

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : GENIE CIVIL

Spécialité : Structure

Par : LAKEHAL Mohammed Yassine

LAOUFI Ilyes

Sujet

**MESURE NON DESTRUCTIVE DES CARACTERISTIQUES DES
BETONS ARMES SOUMIS AU MILIEUX MARINS**

Soutenu publiquement, 06 juillet 2019 devant le jury composé de :

Mme BENACHENHOU K.

M BEZZAR A.

M MERIOUA A.

M BOUKLI HACENE S. M. A

Docteur

Professeur

Docteur

Professeur

Univ. Tlemcen

Univ. Tlemcen

Univ. Tlemcen

Univ. Tlemcen

Président

Directeur de mémoire

Co- Directeur de mémoire

Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Tous d'abord nous remercions le bon Dieu tout puissant pour son aide et pour nous avoir donné la patience et la volonté pour réussir ce modeste travail.

Nos remerciements s'adressent plus particulièrement nos encadrants le Pr. BEZZAR Abdelillah et Dr MERIOUA Abderrahmene qui ont bien accepté de diriger ce mémoire. Nous leur disons « Merci » pour leurs aides, leurs encouragements continus, leurs patiences et leurs judicieux conseils tous le long de ce mémoire.

Nous remercions aussi les responsables et membres du laboratoire EOLE, (Eau et ouvrages dans leurs environnements) de Génie Civil de la faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, sans qui ce travail n'aurait pu être mené à bien.

Nous aimerions témoigner notre gratitude à Madame le Docteur BENACHENHOU Kamila et Monsieur le Professeur BOUKLI HACENE Sidi Mohamed El Amine d'avoir bien voulu consacrer de leurs temps pour examiner et porter un jugement sur notre travail.

Nous remercions les enseignants du département de GENIE CIVIL qui ont assuré notre formation universitaire.

Nous exprimons toute notre admiration à nos familles, nos amis et tous nos proches qui nous ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé durant tout le parcours de nos études.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour m'avoir toujours soutenu et encouragé par leur présence et leur conseil, pour leurs sacrifices, leur amour que Dieu les garde et les protèges

Ma sœur, et toute ma famille je leur adresse mes plus chaleureux remerciements pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire

Mon collègue LAOUFI Ilyes avec qui j'ai partagé la réalisation de ce projet

Mes chers amis Rezzoug Mohamed Reda, Djilali Ahmed, Hadri ahmed El-Amine et tous mes amis et collègues avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur

Tous ceux que j'aime et qui partagent une place dans mon cœur

L.M. Yassine

DEDICACES

Voici enfin . . . Les années passent tel un rêve, voyons ce jour-là on sème le fruit de mon travail.

Je m'incline devant Dieu tout puissant qui m'a ouvert la porte du savoir et m'a aidé la franchir.

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

À mon frère et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

À tous les membres de la famille, petits et grands Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection la plus sincère.

À mon binôme, LAKEHAL Mohammed Yassine avec lequel j'ai partagé la réalisation de ce projet

À mes chers amis RAHOU Ilyes, Sour Kamel, BOUDJEMAA Bachir, RAMDANI Mohamed karim. Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées. En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Laoufi Ilyes

Résumé

Le phénomène de corrosion des armatures est considéré comme l'une des pathologies les plus répandues dans ouvrages en béton armé, soumis aux milieux marins ou aux sels de déverglaçage. Le but de ce travail est d'utiliser des méthodes non destructives simples et peu coûteuses pour le suivi de l'état de corrosion des armatures noyées dans le béton. La mesure de densité du courant Macrocell I_{corr} nous a permis de détecter l'amorçage de la corrosion sur des échantillons en béton et mortier avec différents rapports E/C (0,5 et 0,6) soumis à différentes concentrations en NaCl (30, 120 et 240 g/l) après environ six mois d'exposition par des cycles de mouillage et séchages. Les résultats obtenus ont montré que la concentration des chlorures a une faible influence sur l'initiation de la corrosion. Par contre l'effet de la porosité, qui dépend du rapport E/C ainsi que la nature du mélange, a un grand impact influence sur l'état de corrosion des armatures.

Mots-clés : Macrocell, méthodes non destructives, chlorures, béton armé, corrosion, porosité, densité du courant.

Abstract

The corrosion of reinforcement is considered one of the most common pathologies in concrete structures, subject to high seas or salts deglazing. The aim of this work is to use simple and inexpensive non-destructive methods for the follow-up of the state of corrosion of rebars embedded in concrete. The measurements of Macrocell I_{corr} current density allowed us to detect the initiation of corrosion on concrete and mortar samples with different W / C ratios (0.5 and 0.6) subjected to different NaCl concentrations (30, 120 and 240 g / l) after six months of exposure by wetting and drying cycles. The results showed that the concentration of chlorides has little influence on the initiation of corrosion. However, the effect of the porosity, which depends on the ratio E / C as well as the nature of the mixture has a great impact on the state of corrosion of the reinforcements.

Keywords: Macrocell, non-destructive methods, chlorides, reinforced concrete, corrosion, porosity, current density.

المخلص

تعتبر ظاهرة تآكل الحديد بفعل الصدأ واحدة من أكثر الأمراض شيوعاً في المنشآت من الخرسانة المسلحة الموجودة في البيئات البحرية أو تحت أملاح إزالة الجليد. الهدف من هذا العمل هو استخدام طرق غير مدمرة بسيطة وغير مكلفة لرصد حالة الحديد المغمور في الخرسانة المعرض للصدأ. لدراسة هذه الظاهرة حضرت عينات من الخرسانة والملاط بنسب مختلفة من ماء/اسمنت (0,5 و 0,6) خاضعة لتركيزات مختلفة من كلوريد الصوديوم (30، 120 و 240 غ / لتر) قيست فيها كثافة التيار في الحديد تقريباً لمدة ستة أشهر متعرضة لدورات التبليل والتجفيف، أظهرت النتائج أن تركيز الكلوريد له تأثير ضعيف على عملية بدء تآكل الحديد بالصدأ من ناحية. ومن ناحية أخرى، أثبت تأثير المسامية الذي يعتمد على نسبة ماء/اسمنت وطبيعة الخليط، أن له تأثير كبير على حالة تآكل الحديد بفعل الصدأ

الكلمات المفتاحية: ماكروسيل، الطرق غير المدمرة، الكلوريد، الخرسانة المسلحة، تآكل، المسامية، كثافة التيار

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la corrosion dans les milieux marins	2
I.1. Introduction :	3
I.2. Corrosion :	3
I.3. Corrosion par la pénétration des ions chlorure :	4
I.4. Initiation et propagation de la corrosion dans le béton :	5
I.5. Concentration seuil critique :	6
I.6. Méthodes non destructives :	7
I. 6. 1. Mesure de densité de courant (I_{corr}) :	7
I. 6. 2. Mesure de potentiel de corrosion :	8
I. 6. 3. Mesure de la résistivité électrique du béton :	9
I.7. Conclusion :	10
Chapitre II : Revue bibliographique (méthode Macrocell)	11
II.1. Introduction :	12
II.2. Influence type de béton :	12
II.2. Influence de l'inhibiteur :	17
II.3. Influence du type d'armatures :	19
II.4. Conclusion :	24
Chapitre III : Matériaux et méthodes	25
III.1. Introduction :	26
III.2. matériaux :	26
III.2.1. Caractéristiques des matériaux utilisés :	26
III.2.2. Propriétés des matériaux utilisés :	27
III.2.3. Préparation des échantillons :	28
III.3. méthodes :	33
III.3.1. Essai de porosité :	33
III.3.2. Mesure de la densité de courant I_{corr} :	33
III.7. Conclusion :	37

CHAPITRE IV : Analyse et discussion des résultats	38
IV.1. Introduction :.....	39
IV.2. Essai de Porosité :.....	39
IV.3. la mesure de la densité de courant Macrocell I_{corr} :.....	39
IV.3.1. Éprouvettes de Béton :	39
IV.3.2. Éprouvettes de mortier :.....	43
IV.3.3. Effet de variation des concentrations de NaCl :	46
IV.3.4. Effet de variation de rapport E/C :.....	47
IV.3.5. Effet de la variation des mélanges :.....	48
IV.4. Conclusion :	48
Conclusion générale et recommandations	52
Références bibliographiques	53
Annexe	56

Liste des figures

Figure I.1 : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures (Kaouadji, 2013)	05
Figure I.2 : Dégradation schématique des armatures au cours du temps (Tuutti, 1982)	05
Figure I.3 : Schéma du test de corrosion macrocell (Berke et sundberg .1990)	08
Figure I.4 : Dispositif de mesure de la résistivité électrique (Lataste, 2010) (cité par (Merioua, 2016))	09
Figure II.1 : Densité du courant macrocell pour les échantillons (BO) (Hansson et al., 2006)	12
Figure II.2 : Densité du courant macrocell pour les échantillons de BHP/L (Hansson et al., 2006)	12
Figure II.3 : Densité du courant macrocell pour les échantillons BHP/C (Hansson et al., 2006)	13
Figure II.4 : Barre d'armature supérieure en acier récupérée sur trois des échantillons de béton après 180 semaines d'exposition aux chlorures (Hansson et al., 2006)	13
Figure II.5 : Variation de la densité de courant macrocell avec le temps de l'armature intégré dans le béton de 20 MPa (Vedalakshmi et al., 2008)	14
Figure II.6 : Variation de la densité de courant macrocell avec le temps de l'armature intégré dans le béton de 30 MPa (Vedalakshmi et al., 2008)	14
Figure II.7 : Variation de la densité de courant macrocell avec le temps de l'armature intégré dans le béton à 40 MPa(Vedalakshmi et al., 2008)	14
Figure II.8 : Évolution de la densité de courant macrocell dans les échantillons de (BAP)(Yu et al., 2010)	15
Figure II.9 : Évolution de la densité de courant macrocell dans les échantillons de (BO)(Yu et al., 2010)	15
Figure II.10 : Résultats des mesures de la densité de courant macrocell – CEM I (Lapointe, 2009)	16
Figure II.11 : Résultats des mesures de la densité de courant macrocell – CEM V (Lapointe, 2009)	17
Figure II.12 : Densité de courant macrocell en fonction du temps d'exposition pour des bétons mélangés avec inhibiteurs (Saraswathy and Song, 2007)	17
Figure II.13 : Densité de courant macrocell moyen sur l'acier dans les éprouvettes non fissurées incorporant les inhibiteurs de corrosion sélectionnés (Al-Sodani et al., 2018)	18
Figure II.14 : Densité de courant macrocell moyen sur l'acier dans les échantillons fissurés contenant les inhibiteurs sélectionnés(Al-Sodani et al., 2018)	18
Figure II.15 : Densité de courant macrocell en fonction du temps d'exposition pour les échantillons CEM II/P, sans inhibiteurs (Rengaraju et al., 2018)	19

Figure II.16 : Densité de courant macrocell en fonction du temps d'exposition pour les échantillons CEM II/P, sous l'effet des inhibiteurs R2, NC et RC (Rengaraju et al., 2018).....	19
Figure II.17 : Comportement temporel versus courant des armatures (ATF) non Revêtues et revêtues dans le test de corrosion macro-cellule (HajiSheik et al, 2014).....	20
Figure II.18 : Comportement temporel versus courant des armatures (TTM) non revêtues et revêtues dans le test de corrosion macrocell (HajiSheik et al, 2014).....	20
Figure III.1 : Courbe granulométrique.....	27
Figure III.2 : Moule utilisé pour le béton pour l'essai macrocell.....	28
Figure III.3 : nettoyage des barres d'armatures.....	28
Figure III.4 : conservation des parties centrales des barres d'armatures avec de papier d'aluminium	29
Figure III.5 : Passivation des extrémités des barres d'armatures (Lapointe, 2009)	29
Figure III.6 : Époxy aux extrémités des barres avec les fils	29
Figure III.7 : insertion des d'armatures dans les moules de béton.....	30
Figure III.8 : Découpage des éprouvettes de béton	31
Figure III.9 : Moule de mortier pour essai de corrosion	31
Figure III.10 : Insertion des barres d'armatures dans les moules de mortier.....	32
Figure III.11 : Malaxage de mortier et remplissage des éprouvettes	32
Figure III.12 : La cure des éprouvettes dans un bac d'eau.....	32
Figure III.13 : Saturation sous vide selon AFPC-AFREM modifiée.....	33
Figure III.14 : disposition des éprouvettes de béton dans des bacs à 30g/l, 120g/l et 240g/l de NaCl pour la partie de mouillage.....	34
Figure III.15 : niveau de solution qui assure le contact avec la surface inferieur de l'éprouvette de béton	35
Figure III.16 : disposition des éprouvettes de mortier dans des bacs à 30g/l, 120g/l et 240g/l de NaCl pour la partie de mouillage.....	35
Figure III.17 : disposition des éprouvettes de béton au séchage	36
Figure III.18 : disposition des éprouvettes de mortier au séchage.....	36
Figure III.19 : résistance électrique de 100 Ohm connectée au fils électriques	36
Figure III.20 : multimètre numérique de marque Xiauba et de référence DT9205A+	37
Figure III.21 : multimètre numérique de marque MASTECH et de référence MAS830B	37
Figure IV.1 : Résultats pour essai de porosité des échantillons de Béton et mortier.....	39
Figure VI.2 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0.5 sous l'exposition de chlorures à 30g/l.....	40
Figure VI.3 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0.6 sous l'exposition de chlorures à 30g/l.....	40

Figure VI.4 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0.5 sous l'exposition de chlorures à 120g/l.....	41
Figure VI.5 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0.6 sous l'exposition de chlorures à 120g/l.....	41
Figure VI.6 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0.5 sous l'exposition de chlorures à 240g/l.....	42
Figure VI.7 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0.6 sous l'exposition de chlorures à 240g/l.....	43
Figure IV.8 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,5 sous l'expression de chlorure à 30g/l.....	43
Figure IV.9 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,6 sous l'expression de chlorure à 30g/l.....	44
Figure IV.10 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,5 sous l'expression de chlorure à 120g/l.....	45
Figure IV.11 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,6 sous l'expression de chlorure à 120g/l.....	45
Figure IV.12 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,5 sous l'expression de chlorure à 240g/l.....	46
Figure IV.13 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,6 sous l'expression de chlorure à 240 g/l.....	46
Figure IV.14 : Trace de corrosion sur la surface des différents échantillons de béton.....	47
Figure.IV.15 : Effet concentration	49
Figure.IV.16 : Effet du rapport E/C.....	50
Figure.IV.17 : Effet du mélange.....	51

Liste des tableaux

Tableau I.1 : synthèse bibliographique : teneur critiques en ions chlorures déterminées dans le cas du mortier ou du béton (Hassoune, 2018)	06
Tableau I.2 : Niveau de corrosion en fonction du courant et la densité du courant de corrosion (Andrade et al., 2004).....	08
Tableau I.3 : La probabilité de corrosion de l'armature (ASTM-C-876).....	09
Tableau I.4 : Seuils empiriques de résistivité/conductivité pour la corrosion des armatures (McCarter et al., 2005)	10
Tableau II.1 : Propriété physique des échantillons de bétons (Yu et al., 2010)	16
Tableau II. 2 : Tableau récapitulatif de la revue bibliographie	22
Tableau III.1 : Masses volumiques des granulats utilisés.....	27
Tableau III.2 : caractéristiques des matériaux cimentaires	30

Table des nomenclatures

Acronymes :

AFPC :	Association Française Pour La Construction
AFREM :	Association Française De Recherche Et d'Essais Sur Les Matériaux Et La Construction
ASTM:	American Society For Testing And Materials
ATF :	Armature Tordue A Froid
BAP :	Béton Autoplaçant
BHP/L :	Béton A Hautes Performances/Laitier
BHP/C :	Béton A Hautes Performances/Cendre Volante
BO :	Béton Ordinaire
Ccrit :	Concentration Critique En Chlorures
CND :	Contrôle Non Destructive
C ₃ A :	Aluminate Tricalcique
E/C :	Eau/Ciment
ESC :	Électrode De Référence Cuivre-Sulfate De Cuivre Saturé Cu/Cuso ₄
NE/NF :	normes européennes/ normes françaises
RE :	Résistivité Électrique
SGP :	Système de gestion des ponts
RILEM :	Réunion Internationale Des Laboratoires Et Experts Des Matériaux
TTM :	Traitement Thermomécanique

Symboles :

A :	Surface Active De L'acier
Cl :	Chlore
Fe :	Fer
I :	Intensité De Courant (A)
I _{corr} :	Courant De Corrosion
M _{air} :	Masse De L'échantillon, Pesé Dans L'air
M _{eau} :	Masse De L'échantillon Saturé, Pesé Dans L'eau
M _{sec} :	Masse De L'éprouvette Sèche, Pesée Dans L'air
R :	Résistance (Ω)
U :	Tension (V)
V _{corr} :	Vitesse De Corrosion
Φ :	Porosité

INTRODUCTION GENERALE

Le béton constitue le matériau le plus utilisé au monde avec une moyenne de production de six milliards de mètre cube par an¹. Associé aux armatures, cela fait de lui le composant principal des structures et ouvrages d'art dans le génie civil. Il est apprécié de tous par ses qualités, notamment sa disponibilité, sa facilité de mise en œuvre et son coût peu onéreux mais aussi sa capacité à s'adapter à différents types de construction.

Cependant, ce matériau comporte également des défauts qui peuvent être fatals aux structures. L'un de ces défauts appelé aussi pathologie est la corrosion des armatures, elle est considérée comme la plus rencontrée dans les ouvrages du génie civil, en particulier pour ceux situés dans les milieux agressifs tels que les régions côtières. Le degré de corrosion est aussi considéré comme indicateur de durabilité des structures en béton armé, en effet ce paramètre nous donne une idée sur l'état de dégradation de nos constructions à un temps donné permettant ainsi de préparer une campagne de réparation.

D'un autre côté, la difficulté réside dans la procédure elle-même de réparation, puisque cette opération nécessite des sommes faramineuses d'après le projet européen BRIME²; par exemple plus de 34.000 ponts routiers en Allemagne ont nécessitaient 380 millions d'euros de maintenance, ou encore en Grande Bretagne 9.500 ponts routiers ont eu besoin de 225 millions d'euros pour réparation, la France quant à elle ; a eu droit à 73 millions d'euros pour réhabiliter 28.000 ponts connaissant des dégradations.

Le 14 août 2018, un terrible accident a eu lieu en Italie causant plus de 40 morts, en effet le célèbre pont Morandi de la ville de Gênes s'est effondré suite à des dégradations cumulées provoquées par le phénomène de corrosion. Une étude statistique a montré que l'absence de ce viaduc coûtait un milliard d'euros par an à l'économie génoise³.

L'Algérie avec un littoral dépassant les 1200 km de longueur, une infrastructure portuaire comprenant 45 ports en service, plus de 1000 km d'autoroutes situés non loin de la zone côtière mais aussi une forte concentration de villes et par conséquent énormément de constructions situées à quelques kilomètres de la mer, en fait d'elle une cible parfaite pour cette pathologie. Ceci soulève un grand problème pour nos responsables et constructeurs, puisqu'il est devenu primordial de prédire ; avec précision et en un temps record tout en utilisant des moyens simples, efficaces et surtout moins couteux ; le phénomène de corrosion

¹ PLANETOSCOPE. 2012. matières-premières-production-mondiale-de-béton [Online]. Available : www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-production-mondiale-de-beton.html [Accessed 10 juin 2019.]

² Projet Européen BRIME, Gestion des ponts en Europe ; Bruno GODART, 2005

³ Le reportage de benjamin Mathieu. <https://www.francetvinfo.fr/monde/italie/effondrement-d-un-pont-a-genes>; publié le 10/06/2019.

des armatures afin d'éviter des dégâts considérables mais aussi limiter autant que possible les pertes matérielles et humaines.

Pour cela, on se doit de nous poser les questions suivantes :

- Est-il possible d'ausculter les structures, avec des moyens simples pouvant nous donner une idée sur l'état de leur corrosion ?
- Quels sont les facteurs qui peuvent affecter cette initiation ?

Nous allons tenter d'y répondre dans ce document. En effet, notre travail porte sur l'utilisation et la maîtrise d'une technique non destructive de prédiction du risque de corrosion des armatures présentées dans le béton armé qui compose nos constructions. Cette technique appelée « Macrocell » est capable par le simple principe de la loi d'Ohm de donner une idée sur l'état de corrosion, en un temps donné, d'un béton armé exposé à un environnement agressif. Le but est d'utiliser des composants simples et moins coûteux que les procédés utilisés régulièrement, ce petit matériel va nous aider à suivre, au sein de notre laboratoire, l'infiltration des solutions électrolytiques chargées en sels (chlorures), provenant des milieux agressifs, à travers la structure porale du matériau béton et ainsi connaître l'état de corrosion de ce dernier.

Notre document est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons présenter des généralités sur le phénomène de la corrosion dans le béton, en rappelant d'une part les étapes et les principales causes de la corrosion et d'autre part les différentes méthodes non destructives capable d'identifier et suivre ce phénomène.

Le second chapitre constitue une synthèse bibliographique regroupant plusieurs travaux sur la méthode Macrocell utilisée principalement pour le suivi de la corrosion, sur différents mélanges à base de matériaux cimentaires, utilisant un paramètre électrique appelé densité de courant de corrosion (I_{corr}), mais aussi les principaux paramètres pouvant influencer sur cette corrosion.

Dans le troisième chapitre, nous exposons notre programme expérimental consacré en premier lieu aux choix des matériaux utilisés, en suite la préparation des échantillons en s'inspirant de la norme ASTM G-109 mais aussi les travaux antérieurs portant sur la mesure Macrocell.

Un quatrième chapitre est consacré à la discussion des différents résultats obtenus au cours de notre programme expérimental ainsi qu'une comparaison avec les résultats de la littérature.

Pour terminer ce manuscrit, les principales conclusions de ce travail sont résumées dans une conclusion générale ainsi que des perspectives de recherches.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CORROSION DANS LES MILIEUX MARINS

I.1. INTRODUCTION :

Le présent chapitre présente une généralité sur le phénomène de corrosion des armatures dans le béton ainsi que les causes et les étapes principales de la corrosion d'une part, D'autre part, une revue bibliographique sur les méthodes non destructives utilisées pour mesurer le phénomène de corrosion.

I.2. CORROSION :

La corrosion des armatures présente dans le béton armé est une des pathologies fréquemment rencontrées dans le domaine du bâtiment, et ne peut se produire que lorsque certaines conditions physico-chimiques sont réunies (**Tran, 2016**). Le béton par sa zone d'enrobage protège l'acier de la corrosion du fait d'une part, de son rôle de barrière contre la pénétration d'agents agressifs, et d'autre part de la forte alcalinité (pH élevé de l'ordre de 12,5 à 13) qui conduit à une oxydation rapide en surface de l'acier pour former une couche protectrice mince (appelée film passif) d'oxyde et/ou d'hydroxyde de fer ; ce phénomène est appelé passivation.

Dès lors que le milieu environnant change, la stabilité de l'ensemble béton/acier est modifiée. La couche passive disparaît et la corrosion peut s'amorcer (**Vervisch-Fortuné, 2009**).

Dans le cas des structures en béton armé, la corrosion des armatures est le principal facteur à prendre en compte lorsqu'on veut étudier la durabilité des différents types d'ouvrages (bâtiment résidentiel, bâtiments industriels, ponts et ouvrages d'art, structures portuaires, ouvrages de génie civil...). Ils existent plusieurs types de corrosion des armatures, elle dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existe dans les milieux où ils sont construits. Mais dans le cas de ces ouvrages, l'origine de la corrosion des armatures est de deux types :

- Corrosion localisée par piqûres : attaque par les chlorures provenant de sels de déverglaçage ou d'un environnement marin. Les aciers sont particulièrement sensibles à la corrosion par piqûres, les ions chlorures pénètrent dans les structures poreuses de béton pour atteindre les armatures, l'attaque de ces ions se limite à des piqûres très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur en abaissant systématiquement les critères de la résistance des armatures (**Hassoune, 2018**).

- Corrosion généralisée par carbonatation du béton : elle se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques élémentaires. La carbonatation est un phénomène chimique lié à l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère, le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton et réagit avec le hydrate de la pâte de ciment, ce front de carbonatation abaisse le pH de la solution interstitielle du béton, ceci dégrade la passivation des armatures (**Lesueur nobel pujol, 2004**).

Les propriétés mécaniques et chimiques de la liaison acier/béton sont altérées de manière différente selon la nature des agents agressifs (CO_2 , Cl^-) (**Dehoux, 2012**).

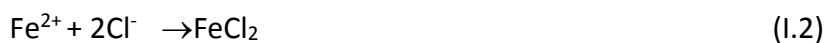
La corrosion des armatures s'identifie généralement par des éclats du béton d'enrobage, des épaufrures locales ou la présence de taches de rouille sur le parement. Elle engendre une diminution de la section de l'acier pouvant entraîner sa rupture et une altération de la capacité portante de la structure. Les principales conséquences résident dans la perte de fonction de la structure en termes d'esthétisme ou de sécurité pour les usagers.

L'évolution de la corrosion de l'acier dans le béton dépend également d'autres paramètres comme le rapport eau/ciment (E/C), le type et la composition du ciment utilisé, le pH de la solution des pores du béton, la qualité de l'interface acier/béton, l'épaisseur du béton d'enrobage, les conditions climatiques, etc. (**Ahmad, 2003**).

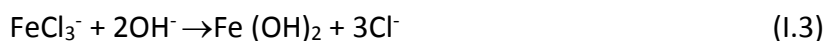
I.3. CORROSION PAR LA PENETRATION DES IONS CHLORURE :

Le phénomène de corrosion par pénétration d'ions chlorure survient lorsque la concentration d'ions chlorure atteint un certain seuil (**Tran, 2016**).

La dépassivation des aciers est initiée lorsque le front de pénétration des ions chlorures traverse le béton d'enrobage et atteint le premier lit d'armatures en quantité suffisante afin d'attaquer la couche passive par la formation des ions FeCl_3 ou FeCl_2 , à partir des réactions (**Hassoune, 2018**)



Les ions formés ainsi, consomment les ions OH^- présents, selon les réactions suivantes :



Ces réactions acidifient la solution, entraînent une diminution du pH et une régénération des ions chlorures, les chlorures agissent par rupture du film passif des aciers qui perd son caractère protecteur, les chlorures sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier et le film passif est lui-même variable selon l'endroit, les chlorures entraînent une corrosion qui est localisée (piques) (**Oualit, 2009**).

Les ions chlorures Cl^- pénètrent dans le béton et provoquent, à partir d'une certaine concentration dans la solution des pores, au niveau des armatures, la destruction locale du film de passivation et l'initiation d'une corrosion localisée. Les ions chlorures s'introduisent dans la couche passive en remplaçant l'oxygène et en augmentant à la fois sa solubilité, sa perméabilité et sa conductivité ionique. Ils sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier laissant subsister quelques imperfections dans la couche passive qui facilite l'incorporation des ions chlore.

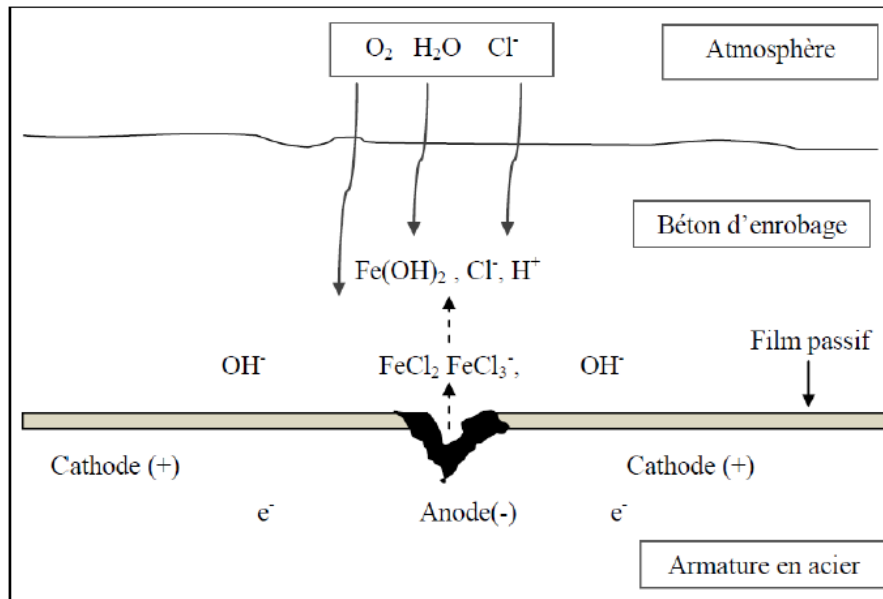


Figure I.1 : Processus électrochimique de corrosion par les chlorures (Kaouadji, 2013).

La dégradation de la couche passive est un phénomène local conduisant à une corrosion par piqûre. On considère que la quantité de chlorures libres nécessaires pour détruire la couche de passivation dépend de la quantité de portlandite présente (voir figure I.1). Toutefois il s'avère que la qualité de l'interface entre l'armature et le béton peut également être déterminante (Castel, 2000).

I.4. INITIATION ET PROPAGATION DE LA CORROSION DANS LE BETON :

La corrosion des armatures dans le béton est décrite par le modèle phénoménologique de (Tuutti, 1982). Il considère que la corrosion des armatures est divisée en deux phases : une phase d'incubation et une phase de propagation (figure I.2).

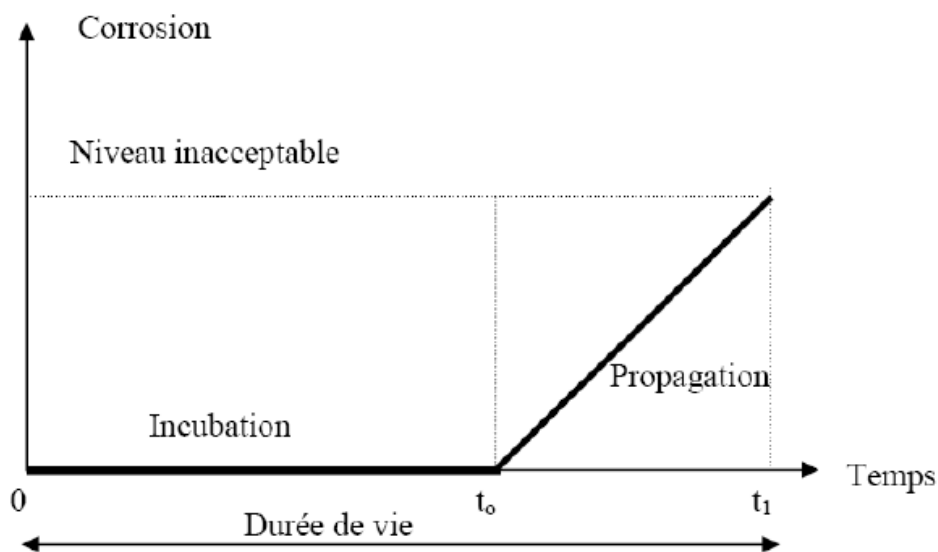


Figure I.2 : Dégradation schématisée des armatures au cours du temps (Tuutti, 1982)

La phase d'incubation correspond à une période pendant laquelle les agents agressifs pénètrent dans le béton d'enrobage jusqu'à l'armature. Lorsque les agents agressifs atteignent le niveau critique qui va provoquer la dépassivation de l'acier, la corrosion s'amorce puis se développe à une vitesse qui dépend de la température, de la présence d'oxygène et de la conductibilité électrique du béton (**Francois et al., 1994**).

Le temps t_0 correspond au passage de la phase d'incubation à la phase de propagation.

I.5. CONCENTRATION SEUIL CRITIQUE :

La réaction de corrosion débute lorsque la concentration en ions Cl^- près des armatures atteint un seuil critique cette valeur est habituellement exprimée en pourcentage de masse de ciment ou en pourcentage de la masse totale de béton sec (**Angst and Elsener, 2017**). Une synthèse de différentes valeurs de la concentration critique (C_{crit}) faite par plusieurs chercheurs en laboratoire sur des matériaux en béton et en mortier est présentée dans le (tableau.1). Selon ce tableau cette valeur varie entre 0,13 et 1,5 % pour le béton et de 0,2 et 0,75 % pour le mortier.

Tableau I.1 : Synthèse bibliographique : teneurs critiques en ions chlorures déterminées dans le cas du mortier ou du béton (**Hassoune, 2018**)

Matériau	Type d'exposition	Seuil d'amorçage (% par poids du ciment)	Références
Béton	Laboratoire	0,5-1,2	(Bolzoni et al. 2014), cité par (Hassoune, 2018
Béton	Laboratoire	0,13-0,3	(Soufi 2014) cité par (Hassoune, 2018
Béton	Laboratoire	1,1-1,4	(Dimitrios et al. 2015) cité par (Hassoune, 2018
Béton	Laboratoire	1,5	(Angst et al. 2017) cité par (Hassoune, 2018
Mortier	Laboratoire	0,7	Rong et al. 2016) cité par (Hassoune, 2018
Mortier	Laboratoire	0,52-0,75	(Nygaard et al. 2005) cité par (Hassoune, 2018
Mortier	Laboratoire	0,2-0,4	(Ann et al. 2007) cité par (Hassoune, 2018

I.6. METHODES NON DESTRUCTIVES :

Les méthodes non destructives sont des outils ou des méthodes de mesure ou de contrôle capable de donner accès à une ou plusieurs grandeurs physiques, physico-chimique ou chimiques caractérisant le phénomène étudié, par l'obtention, soit de valeurs quantitatives, soit d'informations par seuillage de valeurs lorsque l'on s'intéresse à la détection d'évènements (**Merioua, 2016**).

La surveillance ou l'évaluation non destructive (END) ou le contrôle non destructive (CND) dans le domaine des structures en béton permet de suivre l'évolution et la progression des fronts de pénétration des agents agressifs au niveau de la zone d'enrobage ou au niveau de l'armature elle-même (**Lataste, 2010**).

Plusieurs techniques de contrôle électriques non destructif sont utilisées pour évaluer le phénomène de corrosion nous citons les méthodes basées sur la densité de courant ou le potentiel de courant des armatures, d'autres utilisent la résistivité électrique du béton (**Andrade et al., 2004**).

Les valeurs d' i_{corr} , peuvent être utilisées pour évaluer le taux de dégradation des structures en béton affectées par la corrosion des armatures.

I. 6. 1. Mesure de densité de courant (i_{corr}) :

L'ASTM a publié en 1992 (et révisé à nouveau en 2007), la norme (**ASTM-G-109**) qui est la méthode d'essai standard pour déterminer la densité de courant corrosion i_{corr} des aciers noyés dans le béton et exposés à des environnements contenant des chlorures.

La méthode utilise des échantillons de béton de dimensions : 280 x 150 x 115 mm avec un bac d'accumulation rempli de solution de chlorure dosée à 3% de NaCl suivant la norme. (Figure I.3).

La tension à travers la résistance de 100 Ω est surveillée en cycle (mouillage et séchage) quotidiennement ce qui permettait de déterminer le courant de corrosion macrocell entre la barre supérieur (anode) et la barre inférieur (cathode) en utilisant la loi d'Ohm (cf. équation I.5) (**ASTM-G-109**).

$$i_j = V_j / R \quad (I.5)$$

i_j : intensité de courant (A)

V_j : tension (v)

R : Résistance en (100-ohm) valeur constante

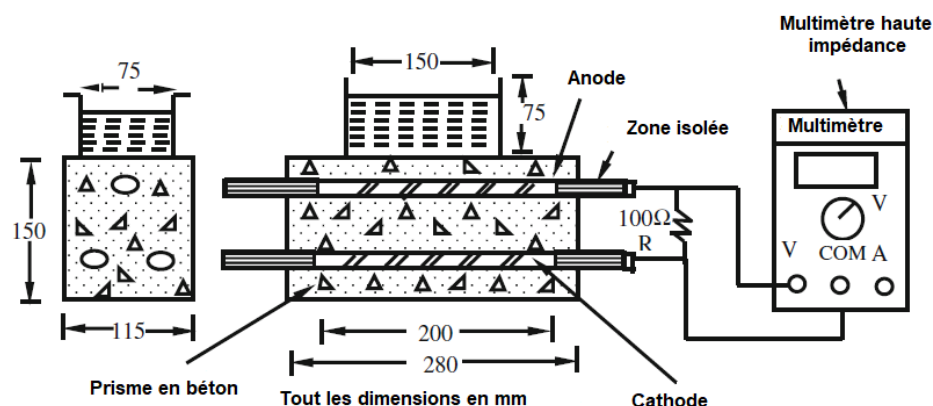


Figure I.3 : Schéma du test de corrosion macrocell (Berke et sundberg .1990)

La densité de courant de corrosion, I_{corr} , est le rapport du courant mesuré sur la surface exposée de l'acier (cf. l'équation I.6).

$$I_{corr} = i / A \quad (I.6)$$

i : intensité de courant (A)

A : surface de contact acier béton (cm^2)

Les niveaux de corrosion en fonction de la valeur de la densité de courant de corrosion I_{corr} et la vitesse instantanée de corrosion V_{corr} sont indiqués dans le tableau I.2 (Andrade et al., 2004).

I. 6. 2. Mesure de potentiel de corrosion :

La mesure de potentiel de corrosion ou de potentiel d'électrode est une des techniques les plus utilisées dans le domaine du contrôle non destructif en génie civil, Il s'agit de mesurer, à l'aide d'un voltmètre à haute impédance ($10 \text{ M}\Omega$ au minimum), la différence de potentiel entre l'armature du béton et une électrode placée sur le parement de béton. La conductivité électrique est assurée par mouillage de la surface du parement.

Tableau I.2 : Niveau de corrosion en fonction du courant et la densité du courant de corrosion (Andrade et al., 2004).

I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	V_{corr} (mm/an)	Niveau de corrosion
< 0,1	0,001	Négligeable
0,1 – 0,5	0,001 – 0,005	Faible
0,5 – 1	0,005 – 0,010	Moyen
> 1	> 0,010	Élevé

Selon cette norme (ASTM-C-876), la mesure de la différence de potentiel électrique entre une armature dans le béton et une électrode de référence en cuivre-sulfate de cuivre en contact

avec le béton de recouvrement d'avoir une information sur la probabilité de corrosion de l'armature, voir tableau I.3.

Tableau I.3 : La probabilité de corrosion de l'armature (**ASTM-C-876**).

Potentiel mesuré (ESC)*	Probabilité de corrosion
Supérieur à -200 mV	>10%
Entre -200 mV et -350 mV	50%
Inférieur à -350 mV	<90 %

*ESC = électrode de référence Cuivre-sulfate de cuivre saturé Cu/CuSO₄

I. 6. 3. Mesure de la résistivité électrique du béton :

La mesure de la résistivité électrique du béton est parmi les contrôles non destructives dans l'estimation de la corrosion des armatures en acier incorporés dans le béton (**Neithalath, 2007**), elle caractérise les possibilités de déplacement des particules électriquement chargées et représente la résistance spécifique du matériau au passage d'un courant électrique (**McCarter et al., 2005**). Elle s'exprime souvent en Ohm Mètre [$\Omega \cdot m$] (équation I.7) (**Elsener et al., 2003**).

$$R=U/i \quad (I.7)$$

L'équation (I.8) décrit la résistivité électrique, en intégrant le facteur géométrique considérant l'espacement L(m) et la section A (m²) des électrodes.

$$RE = R. A/L \quad (I.8)$$

La gamme de résistivité électrique du béton est très large, en fonction de sa composition et des conditions environnantes ; le Tableau I.4 montre la probabilité de corrosion en fonction de la résistivité (**McCarter et al., 2005**).

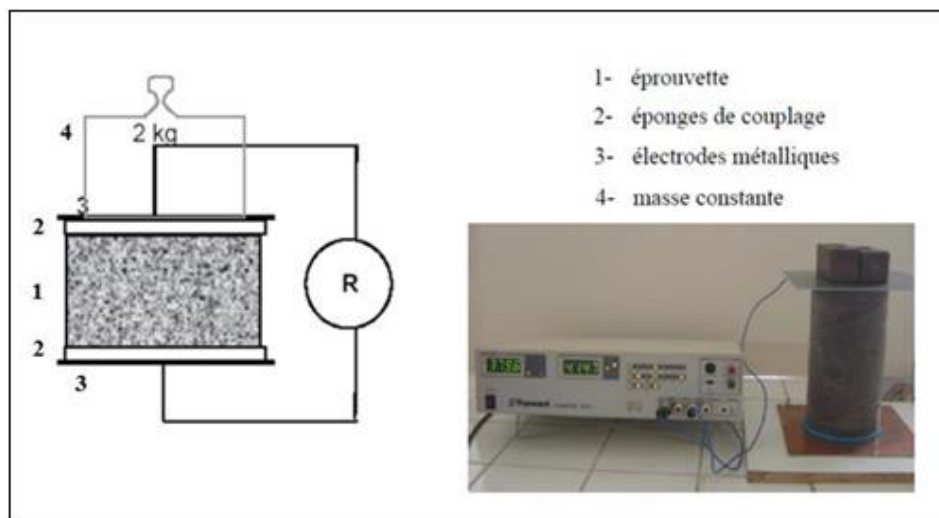


Figure I.4 : Dispositif de mesure de la résistivité électrique. (**Lataste, 2010**)
(Cité par (**Merioua, 2016**))

Tableau I.4 : Seuils empiriques de résistivité/conductivité pour la corrosion des armatures (McCarter et al., 2005).

Résistivité ($\Omega.m$)	Conductivité(S/m)	Probabilité de corrosion
< 50	$> 2.10^{-2}$	Très haute
50 – 100	$2.10^{-2} - 10^{-2}$	Haute
100 – 200	$10^{-2} - 5.10^{-3}$	Faible à modérée
> 200	$< 5.10^{-3}$	Faible

I.7. CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur l'effet de corrosion des aciers noyés dans le béton. Ce phénomène « la corrosion » se fait en deux phases, l'amorçage et la propagation. Lorsque les ions chlorures atteignent la concentration critique d'après la littérature [0,13 - 1,5 %] pour le béton et [0,2 et 0,75 %] pour le mortier, les ions chlore vont provoquer la dépassivation de l'acier, la corrosion s'amorce puis se développe. En effet, l'état de corrosion est contrôlé par les méthodes non destructives afin de détecter le niveau de risque en utilisant des méthodes tel que le potentiel de corrosion, la résistivité électrique du béton et la densité de courant macrocell (**ASTM G-109**). Dans notre travail nous avons développé la dernière méthode dite « macrocell », dont une synthèse bibliographique, basée sur des travaux antérieurs, est détaillée dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE (METHODE MACROCELL)

II.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons développer une revue bibliographique concernant la méthode macrocell pour le suivi de la corrosion des aciers noyés dans le béton, les études étaient faites par différents auteurs utilisant des différents paramètres pouvant influencer le phénomène de corrosion sur les matériaux cimentaires.

II.2. INFLUENCE TYPE DE BETON :

Hansson et al., (2006) Ont étudié selon la norme l'ASTM G109 trois béton (Béton ordinaire BO, béton haute performance avec deux types d'ajout cendre volante BHP/C ou laitier BHP/L) pendant une durée de 180 semaines avec un cycle d'humidification – séchage de (15 jours – 15 jours) utilisant une solution de NaCl à 3% de concentration. Les (Figure II.1, II.2, II.3) illustrent la densité de courant macrocell en fonction du temps pour les trois bétons étudiés.

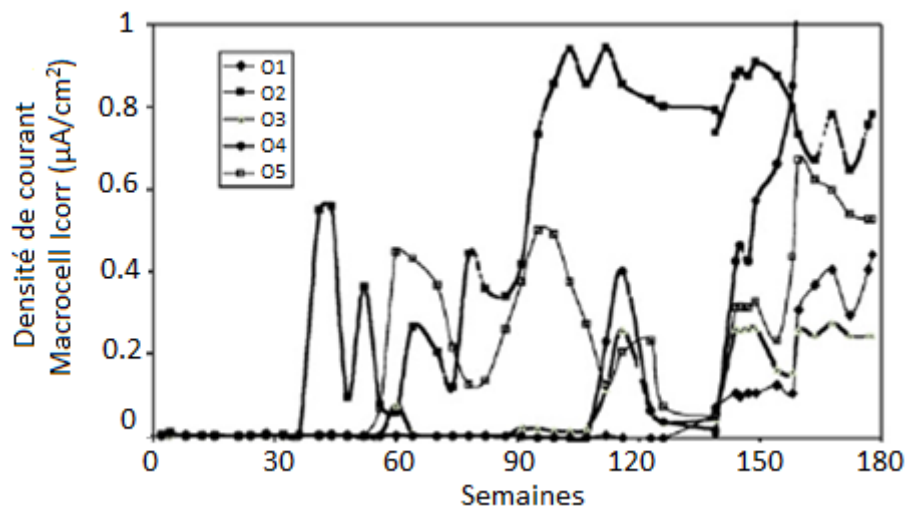


Figure II.1 : Densité du courant macrocell pour les échantillons (BO) (Hansson et al., 2006)

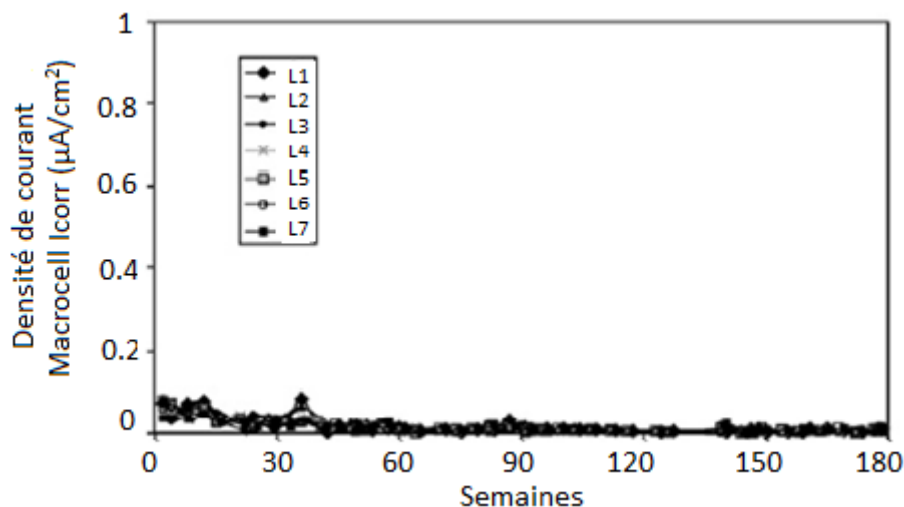


Figure II.2 : Densité du courant macrocell pour les échantillons de BHP/L (Hansson et al., 2006)

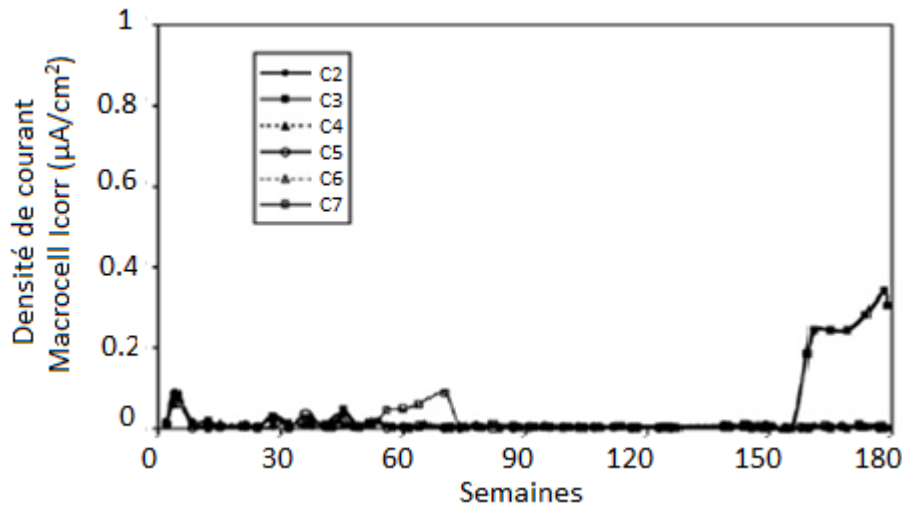


Figure II.3 : Densité du courant macrocell pour les échantillons BHP/C (Hansson et al., 2006)

Les résultats n'ont montré aucune indication de corrosion active après une exposition de 180 semaines aux chlorures pour les deux types de BHP/C et BHP/L, par contre une initiation de la corrosion pour le BO variant entre 35 jours et 140 semaines (figure II.4). Cette différence est due à l'influence de la composition sur la porosité du mélange et par conséquent sur la réduction du transfert des chlorures et de l'amorçage de la corrosion observée.

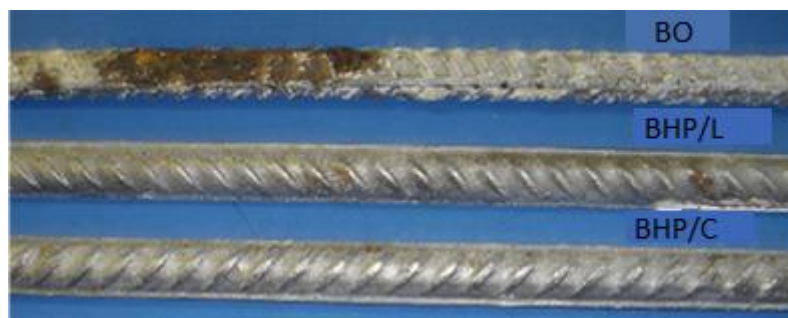


Figure II.4 : Barre d'armature supérieure en acier récupérée sur trois des échantillons de béton après 180 semaines d'exposition aux chlorures (Hansson et al., 2006)

(Vedalakshmi et al., 2008) ont suivi l'évolution de la densité de courant de corrosion macrocell pendant plus de 120 semaines selon la norme (ASTM-G-109), l'exposition de neuf (09) béton dans une solution de 3% de NaCl sous un cycle d'une semaine (4 jours mouillage – 3 jours séchage). Les bétons confectionnés offrent trois résistances mécaniques (20, 30 et 40 MPa) en utilisant trois ciments le premier un CEMI noté (B01), un CEMII à base pouzzolane (B02) et un ciment à base de laitier (B03).

Les figures II.5, II.6 et II.7 montrent l'évolution par rapport au temps de la densité de courant de corrosion I_{corr} dans les armatures.

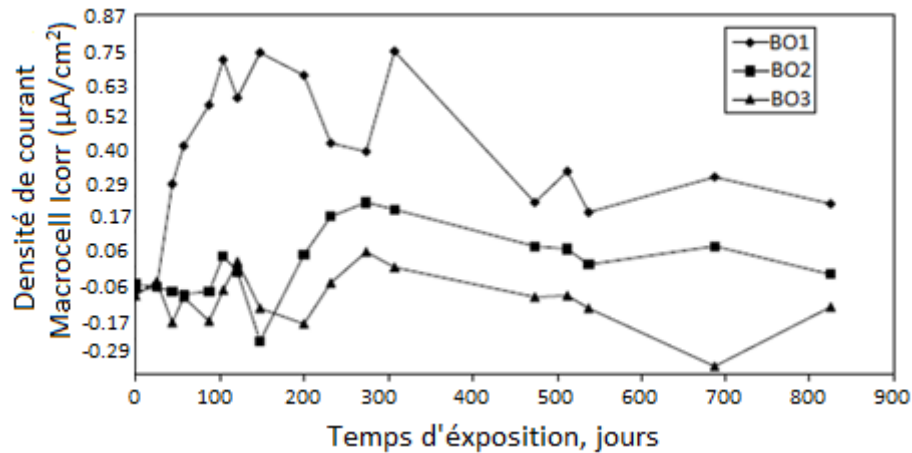


Figure II.5 : Variation de la densité de courant macrocell avec le temps de l'armature intégré dans le béton de 20 MPa (Vedalakshmi et al., 2008)

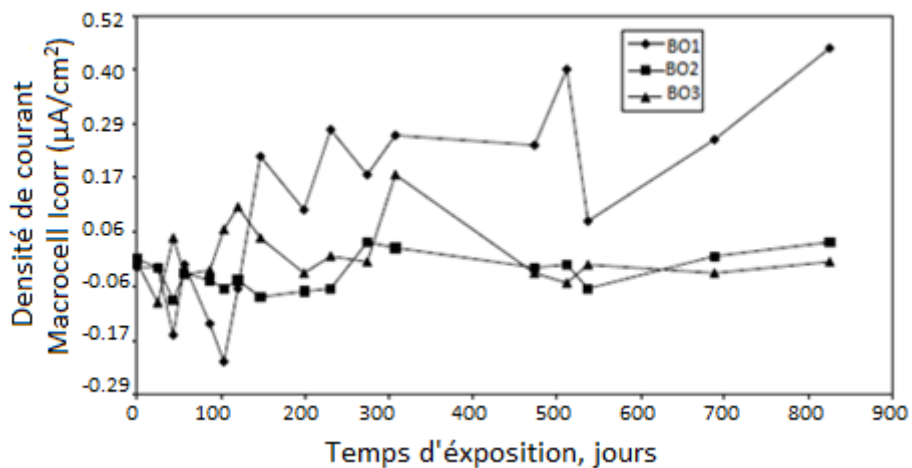


Figure II.6 : Variation de la densité de courant macrocell avec le temps de l'armature intégré dans le béton de 30 MPa (Vedalakshmi et al., 2008)

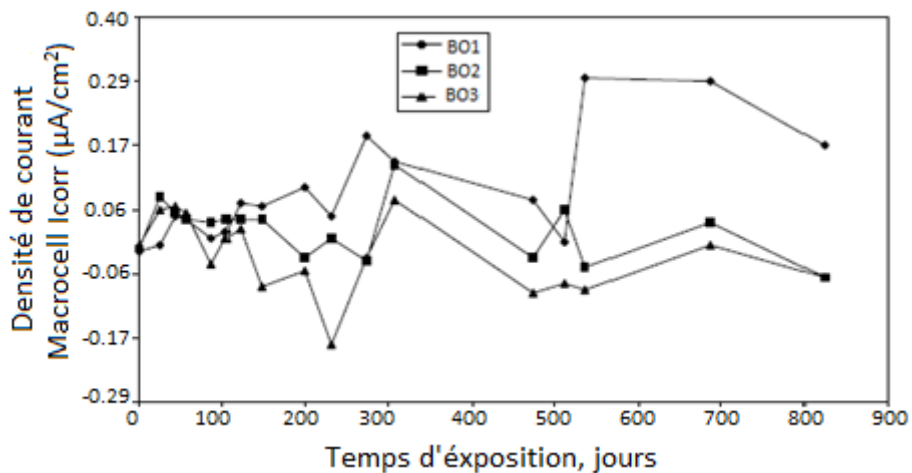


Figure II.7 : Variation de la densité de courant macrocell avec le temps de l'armature intégré dans le béton à 40 MPa (Vedalakshmi et al., 2008)

Les résultats montrent que dans le béton de 20 MPa, le taux de corrosion des barres d'armature dans les bétons (BO2) et (BO3) était respectivement 9 à 10 fois inférieur à celle des barres dans le béton (BO1), par contre, dans le cas des bétons à 30 MPa, il est de 17 et 6 fois plus faible que dans le béton (BO1). Concernant les bétons à 40 MPa, le taux de corrosion était 1,6 et 2,5 fois moins dans les bétons de (BO2) et (BO3) que dans le béton (BO1), respectivement.

Vedalakshmi et al., (2008) Constatent que la réduction de porosité des bétons due soit à la classe de résistance du ciment soit aux réactions pouzzoloniques entraînent une réduction du transfert des ions chlorures, de plus les formulations proposées améliorent grandement la résistance contre la corrosion des aciers dans le béton.

Yu et al., (2010) Ont mesuré i_{corr} selon **(ASTM-G-109)** dans deux bétons, autoplaçant (BAP) ainsi qu'un béton ordinaire (BO). Le ciment utilisé est un ciment Portland CEM I d'alcalinité normale (0.39% de Na₂O) avec un super plastifiant (PLASTOL 5000) pour obtenir le (BAP). Les échantillons ont été exposés à un cycle (7 jours mouillage / 7 jours séchage) à une solution saline à 15% de NaCl, Les mesures étaient prises à la fin de chaque cycle.

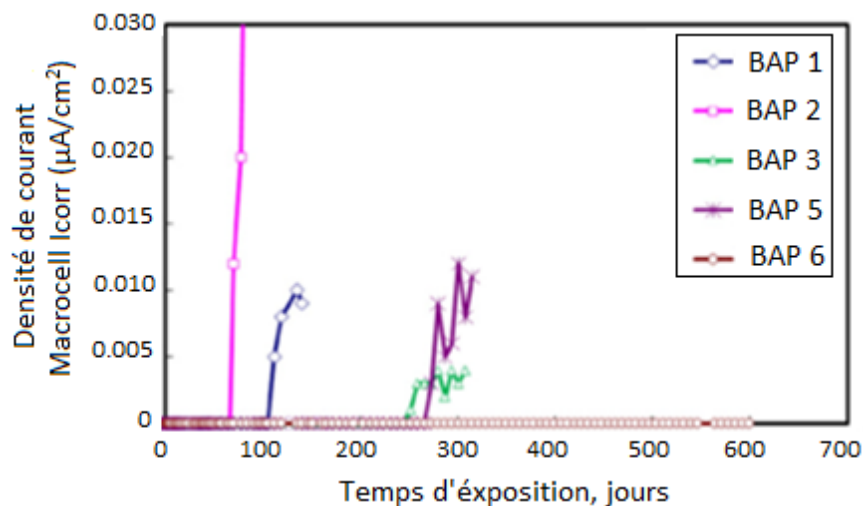


Figure II.8 : Évolution de la densité de courant macrocell dans les échantillons de (BAP) (Yu et al., 2010)

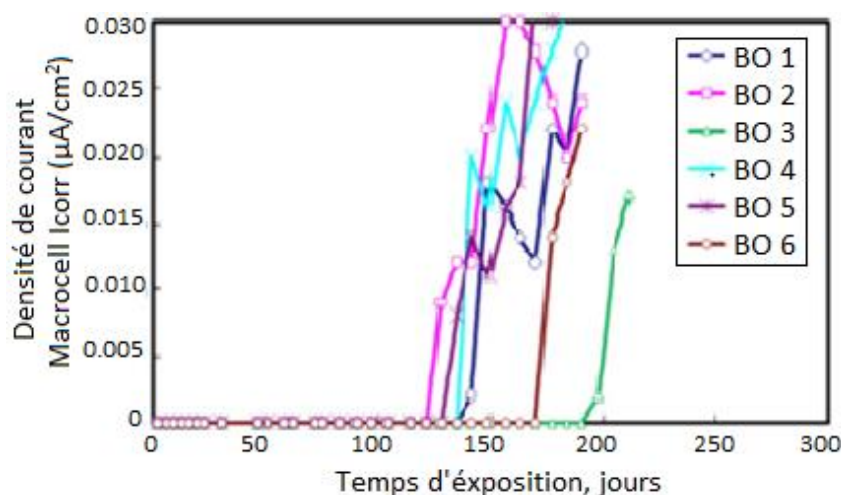


Figure II.9 : Évolution de la densité de courant macrocell dans les échantillons de (BO) (Yu et al., 2010)

Il est à noter d'après **(Yu et al., 2010)** que l'addition d'un superplastifiant spécifique améliore la résistance à la corrosion du béton, ce pendant les figures II.8 et II.9 indiquent que l'initiation de la corrosion des barres d'armatures dans le BAP est plus hâtive que dans le BO, à cause de la grande quantité des vides distribuée à l'interface acier/béton, produits un défaut qui entraîne un risque de diffusion des ions chlorures.

Le tableau II.1 montre la différence entre la prospérité physique des échantillons de BAP et le BO.

Tableau II.1 : Prospérité physique des échantillons de bétons **(Yu et al., 2010)**

Types de bétons	Effondrement (cm)	Diffusion (cm)	Teneur en air %
BAP	20,6	66,0	7,6
BO	22,9	33,6	3,1

Ces résultats confirment que l'initiation de la corrosion dépend fortement de l'alcalinité du ciment ainsi que du superplastifiant.

Lapointe, (2009) a étudié l'évolution de I_{corr} sur des échantillons de mortier cylindriques (de 150mm de diamètre et 127 mm de hauteur) exposées à un milieu marin de 3% de NaCl, en suivant un cycle de 3 jours de séchage et 4 jours de mouillage. En utilisant deux type de ciment, un (CEM/I) de forte teneur en C_3A et un (CEM/V) de faible teneur en C_3A , et rapport Eau/Ciment = 0,48.

Les figures II.10 et II.11 montrent les résultats des mesures de I_{corr} sur les échantillons utilisant les deux types de ciments.

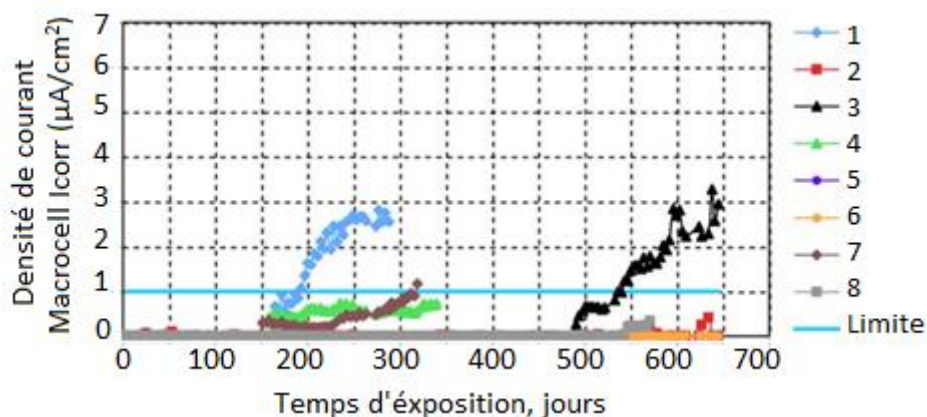


Figure II.10 : Résultats des mesures de la densité de courant macrocell –CEM I **(Lapointe, 2009)**

Les résultats montrent que les échantillons confectionnés avec du CEM V donnent des densités de courants supérieures à $1\mu A/cm^2$ sur une période allant de 50 à 300 jours, par contre les éprouvettes confectionnées avec le CEM I, leurs densités de courant dépassent $1\mu A/cm^2$ entre 150 et 650 jours. Cela indique que la teneur en C_3A du ciment est un facteur favorisant sur le temps d'initiation de la corrosion.

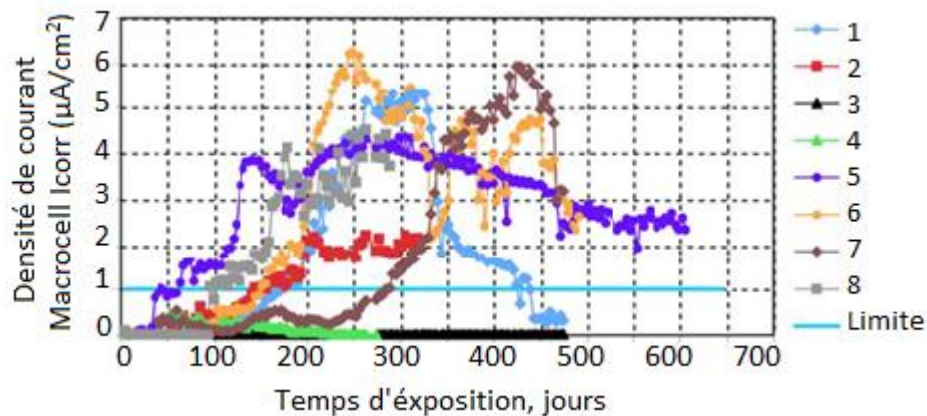


Figure II.11 : Résultats des mesures de la densité de courant macrocell – CEM V (**Lapointe, 2009**)

II.2. INFLUENCE DE L'INHIBITEUR :

Saraswathy and Song, (2007) ont étudié le courant de corrosion I_{corr} des armatures noyées dans un béton ordinaire sous l'effet des inhibiteurs du type (nitrite de sodium, oxyde de zinc, monoéthanolamine, diéthanolamine, triéthanolamine et les inhibiteurs mixtes) selon la norme ASTM G-109 pendant une durée de 180 jours, sous exposition de 3% de NaCl (3 jours séchage et 3 jours mouillage).

Les mesures de la densité de courant I_{corr} sont présentées dans la figure II.12.

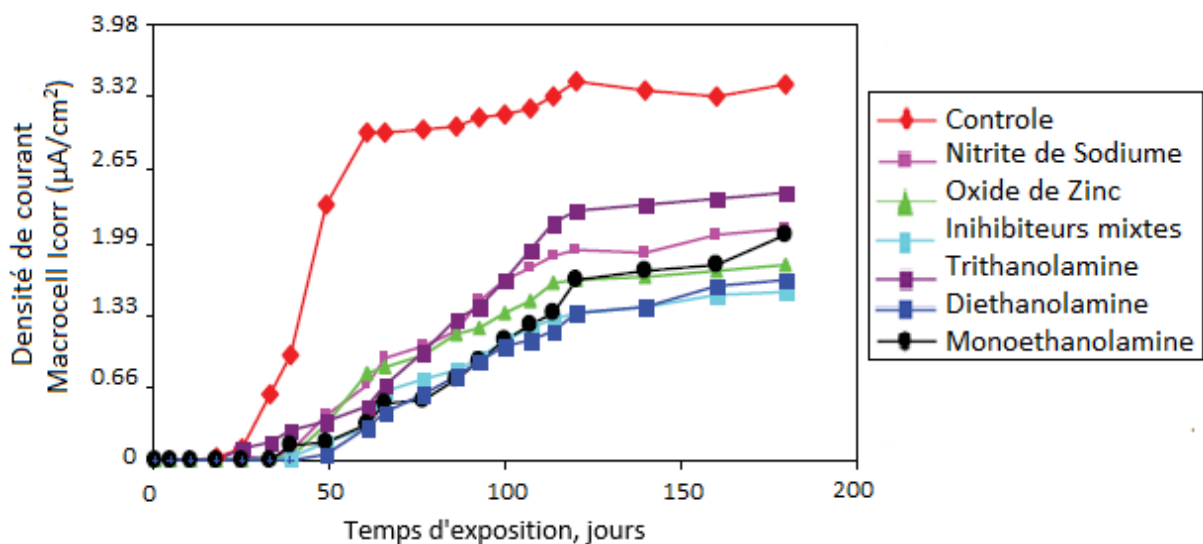


Figure II.12 : Densité de courant macrocell en fonction du temps d'exposition pour des bétons mélangés avec des inhibiteurs (**Saraswathy and Song, 2007**).

Les résultats ont montré une densité de courant I_{corr} inférieure pour les échantillons traités avec des inhibiteurs à celui du béton non traité. De plus, il est remarqué que les inhibiteurs mixtes donnent une meilleure résistance à la corrosion que les autres types. Par conséquent, l'ajout des inhibiteurs améliore les propriétés de résistance à l'initiation de la corrosion.

Al-Sodani et al., (2018) ont étudié le courant de corrosion I_{corr} des armatures noyées dans des échantillons de béton fissurés et non fissurés utilisant quelques inhibiteurs, préparés conformément à la norme **(ASTM-G-109)** et exposées à des cycles de deux semaines de mouillage et deux semaines de séchage, dans une solution à 3% de (NaCl). Et les résultats sont présentés dans les figures II.13 et II.14.

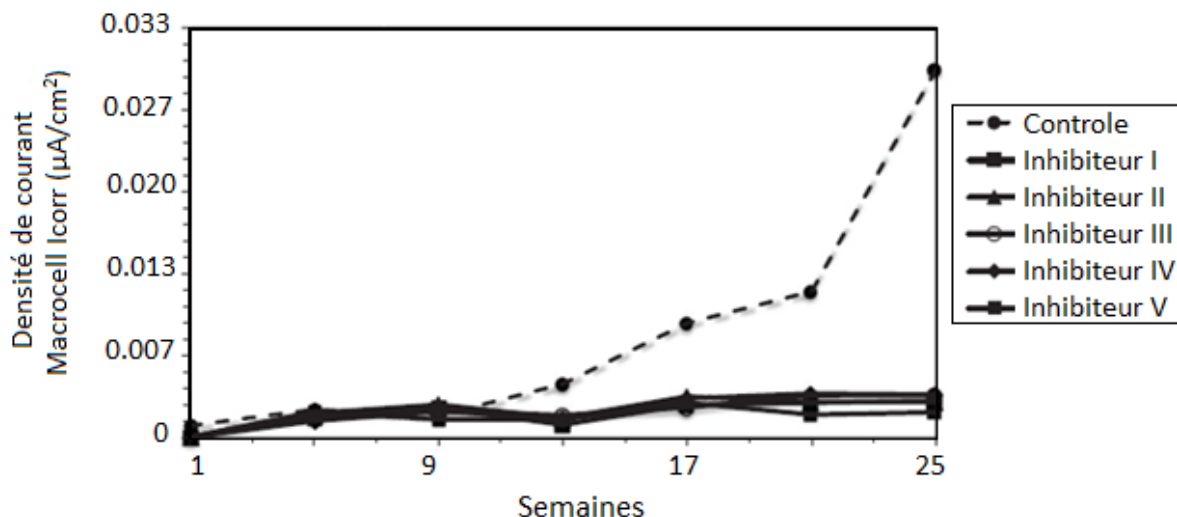
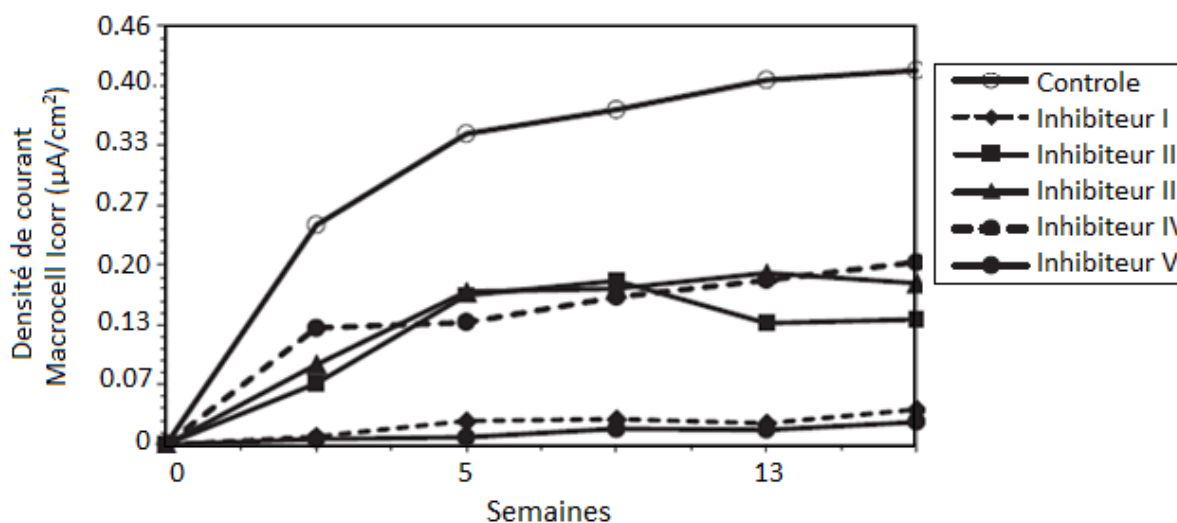


Figure II.13 : Densité de courant macrocell moyen sur l'acier dans les éprouvettes non fissurées incorporant les inhibiteurs de corrosion sélectionnés **(Al-Sodani et al., 2018)**



Inhibiteur-I : Adjuvant spécifique pour béton liquide à base de nitrite de calcium ; **Inhibiteur-II** : Inhibiteur de corrosion générique à base de nitrite de calcium ; **Inhibiteur-III** : Adjuvant de béton liquide breveté à base de carboxylate d'amine ; **Inhibiteur-IV** : Adjuvant spécifique pour béton liquide à base d'amino-alcool modifié ; **Inhibiteur-V** : Adjuvant spécifique pour béton liquide à base de nitrite de calcium.

Figure II.14 : Densité de courant macrocell moyen sur l'acier dans les échantillons fissurés contenant les inhibiteurs sélectionnés **(Al-Sodani et al., 2018)**

Les résultats d' I_{corr} dans les échantillons de béton non fissuré avec les inhibiteurs choisis étaient dix fois inférieurs à ceux des échantillons de béton fissuré. Et les inhibiteurs à base de nitrite de calcium ont présenté la meilleure résistance en termes de protection contre la corrosion dans les deux types de béton.

Rengaraju et al., (2018) ont étudié l'effet de trois types d'inhibiteurs (R2 (amino alcool), NC (nitrate de calcium et nitrite de calcium), RC (acide nitreux et sel de calcium) sur l'état de corrosion des armatures noyées dans un béton à types de ciment CEMII/P (pouzzolaniques), pendant une durée de 350 jours, avec une concentration à 3% de NaCl. Et les résultats sont présentés dans la figure II.16.

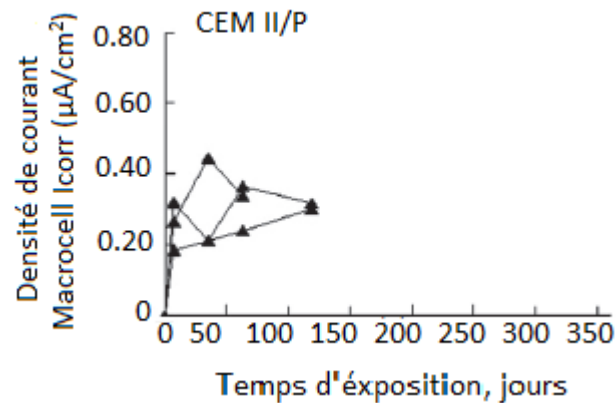


Figure II.15 : Densité de courant macrocell en fonction du temps d'exposition pour les échantillons CEM II/P, sans inhibiteurs (**Rengaraju et al., 2018**)

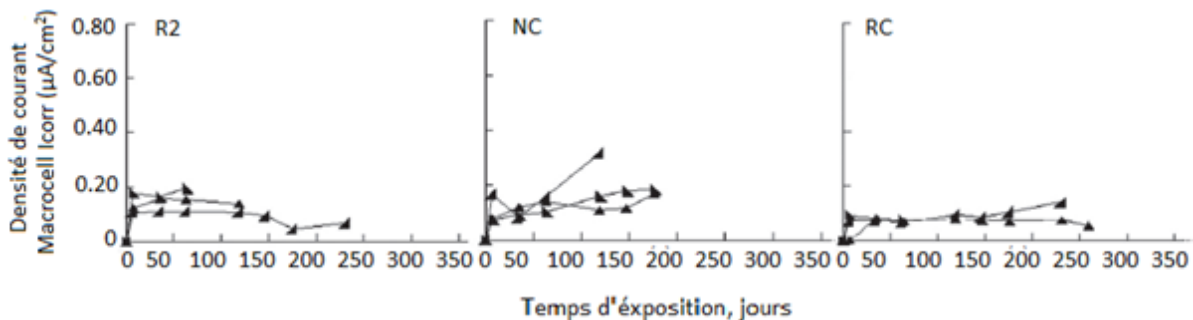


Figure II.16 : Densité de courant macrocell en fonction du temps d'exposition pour les échantillons CEM II/P, sous l'effet des inhibiteurs R2, NC et RC (**Rengaraju et al., 2018**)

Les résultats montrent que dans les échantillons portés des inhibiteurs donnent une densité de courant I_{corr} inférieure par rapport à l'échantillon sans inhibiteurs. Ainsi, l'inhibiteur RC a montré la meilleure résistance que les deux autres inhibiteurs. Les résultats ont permis de déduire que l'action des inhibiteurs sur la surface de l'acier empêchait la corrosion et augmentait la performance de béton.

II.3. INFLUENCE DU TYPE D'ARMATURES :

HajiSheik et al, (2014) ont étudié la corrosion macrocell des armatures tordues à froid (ATF) et des barres traitées thermo-mécaniquement (TTM) de 12 mm de diamètre noyées dans des éprouvettes en béton ordinaire confectionnées conformément à la norme (**ASTM-G-109**), et exposée dans un milieu marin de 3% de NaCl.

La densité de courant de corrosion est suivie au début de chaque cycle (7 jours de séchage et 7 jours de mouillage). Les résultats obtenus lors des mesures de la densité de courant I_{corr} des deux types des armatures été présenté dans les figures II.17 et II.18.

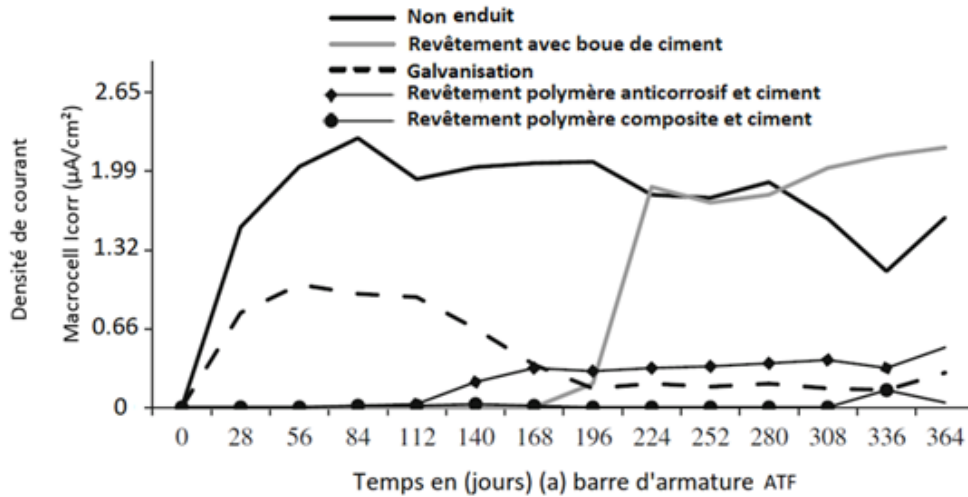


Figure II.17 : Comportement temporel versus courant des armatures (ATF) non revêtues et revêtues dans le test de corrosion macro-cellule (HajiSheik et al, 2014)

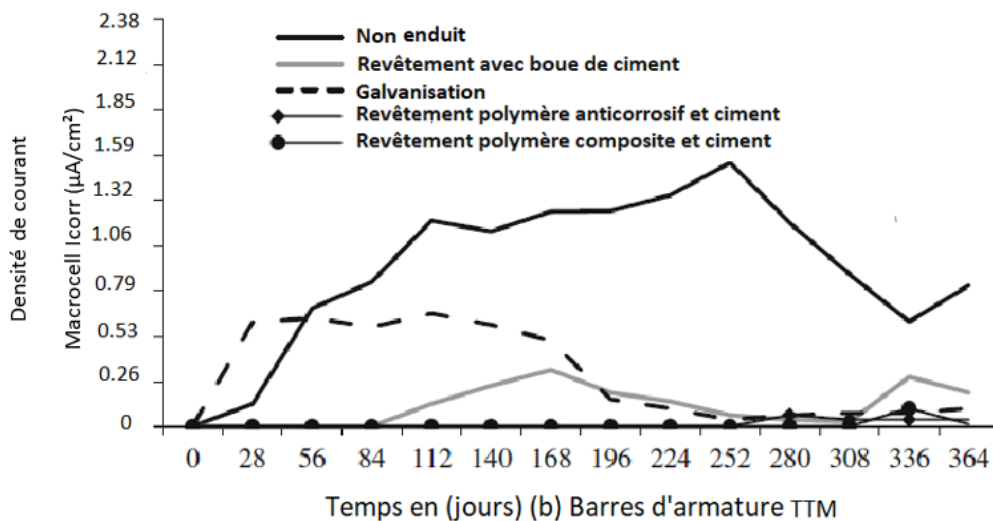


Figure II.18 : Comportement temporel versus courant des armatures (TTM) non revêtues et revêtues dans le test de corrosion macro-cellule (HajiSheik et al, 2014)

À première vue, Il y a une forte augmentation de la densité de courant I_{corr} dans les aciers traités par galvanisation et ceux qu'ils ont resté intacts (non enduit) pour une valeur de $2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dès les premiers jours d'exposition, cela est remarquable dans les deux types d'armatures à froid tordu (ATF) et ceux qu'ils sont fabriqués par un traitement thermo-mécanique (TTM).

Les barres d'armature traitées par revêtement de boue de ciment ont également présenté une initiation de la corrosion après 84 jours pour atteindre une valeur de $I_{corr}=0,3\mu A/cm^2$ dans les aciers (TTM), par contre dans les aciers (ATF) l'initiation de la corrosion ne se commence qu'après 168 jours pour une valeur de $I_{corr}= 2\mu A/cm^2$ ce qui est due à un taux de dissolution du zinc plus élevé.

Dans le cas des aciers traitées par un revêtement polymère anticorrosif et ciment l'initiation de la densité de I_{corr} a commencé après 112 jours dans les armatures (ATF) jusqu'à la valeur de $0,61\mu A/cm^2$, il est largement différent dans les armatures (TTM), le commencement de corrosion été observé après 280 jours par une valeur plus faible de $I_{corr}=0,29 \mu A/cm^2$.

Par ailleurs, le traitement par revêtement polymère composite et ciment donne des valeurs de I_{corr} non nulles dans la longue période d'essai 308 jours, alors que les deux types d'armatures (ATF) et (TTM) ont montré un développement actuel minimal de $0,04\mu A/cm^2$.

Il a été constaté que les barres élaborés thermo-mécaniquement ont des performances sensiblement meilleures que les barres d'armature fabriqués à froid tordu quel que soit le revêtement appliqué.

Le tableau II.2 représente un récapitulatif des travaux, déjà présenté dans ce chapitre, utilisant la méthode macrocell décrite par différents auteurs ayant travaillé sur différents paramètres.

Tableau II. 2 : Tableau récapitulatif de la revue bibliographie

	Auteurs	Normes	Types de matériaux	Conclusions
Influence du type de béton	(Hansson et al., 2006)	ASTM G109 180 semaines 3% NaCl Cycles 15jrs - 15jrs	BO BHP/C BHP/L	BO dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 40 semaines. BHP/C dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 160 semaines. (1120 jours) BHP/L ne dépasse pas 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ même après 180 semaines (1260 jours) d'exposition.
	(Vedalakshmi et al., 2008)	ASTM G109 120 semaines 3% NaCl Cycles 4jrs - 3jrs	CEM/I (B01) CEM/II laitier (B02) CEM/II Pouzzolane (B03)	Pour le béton à résistance de 30 MPa : BO1 dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 150 jours. BO2 ne dépasse pas 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ même après 900 jours. BO3 dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 300 jours.
	(Lapointe, 2009)	ASTM G109 700 jours 3% NaCl Cycles 3jrs-4jrs	Mortier CEM I CEM V	CEM I dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 150 jours. CEM V dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 30 jours.
	(Yu et al., 2010)	ASTM G109 3%, 9%, 15% NaCl Cycles 7jrs-7jrs	BAP BO	Tous les échantillons de BAP ne dépassent pas 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ même après 300 jours. Tous les échantillons de BO ne dépassent pas 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ même après 200 jours.
	(Saraswathy and Song, 2007)	ASTM G109 180 jours 3% (NaCl) Cycles 3jrs-3jrs	BO Inhibiteurs anodiques Inhibiteurs cathodiques Inhibiteurs mixtes	Inhibiteurs mixtes dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 50 jours. Oxyde de Zinc dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 40 jours. Diéthanolamine dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 50 jours.

Influence des inhibiteurs	(Al-Sodani et al., 2018)	ASTM G109 25 semaines 3% (NaCl) Cycles 15jrs – 15jrs	BO à base de fumée de silice. Poutre fissuré et non fissuré. 5 types d'inhibiteurs.	Tous les échantillons de béton non fissuré ne dépassent pas 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 25 semaines (175 jours). Pour béton fissuré les inhibiteurs I et V ne dépasse pas 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, les inhibiteurs II et III dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 3 semaines (21 jours), et l'inhibiteur IV après 2 semaines (15 jours).
	(Rengaraju et al., 2018)	ASTM G109 350 jours 3% (NaCl) Cycles 14jrs-14jrs	CEM/P 3 inhibiteurs (R2, RC, NC)	Pour CEM/P- RC dépasse le 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 200 jours. Pour CEM/P- R2 et CEM/P- NC dépassent le 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après la 1 ^{ère} semaine (7 jours).
Influence du type d'armatures	(HajiSheik et al, 2014)	ASTM G109 3% (NaCl) 380 jours Cycles 7jrs-7jrs	BO (Barre TTM traité thermomécanique) (Barre ATF revêtus à froid- tordue	ATF : revêtement anticorrosion de polymère de ciment dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 120 jours, et pour revêtement au bous de ciment inhibé après 168 jours. Revêtement par galvanisation dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 7jours.et l'acier non enduit dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dès la 1ère semaine 7jours. TTM : l'acier non enduit dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 30jours. Revêtement anticorrosion de polymère de ciment dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 252 jours, et pour revêtement au bous de ciment inhibé après 84 jours. Revêtement par galvanisation dépasse 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 7jours. Revêtement compose de polymère de ciment ne dépasse pas 0,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ même après 365 jours

II.4. CONCLUSION :

D'après cette revue bibliographique, nous avons distingué trois types d'influences sur le phénomène de la corrosion des armatures incorporées dans les bétons en se basant sur la mesure de la densité de courant macrocell I_{corr} selon la norme (ASTM-G-109) considérant : la concentration de NaCl, le temps d'exposition des cycles de mouillage et séchage.

En premier lieu, l'influence de types de béton dépend à la fois des types de ciment (CEM I, CEM II, CEM V, ...), du type d'ajout (laitier, cendre volante, ...) et des adjuvants, ces paramètres ont une influence directe sur la porosité du béton. Plus la porosité est faible meilleure est la protection contre la corrosion constaté par le comportement des bétons de haute performance.

En deuxième lieu, les échantillons traités avec inhibiteurs présentaient un risque faible de corrosion avec des valeurs I_{corr} inférieures par rapport aux bétons non traités. Il a été constaté que ces produits protègent aussi les armatures dans les bétons fissurés.

En troisième lieu, la nature des d'armatures noyées dans le béton, ainsi que leurs traitements préalables, ont montré qu'ils peuvent offrir une meilleure protection contre la corrosion.

Les résultats obtenus dans cette partie nous ont permis de choisir notre programme expérimental traitant la mesure du courant macrocell I_{corr} . Trois paramètres ont été étudiés : l'influence de rapports E/C, la concentration en NaCl, la nature du matériau cimentaire.

CHAPITRE III : MATERIAUX ET METHODES

III.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre présente en détail le programme expérimental adopté dans notre travail, ce dernier consiste à tester le principe de mesure Macrocell (**ASTM-G-109**) dans notre laboratoire, pour le suivi du phénomène de corrosion sur des armatures noyées dans des matériaux cimentaires. En premier lieu nous présentons la confection suivant les normes des cellules en PVC, en suite la passivation des barres d'armature et leur préparation pour l'essai. Après, vient la formulation des matériaux cimentaire (béton et mortier ordinaire) en faisant varier le rapport Eau / Ciment. Et pour finir nous expliquons comment procéder à la mesure Macrocell sur nos échantillons mis en contact avec des solutions salines à différentes concentration qui représentent notre environnement agressif.

III.2. MATERIAUX :

III.2.1. Caractéristiques des matériaux utilisés :

III.2.1.1. Ciment :

Dans le cadre de ce travail, un ciment portland a été utilisé composer à la pouzzolane naturelle de la classe CPJ-CEM II/A 42,5 de Béni-Saf, est constitué de minimum de 80-94 % de clinker et 6-20 % de la pouzzolane naturelle. Ce choix se justifie par le fait que ce type de ciment est le plus utilisé dans la construction dans notre région "Tlemcen, Algérie".

III.2.1.2. Granulats :

- Sable :

Un seul sable été utilisé en tant que granulats fins, il s'agit d'un sable qui provient de la carrière de (RAMDANI-Tlemcen) a un diamètre compris entre 0 et 4 mm, ce sable a été choisi puisqu'il était normalisé.

- Gravier :

Deux différentes classes de granulats grossiers ont été préparées pour la formulation de notre béton :

- Gravillon (4/8) mm
- Gravier (8/16) mm

III.2.1.3. Eau de gâchage :

L'eau utilisé pour la confection de nos échantillons est une eau déminéralisée afin d'éviter toute contamination en chlorures provenant de l'eau de gâchage.

III.2.2. Propriétés des matériaux utilisés :

Les caractéristiques des matériaux que nous allons utiliser pour la confection de nos bétons sont donnés en détail dans ce qui suit.

III.2.2.1. Masse volumique des granulats :

La masse volumique apparente et absolue des granulats sont présentées dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Masses volumiques des granulats utilisés

Désignation	Sable (0/4)	Gravier (4/8)	Gravier (8/16)
Masse Volumique absolue g/l	2,698	2,678	2,608
Masse Volumique apparente g/l	1,582	1,378	1,328

III.2.2.2. Analyse granulométrique :

Les courbes granulométriques effectuées sur les trois granulats étudiés sont représentées dans la figure III.1

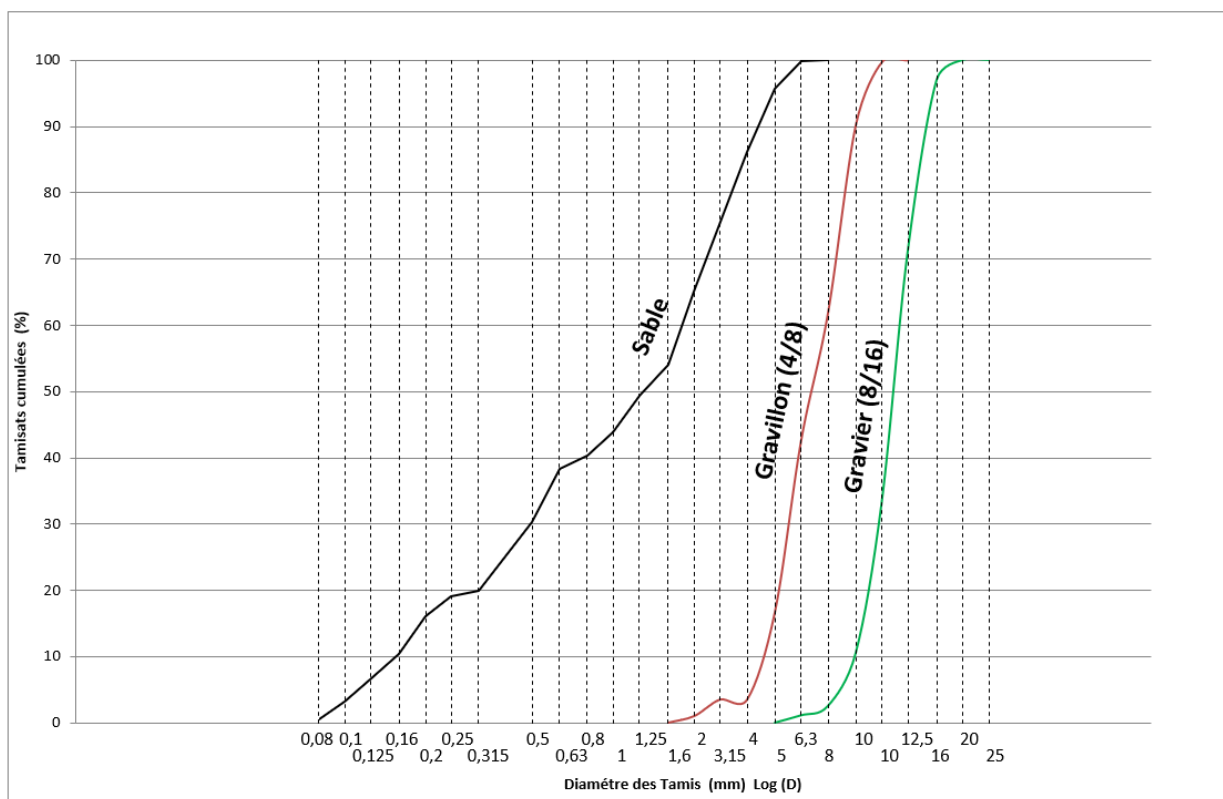


Figure III.1 : Courbe granulométrique

III.2.3. Préparation des échantillons :

III.2.3.1. Éprouvettes en béton :

En premier lieu, des moules en PVC de (110 x 220) mm ont été préparé, contenant des ouvertures de 14 mm de diamètre espacées de 66 mm, prévues pour les armatures comme illustré sur la figure III.2 (**Lapointe, 2009**).

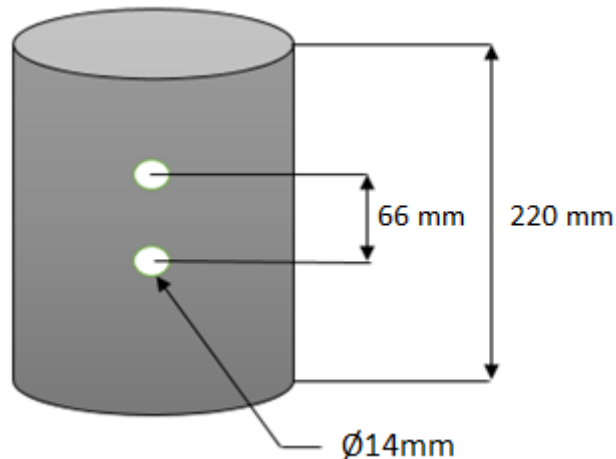


Figure III.2 : Moule utilisé pour le béton pour l'essai macrocell

La suite consistait à préparer des barres d'armature de nuance 400R et de 12mm de diamètre. Afin de pouvoir réaliser le montage, les barres ont d'abord été coupées en tiges de 200 mm de longueur et brossées à l'aide d'une brosse métallique pour éliminer toutes traces de rouille (figure III.3).



Figure III.3 : Nettoyage des barres d'armatures.

Après cela, vient le traitement des armatures où chaque extrémité (50 mm environs) a été immergée dans une solution basique (NaOH) avec une concentration de 100 mmol/l à 50 °C pendant plus de 12heures pour chaque extrémité servant à la passivation des extrémités de chaque barre (**Lapointe, 2009**) tout en enveloppant la partie centrale (100mm) avec du papier aluminium pour éviter tout contact avec la solution (figure III.4 et III.5).



Figure III.4 : Conservation des parties centrales des barres d'armatures avec de papier d'aluminium.

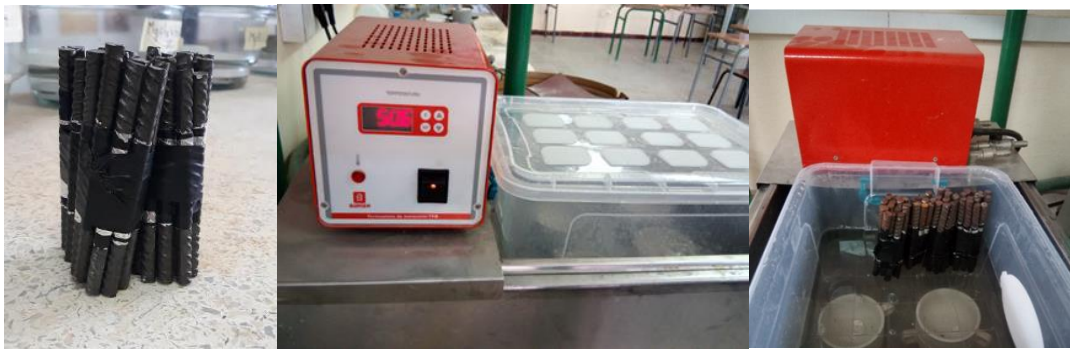


Figure III.5 : Passivation des extrémités des barres d'armatures (Lapointe, 2009).

Par ailleurs, des fils électriques ont été connectés sur une des extrémités des armatures. Une résine époxy a été enduite sur environ 50 mm de part et d'autre sur les armatures comme le montre la figure III.6 pour les protéger contre tout effet perturbateur extérieur. Une fois l'époxy durcis, la partie centrale des armatures a été nettoyée pour enlever toutes traces d'impuretés ou de corps gras provenant de leur manipulation.



Figure III.6 : Époxy aux extrémités des barres avec les fils.

En dernier lieu, chaque moule en PVC était équipé de deux barres au niveau des ouvertures prévues, les joints ont été colmatés avec de la colle Silicone pour éviter les fuites de laitance du béton (figure III.7).



Figure III.7 : Insertion des d'armatures dans les moules de béton.

Le béton utilisé est un béton ordinaire (**Boukli Hacene, 2010**) avec deux rapports E/C 0,5 et 0,6 afin de voir l'effet de la porosité, ses caractéristiques sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Caractéristiques des matériaux cimentaires

Matériaux utilisés	Classe granulaire	Formulation	Rapport E/C
Mortier	Sable (0-4) mm	1/3	0,5 – 0,6
	CPJ-CEM II/A 42,5		
Béton ordinaire	CPJ-CEM II/A 42,5	BO	0,5 – 0,6
	Sable (0-4) mm		
	Gravillon (4-8) mm		
	Gravier (8-16) mm		

Le remplissage des éprouvettes s'est fait en respectant la norme NE 12390–1. Après 24 heures les éprouvettes sont immergées dans un bac d'eau pendant 28 jours pour assurer une hydratation complète. Une fois la cure achevée ces éprouvettes sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse de façon à récupérer des échantillons de 100 mm de hauteur du cœur de chaque éprouvette (figure III.8), en veillant à avoir un enrobage de 10 à 12 mm d'enrobage, la norme G 109 de l'ASTM ou l'étude effectuée par (**Lapointe, 2009**) ont laissé 20 mm d'enrobage. Nous avons laissé délibérément un enrobage plus faible afin d'accélérer le transfert des chlorures vers les aciers et avoir une corrosion plus rapide.



Figure III.8 : Découpage des éprouvettes de béton.

III.2.3.2. Éprouvettes en mortier :

Concernant les éprouvettes en mortier, le même procédé était suivi, avec seule différence les dimensions des moules mais aussi les armatures. En effet, des éprouvettes cylindriques en PVC de 60 mm de diamètre et 94mm de hauteur ont été préparées (Figure III.9)



Figure III.9 : Moule de mortier pour essai de corrosion.

Comme les précédant les moules fut percée de deux paires de trous, espacés de 66 mm, afin de permettre aux barres d'armature de loger, des armatures de 120 mm de longueur et de 8 mm de diamètre, de nuance 400R. La même procédure de dépassivation et préparation des armatures a été adoptée, ces dernières sont ensuite placées dans les moules pour procéder au coulage du mortier (figure III.10).

Le mortier utilisé dans notre travail est un mortier ordinaire tel que montré dans le tableau III.2, avec également deux rapport E/C 0,5 et 0,6, un malaxeur à petit volume (5 litres) est utilisé pour le malaxage du mélange, pour ensuite procéder au remplissage des moules avec une légère vibration à l'aide d'une table vibrante pour éliminer les vides (figures III.11).

Après 24 heures, les échantillons sont également placés dans un bac d'eau (figure III.12) pour finaliser l'hydratation, ces échantillons sont placés de telle sorte à ce que les fils ne soient pas en contact avec l'eau pour éviter tout risque d'endommagement.



Figure III.10 : Insertion des barres d'armatures dans les moules de mortier.



Figure III.11 : Malaxage de mortier et remplissage des éprouvettes.



Figure III.12 : La cure des éprouvettes dans un bac d'eau.

III.3. METHODES :

III.3.1. Essai de porosité :

Pour cet essai, des éprouvettes en béton et mortier ont été prises pour chaque E/C (0,5 et 0,6) auxquelles le test de saturation à vide a été adopté, conformément à la norme recommandée par l'AFPC-AFREM modifiée.

L'essai consiste à mettre les échantillons dans un dessiccateur relié à une pompe à vide (Figure III.13), et de procéder en premier lieu au dégazage pendant 24 heures, principe qui sert à chasser toutes les bulles d'air présentes dans l'échantillon, suivie par une demie saturation avec de l'eau pendant 24 heures, et enfin une saturation totale pendant environ 6 heures.



Figure III.13 : Saturation sous vide selon AFPC-AFREM modifiée.

La procédure faite après la saturation totale est comme suite :

- Pesée de l'échantillon saturé dans l'eau : M_{eaux} ,
- Pesée de l'échantillon saturé à l'air : M_{air} ,
- Séchage de l'échantillon à 105° C jusqu'à séchage complet,
- Pesée de l'échantillon sec : M_{sec} .

Ainsi, la porosité pour les briques et les matériaux cimentaires peut être calculée selon l'équation 1 :

$$\emptyset = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \cdot 100 \quad (\text{III.1})$$

III.3.2. Mesure de la densité de courant I_{corr} :

III.3.2.1. Préparation de la solution :

Afin de simuler l'environnement agressif et se rapporter aux conditions réelles, des solutions saline en NaCl à différentes concentrations ont été préparées. Une première à 30 g/l correspondant au degré de salinité de la mer méditerranéenne, et deux autres à 120 g/l et 240

g/l qui peuvent représenter le taux de chlorure élevé qu'on trouve sur les routes après le déverglaçage pour faire fondre la neige et le verglas.

Pour la préparation des solutions un volume donnée d'eau distillée était pris auquel on rajoutait la masse en grammes équivalente à la concentration voulue, en suite les solutions étaient conservées pour une utilisation ultérieure (Lapointe, 2009).

III.3.2.2. Principe de mesure Macrocell :

Après la fin de cure des éprouvettes des deux mélanges (béton et mortier), les échantillons ont subi une exposition cyclique à l'environnement agressif, 7 jours de mouillage et 7 jours de séchage on se basant sur les travaux de (Lapointe, 2009). Pour le béton comme pour le mortier trois (3) éprouvettes pour chaque E/C ont été placés dans des bacs contenant les différentes concentrations de solution saline NaCl (30, 120 et 240) g/l bacs comme illustré dans la figure III.14.



Figure III.14 : Disposition des éprouvettes de béton dans des bacs à 30g/l, 120g/l et 240g/l de NaCl pour la partie de mouillage.

Pour la phase de mouillage ou d'humidification les échantillons étaient mis en contact directement avec la solution (figure III.15) en se basant sur le principe de la remonté capillaire pour permettre aux chlorures de diffuser. Il est à noter que les bacs étaient protégés du soleil et recouverts pour éviter le phénomène d'évaporation. Pour la phase de séchage, les échantillons étaient placés à l'air libre à température ambiante.

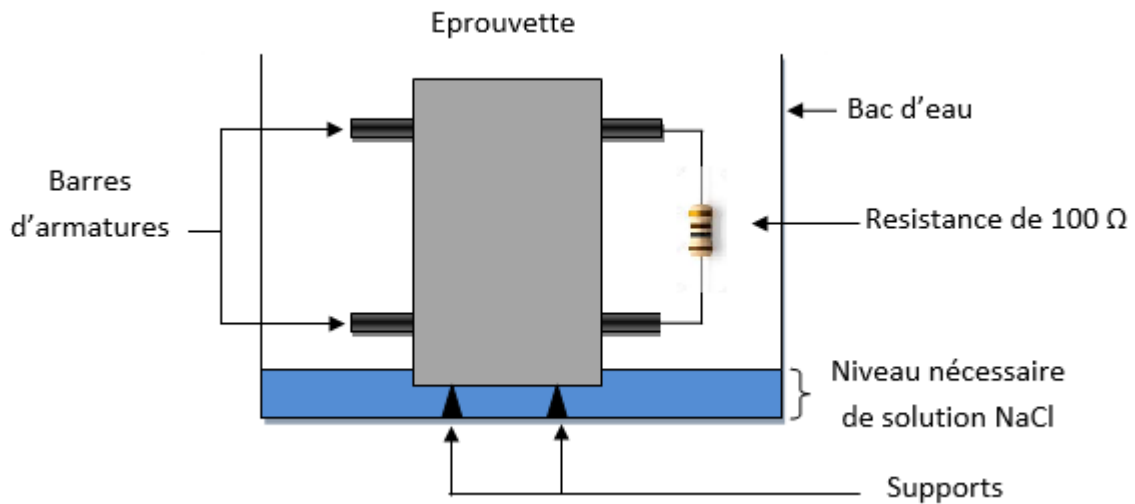


Figure III.15 : Niveau de solution qui assure le contact avec la surface inférieure de l'éprouvette de béton.

Concernant les éprouvettes en mortier, le même procédé d'exposition est adopté comme illustré sur la figure III.16.



Figure III.16 : Disposition des éprouvettes de mortier dans des bacs à 30g/l, 120g/l et 240g/l de NaCl pour la partie de mouillage.

Il est important de noter aussi que pour la phase de séchage les éprouvettes en béton ou mortier étaient placées de façon que la partie humide qui était en contact avec la solution soit exposée à l'air libre figure III.17 et III.18.



Figure III.17 : Disposition des éprouvettes de béton au séchage.



Figure III.18 : Disposition des éprouvettes de mortier au séchage.

Pour la mesure et le suivi du phénomène de corrosion, une résistance électrique de 100 Ohm était connectée aux fils électriques mentionnés précédemment, (figure III.19). Le principe est de mesurer une différence de potentiel en Volt selon la loi d'Ohm et d'en déduire l'intensité du courant électrique en Ampères. Cette dernière est ensuite utilisée pour calculer la densité du courant I_{corr} comme cité dans le second chapitre.



Figure III.19 : Résistance électrique de 100 Ohm connectée au fils électriques

La mesure était effectuée à la fin de chaque phase de mouillage, pour chaque échantillon la mesure était réalisée deux à trois fois pour vérifier la répétabilité mais aussi avec deux différents types de multimètres pour plus de précision (figure III.20) (figure III.21).



Figure III.20 : Multimètre numérique de marque Xiauba et de référence DT9205A⁺.



Figure III.21 : Multimètre numérique de marque MASTECH et de référence MAS830B.

III.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté le protocole de la préparation des éprouvettes en utilisant deux types de mélanges (béton ordinaire et mortier), et deux rapports E/C (0,5 et 0,6). Ces éprouvettes ont été soumises à différentes concentrations en NaCl 120 et 240 g/l dans le but d'accélérer la corrosion et pour simuler l'effet de déverglaçage et 30g/l de NaCl pour approcher des conditions réelles. La mesure du courant de corrosion I_{corr} s'est effectuée durant environ six (06) mois. Les résultats obtenus lors de cette période d'essai ainsi que les analyses seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre présente l'analyse et interprétation des résultats obtenus durant nos essais. Les résultats englobent la porosité et le suivi de la densité de corrosion I_{corr} pour des différents échantillons de béton et de mortier en variant certains paramètres (la concentration de NaCl, le rapport E/C).

IV.2. ESSAI DE POROSITE :

L'essai de porosité a été fait conformément à la norme AFPC-AFREM. Les résultats obtenus de ces essais sont présentés dans la figure IV.1 :

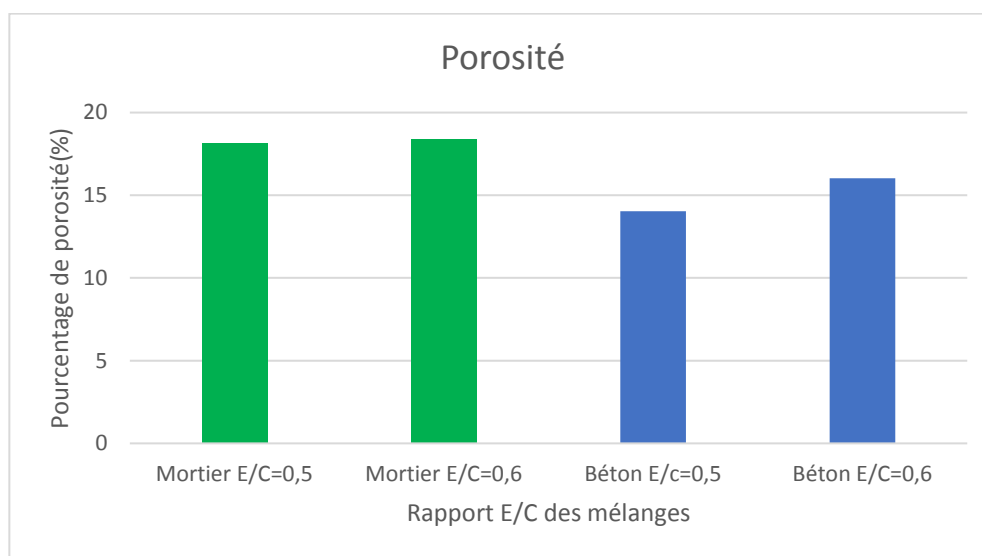


Figure IV.1 : Résultats pour essai de porosité des échantillons de Béton et mortier.

La figure IV.1 représente les résultats de porosité trouvés pour nos échantillons (béton et mortier). Ce qui ressort en premier lieu, c'est que la porosité des mortiers ($\approx 18\%$) était supérieure à celles des bétons ($\approx 15\%$). En second lieu nous remarquons que la porosité varie et augmente en fonction du rapport E/C, en effet les mélanges avec un E/C de 0,6 avaient des porosités légèrement supérieures à celles avec un E/C de 0,5 pour les deux mélanges ; ceci se traduit par la différence d'eau de gâchage qui crée un réseau poral plus important après hydratation (Lapointe, 2009 ; Hassoune, 2018 ; Boukli Hacene, 2010).

IV.3. LA MESURE DE LA DENSITE DE COURANT MACROCELL I_{corr} :

L'étude de détermination de la densité de courant macrocell a été faite selon la norme ASTM G-109, la procédure de mesure a été réalisée en utilisant deux types de mélange : béton et mortier, chacun de ces derniers ayant deux rapports E/C (0,5 et 0,6), chaque rapport a trois échantillons immergés dans trois concentrations de NaCl (30g/l, 120g/l et 240g/l).

IV.3.1. Éprouvettes de Béton :

IV.3.1.1. Béton 30g/l :

Les figures IV.2 et IV.3 illustrent la variation de la densité du courant I_{corr} pour les échantillons des deux bétons (E/C 0,5 et 0,6) exposés à une concentration de NaCl à 30g/l, sur une durée de plus de 119 jours, les lignes horizontales rouges représentent les limites en I_{corr} entre chaque intervalle de risque de corrosion du moins élevé au plus critique. Les lignes verticales noires désignent la fin de chaque cycle d'humidification séchage.

Les données montrent que l'initiation de la corrosion a commencé depuis le premier cycle pour les deux mélanges.

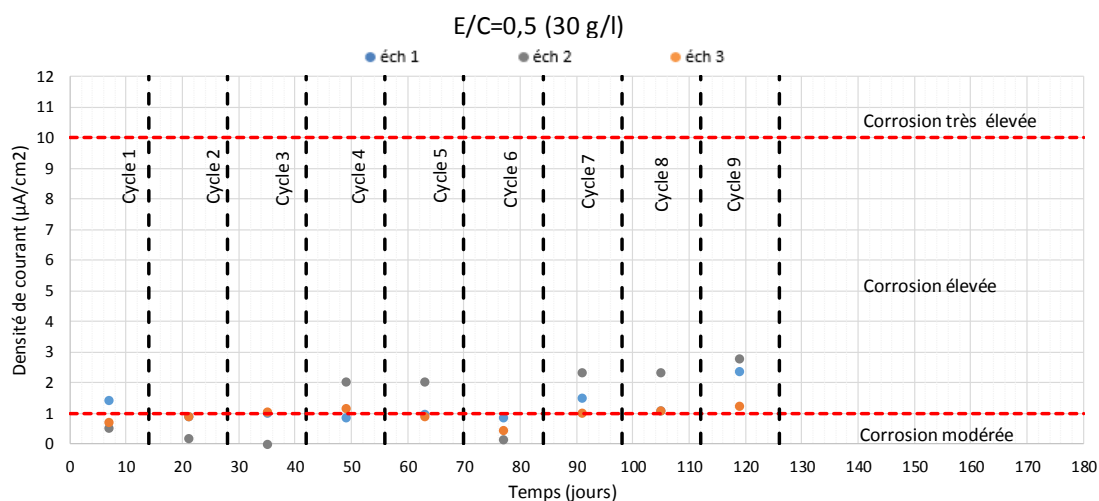


Figure IV.2 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0,5 sous l'exposition de chlorure à 30g/l.

Concernant les échantillons ayant un rapport E/C=0,5 ; I_{corr} dépassent $0,1\mu A/cm^2$ ce qui montre une initiation à la corrosion après seulement sept jours, ceci a été remarqué aussi chez (Vedalakshmi et al., 2008) qui avait trouvé des valeurs autour de $0,30\mu A/cm^2$ dans les premiers cycles. Deux des trois échantillons dépassent $1\mu A/cm^2$ après 40 jours, signe d'un état de corrosion élevé (cf. Fig. IV.2).

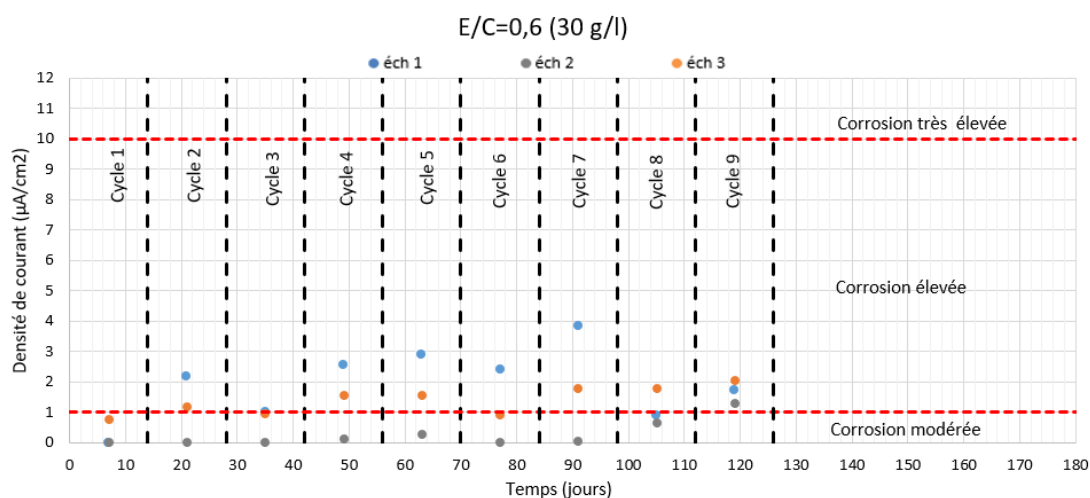


Figure IV.3 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0,6 sous l'exposition de chlorure à 30g/l.

Tandis que le béton ayant un $E/C=0,6$, les valeurs trouvées sur les échantillons 1 et 3 sont $>1\mu A/cm^2$ (cf. Fig. IV.3), sur pratiquement toute la durée de l'essai, ceci nous montre que le risque de corrosion est élevé depuis les premiers cycles. Quant à l'échantillon 2 l'initiation de la corrosion débute seulement après le 4 -ème cycle (cf. Fig. IV.3).

IV.3.1.2. Béton 120 g/l :

Les figures IV.4 et IV.5 nous montrent les résultats de I_{corr} des deux mélanges ($E/C=0,5$ et $E/C=0,6$) exposés à une concentration en NaCl de 120 g/l sur une durée de 12cycles de mouillage - séchage.

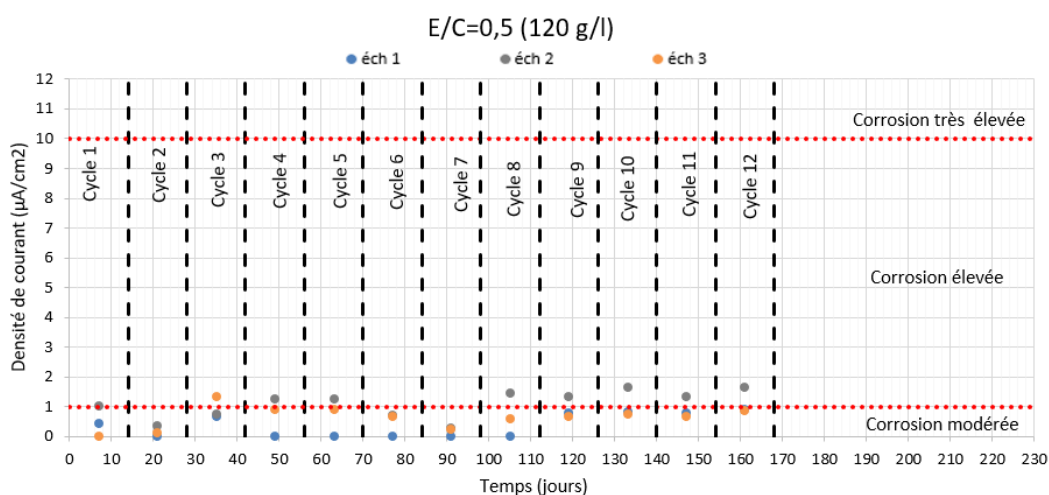


Figure IV.4: Densité de courant Macrocell des bétons a rapport $E/C=0,5$ sous l'exposition de chlorures à 120g/l.

Les valeurs trouvées pour les échantillons ayant un $E/C=0,5$ (cf. figure IV.4) montrent que le risque de corrosion reste plus ou moins modéré pour les échantillons 1 et 3 sur toute la durée de l'essai, mais relativement élevé pour l'échantillon 2 avec des valeurs de I_{corr} qui tournent autour de $1\mu A/cm^2$.

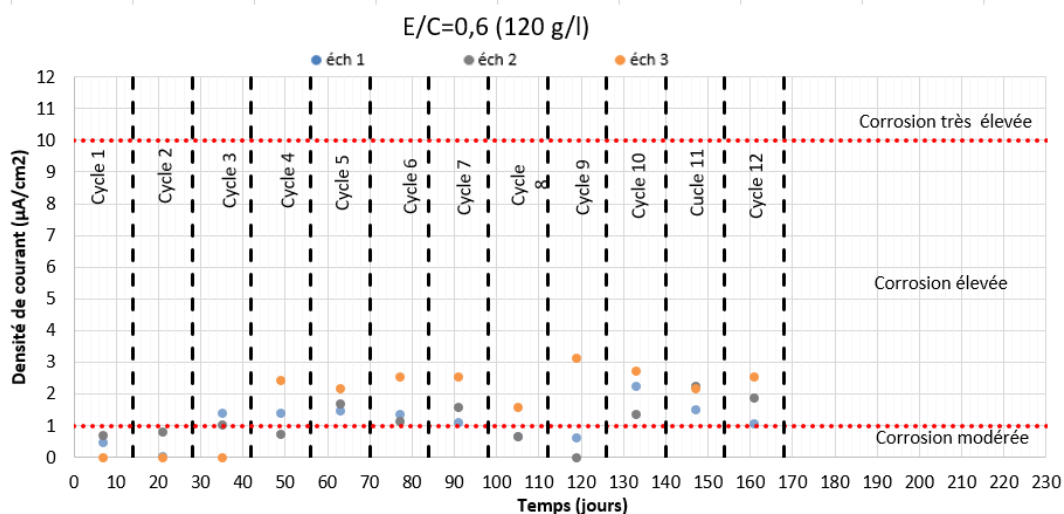


Figure IV.5 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport $E/C=0,6$ sous l'exposition de chlorures à 120g/l.

Pour les échantillons avec $E/C=0,6$, la corrosion a été initiée durant les premiers cycles, les résultats trouvés nous montrent que le risque devient élevé à partir du 4^{-ème} cycle avec des valeurs supérieures à $1\mu A/cm^2$ (cf. figure IV.5). On remarque aussi une oscillation des valeurs de I_{corr} après 60 jours, phénomène déjà remarqué auparavant chez (**Hansson et al., 2006**) et (**Vedalakshmi et al., 2008**).

IV.3.1.3. Béton 240g/l :

Les résultats de I_{corr} , recueillis à partir des mesures réalisées sur une période de plus de 147 jours sur les échantillons avec $E/C=0,5$ exposés à une concentration en NaCl de 240g/l, sont représentés sur la figure VI.6.

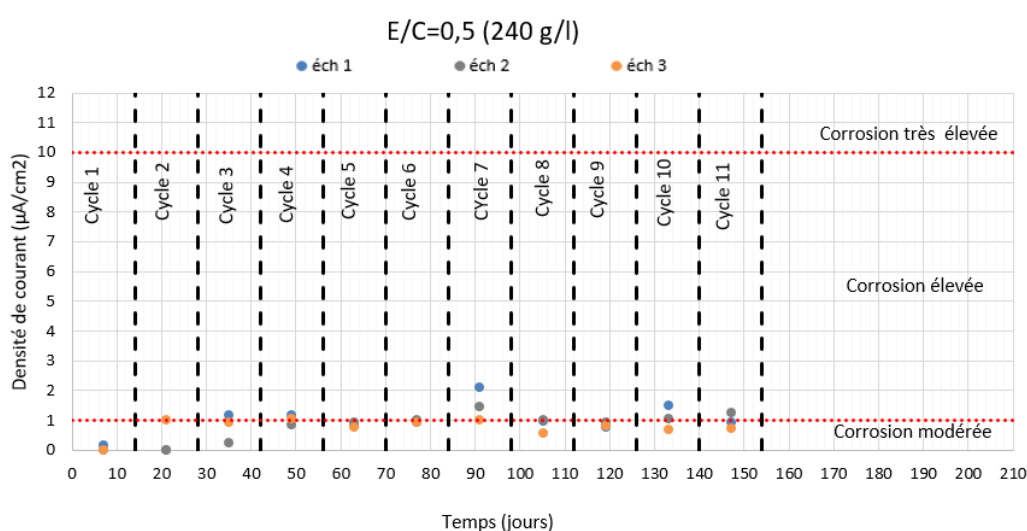


Figure IV.6 : Densité de courant Macrocell des bétons à rapport $E/C=0,5$ sous l'exposition de chlorures à 240g/l.

Après initiation de la corrosion durant les deux premiers cycles, les valeurs restent pratiquement autour de la limite entre les deux paliers de corrosion ($\approx 1\mu A/cm^2$) sur le reste du temps de l'essai (cf. figure IV.6)

Concernant les échantillons avec $E/C=0,6$; les résultats sont représentés sur la figure IV.7. Nous remarquons qu'après seulement le 3^{-ème} cycle, nous avons un risque élevé de corrosion sur les trois échantillons, avec une valeur maximale de $3,02\mu A/cm^2$ après 91 jours. (**Saraswathy and Song, 2007**) Avaient également trouvé des valeurs autour de $3\mu A/cm^2$ après une période de 100 jours.

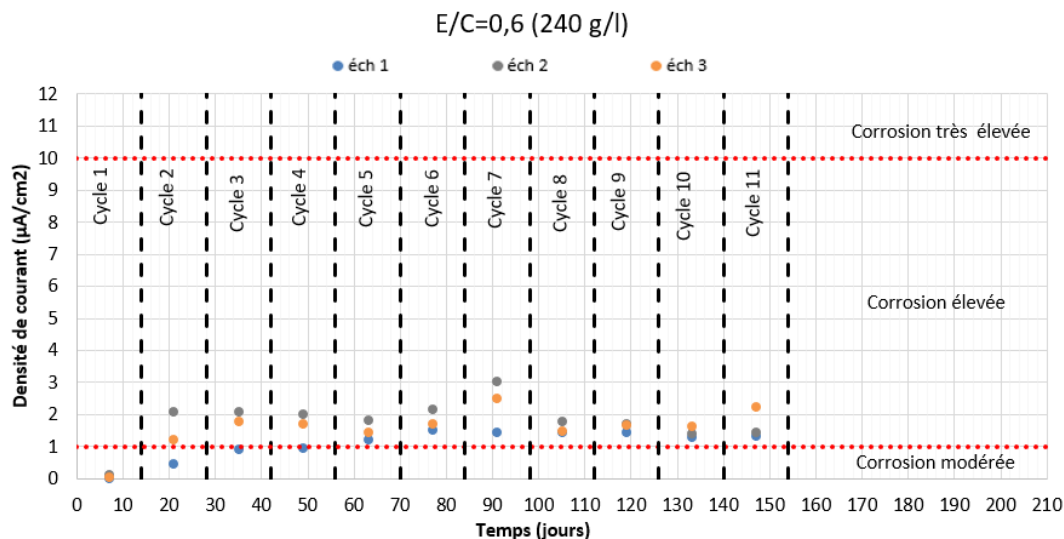


Figure IV.7 : Densité de courant Macrocell des bétons a rapport E/C=0,6 sous l'exposition de chlorures à 240g/l.

IV.3.2. Éprouvettes de mortier :

IV.3.2.1. Mortier de 30g/l :

Les figures IV.8 et IV.9, nous montrent les résultats de I_{corr} des échantillons mortier (E/C=0,5 et 0,6) exposés à 30g/l de NaCl pendant 105 jours.

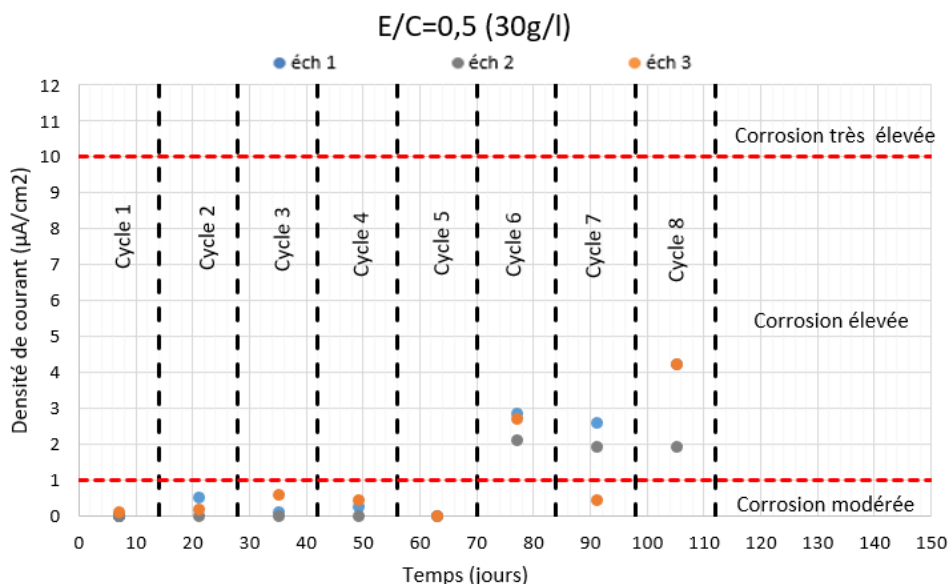


Figure IV.8 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,5 sous l'exposition de chlorure à 30g/l.

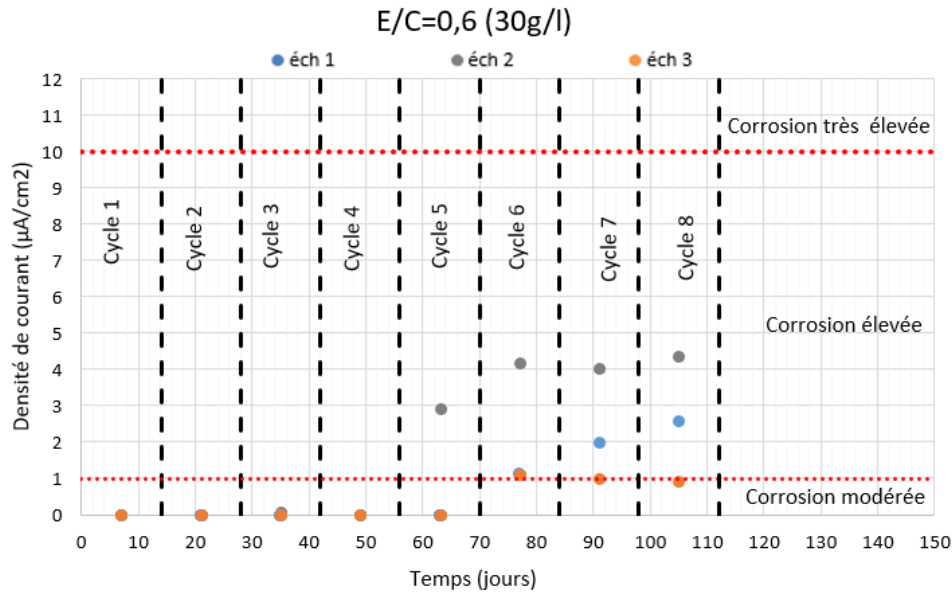


Figure IV.9 : Densité de courant macrocell des mortiers à rapport E/C =0,6 sous l'expression de chlorure à 30g/l.

Les résultats montrent que l'initiation de la corrosion dans les échantillons de E/C=0,5 commence dès la première semaine (7 jours) et restent pratiquement dans la corrosion modérée pendant 65 jours, pour dépasser en suite la barre des $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ après 77 jours, signe de corrosion élevée. Pour ce qui est des échantillons avec E/C=0,6, on n'avait pas de risque de corrosion pendant presque 60 jours, puis une brusque variation de I_{corr} après 65 jours pour dépasser la valeur de $3\mu\text{A}/\text{cm}^2$, ces résultats peuvent être comparés avec ceux dans de la littérature où la corrosion avait des seuils similaires à partir de 56 jours (**Lapointe, 2009**).

IV.3.2.2. Mortier de 120g/l :

Les résultats de I_{corr} pour les échantillons de mortier exposés à la solution de concentration 120g/l de NaCl pour plus de 80 jours sont représentés sur les figure IV.10 et IV.11.

À première vue, nous avons un risque plus ou moins élevé depuis le premier cycle (7 jours) puisque $I_{\text{corr}}=1,26\mu\text{A}/\text{cm}^2$, elle augmente ensuite progressivement pour atteindre une valeur maximale après 49 jour $I_{\text{corr}}= 4,31\mu\text{A}/\text{cm}^2$, cela était remarqué pour l'échantillon 1. Les deux autres échantillons restaient dans un champ modéré jusqu'au 77 -ème où ils avaient dépassé cette limite ($1\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

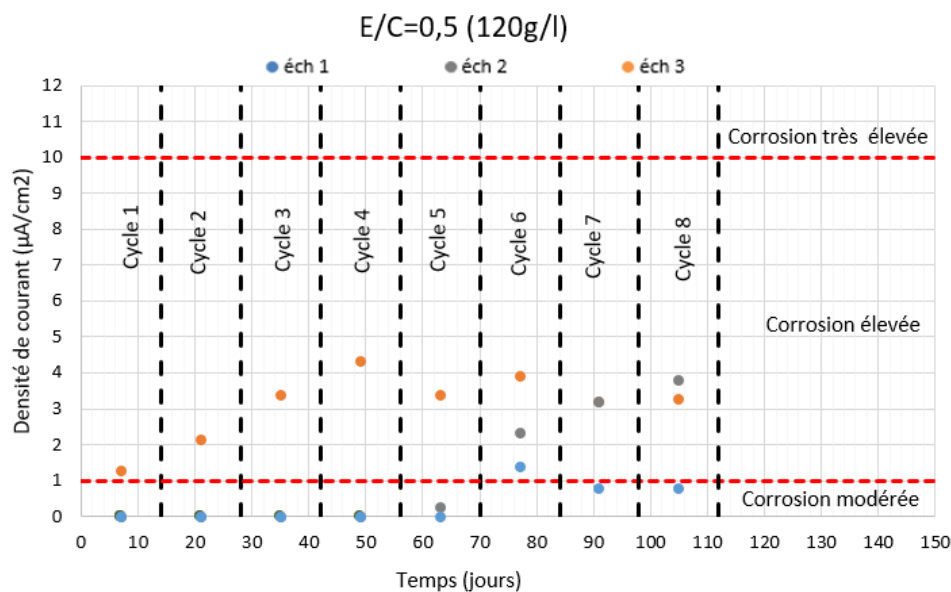


Figure IV.10 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,5 sous l'expression de chlorure à 120g/l.

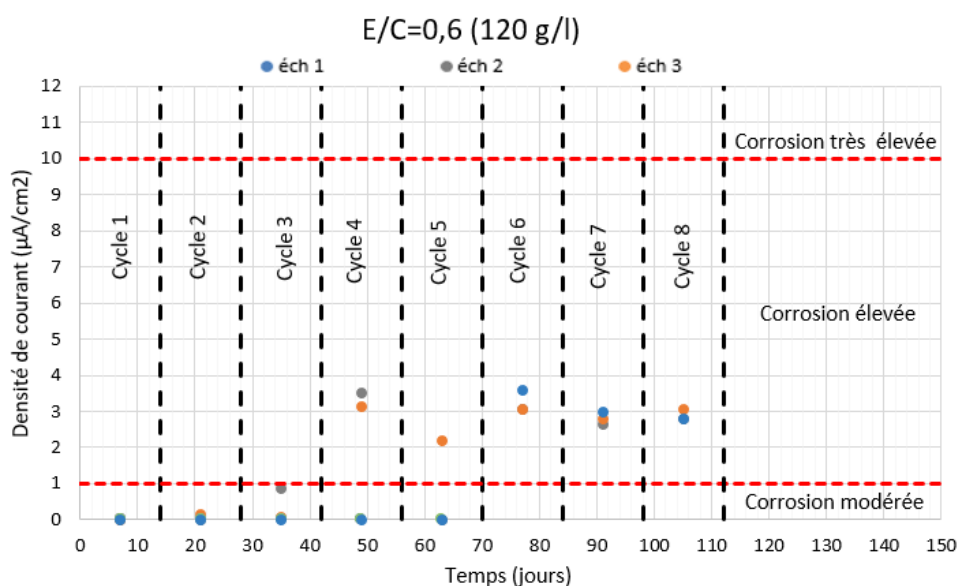


Figure IV.11 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,6 sous l'expression de chlorure à 120g/l.

Concernant les échantillons avec E/C=0,6, le risque de corrosion reste dans le taux de modération jusqu'à 50 jours pour ensuite subir une variation brutale atteignant les 3,8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

IV.3.2.3. Mortier de 240g/l :

Les figures IV.12 et IV.13 montrent les résultats de I_{corr} des échantillons de mortier immergés dans du NaCl à 240g/l pendant 80 jours. Il est observé dans les deux figures que l'initiation de la corrosion débute légèrement après 7 jours et perdure dans cet état pendant 35 jours, le

risque devient élevé après le 4 -ème cycle pour atteindre un maximum de $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ et $4,7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les rapports E/C 0,5 et 0,6 respectivement, signe d'une corrosion élevée selon (Andrade et al., 2004).

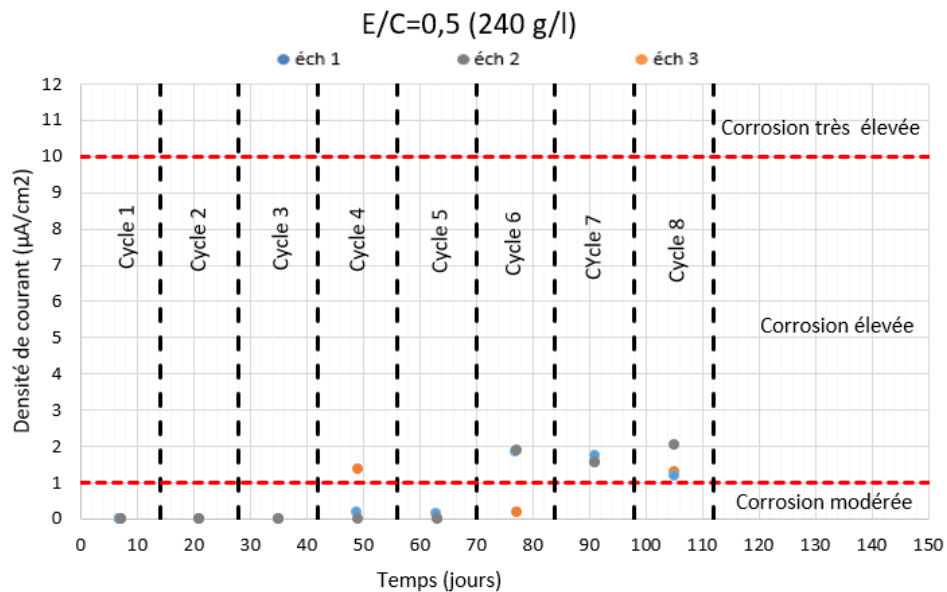


Figure IV.12 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,5 sous l'expression de chlorure à 240g/l.

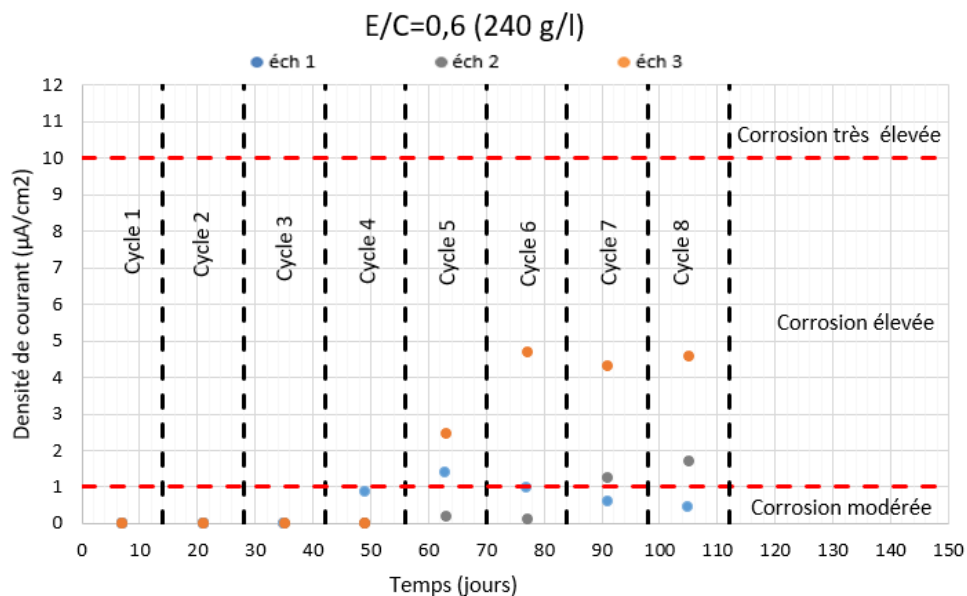


Figure IV.13 : Densité de courant macrocell des mortiers a rapport E/C =0,6 sous l'expression de chlorure à 240 g/l.

IV.3.3. Effet de variation des concentrations de NaCl :

Afin de montrer l'effet de la variation de concentration des chlorures sur les échantillons de bétons et mortier, on a regroupé les résultats des trois concentrations pour chaque mélange

dans une représentation en histogrammes (cf. figure IV.15). Les barres verticales colorées représentent la moyenne de densité de courant I_{corr} entre 3 échantillons pour chaque mélange et pour chaque concentration. Les lignes rouges représentent la limite en I_{corr} entre l'intervalle de risque de corrosion modérée et corrosion élevée.

Cette comparaison était sensée nous montrer l'effet de concentration sur l'accélération du phénomène de corrosion, cela veut dire que plus la concentration du milieu agressif est importante et plus la corrosion est accélérée sous gradient de concentration, plus ce gradient est considérable plus les valeurs de I_{corr} sont élevées, cette nuance est plus ou moins remarquée sur le béton avec $E/C = 0,6$. Cependant les résultats des autres mélanges nous ont montré autre chose, puisque la logique de variation n'est pas remarquée, cela est peut-être dû au fait qu'une fois la corrosion est amorcée, on en peut prévoir ou prédire la suite, cela peut être dû aussi à la tortuosité qui peut grandement modifier l'écoulement ou encore la diffusion des chlorures et ne pas respecter la logique du gradient de concentration.

La chose dont nous sommes sûrs, est que la corrosion avait bien atteint des limites critiques quelle que soit la concentration, on peut le voir sur la figure IV.4 où les traces de corrosion avaient atteint la surface de nos échantillons.



Figure IV.14 : Trace de corrosion sur la surface des différents échantillons de béton

IV.3.4. Effet de variation de rapport E/C :

La figure IV.16 présente cette fois-ci l'effet de variation du rapport E/C pour les deux mélanges (béton et mortier). Le principe était de regrouper les résultats d'un mélange donné avec un E/C donné pour chaque concentration. L'effet est indéniable et bien remarquable puisque toutes les courbes de la figure IV.16 montrent que le rapport E/C de 0,6 (histogrammes en vert) donnait dans la majorité des I_{corr} plus importants comparés à ceux de E/C 0,5 (histogramme en bleu). Ceci est dû principalement à l'effet de porosité qui accélère la pénétration des chlorures dans la zone d'enrobage vers les armatures (**Hassoune, 2018**). Cette différence de porosité induit aussi une surface de contact plus grande entre acier et béton offrant plus de réaction entre les aciers (Fe^{2+}) et chlorures (Cl^-) produisant ainsi plus de produits de corrosion ($Fe(OH)_2$) (cf. § I.3). Les mêmes constatations ont été observées dans (**Hansson et al., 2006, Vedalakshmi et al., 2008, Yu et al., 2010, Lapointe, 2009**).

IV.3.5. Effet de la variation des mélanges :

Le dernier point de notre étude était consacré à la comparaison entre les supports eux même qui font guise de protection pour les armatures contre la corrosion. Pour cela, nous avons pris les résultats pour chaque concentration du béton avec un E/C donné et l'avons comparé avec ceux du mortier avec le même E/C et la même concentration d'exposition. La finalité de cette opération a donné la figure IV.17. Là aussi on revient sur l'effet de porosité qui favorisait le transport des chlorures et accélère par conséquent le phénomène de corrosion, puisque la porosité des mortiers (histogrammes en vert) tournait autour de 18% or que celle du béton (histogrammes en bleu) était autours de 15- 16%. Donc on retrouve une certaine logique dans nos résultats la structure de mortier et plus poreuse pars rapport le béton, d'après (**Boukli Hacene, 2010**) une importante porosité d'un matériau donne une surface importante entre le matériau et les substances chimiques agressives avec lesquelles il est en contact.

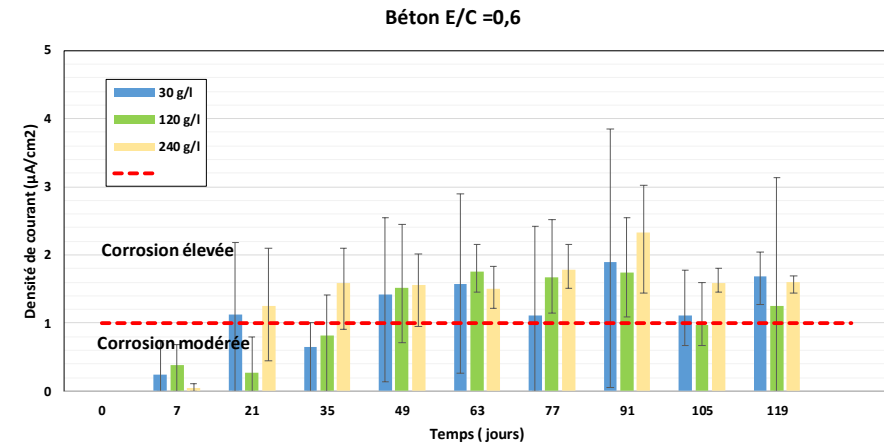
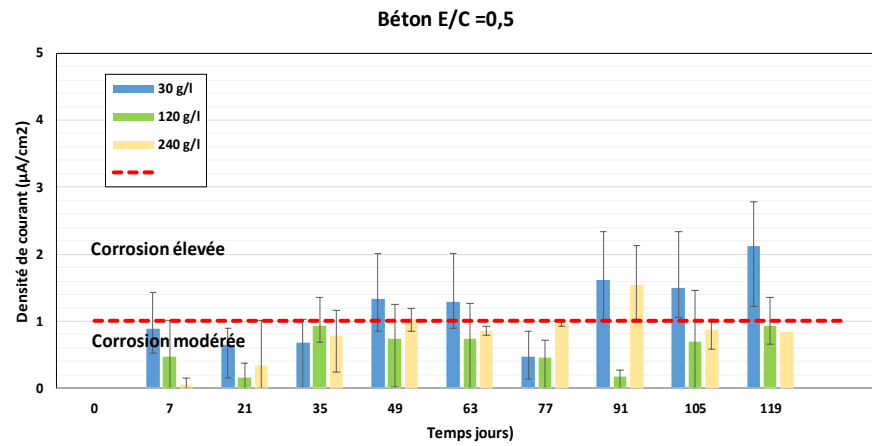
IV.4. CONCLUSION :

Ce chapitre nous a permis à partir de petits moyens de détecter l'initiation de la corrosion des armatures pour différentes configurations. Nous avons remarqué durant les premiers cycles sur tous les échantillons étudiés des signes de corrosion traduits par l'augmentation du courant de corrosion I_{corr} . Cet état de corrosion est dû au faible enrobage choisi (10 – 12) mm contrairement aux enrobages utilisés couramment, la faible épaisseur utilisée décrit les imperfections de mise en œuvre sur chantier et la dégradation du béton.

Les résultats nous ont montré une faible influence de la variation de concentration sur l'initiation de la corrosion. Cette faible influence est attribuée en premier lieu à une faible concentration d'amorçage par rapport aux concentrations choisies. En second lieu, le paramètre tortuosité qui modifie le phénomène de transport des ions chlores pour un même mélange ayant pratiquement la même porosité.

Nous avons remarqué des I_{corr} plus élevés pour les échantillons ayant un E/C de 0,6. Le rapport E/C a une influence directe sur la porosité ainsi que la tortuosité du milieu se traduisant par une surface de contact plus grande entre acier et béton offrant plus de réaction entre les aciers et chlorures provoquant un amorçage plus rapide. Le même constat a été observé pour les échantillons en mortier ayant des porosités supérieures à celles des bétons.

Béton



Mortier

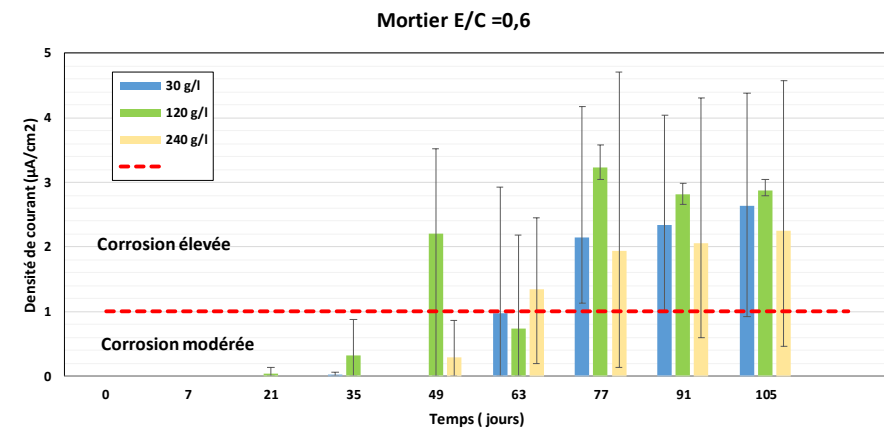
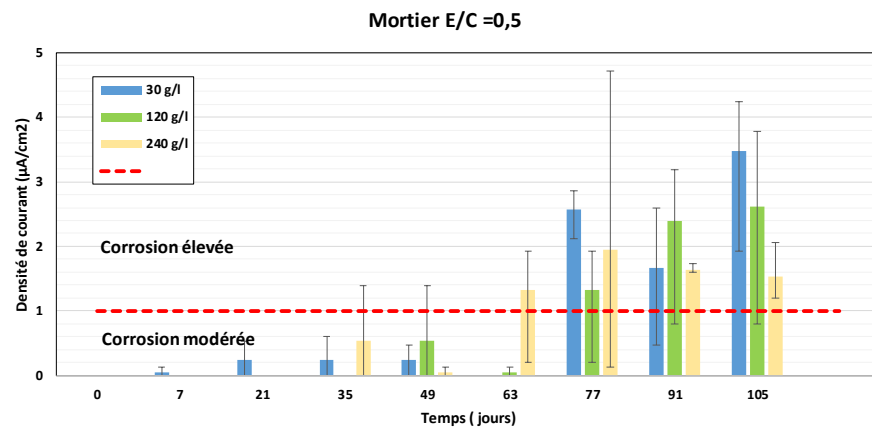


Figure IV.15 : Effet de concentration

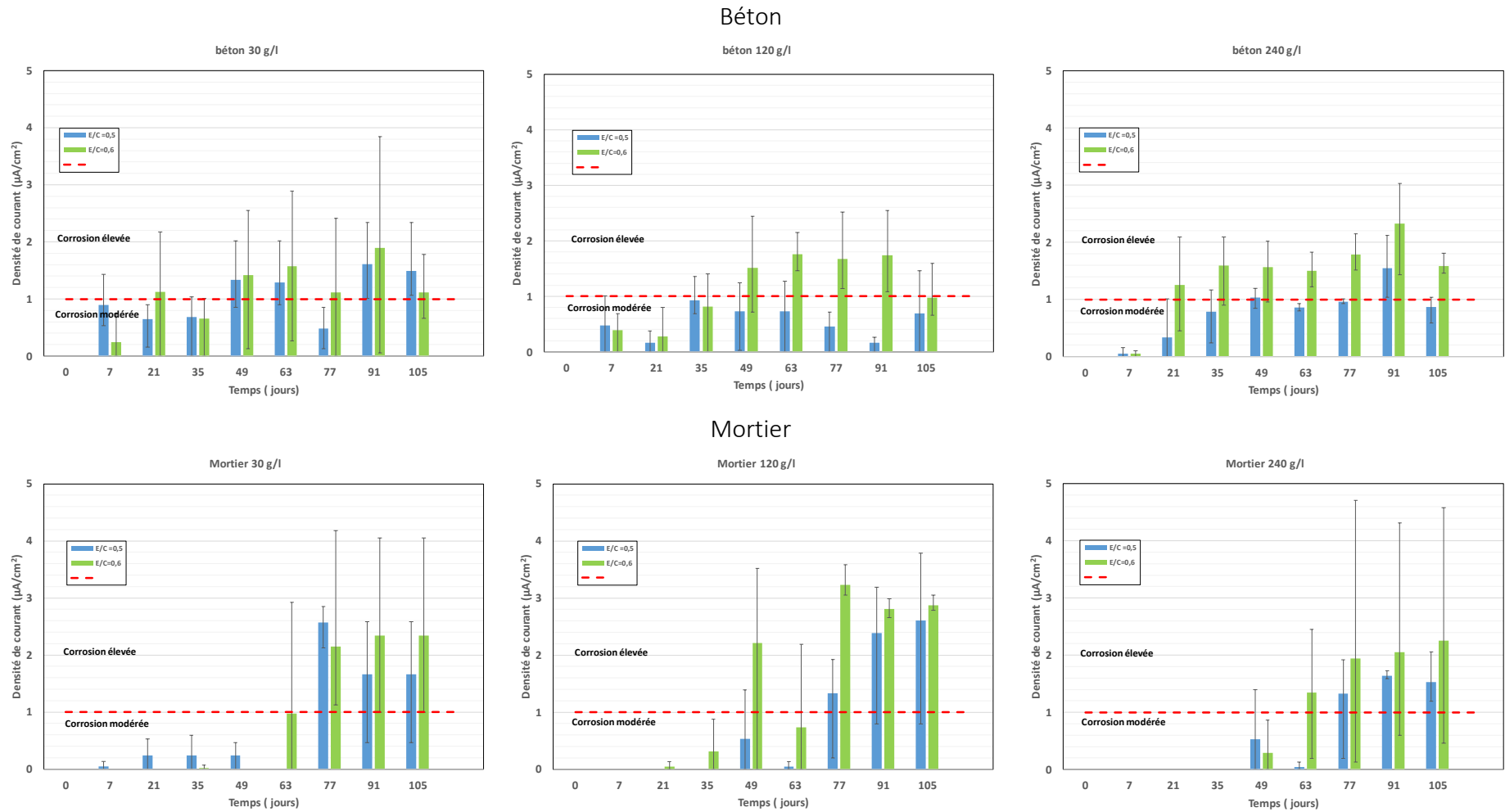


Figure IV.16 : Effet du rapport E/C

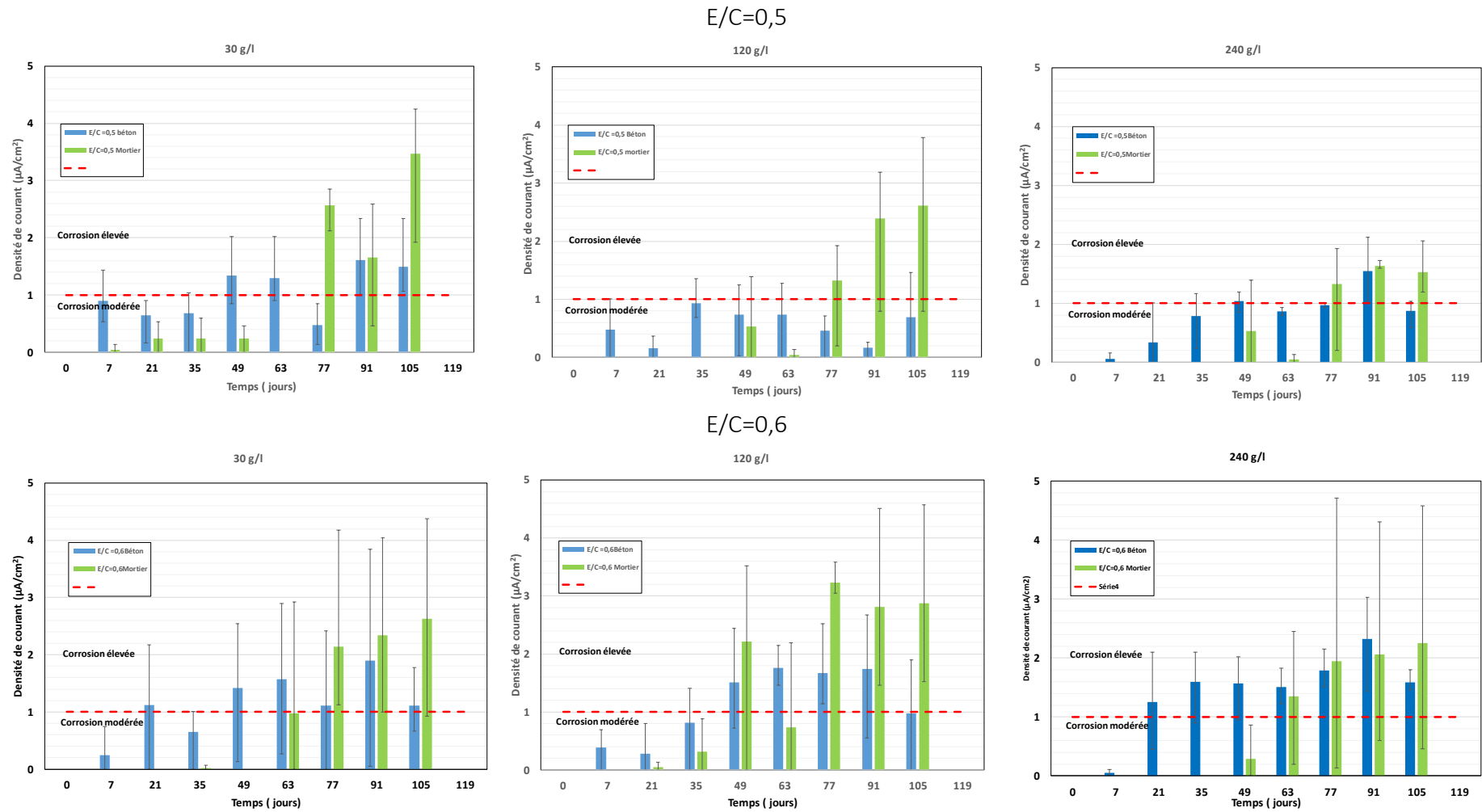


Figure IV.17: Effet du mélange

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Les ouvrages soumis aux environnements marins sont sujet à la dégradation par corrosion des armatures noyées dans le béton. Il est nécessaire de contrôler ces constructions pour assurer leurs durabilités. Pour ce faire, Plusieurs méthodes existent dont les méthodes non destructives qui permettent d'évaluer le risque en corrosion sans dégrader l'ouvrage, parmi ces procédés ceux utilisant le potentiel de corrosion, la résistivité électrique et la densité de courant macrocell. Notre choix s'est porté sur la dernière méthode puisque qu'elle ne nécessite pas de moyens couteux et est relativement simple dans la mise en œuvre.

D'après la synthèse bibliographique la densité du courant varie avec la variation de trois paramètres. Le premier est relié à la nature du béton et de sa porosité qui tient en compte le type de ciment, type d'ajout (laitier, cendre volante, ...) et utilisation ou non d'adjuvants. Le second dépend du traitement du béton dans sa masse par des inhibiteurs de corrosion. Le dernier concerne la nature des d'armatures noyées dans le béton, ainsi que leurs traitements préalables. Cette synthèse nous a permis d'établir notre programme expérimental traitant la mesure du courant macrocell I_{corr} en faisant varier trois paramètres : la concentration en NaCl, le rapport E/C et la nature du matériau cimentaire.

Les résultats obtenus sur différents échantillons de différentes natures (béton et mortier) avec différents rapports E/C (0,5 et 0,6) soumis à différentes concentrations en NaCl (30, 120 et 240 g/l) après environ six mois d'exposition par des cycles de mouillage et séchages ont révélé que la technique choisie, basée sur la mesure du courant de corrosion macrocell a permis de détecter l'amorçage de la corrosion. Cette technique de mesure est très facile à mettre en place, elle utilise des moyens simples et peu onéreux (résistance électrique, connexion électrique et un multimètre).

Les résultats des paramètres étudiés ont montré d'abord une faible influence de la concentration des chlorures sur l'initiation de la corrosion sur des échantillons ayant les caractéristiques physiques (porosité et tortuosité). En revanche l'augmentation du rapport E/C ou l'utilisation du mortier au lieu du béton donnent des échantillons plus poreux et par conséquent des états de corrosion plus importants.

Recommandations :

D'après les résultats obtenus par ce travail, nous recommandons de compléter cette recherche par les points suivants :

- Améliorer la porosité du béton par des ajouts (pouzzolane, fumée de silice, filler calcaire).
- Tester différents types de traitement d'aciers.
- Utiliser des inhibiteurs de corrosion migrateurs et/ou incorporés dans la masse du béton.

Références bibliographiques

AHMADS S., Reinforcement corrosion in corrosion structures, its monitoring and service life prediction – a review. *Cement and concrete composites*, 2003, 25, 459 – 471.

AL-SODANI K. A. A., MASLEHUDDIN M., AL-AMOUDI O. S. B., SALEH T. A. & SHAMEEM M., 2018. Performance of corrosion inhibitors in cracked and uncracked silica fume cements concrete beams. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1- 16.

ANDRADE C., ALONSO J., GULIKERS J., POLDER R., CIGNA R., VENNESLAND O. & SALTA M., 2004. Recommendations of RILEM TC-154-EMC: “Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion”, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, *Mat. Str.*, 37, pp 623-643.

ANGST U. M., ELSENER B., 2017. The size effect in corrosion greatly influences the predicted life span of concrete infrastructures. *Science advances*, 3, 1-8

BERKE N.S., et SUNDBERG K.M. 1990. "The effects of calcium nitrite and microsilica admixtures on corrosion resistance of steel in concrete", *International Concrete Abstracts Portal*, Vol. 122, pp. 265-280

Boukli Hacène S. M. A., 2009. "Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen", Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 193 pages.

CASTEL A., 2000. Couplage mécanique et corrosion dans les éléments de béton armé. Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3, France, 233 pages.

DEHOUX A., 2012. Propriétés mécaniques des couches de produits de corrosion à l'interface acier/béton. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, France, 159 pages.

FRANCOIS R., ARLIGUIE G. & BARDY D., 1994. Electrode potential measurements of concrete reinforcement for corrosion evaluation. *Cement and Concrete Research*, 24, 401-412.

HANSSON C., POURSAEE A. & LAURENT A., 2006. Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 36, 2098-2102.

HASSOUNE M., 2018. Amorçage de la corrosion des armatures dans le béton exposé au milieu marin : prédiction et prévention par inhibition. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 186 pages.

KAOUADJI M. S., 2013. Dégradations au niveau de l'usine al zinc constats et recommandations. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie, 77 pages

LAPOINTE V., 2009. Initiation et propagation de la corrosion dans un élément de béton armé, Mémoire de maitrise, Université de Laval, Québec, Canada, 103 pages

Lataste J., 2010. "Durée de vie des ouvrages : Approche Prédicative Performantielle et Probabiliste", APPLET L1-2-1 : Rapport final sur les mesures de résistivité électrique, Bordeaux.

MCCARTER W., CHRISP T., STARRS G., BASHEER P. et BLEWETT J. 2005. Field monitoring of electrical conductivity of cover-zone concrete. *Cement and concrete composites*, 27, 809-817.

MERIOUA, A. 2016. Mesures non destructives des caractéristiques physico-chimiques des matériaux poreux : application au transfert des électrolytes. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 133 pages.

NEITHALATH N., 2007. Extracting the performance predictors of enhanced porosity concretes from electrical conductivity spectra. *Cement and Concrete Research*, 37, 796-804.

QUALIT M., 2009. Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien. SARASWATHY, V. & SONG, H.-W. 2007. Improving the durability of concrete by using inhibitors. *Building and environment*, 42, 464-472.

TOUIL B., GHOMARI F., BEZZAR A., KHELIDJ A., BONNET S. (2011). "Etude des performances de durabilité des bétons locaux." XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. AUGC 2011, Tlemcen, 29 au 31, pp 53-64

TRAN V. Q., 2016. Contribution à la compréhension des mécanismes de dépassivation des armatures d'un béton exposé à l'eau de mer : théorie et modélisation thermochimique. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, France, 103 pages

TUUTTI K., 1982. Corrosion of steel in concrete. CBI forskning, Cement- och betonginst, 468 pages.

VEDALAKSHMI R., RAJAGOPAL K., PALANISWAMY N., 2008. Long term corrosion performance of rebar embedded in blended cement concrete under macro cell corrosion condition. *Construction and Building Materials*, 22, 186-199.

VERVISCH-FORTUNÉ I., 2009. Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier. France, 194 pages

YU H., SHI X., HARTT W. H. et LU B., 2010. Laboratory investigation of reinforcement corrosion initiation and chloride threshold content for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 40, 1507-1516.

Normes utilisées

ASTM-C-876, "Standard Test Method for Half-cell potentials of reinforcing steel in concrete", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 1991.

ASTM-G-109, "Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments" Annual Book of ASTM Standards, Vol. 07., 2013

ANNEXE

Exemple de calcul de densité de corrosion I_{corr} :

La résistance 100 Ohm

$1 \text{ A} = 10^{-6} \mu\text{A}$

A = La surface de la partie intérieure de la barre d'armature noyée dans le béton : 37,68 cm²

Exemple de cycle 1 (mouillage) après 7 jour :

La tension mesurée est 5,4 mV = 0,0054 V

Nous calculons l'intensité par la formule $i = V/R$:

$0,000054 = 0,0054/100$

I : intensité du courant (A)

V : tension du courant (V)

R : résistance électrique (Ohm)

Après nous convertissons l'intensité en μA :

$0,000054 * 10^{-6} = 54 \mu\text{A}$

Finalement nous calculons la densité par la formule $I_{corr} = i / A$:

$1,433 = 54/37,68$

N° cycle	Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3	
	Mouillage	Séchage	Mouillage	Séchage	Mouillage	Séchage
Temps (jours)	7	14	21	28	35	42
Tension (V)	0,0054	0,0011	0,0034	0,0016	0,0038	0,0014
Intensité (A)	0,000054	0,000011	0,000034	0,000016	0,000038	0,000014
Intensité (μA)	54	11	34	16	38	14
Densité ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	1,433121	0,2919321	0,9023355	0,4246285	1,0084926	0,3715499
État de corrosion	High	Low	Low	Low	High	Low