutes les valeurs d'apprentissage, de validation et de test sont représentées dans la figure III.13(d). Les coefficients de corrélation pour l'entraînement, la validation et les tests sont respectivement de 89,4% 90,1 % et 92,8%.

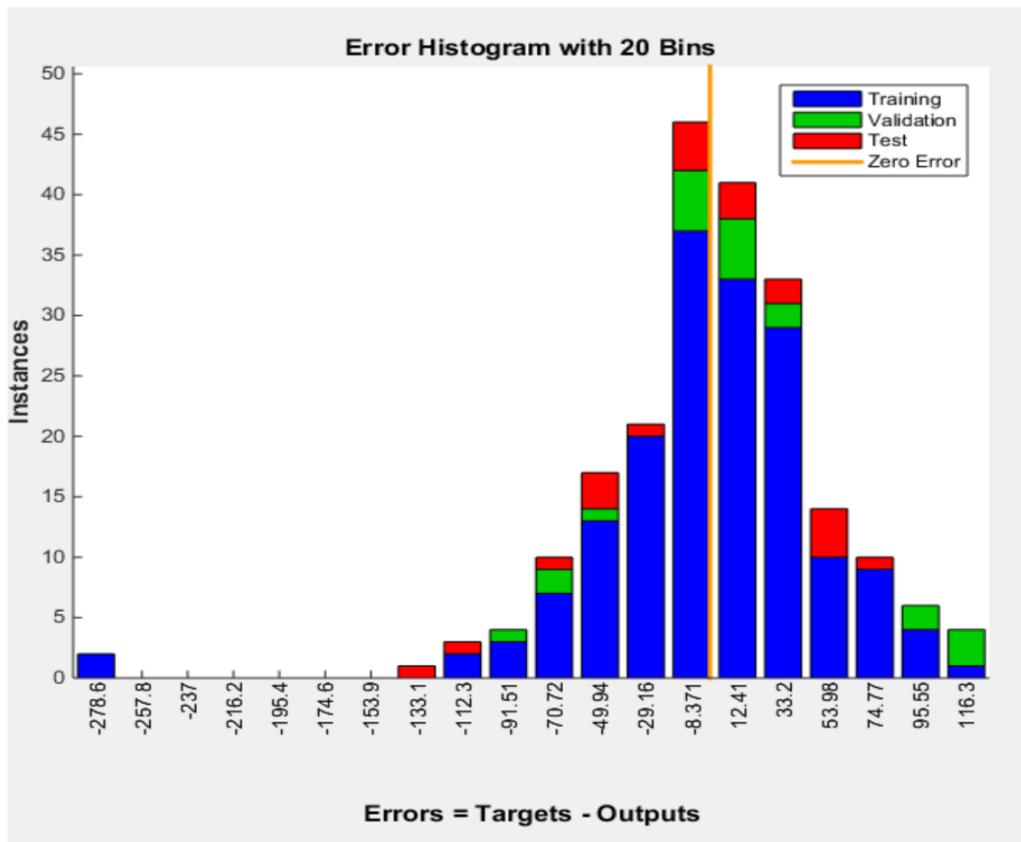


Figure III. 14. Résultats d'erreur entre les cibles et les sorties pour le potentiel de corrosion

La figure III.14 montre également les taux d'erreur en pourcentage du potentiel de corrosion obtenus par la formation, les tests et la validation dans le modèle ANN. Il est clair que le modèle ANN présente une bonne corrélation entre les données expérimentales et les valeurs prédites du potentiel de corrosion.

## V. Conclusion

Le choix de la méthode des réseaux de neurones artificiels comme modèle statistique pour inverser les résultats expérimentaux repose sur sa capacité à être parcimonieuse et rapide [82]. Les résultats obtenus à partir de la technique  $E_{corr}$  pour déterminer le potentiel de corrosion ont montré que les valeurs prédites étaient très proches des données expérimentales issues des phases d'apprentissage, de test et de validation du réseau de neurones artificiels.

En conclusion, les mesures électrochimiques du potentiel de corrosion ont été réalisées à l'aide de la méthode non destructive de la demi-cellule, utilisant l'appareil Canin+. Cela a permis d'évaluer un indicateur de durabilité pour les structures en béton. Malgré les variations observées dans les mesures du potentiel de corrosion, une analyse statistique des données disponibles a été

effectuée pour vérifier leur représentativité. Les résultats ont montré que le modèle de prédiction basé sur cette analyse statistique ne fournissait pas une estimation précise.

L'utilisation d'un modèle de réseau neuronal pour étudier l'état de potentiel de corrosion sur l'acier s'est avérée très prometteuse. Ce modèle a été entraîné avec des paramètres expérimentaux essentiels, tels que le temps , le milieu , avec ou sans inhibiteur ,le revêtement .

Une expansion du nombre d'expériences a clairement démontré une amélioration significative de la capacité prédictive du modèle de corrosion. De plus, l'optimisation du modèle ANN peut être réalisée en ajustant divers paramètres, tels que le nombre de neurones cachés, leurs fonctions de transfert, ainsi que les algorithmes d'apprentissage. Modifier également le ratio des données d'entraînement, de validation et de test peut contribuer à une meilleure performance globale du modèle.

## *Conclusión general*

# Conclusion générale

---

/L'étude de la corrosion dans les structures en béton armé est d'une importance capitale pour garantir leur durabilité à long terme. La corrosion, un phénomène résultant de réactions chimiques entre le fer contenu dans l'armature métallique et l'environnement extérieur, peut compromettre sérieusement l'intégrité structurelle. Dans un contexte où les ouvrages en béton armé constituent une part significative de l'infrastructure urbaine, la compréhension de ce processus corrosif permet de prévenir les risques d'effondrement et de dégradation prématurée. Une étude approfondie de la corrosion offre ainsi la possibilité de mettre en place des stratégies de maintenance préventive, de sélectionner des matériaux résistants, et de concevoir des structures plus durables, assurant ainsi la sécurité des occupants et la pérennité des infrastructures.

L'utilisation du corrosimètre Canin+ (demi-cellule) pour détecter la corrosion des armatures dans les structures en béton armé représente une avancée majeure. Cette nouvelle technique permet une détection rapide et non destructive de la corrosion, avec des résultats instantanés affichés directement sur l'écran de l'appareil. Le fonctionnement de ce dispositif repose sur la mesure de la variation du potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) entre l'armature et le béton par rapport à une électrode de référence (demi-cellule). Les mesures ont été prises dans cinq environnements différents : le premier étant une solution de référence contenant  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , le deuxième contenant des ions chlorures (3% NaCl), simulant la concentration de sel dans la mer Méditerranée, et le troisième ajoutant un inhibiteur à l'armature (3% de NaCl + inhibiteur) pour le quatrième (3% NaCl +inhibiteur appliqué sur la surface) et le milieu 5, où nous avons laissé un échantillon des éprouvettes à l'extérieur.

Nous avons testé deux dimensions d'éprouvettes cylindriques en béton : une avec un diamètre de 8 centimètres et l'autre avec un diamètre de 11 centimètres, toutes deux ayant une hauteur de 15 centimètres. Sur chacune de ces éprouvettes, nous avons placé une armature de type HA 10 pour obtenir un enrobage respectif de 3,5 centimètres et 5 centimètres.

Les résultats de notre étude expérimentale nous ont conduit à conclure que :

- Dans le cas d'un revêtement mince (3,5 cm), le potentiel de corrosion tend systématiquement à être plus élevé, atteignant des valeurs négatives par rapport à un enrobage de 5 mm, ce qui confirme l'intérêt d'augmenter l'enrobage dans les milieux agressifs.
- Les résultats démontrent que toutes les éprouvettes placées dans les milieux contenant du 3% NaCl présentent un potentiel inférieur à celui du milieu 1 (milieu

# Conclusion générale

---

témoin/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), ce qui confirme l'attaque du béton par des chlorures augmente le potentiel de corrosion de l'acier d'armature.

- Les valeurs du potentiel sont toujours plus négatives pour le béton ordinaire (BO) que celles obtenues avec le système utilisant un inhibiteur.

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels offre plusieurs avantages dans ce contexte, visant à déterminer une relation non linéaire entre les données de mesure du potentiel de corrosion à l'aide de l'appareil CANIN+. Ces modèles peuvent capturer des relations complexes entre les différents paramètres influençant la corrosion, tels que la composition chimique de l'environnement, le temps, le type de matériau, le revêtement et le support, ainsi que d'autres facteurs environnementaux. En intégrant ces données, les réseaux de neurones peuvent prédire avec précision le potentiel de corrosion d'un matériau ou d'une structure dans des conditions spécifiques.

De plus, les réseaux de neurones sont capables d'apprendre à partir de grandes quantités de données et de s'adapter aux changements dans l'environnement ou dans les conditions de fonctionnement. Cela permet une modélisation dynamique et en temps réel de la corrosion, ce qui est essentiel pour une gestion efficace des risques liés à la corrosion. Mais Malgré une modélisation par régression multiple, qui a légèrement amélioré les résultats, le niveau de fiabilité n'a pas été suffisant pour une analyse statistique. En raison de la complexité du phénomène de corrosion et de l'interaction de plusieurs paramètres sur une seule sortie (le potentiel de corrosion), nous avons choisi d'adopter une approche basée sur les réseaux de neurones artificiels généralisés.

En résumé, ce travail démontre l'importance des réseaux de neurones dans l'étude et la prédiction de la corrosion des structures en béton armé. Ces approches permettent une meilleure compréhension des mécanismes de corrosion et offrent des outils précieux pour évaluer la durabilité des ouvrages et prendre des décisions éclairées en matière de maintenance et de réparation. . Il est recommandé d'intégrer ces méthodes dans les processus de maintenance et d'évaluation de la corrosion, tout en continuant à explorer de nouvelles façons d'optimiser leur utilisation.

# **Références bibliographiques**

# Bibliographie

- [1] « Les facteurs de dégradation du béton » CIMbéton, (Janvier 2019). 1. Consulté Le 02 Février 2024.
- [2] Michel, Berkowicz « Pourquoi armer le béton ? » s.l. : FUTURA,( 21 Octobre 2019).  
<https://www.futura-sciences.com/maison/questions-reponses/construction-maison-arter-beton->  
Consulté Le 05 Février 2024.
- [3] Guiraud, Patrick (Avril 2018) « Armatures pour béton armé » : infociments.  
<https://www.infociments.fr/betons/armatures>. Consulté Le 10 Février .
- [4] Boussuge, Dominique (31 mai 2020) « Les principales dégradations du béton ».s.l. : Pathologiste – Expert technique. <https://www.journaldelagence.com/1181974-les-principales-degradations-du-beton-dominique-boussuge-pathologiste-expert-technique-scientifique-en-ouvrages-batis>. Consulté Le 24 Février 2024.
- [5] M. DRA Rafik El Arslene. Cours et exercices« Corrosion ». Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes ,Faculté de Technologie,page 2,5,14.
- [6] DR.Bensaada . S "Cours de corrosion". University - Biskra ,page 6.
- [7] Bencheikh, Mohammed. "La corrosion des aciers :durabilité des matériaux", ( 7 Janvier 2023).  
<https://www.youtube.com/watch?v=C-fe7x3cLRQ>. Consulté Le 11Février 2024.
- [8] « La corrosion : un ennemi industriel redoutable »Veille technologique en Chimie-Parachimie :Produits et Technologies . [lechimie.cnrst.ma/produits-technologies/technologies-procedes/303-la-corrosion-un-ennemi-industriel-redoutable#](http://lechimie.cnrst.ma/produits-technologies/technologies-procedes/303-la-corrosion-un-ennemi-industriel-redoutable#) .Consulté Le 24 Février 2024.
- [9] Moulinier, F & Geraud.E "Combien coûte la corrosion ?" Institut de Développement de l'Inox Av. Mx; Berthelot. F-44822 St -Herblain ,page 1.
- [10] Capra, Bruno (10 novembre 2014)"Aspect économique de la corrosion des structures en béton armé", Réf : C6151 v1.

- [11] Habchi Abderrahmane (2013) « Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier xc52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondent dans un milieu h2so4 20% » Mémoire de Master Académique , Université Kasdi Merbah , Ouargla Algérie ,page 3,4.
- [12] Wafa, Bourbia & Kerrouchi, Rima (2021), "Effet de traitements thermiques sur le comportement microstructural, mécanique et électrochimique de l'alliage d'aluminium 2017A". Mémoire de Master , Université Mohammed Seddik Benyahia Jijel ,Algérie page 23,35.
- [13] Damien Féron (18 Février 2004) " Contribution à l'étude des phénomènes de Biocorrosion Des Matériaux Métalliques". En vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches. L'Institut National Polytechnique De Toulouse France ,page 11.
- [14] Addaou, Abdellah "Dégradation des matériaux :Corrosion". Cour de corrosion-Technologie des matériaux Ecole Supérieure de Technologie de Alger.
- [15] Hassanein, Arthur " Les principaux types de corrosion-Les bases de la corrosion. <https://ask.hilti.fr/article/les-principaux-types-de-corrosion/pzvjbj> . Consulté Le 10 février 2024.
- [16] Brokate, Cristian Felipe Pérez (13 Jul 2017) « Etude de la compétition entre corrosion uniforme et localisée par automates cellulaires ». Université Pierre et Marie Curie, NNT : 2016PA066650f HAL <https://theses.hal.science/> , page 2.
- [17] "Introduction à la corrosion" : Cour plus . @coursplus6726, <https://youtu.be/iV2S6gOpouA?si=dftlPPeXRQpEhUDQ> . Consulté Le 13 Février 2024
- [18] Okada (1985) « A Theory of Perturbation-Initiated Pitting ». T. N 3, : The Electrochemical Society, Vol 132. DOI 10.1149/1.2113883 .
- [19] Corrosion aqueuse. s.l. : Techno-Science.net. <https://www.techno-science.net/>. Consulté Le 15 Février 2024.
- [20] « Galvanique, comprendre la corrosion » (18 Mai 2023). <https://galvatech2000.com/comprendre-la-corrosion-galvanique/> . Consulté Le 15 Février 2024.
- [21] IR. Jens Conderaerts (01-05-2019) « Multicorr: Recherche collective appliquée sur la corrosion galvanique ». Bulletin d'information : institut Belge de la soudure. Dernière modification: (08-12-

2023).<https://bil-ibs.be/fr/project/multicorr-recherche-collective-appliquee-sur-la-corrosion-galvanique> .

Consulté Le 24 Février 2024.

[22] Badiia Haroune & Kaim Samra (04 Juillet 2019). "Effet d'un polysavon 80C12 réducteur de frottement hydrodynamique" Mémoire de Fin d'études ,Université A. Mira de Bejaia , page12 ,14.

[23] M.G, Fontan U &Green A.N.D . "corrosion engineering".

[24] "Corrosion sous contrainte"(2012).. Environnement - Mécanique - Matériaux, Lyon

[25] Chérifi Wafa Nor Houda (2020) « Durabilité des éléments en béton armé en milieu marin » Diplôme de Doctorat 3<sup>ème</sup> Cyclel , Universitaire Belhadj Bouchaib, Ain Témouchent Algérie ,page 9,58,88.

[26] Bensafir Soumaya Amina, (2010) « Mécanismes d'altérations soumis des matériaux cimentaires aux milieux fortement agressifs » Diplôme d'ingénieur d'état en génie civil . Université de Mascara Algérie,page73.

[27] "La corrosion des aciers". Technique ingénieur : .fr, (07-03-2023). Réf : TBA1054.

[28] D.A.H. "Concrete How does it occur?" , Matériels Protection.

[29] Ir C Ployaert,( Novembre 2008) "La corrosion des armatures des béton armés et précontraintes". Boulevard du Souverain 68-1170 Bruxelles : Febelcem Belge Ed. resp/A.Jasienski.

[30] Lynda Amarni (2012)"Durabilité des éléments en Béton Armé en milieu agressif". Memoire de magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou -Faculté du Génie de la construction Algérie, page 23,24.

[32] Saidia Mohammed Aymen & Salah Salah, (Septembre 2020). « Influence de la corrosion dans les ouvrages en béton armé » Mémoire de Master - Faculté de sciences et de la technologie 8 mai 1945 Geulma Algérie ,page 56.

[33]Gaël Corvec, Riccardo Artoni , Aît-Mokhtar, Philippe Turcry & Abdelkarim (1Dècembre 2022) « Influence de la température sur la carbonatation des granulats de béton recyclés »,page 7,8.Vol 40N2.2022 HAL Id: hal-03880707, <https://doi.org/10.26168/ajce.40.2.22> .

[34] Hermann, Kurt & Hunkeler, Fritz, (1999) « La carbonatation du béton ». Ein Dienst der ETH-Bibliothek : Bulletin du cimentLink: <https://doi.org/10.5169/seals-146497>.

[35] Omar Tanane. « Etude de l'influence de la carbonatation sur la qualité du béton armé ». Adresse 38 Avenue Hassan Casablanca : 1Laboratoire Physico-chimie des Matériaux -Faculté des sciences Ben M'Sik Université Hassan II Casablanca Maroc .

[36]Mohamed Benchikh & Boualleg Saida (Novembre 2017) "Influence de la cure humide sur les caractéristique du mortier et béton sous l'effet d'un milieu agressif (carbonatation) DOI:10.13140/RG/2.2.32149.14561

[37] Jonathan Mai-nhu (18 décembre 2015) "Corrosion des armatures – intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi dans la vie de l'ouvrage". ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, 37, Réf 276.E . ISSN 0249-6224 – EAN 9782857552574, page 10 ,11.

[38] Schmittle Lucie (25/04/2019). "Durabilité des ouvrages en béton soumis à la corrosion : optimisation par une approche probabiliste". Thèse de doctorat , INSA: École doctorale Mécanique,énergétique,génie civil et procédés Toulouse France, page 29,30.

[39] Projet diamonde « Diagnostic corrosion et monitoring pour la durabilité des ouvrages en béton armé et des structures métalliques ». <https://lerm.fr/projet/projet-diamond-2/> .Consulté Le 17 Février 2024.

[40] CANIN+ « Analyseur de corrosion » Fiche produit PCQ/CNIN-Sol Measures.

[41] Rui Miguel Ferreira (November 2004) « Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment » Doctoral thesis, ISBN: : University of Minho, Guimarães, Portugal. ISBN: 972 – 8692 – 16 – 1.

[42] Akshata Patil, Lata Patted, Mahesh Tenagi, Vaishnavi Jahagirdar &Madhuri Patil Rahul Gautam. "Artificial Intelligence as a Tool in Civil Engineering- A Review ". s.l. : (Student, Department of Civil Engineering, Jain College of Engineering, Belagavi, India) ,page 36.

[43] M. Housseem Ghiat & M. Mohamed El-Mehdi Boukessessa (juin 2013). "Application des réseaux de neurones artificiels à l'analyse des chaussées souples". Mémoire de fin d'études: Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Pasteur Hassen Badi BP182 El-Harrach Alger Algérie ,page 31, 35.

- [44] Marijana Lazarevska, Milos Knezevic, Meri Cvetkovska & Ana Trombeva-Gavriloska (2014). "Application of artificial neural networks in civil engineering". India : s.n. SSN 1330-3651(Print), ISSN 1848-6339,page 1355,1354.
- [45] Suzuki, Kenji (2011) "Artificial Neural Networks". India : Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, ISBN 978-953-307-243-2,page 5,8.
- [46] Djeriri, Youcef (September 2017) « Cour :Les Réseaux de Neurones Artificiels ». s.l. : University of Sidi-Bel-Abbes, ,page 6,10,11,12 .
- [47] FatihaTrahi (2011) . « Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région deTizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels ». Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou,page 20,22,25,26.
- [48] Rahway, NJ,( Mai 2020)"Avenir de l'intelligence artificielle en anatomie pathologique" : s.n. USA. <https://www.msconnect.fr/therapeutic-areas/pilote/articles-publications/intelligence-artificielle-quel-avenir-en-anatomie-pathologique/>. Consulté Le 17 Mars 2024
- [49] Qu'est-ce qu'un réseau de neurones. s.l. : IBM. <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/neural-networks>.
- [50] Yang Z. (2014) « Artificial Neural Network » Comprehensive Biomedical Physics .Karolinska Institute, Stockholm, Sweden: Elsevier. p. 1.Hyperlink ISBN Hyperlink .
- [51]Hsiang-Teng Lin, Lo, Chien-Ming & Min-Der Lin. Advances in Intelligent Systems Research(2017) "Application of Artificial Neural Networks on Predicting Corrosion Rates of Carbon Steel in Taiwan". Department of Environmental Engineering, National Taiwan, R.O.C, volume 132 .  
Chung Hsing University Taichung , Published by Atlantis Press ,page 279.
- [52] D.S. Jeng, D. H. Cha & M. Blumenstein « Application of Neural Network in Civil Engineering Problems » page 1.
- [53] Nicolas Thome & Christian Wolf (4 Apr 2023) "Histoire des réseaux de neurones et du deep learning en traitement des signaux et des images". Naver Labs Europe, Meylan, France : Sorbonne Université, CNRS, ISIR, Paris, HAL Id: hal-04058482.<https://hal.science/hal-04058482>.

- [54] Vikash Singh ( APR 2019) "Feasibility of Artificial Neural Network in Civil Engineering". | Issue: 3 Mar-Apr 2019 Available , International Journal of Trend in Scientific Research and Development IJTSRD , India Volume: 3. Online: [www.ijtsrd.com](http://www.ijtsrd.com) e-ISSN: 2456 - 6470,page 725,726.
- [55] Khaled, Sadi (2018) "Application des réseaux de neurones et des SVM dans la prédiction du potentiel et du taux de corrosion d'un acier" Mémoire de magister ,Universite Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem Algérie, page 9,13.
- [56] Da Silva (2017) "Artificial Neural Networks" Springer International Publishing,<https://doi.org/10.1007/978-3-319-43162-8>.
- [57] Trevor Hastie,Robert Tibshirani & Jerome Freidman " The Elements of Statistical learningig -Data Mining inference,and prediction -Springer Series in statistics".
- [58] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio & Aaron Courville. "Deep Learning".Lien : Deep Learning Book.
- [59] Sublime Jérémie (22Apr 2022)" L'apprentissage non-supervisé et ses contradictions", : Bulletin de la Société informatique france), France. Vol. 19. pp.145-156. ff10.48556/SIF.1024.19.145ff.ffhal-03648943 <https://hal.science/hal-03648943>.
- [60] Grossberg, S. (1988) "Neural networks and natural intelligence" The MIT Press, <https://psycnet.apa.org/record/1988-97862-000>
- [61] Kohonen, T (1987) « Adaptive, associative, & self-organizing functions in neural computing », PMID: 20523469 DOI: 10.1364/AO.26.004910.<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20523469/>.
- [62] Hastie, T, Tibshirani, R, & Friedman, J. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer Science & Business Media.
- [63] Peña-Mora, F., & El-Rayes, K. (Eds.) (2004). Neural Networks Applications in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers.
- [64]Öztaş, A, "Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network". no. 9, s.l. : Construction and Building Materials, (2006), Vol 20. pp. 769-775.
- [65] Y, Pu et Mesbahi E (2006) "Aplication of ANN to evaluation of "corrosion . pp. 1190-1196, s.l. : Engineering Structures, Vol28. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.,12.009>.

- [66] Pandya D & Shaha (2014) "Experimentation and Its Prediction of Process Parameters Effects on Elongation in Tensile Test of AISI 1008 Steel Using ANN Model" D. page 282 – 289 : Procedia Technology, Vol. 14. <https://doi.org/10.1016/j.protcy08.037>.
- [67] Jiménez-Come, M J et I J Turias & J J Ruiz- Aguilar" A two-stage model based on Artificial Neural Networks to determine pitting corrosion status of 316L stainless steel". Intelligent Modelling of Systems Research Group Department of Civil and Industrial Engineering , University of Cadiz. Polytechnic School of Engineering Spain (Algeciras). Avda. Ramón Puyol s/n. 11202 - Algeciras (Cádiz).
- [68] Rankine, R, & Sivakugan, N. (2005) "Prediction of paste backfill performance using artificial neural networks.". Japan : Proceedings of the 16th International, 1107-1110.
- [69] Yang, S O Prasher (1997) "Artificial neural network model for sub surface drained farmland". al. 123(4), s.l. : Journal of Irrigation and, PP. 285.
- [70] You, X, & Liu, X. (2010) "Modeling corrosion rate of stainless steel in seawater using artificial neural networks". s.l. : Corrosion Science,52(11), 3752-3760.
- [71] Boucherit, M, & Kadri, A (2010) « Application of artificial neural networks for predicting localised corrosion resistance of steel ». s.l. : Materials & Design, 31(5), page 2632-2636.
- [72] Ramana, M. V, & Rao, G. V. R. ( 2012) « A neural network approach to predict the pitting potential of AISI type 316L stainless steel ». s.l. : Journal of Applied Electrochemistry 42(4), 245-253..
- [73] Leifer, L, & Mickalonis, J. Predicting pit depth from environmental variables using artificial neural networks. s.l. : Corrosion,. 71(9), 1081-1091.
- [74] Hua (2020) "Optimization of Corrosion Parameters for Low-Carbon Steel in Seawater Environment Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm".
- [75] Wang (2018)"A Neural Network Model for Real-Time Corrosion Monitoring in Marine Environments".
- [76] Fu (2017) "Prediction of Concrete Durability Based on an Artificial Neural Network Model".

[77] ASTM C876-09, (2009), “Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”, ASTM International, West Conshohocken. <https://doi.org/10.1520/C0876-09.2>.

[78] Benamara Ritadj & Lyaka Catherine (2023). Mémoire pour l’Obtention du diplôme de Master “Mesure du potentiel de corrosion avec des méthodes non destructives” Université d’Ain-Temouchent - Belhadj Bouchaib Algérie .

[79] Benjamin, J.R. and Cornell, C.A. (1970), “Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers”, Mcgraw-Hill Book Company, New York, USA. ISBN 07004549-6.

[80] Akshata Patil, Lata Patted, Mahesh Tenagi, Vaishnavi Jahagirdar, Madhuri Patil, Rahul Gautam ”Artificial Intelligence as a Tool in Civil Engineering – A Review” IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE) India e-ISSN: 2278-0661,p-ISSN: 2278-8727  
PP 36-39.[www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org).

[81] Sidi Mohamed Aissa Mamoune and Fatima Zohra Merouane ” prediction of swelling parameters of two clayey soils from algeria using artificial neural networks” Mathematical Modelling in Civil Engineering .Vol. 14-No. 3: 11-26- 2018 Doi: 10.2478/mmce-2018-0008.

[82] Zoubir Mehdi Sbartai ” Radar et Réseaux de Neurones Artificiels appliqués à l’évaluation non destructive des teneurs en eau et en chlorures des bétons ” Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) – INSA, Université Paul Sabatier - Toulouse France – 135 avenue de Rangueil - 31400 Toulouse France Cedex 4

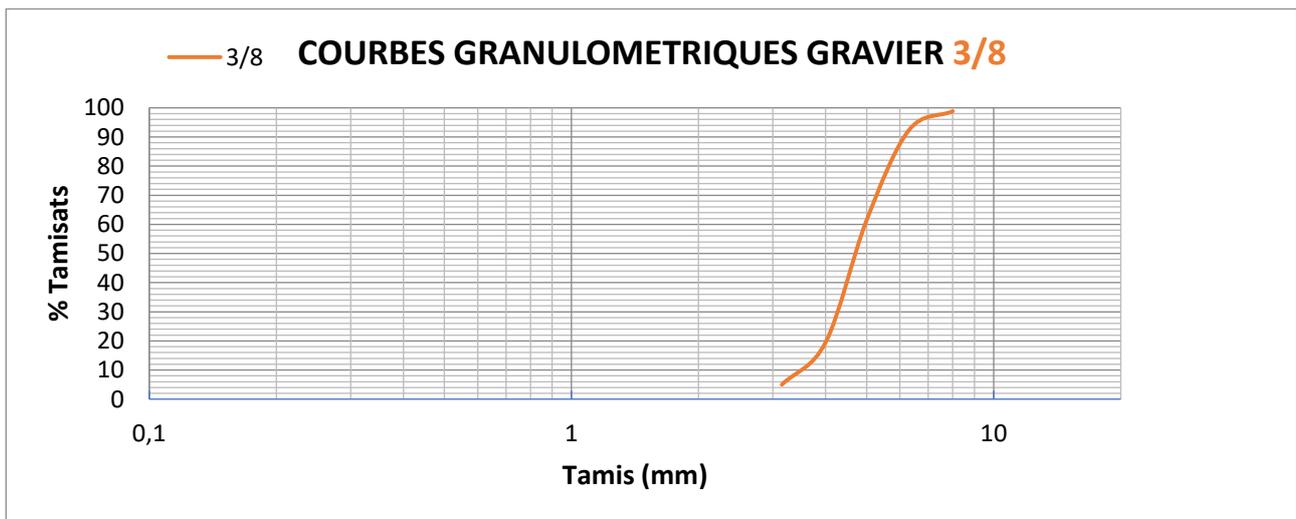
# *ANNEXES*

# ANNEXE A

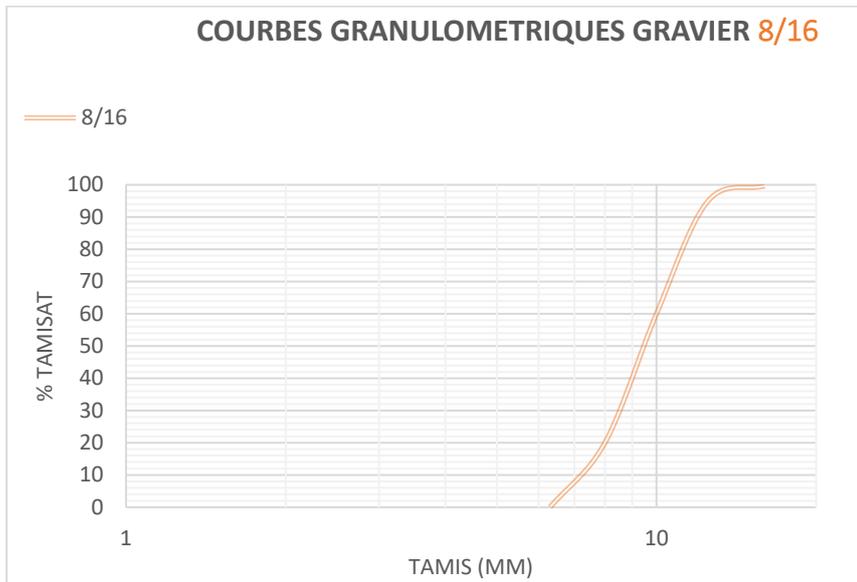
## Les résultats des essais

### Essai de la granulométrie par tamisage

Gravier 3/8					
	Ouverture des tamis en mm	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	%Tamisat
	8	11,59	11,59	1,16	98,84
	6,3	64,93	76,52	7,65	92,35
	5	309,53	386,05	38,61	61,39
	4	418,7	804,75	80,48	19,52
	3,15	145,46	950,21	95,02	4,98
	Le fond	49,79	1000	100	0



Gravier 8/16					
	Ouverture des tamis en mm	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	%Tamisat
	16	3,4	3,4	0,34	99,66
	12,5	47,57	50,97	5,05	94,91
	10	349,34	400,31	40,03	59,97
	8	399,03	799,34	79,93	20,07
	Le fond	200,65	1000	100	0



$$M_f = \sum \frac{\% \text{Refus Cumulé}}{100}$$

Sable 0/4					
	Ouverture des tamis en mm	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	%Tamisat
	4	2,73	2,73	0,273	99,73
	2	341,73	344,46	34,45	65,55
	1	251,34	595,8	59,58	40,42
	0,5	13,21	729,01	72,9	27,1
	0,25	91,81	820,82	82,08	17,92
	0,125	47,64	868,46	86,85	13,15
	Le fond	131,4	999,86	99,98	0,02

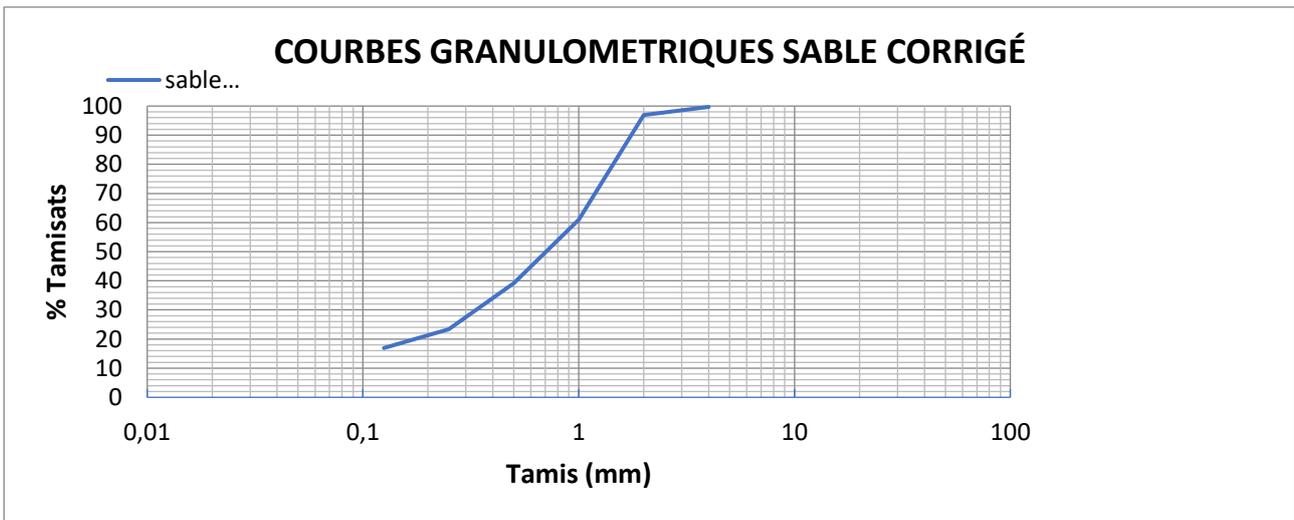
Mf=3,36

Sable 0/2					
	Ouverture des tamis en mm	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	%Tamisat
	4	0	0	0	100
	2	8,6	8,6	0,86	99,14
	1	360,3	368,9	36,89	63,11
	0,5	210,2	579,1	57,91	42,09
	0,25	159,1	738,2	73,82	26,18
	0,125	66,9	805,1	80,5	1
	Le fond	194,7	999,8	99,98	0,02

Mf=2,5

Sable :90%sable (0/2) +10%sable (0/4) corrigé :					
	Ouverture des tamis en mm	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	%Tamisat
	4	2,1	2,1	0,21	99,79
	2	28,6	30,7	30,7	69,3
	1	359,9	390,6	39,06	60,94
	0,5	218,3	608,9	60,89	39,11
	0,25	156,9	765,8	76,58	23,42
	0,125	64,9	830,7	83,07	16,93
	Le fond	168,8	999,5	99,95	0,05

Mf=2,62



- **Essai de l'équivalence de Sable**

La hauteur h1 : sable propre + le flocculat h1= 4,2

La hauteur h2 : sable propre h2=3,5

$$\frac{h2}{h1} \times 100 = 83.33\%$$

**Essai de la masse volumique apparente(g/ml)**

$$\rho = \frac{(m1+m2+m3)}{3V}$$

Gravier 8-16	Gravier 3-8	Sable corrigé
1.36	1.34	1.69

**Essai de la masse volumique absolue (g/ml)**

$$\rho = \frac{m}{V1-V2}$$

Gravier 8-16	Gravier 3-8	Sable corrigé
2.5	2.5	2.61

# ANNEXE B

## Fiche technique de ciment

### COMPOSITION

Clinker	Ajout calcaire	Canstituant secondaire
(80 à 94) %	Catégorie A (06 à 20) %	( De 0 à 5 ) %

### CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

	Temps de prise	Stabilité
VALEUR	≥ 60 minutes	≤ 10 MINUTES

### CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

	Résistance à la compression à 02 j	Résistance à la compression à 28 j
42.5 N	≥ 10.0 N / mm <sup>2</sup>	≥ 42.5 (N / mm <sup>2</sup> )
42.5 R	≥ 20.0 N / mm <sup>2</sup>	≤ 42.5 (N / mm <sup>2</sup> )

### CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )	Teneur en chlorures (Cl)
≤ 4.0 %	≤ 0.10 %

### PACKAGING

**Sacs 50 kg / Disponible en sac & Vrac**

Ciment Portland au calcaire (NA 442/2013) **CEM II A-L42.5 N & R** est un ciment gris, contenant :

80 à 94 % de clinker ordinaire  $C_3S \geq 55 \%$

6 à 20 % de calcaire pur

0 à 5% de gypse en tant que régulateur de prise.

**Domaines d'utilisation :**

- Béton courant et armé ou faiblement armé.
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis ...).
- Maçonnerie.
- Stabilisation des sols.
- Travaux en grande masse (barrages etc).

# MasterEmaco P 5000AP

## Apprêt de protection, mono-composant à base de ciment à usage multiple

### DESCRIPTION

Le **MasterEmaco P 5000AP** est un matériau prêt à l'emploi à base de ciment hydraulique, des charges sélectionnées, de résine redispersable et des additifs spéciaux. Destiné à la protection des armatures et structure en béton.

### DOMAINE APPLICATION

- Lorsque l'acier est visible et que la profondeur de recouvrement disponible est inférieure à 10 mm
- Lorsque le béton est contaminé par des chlorures
- Dans les environnements critiques où une protection supplémentaire est spécifiée
- Lorsque les conditions sur le chantier ne permettent pas d'appliquer les mortiers de réparation immédiatement après le nettoyage de l'acier
- **MasterEmaco P 5000AP** peut également être utilisé pour améliorer les propriétés de liaison et d'application des mortiers de réparation appliqués à la main dans des épaisseurs et conditions extrêmes

### AVANTAGE & PROPRIÉTÉS

- Excellentes propriétés anticorrosion, car il rétablit un environnement à pH élevé
- Contient des inhibiteurs de corrosion actifs pour mieux protéger l'acier
- Polymère modifié pour un collage supplémentaire sur l'acier
- N'affecte pas la résistance à la traction de l'acier d'armature
- Compatibilité parfaite avec les armatures en acier et les mortiers de béton ou de réparation
- A usage Multiple : peut également être utilisé comme primaire de liaison pour améliorer l'adhérence
- Faible teneur en chromate (Cr [VI] <2 ppm)

### CARCTÉRISTIQUES

Aspect	Poudre
Couleur	Grise / Blanc cassé
Masse volumique	Approx. 1,8 g/cm <sup>2</sup>
Test de conformité ZTV-Sib90	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teneur totale en halogène</li> <li>• Stimulation de la corrosion</li> <li>• Résistance à la corrosion</li> <li>• Vieillessement accéléré 10 cycles DIN 50017 10 cycles DIN 50018 120 heures DIN 50021</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 0.05</li> <li>&lt; 10</li> <li>&lt; 1 (migration de la rouille sous le revêtement à partir du bord non revêtu)</li> </ul>

	Pas de corrosion / Pas de délaminage / Max. largeur de fissure <0,1 mm
DPU	Approx. 60 minutes (Climat Froid) Approx. 20 minutes (Climat Chaud)
Température d'application (support et matériel)	min. 05 °C max. 35 °C
Force d'arrachement de la barre d'armature enduite par rapport à celle non-enduites	>80%

### DOSAGE EN EAU

Quantité d'eau de mélange Approx. 0.22 à 0.26 litre/ Kg

### CONSOMMATION MOYENNE

Environ. 1,5 kg de poudre sèche par m<sup>2</sup> et par mm d'épaisseur. Cette consommation est théorique et dépend de la rugosité du substrat. Il devrait être vérifié pour chaque travail particulier au moyen de tests «in situ».

### MODE D'EMPLOI

#### (a) Préparation du support

##### Béton et mortier :

- Toutes les surfaces doivent être propres, saines et exemptes de toutes traces d'huiles, de graisses, agent de démoulage et de produit de cure
- Enlevez le béton ou le mortier détérioré ou contaminé, par ex. par : grenailage ou par jet d'eau à haute pression.
- Saturer la surface de béton avec de l'eau tout réduisant l'excédent avant l'application

##### Armature et structure métallique :

- Toute les parties et couches corrodées doivent être éliminer avec des outils et méthodes appropriées avant l'application de **MasterEmaco P 5000AP**

#### (b) Préparation du mélange

- Dans un récipient propre et approprié, verser la quantité d'eau nécessaire puis ajouter progressivement **MasterEmaco P 5000AP** tout en

# MasterEmaco P 5000AP

## Apprêt de protection, mono-composant à base de ciment à usage multiple

mélangeant avec un malaxeur à faible vitesse jusqu'à obtention d'une consistance épaisse et homogène

- Utilisez uniquement de l'eau propre et non contaminée.

### (c) Application

- La température du substrat doit être au minimum de +5°C et au maximum de + 35°C. Les températures minimales doivent être maintenues pendant l'application et pendant au moins 24 heures pour un durcissement optimal du produit
- Ne pas appliquer par temps pluvieux
- Appliquer le matériau mélangé en une couche uniforme d'au moins 1 mm d'épaisseur (environ 1,5 kg / m<sup>2</sup>) sur toute la circonférence du renforcement préparé à l'aide d'un pinceau.
- Lorsque la première couche a suffisamment durci (environ 30 à 90 minutes), appliquer une deuxième couche de 1 mm d'épaisseur. Il est important que cette deuxième couche ait suffisamment durci avant que le mortier de réparation ne soit appliqué.
- Lorsque vous appliquez le mortier de réparation par projection ou autre méthode mécanique, laisser la couche d'apprêt sécher 8 heures à 20°C

### NETOYAGE DES OUTILS

Le nettoyage des outils se fait avec de l'eau avant séchage

### REMARQUES

- Ne pas appliquer à des températures inférieures à + 5°C ni supérieures à + 35°C
- N'ajoutez pas de ciment, de sable ou d'autres substances pouvant affecter les propriétés du matériau.
- N'ajoutez jamais d'eau ou de mortier frais à un mélange de mortier qui a déjà commencé apprendre

- Contactez le service technique de votre bureau MASTER BUILDERS SOLUTIONS pour connaître toute information requise non mentionnée.

### CONDITIONNEMENT

**MasterEmaco P 5000AP** est disponible en unité de 5Kg et de 1kg

### CONDITION DE STOCKAGE

Le produit **MasterEmaco P 5000AP** doit être stocker dans un endroit sec à l'abri de l'humidité et du gel, dans son emballage origine bien fermé.

Eviter le tassement excessif des sacs. Ne pas empiler plus de 10 sacs

### DURÉE DE VIE

**MasterEmaco P 5000AP** se conserve 12 mois dans son emballage à compter de la date de fabrication.

Pour les conseils spécifiques de stockage, consulter le service technique de BASF.

### PRÉCAUTION D'EMPLOI

Comme tous les produits contenant du Ciment portland, le **MasterEmaco P 5000 AP** peut provoquer des irritations.

Eviter le contact avec les yeux et un contact prolongé avec la peau. En cas de contact avec les yeux, laver à grande eau pendant au moins 15 minutes et consulter un médecin.

En cas de contact avec la peau, rincer soigneusement à l'eau courante. Si le produit est accidentellement ingéré consulter immédiatement un médecin. Se référer à la fiche de données de sécurité pour de plus amples informations

### CONTACT

Pour plus d'informations ou de questions, Contacter votre représentant local.

BASF Construction Chemicals Algeria  
Zone Industrielle Sidi Moussa, Route de Dar El Beïda,  
District 13 Ilot N° 15 Alger, Algérie  
Tel. +213 (0) 23 909 590  
Fax +213 (0) 21 909 591

Les informations données sont réelles, représentent notre savoir actuel et sont basées non seulement sur des essais en laboratoire mais également sur les expériences du terrain. Cependant, du fait de nombreux facteurs affectant les résultats, nous offrons ces informations sans garantie et aucune responsabilité ne pourra nous être imputée.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec notre département technique.

© = registered trademark of MBCC group in many countries

# ANNEXE C

jours	diamètre (mm)	milieux	inhibiteur	potentiel (mV)	Potentiel calc
0	110	1	7	-172,33	-254,485
4	110	1	7	-228,66	-267,417
6	110	1	7	-231,00	-273,883
8	110	1	7	-232,99	-280,349
18	110	1	7	-240,44	-312,679
20	110	1	7	-231,33	-319,145
22	110	1	7	-233,16	-325,611
25	110	1	7	-219,62	-335,31
27	110	1	7	-321,00	-341,776
29	110	1	7	-241,66	-348,242
32	110	1	7	-242,00	-357,941
34	110	1	7	-307,50	-364,407
36	110	1	7	-348,08	-370,873
39	110	1	7	-342,50	-380,572
41	110	1	7	-346,86	-387,038
0	80	1	7	-247,66	-280,915
4	80	1	7	-326,94	-293,847
6	80	1	7	-266,70	-300,313
8	80	1	7	-268,05	-306,779
18	80	1	7	-277,72	-339,109
20	80	1	7	-288,50	-345,575
22	80	1	7	-268,82	-352,041
25	80	1	7	-259,66	-361,74
27	80	1	7	-309,67	-368,206
29	80	1	7	-274,61	-374,672
32	80	1	7	-275,70	-384,371
34	80	1	7	-270,94	-390,837
36	80	1	7	-307,05	-397,303
39	80	1	7	-313,48	-407,002
41	80	1	7	-303,71	-413,468
0	110	2	7	-187,33	-240,376
4	110	2	7	-344,50	-253,308
6	110	2	7	-344,50	-259,774
8	110	2	7	-367,33	-266,24
18	110	2	7	-380,90	-298,57
20	110	2	7	-429,44	-305,036
22	110	2	7	-445,20	-311,502
25	110	2	7	-488,94	-321,201
27	110	2	7	-468,77	-327,667
29	110	2	7	-487,55	-334,133
32	110	2	7	-516,66	-343,832
34	110	2	7	-490,33	-350,298
36	110	2	7	-563,66	-356,764

39	110	2	7	-514,38	-366,463
41	110	2	7	-464,33	-372,929
0	80	2	7	-222,36	-266,806
4	80	2	7	-405,70	-279,738
6	80	2	7	-459,54	-286,204
8	80	2	7	-479,05	-292,67
18	80	2	7	-499,23	-325
20	80	2	7	-479,33	-331,466
22	80	2	7	-491,44	-337,932
25	80	2	7	-550,33	-347,631
27	80	2	7	-558,50	-354,097
29	80	2	7	-570,00	-360,563
32	80	2	7	-585,67	-370,262
34	80	2	7	-521,61	-376,728
36	80	2	7	-527,72	-383,194
39	80	2	7	-609,33	-392,893
41	80	2	7	-562,06	-399,359
0	110	3	8	-237,39	-329,113
4	110	3	8	-296,17	-342,045
6	110	3	8	-301,10	-348,511
8	110	3	8	-304,05	-354,977
18	110	3	8	-349,66	-387,307
20	110	3	8	-344,00	-393,773
22	110	3	8	-349,66	-400,239
25	110	3	8	-355,16	-409,938
27	110	3	8	-428,49	-416,404
29	110	3	8	-367,38	-422,87
32	110	3	8	-378,66	-432,569
34	110	3	8	-389,17	-439,035
36	110	3	8	-478,45	-445,501
39	110	3	8	-470,61	-455,2
41	110	3	8	-494,61	-461,666
0	80	3	8	-255,31	-355,543
4	80	3	8	-367,44	-368,475
6	80	3	8	-375,77	-374,941
8	80	3	8	-380,49	-381,407
18	80	3	8	-398,94	-413,737
20	80	3	8	-389,56	-420,203
22	80	3	8	-398,94	-426,669
25	80	3	8	-403,94	-436,368
27	80	3	8	-385,17	-442,834
29	80	3	8	-415,22	-449,3
32	80	3	8	-428,94	-458,999
34	80	3	8	-451,72	-465,465
36	80	3	8	-520,03	-471,931
39	80	3	8	-520,99	-481,63
41	80	3	8	-511,88	-488,096
0	110	4	8	-202,50	-315,004
4	110	4	8	-322,28	-327,936
6	110	4	8	-328,30	-334,402

8	110	4	8	-336,50	-340,868
18	110	4	8	-456,10	-373,198
20	110	4	8	-460,00	-379,664
22	110	4	8	-465,99	-386,13
25	110	4	8	-442,42	-395,829
27	110	4	8	-452,27	-402,295
29	110	4	8	-430,49	-408,761
32	110	4	8	-445,05	-418,46
34	110	4	8	-523,11	-424,926
36	110	4	8	-516,99	-431,392
39	110	4	8	-455,66	-441,091
41	110	4	8	-521,05	-447,557
0	80	4	8	-208,15	-341,434
4	80	4	8	-339,94	-354,366
6	80	4	8	-347,33	-360,832
8	80	4	8	-354,27	-367,298
18	80	4	8	-448,33	-399,628
20	80	4	8	-453,72	-406,094
22	80	4	8	-467,61	-412,56
25	80	4	8	-428,44	-422,259
27	80	4	8	-500,39	-428,725
29	80	4	8	-413,71	-435,191
32	80	4	8	-430,41	-444,89
34	80	4	8	-523,11	-451,356
36	80	4	8	-516,97	-457,822
39	80	4	8	-440,44	-467,521
41	80	4	8	-545,49	-473,987
0	110	5	7	-104,22	-198,049
4	110	5	7	-130,83	-210,981
6	110	5	7	-133,21	-217,447
8	110	5	7	-134,38	-223,913
18	110	5	7	-138,96	-256,243
20	110	5	7	-142,44	-262,709
22	110	5	7	-146,38	-269,175
25	110	5	7	-163,10	-278,874
27	110	5	7	-136,78	-285,34
29	110	5	7	-177,50	-291,806
32	110	5	7	-201,94	-301,505
34	110	5	7	-159,99	-307,971
36	110	5	7	-164,94	-314,437
39	110	5	7	-150,44	-324,136
41	110	5	7	-157,45	-330,602
0	80	5	7	-100,11	-224,479
4	80	5	7	-108,11	-237,411
6	80	5	7	-110,71	-243,877
8	80	5	7	-112,33	-250,343
18	80	5	7	-119,66	-282,673
20	80	5	7	-106,72	-289,139
22	80	5	7	-125,10	-295,605
25	80	5	7	-213,21	-305,304

27	80	5	7	-218,39	-311,77
29	80	5	7	-222,33	-318,236
32	80	5	7	-202,94	-327,935
34	80	5	7	-145,66	-334,401
36	80	5	7	-223,22	-340,867
39	80	5	7	-209,66	-350,566
41	80	5	7	-220,16	-357,032
10	80	1	7	-410,67	-313,245
13	80	1	7	-639,27	-322,944
15	80	1	7	-374,83	-329,41
18	80	1	7	-425,83	-339,109
20	80	1	7	-340,00	-345,575
22	80	1	7	-290,30	-352,041
24	80	1	7	-299,53	-358,507
27	80	1	7	-304,67	-368,206
31	80	1	7	-263,50	-381,138
34	80	1	7	-318,97	-390,837
36	80	1	7	-359,90	-397,303
38	80	1	7	-343,87	-403,769
41	80	1	7	-413,80	-413,468
43	80	1	7	-370,03	-419,934
45	80	1	7	-293,43	-426,4
51	80	1	7	-258,94	-445,798
10	110	1	7	-410,47	-286,815
13	110	1	7	-602,57	-296,514
15	110	1	7	-369,13	-302,98
18	110	1	7	-321,13	-312,679
20	110	1	7	-311,10	-319,145
22	110	1	7	-301,37	-325,611
24	110	1	7	-315,50	-332,077
27	110	1	7	-308,10	-341,776
31	110	1	7	-286,20	-354,708
34	110	1	7	-299,23	-364,407
36	110	1	7	-315,50	-370,873
38	110	1	7	-306,00	-377,339
41	110	1	7	-425,00	-387,038
43	110	1	7	-340,67	-393,504
45	110	1	7	-299,77	-399,97
51	110	1	7	-265,27	-419,368
13	80	6	7	-337,67	-252,399
18	80	6	7	-329,83	-268,564
20	80	6	7	-345,50	-275,03
22	80	6	7	-378,50	-281,496
24	80	6	7	-478,17	-287,962
27	80	6	7	-445,33	-297,661
31	80	6	7	-399,83	-310,593
34	80	6	7	-298,33	-320,292
36	80	6	7	-380,17	-326,758
38	80	6	7	-461,67	-333,224
41	80	6	7	-349,00	-342,923

43	80	6	7	-430,50	-349,389
45	80	6	7	-452,22	-355,855
51	80	6	7	-329,78	-375,253
55	80	6	7	-356,44	-388,185
15	110	6	7	-288,17	-232,435
18	110	6	7	-320,50	-242,134
20	110	6	7	-441,00	-248,6
22	110	6	7	-482,11	-255,066
24	110	6	7	-438,28	-261,532
27	110	6	7	-249,33	-271,231
31	110	6	7	-352,67	-284,163
34	110	6	7	-252,00	-293,862
36	110	6	7	-366,61	-300,328
38	110	6	7	-435,39	-306,794
41	110	6	7	-409,33	-316,493
43	110	6	7	-345,28	-322,959
45	110	6	7	-333,83	-329,425
51	110	6	7	-337,89	-348,823
55	110	6	7	-419,23	-361,755