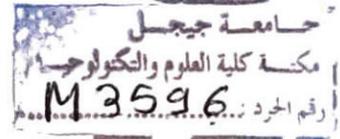


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de JIJEL

Faculté des Sciences et Technologie
Département de Génie des procédés



Mémoire de Fin d'étude pour l'obtention du diplôme Master
En Génie des procédés
Option : génie des matériaux

Thème



L'effet du liège sur les propriétés anti corrosion
du béton

Présenté par :

Salhi samir

Encadré par :

Mr.Bensabra Hakim

PROMOTION 2017

Remerciements

Louange à Dieu tout puissant pour tout ce qu'il m'a donné afin que je puisse terminer ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement monsieur Hakim Bensabra , qui a dirigé ce travail, je suis très reconnaissant de l'intérêt constant qui l'a manifesté à mon égard. Les nombreux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer et les discussions amicales que j'ai eu fréquemment eu avec lui, me furent d'un grand soutien, ainsi que son aide par une documentation riche et par ses conseils. Qu'il veuille trouver ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Mes remerciements vont aux membres du jury pour m'avoir honoré en acceptant de juger mon travail.

Que l'ensemble des enseignants qui ont contribués par leurs dévouements et leurs compétences à ma formation, acceptent mes remerciements les plus sincères.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues de travail du hall technologie pour leurs aides et leurs soutiens.

Pour finir, je remercie toute les personnes du laboratoire LIME : ingénieur, thésards, spécialement Soumia et Meriem pour leur contribution à une ambiance de travail agréable.

Enfin, je dédie ce modeste travail à ma famille et plus particulièrement ma mère et mes enfants Siredj eddine et Yahia.

SAMIR



Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : le béton et le béton armé

I.1. Historique	3
I.2. Le béton	3
I.2.1. Ciment	3
I.2.2. Granulats	4
I.2.3. L'eau de gâchage	4
I.2.4. Les adjuvants	4
I.2.5. Les qualités spécifiques du béton	4
I.3. Le béton armé	5
I.3.1. Définition	5
I.3.2. Les aciers ronds à béton	6
I.3.2.1. Définition	6
I.3.2.2. Structure des aciers d'armatures	6
I.3.2.3. Traitement thermique des aciers d'armature	7
I.3.2.4. Propriétés des aciers de construction	7
I.3.2.4.1. Propriétés physiques	7
I.3.2.4.2. Propriétés chimiques	8
I.3.2.4.3. Propriétés mécaniques	8
I.3.2.5. Type des armatures	8



CHAPITRE II : la corrosion dans le béton

II.1. Généralités	10
II.2. Définition de la corrosion	10
II.3. Causes de la corrosion	10
II.4. Classification de la corrosion	11
II.4.1. Corrosion chimique	11
II.4.2. Corrosion bactérienne la bio corrosion	11
II.4.3. Corrosion électrochimique	11
II.5. Morphologie de la corrosion	12
II.5.1. La corrosion uniforme	12
II.5.2. La corrosion localisée (zonale)	12

a. La corrosion galvanique.....	12
b. La corrosion caverneuse	13
c. La corrosion par piqûres	13
d. La corrosion inter granulaire	13
e. La corrosion sélective	13
f. La corrosion érosion.....	13
g. La corrosion sous contrainte.....	13
h. Fragilisation par l'hydrogène	14
II. 6. Facteurs de corrosion	15
a.Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque.....	15
b.Facteurs métallurgiques.....	15
c.Facteurs définissent les conditions d'emploi.....	15
d.Facteurs dépendant du temps.....	15
II. 7. Protection contre la corrosion	16
II. 8. Aspect thermodynamique de la corrosion électrochimique	16
II. 8. 1. Potentiel d'équilibre d'une électrode	16
II. 8. 2. Equation de Nernst.....	16
II.8.3. potentiel de dissolution ou de corrosion :	17
II. 8. 4. Diagramme de Pourbaix.....	18
II. 8. 4. 1. Diagramme potentiel-pH du fer	19
II.9. Aspect cinétique de la corrosion électrochimique	20
II.9.1. Généralités	20
II. 9. 2. Courbes de polarisation.....	21
II. 9. 3. Etude de la surtension	22
II. 9. 4. Vitesse des réactions de corrosion	22
II.9. 5. Relation fondamentale entre le courant et le potentiel.....	23
II.10. Corrosion des armatures dans le béton.....	24
II.10. 1. Processus de la corrosion dans le béton :	24
II.10. 2. L'acier dans le béton sain :	25
II.10. 3. Etapes de corrosion des armatures dans le béton :	26
II.10. 4. Dépassivation des armatures	27
II.10.4. 1. La carbonatation.....	27
II.10.4. 2. La pénétration des chlorures :	29
II.10.4. 2. 1. Mécanisme d'attaque par les chlorures :.....	29
II.10.4. 2. 2. Mécanisme de diffusion des chlorures :.....	31
II.10. 5. Facteurs influents la corrosion des armatures :	32



II.10. 5. 1. Influence de la composition du béton :	32
II.10. 5. 2. Influence de l'humidité :	32
II.10. 5. 3. Influence de l'épaisseur d'enrobage:	33
II.10. 6. Détermination de l'état de corrosion :	33
a-Mesure du Potentiel de corrosion :	33
b-Taux de corrosion (courant de corrosion)	33
II.10. 7. Prévention contre la corrosion dans le béton	34
II.10. 8. Etude de la corrosion des armatures dans les solutions aqueuses simulées du béton :	35
II.10. 9. Nature des solutions simulées :	35

CHAPITRE III : modes et méthodes opératoires

III.1. But du travail	37
III.2. Matériau d'étude	37
III.3. Préparation des échantillons	37
III.4. Milieu de l'étude	38
III.4.1. Solutions simulées du béton	38
III.4.2. Milieux cimentaires	39
III.4.2.1. Préparation des spécimens en mortier	39
III.4.2.2. Préparation des spécimens en mortier avec l'ajout du liège	40
III.5. Techniques électrochimiques	42
III.5.1. Mesure du potentiel de corrosion	42
III.5.2. Courbes de polarisation	42
III.5.3. Spectroscopie d'impédances électrochimique (EIS)	43
III.6. Essai de corrosion accélérée:	45
III.7. Essai de compression sur le mortier:	46

CHAPITRE IV: résultats et discussions

IV.1. Etude dans les solutions simulées	48
IV.1. 1. Effet des chlorures	48
IV.1. 2. Effet du pH	51
IV.2. Etude dans les spécimens en mortier	56
A – Evolution du potentiel de corrosion	56
B – Courbes de polarisation	58
C – Impédances électrochimiques	59
D – Essai de compression	61
E - Caractérisation de surface	62

IV.3. Discussions :	64
CONCLUSION GENERALE	67



Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La durabilité des ouvrages en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent résister à ces agressions, des désordres dont le plus fréquent est la corrosion des armatures apparaissent dans le béton de ces structures. Ces désordres sont généralement dus à des défauts de conception, à une mauvaise mise en œuvre ou à des causes accidentelles ; ils hypothèquent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation, leur ruine. Bien conçu et mis en œuvre suivant les règles de l'art, le béton offre aux armatures une protection à la fois physique et chimique. L'enrobage assure la protection physique en jouant un rôle de barrière vis-à-vis de l'environnement. Sa qualité (compacité, teneur en ciment, imperméabilité, etc.) et son épaisseur (3 cm en milieu non agressif et 5 cm en milieu marin) sont des facteurs essentiels à la bonne tenue des armatures face à la corrosion [1] .

L'alcalinité élevée du béton assure la protection chimique en recouvrant, selon le phénomène de passivation, les armatures d'un film extrêmement mince d'hydroxyde de fer. Mais, en présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, le dioxyde de carbone etc. La corrosion pourrait donc apparaître avec comme conséquences la réduction des sections d'acier et formation de rouille, dont le volume, aux moins deux supérieur à celui du fer initial, entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

Il existe actuellement plusieurs méthodes de protection ou de réparation. Celles-ci agissent directement au niveau de l'acier (revêtements organiques ou métalliques des armatures, inhibiteurs de corrosion, protection cathodique) ou au niveau du béton, soit en empêchant la pénétration d'éléments agressifs (revêtement du béton par des peintures spéciales), soit en réhabilitant la qualité du béton (changement des parements, déchlorurations, ré-alcalinisation).

A travers notre étude, réalisée au niveau de laboratoire des interactions matériaux environnement (LIME), nous avons testé l'effet de l'addition du liège sur les propriétés anticorrosion du béton dans deux milieux distincts :

- Essais potentiel-dynamiques dans une solution simulée du béton contaminée par les ions chlorures et zincs.
- Essais de corrosion accélérée sur des spécimens en béton préparé au laboratoire.

Les objectifs visés par notre étude sont :

- D'évaluer et de comparer l'effet de l'addition du liège dans le béton.
- De déterminer la concentration optimale du liège qui correspond à un rendement maximal.
- Définir l'effet de l'addition du liège sur les propriétés anticorrosion et à la compression du béton.

Notre étude est structurée comme suivant :

- 1- Chapitre I, des notions sur le béton et le béton armé.
- 2- Chapitre II, présente des informations sur la corrosion et protection par l'utilisation des inhibiteurs.
- 3- Chapitre III, comporte les différents modes et méthodes opératoires utilisés.
- 4- Chapitre IV, est consacré à la présentation et à la discussion des différents résultats obtenus.
- 5- Conclusion, recommandations nécessaires ainsi que les futurs travaux en perspectives.

CHAPITRE I

Le béton et le béton armé

I.1. Historique

L'apparition des premiers bétons se situe à la fin du premier quart du XIX^{ème} siècle lorsque la chaux hydraulique, liant utilisé jusqu'alors, est remplacée par le ciment Portland.

C'est vers 1870 que l'on introduit des barres d'acier dans le béton afin de compenser sa faible résistance à la traction, donnant ainsi naissance au béton armé. Cependant, ce n'est que vers 1900 que le béton armé remplace peu à peu les structures métalliques dans la construction d'ouvrage de génie civil.

Les premières théories des calculs statiques apparaissent 30 ans plus tard et les progrès réalisés au 20^{ème} siècle ont fait du béton armé, le principal matériau de construction utilisé aujourd'hui, surtout sans doute par ce qu'il est simple d'emploi, économique et qu'il s'adapte en souplesse aux conditions les plus variées [2].

I.2. Le béton

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau et de faibles quantités d'adjuvants. Ces constituants sont dosés de manière à obtenir, après durcissement, un produit solide dont les propriétés mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique fabriqué essentiellement à partir de minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.

I.2.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissement progressifs dans le temps [3].

Il existe plusieurs sortes de ciment offrant des caractéristiques différentes. Le plus usuel est le ciment dit « Portland ». Tous ces ciments contiennent du « clinker » car c'est lui qui assure la fonction liante grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide modulable à un état final de solide mécaniquement résistant.

Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450 °C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de calcaire et d'argile (ou de marnes) dans un rapport d'environ 80-20% pour former des silicates de calcium (C_3S et C_2S) ainsi que des aluminates et aluminoferrites de calcium (C_3A et C_4AF).

Dans ces symboles, C figure le calcium (Ca), S la silice (SiO_2), A l'alumine (Al_2O_3) et F l'oxyde ferrique (Fe_2O_3).

I.2.2. Granulats

Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés (CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou siliceuses (SiO_2) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, le squelette du béton dont ils occupent environ 70% du volume, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique [4].

La sélection et le dosage des différentes fractions granulaires sont un aspect essentiel pour l'obtention d'un béton de propriétés satisfaisantes.

I.2.3. L'eau de gâchage

C'est l'un des constituants du béton qui définit dans une large mesure la qualité et les propriétés de l'épiderme du béton. Elle intervient, par ses propriétés mécaniques et physico-chimiques, à toutes les étapes de la vie du matériau. L'eau confère au béton une plasticité qui permet son écoulement et son moulage. Elle assure ensuite l'hydratation du ciment et participe à la cohésion du matériau [5].

La teneur en eau, du béton, est en fonction de celle du ciment. Le rapport pondéral eau/ciment est un paramètre caractéristique élémentaire dans la formulation du béton.

I. 2.4. Les adjuvants

Par définition les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans le béton, moins de 5% de la masse de ciment. Ils ont pour but d'améliorer certaines propriétés ou qualités souhaités soit sur le béton frais soit sur béton durci.

Les adjuvants sont souvent des composés organiques spécialement formulés pour les applications béton, et disponibles commercialement. Leur classification repose essentiellement sur les propriétés qu'ils confèrent au béton frais ou durci (plasticité, fluidité, compacité, etc.)[3]. On distingue ainsi les catégories suivantes : adjuvants plastifiants/super plastifiants, adjuvants accélérateurs/retardateurs de prise ou de durcissement et adjuvants entraîneur d'air.

I.2.5. Les qualités spécifiques du béton.

Les bétons présentent les qualités spécifiques suivantes :

- Matériau moulable à froid : Il permet la réalisation de toutes formes, dimensions et détails de parement.

- Matériau composite : Il offre une gamme illimitée d'aspects de surface et de performances par le vaste choix de constituants, de compositions, de moules et de traitements de surface.

- Matériau minéral durable : Il est capable de résister, selon sa composition, à des environnements sévères ; matériau économique : c'est l'un des matériaux de base les moins chers du marché ; son coût est adaptable aux besoins de l'utilisateur ; il est fonction des performances recherchées.

I.3. Le béton armé

I.3.1. Définition

Le béton armé est l'intime assemblage d'armatures (généralement en acier) et de béton afin de compenser la mauvaise tenue de ce dernier à la traction. Cet assemblage est rendu possible grâce à la dilatation comparable des deux matériaux. A titre indicatif la résistance du béton à la compression est d'environ 12 fois plus élevée que sa résistance à la traction [5]. En effet, l'utilisation du béton est la plupart du temps couplée à celle d'armatures en acier doux pour former des structures composites en béton armée. Dans ces structures, le béton assure la résistance à la compression et la protection des aciers qui, eux, reprennent les efforts de traction et limitent la fissuration, tout en donnant de la ductilité à l'élément composite [6]. Vis-à-vis d'autres matériaux, le béton armé présente plusieurs avantages tels que l'économie, la souplesse des formes, la facilité des assemblages, la résistance aux agents atmosphériques, la résistance au feu, etc. les étapes de préparation d'un béton armé sont représentées par le schéma de la figure 1.

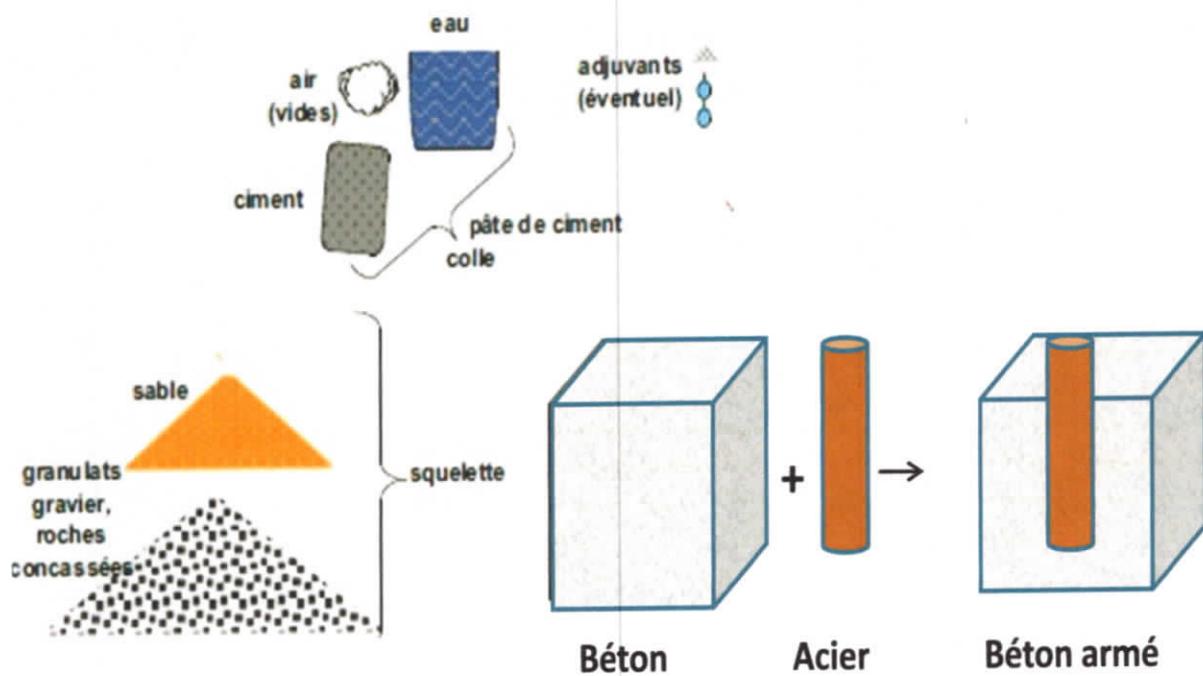


Figure 1 : Etapes de préparation du béton armé [6]

I.3.2. Les aciers ronds à béton

I.3.2.1. Définition

L'acier est un alliage à base de fer et du carbone dont la teneur de ce dernier ne dépasse pas les 2%. Il contient également d'autres éléments inévitables dits éléments normaux tels que le Si, le P et le Mn. Les bonnes propriétés de ductilité de l'acier (aptitude à la mise en forme par déformation plastique) ont fait que l'acier est le plus utilisé de tous les alliages, ferreux ou non ferreux, notamment dans le domaine de la construction.

La composition chimique des aciers joue un rôle très important tant du point de vue mécanique (dureté, limite d'élasticité, charge à la rupture, etc.) que du point de vue physico-chimique (résistance à la corrosion, usure, etc.).

I.3.2. 2. Structure des aciers d'armatures

Selon la composition chimique (teneur en carbone surtout) et les conditions de chauffage et refroidissement (traitements thermiques ou thermomécaniques lors de processus de fabrication).

Les aciers de construction présentent, dans les conditions de mise en œuvre, deux structures métallographiques distinctes :

- ✓ *Structure ferrito-perlitique* : Structure biphasée composée de ferrite (solution solide d'insertion du carbone dans le fer α) [7], et de perlite (agrégat de ferrite et de cémentite (Fe_3C)) dont la première est la plus prédominante, figure 2-a.
- ✓ *Structure perlito-ferritique* : Contrairement à la précédente, la structure perlito-ferritique, figure 2-b, contient plus de perlite que de la ferrite, elle est la conséquence d'une teneur relativement élevée en carbone et une vitesse de refroidissement plus élevée. Les aciers perlito-ferritiques présentent un bon compromis entre la caractéristique de ductilité et de dureté.

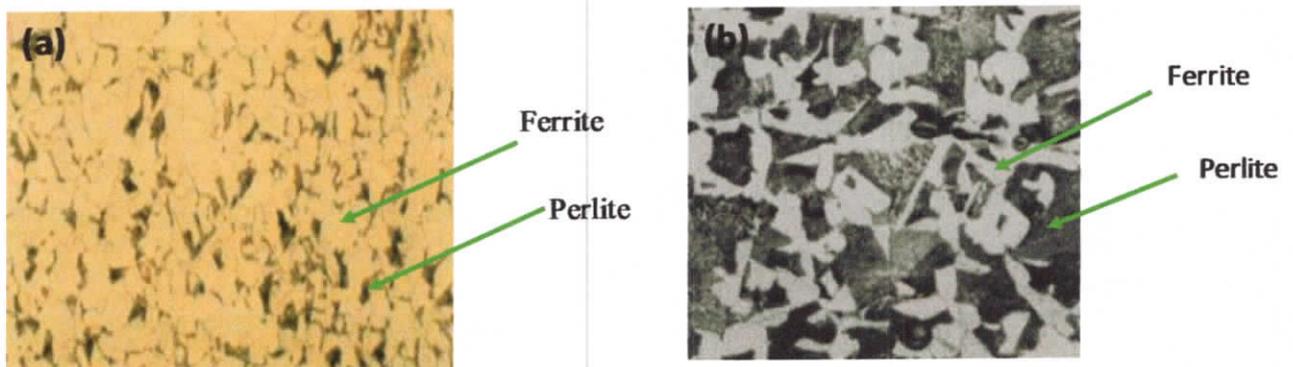


Figure 2 : Structure des aciers ronds à béton

I.3.2.3. Traitement thermique des aciers d'armature

L'amélioration de la qualité d'un acier d'armature est aussi réalisée par des traitements thermiques (trempe, trempe iso-thermique, revenu, etc.). Après un traitement thermique, la résistance de l'acier augmente de 30% et la limite d'élasticité s'élève respectivement de 65% jusqu'à 100%. L'amélioration des propriétés mécaniques d'un acier soumis au traitement thermique donne jusqu'à 35 à 40% d'économie sur l'armature d'un béton armé [8].

I.3.2.4. Propriétés des aciers de construction

Pour permettre la caractérisation d'un acier, les trois catégories de propriétés principales sont les suivantes :

I.3.2.4.1. Propriétés physiques

La dilatabilité linéique (ou dilatation) est la caractéristique physique la plus intéressante pour le constructeur métallique. Témoin de l'augmentation des dimensions de l'acier, ce coefficient peut être donné par rapport à une température précise (vrai) ou entre

deux températures (moyen). L'acier est également un bon conducteur thermique, notion à considérer dans le cas des échanges de chaleur entre extérieur et intérieur.

I.3.2.4.2. Propriétés chimiques

Liée aux propriétés d'un acier, la teneur des éléments (ou de certains d'entre eux) qui le compose est donnée par les normes ou par les catalogues des producteurs. L'indication est soit une « fourchette » avec les teneurs maximale et minimale, soit une valeur fixe (minimale ou maximale). En outre, la réactivité des aciers avec leur environnement est importante. La corrosion atmosphérique dépend de l'humidité relative et de la pollution de l'air. Elle engendre une dégradation du matériau en termes d'épaisseur, de poids et par conséquent de performances. Pour recourir à ces phénomènes, on fait appel à des revêtements de protection, métalliques ou non, ainsi qu'aux aciers inoxydables.

I.3.2.4.3. Propriétés mécaniques

Parmi les caractéristiques mécaniques des aciers les plus couramment utilisées pour une application dans la construction métallique sont : la limite d'élasticité, la résistance à la traction (rupture), l'allongement à la rupture, Module d'élasticité (d'Young) et la résilience.

I.3.2.5. Type des armatures

Les produits sidérurgiques les plus utilisés pour constituer les armatures des constructions en béton armé sont [9]:

1. Les fils et les barres ronds lisses qui peuvent provenir, soit de ronds laminés à chaud, soit de fil machine redressé ;
2. Les barres nervurées ou barres à haute adhérence (barres HA) laminées à chaud;

Les aciers d'armatures, étant livrés prêts à l'emploi, sont donc sous des formes (géométriques) correspondant aux besoins des utilisateurs, figure 4. Une barre lisse ou barre à haute adhérence (barre HA) appelée aussi crénelée, est caractérisée par un diamètre nominal. Les diamètres nominaux normalement utilisés dans le domaine de la construction appartiennent à la gamme suivante.

Rond lisse : 6 8 10 12 13 14 20 25 32 40 mm

Barre HA (crénelé) : 6 7 8 9 10 12 14 16 20 25 32 40 mm

A chaque diamètre nominal correspond une section nominale et un périmètre nominal.

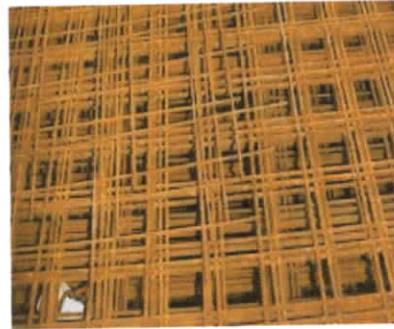


Figure 3 : Types d'armatures : lisses, crénelées et treillis soudés



CHAPITRE II

La corrosion dans le béton

II.1. Généralités

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes [1].

En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives [11].

La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément :

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- la présence d'un agent agressif.

II.2. Définition de la corrosion.

Le terme corrosion vient du latin "*corrodere*" qui signifie rongé, attaquer. La corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interactions physico- chimiques entre le matériau et son environnement entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, optiques, esthétiques, etc.). Evans (1929) puis Wagner et Traud (1938) sont les premiers à avoir défini la Corrosion, en présence d'une phase liquide, comme un processus électrochimique [12].

II.3. Causes de la corrosion

Dans la nature, tous les métaux, à l'exception des métaux nobles tel que l'or, se présentent sous forme d'oxydes et de sulfures métalliques. Cet état de point de vue thermodynamique est très stable. Cependant, l'énergie considérable fournie pour l'obtention des métaux à partir de ces minerais fait que les métaux obtenus se trouvent dans un niveau d'énergie élevée ils sont dans un état métastable. C'est pourquoi, tous les

métaux usuels ont tendance à retourner à leur état initial pauvre en énergie, cela à l'aide du milieu environnant.

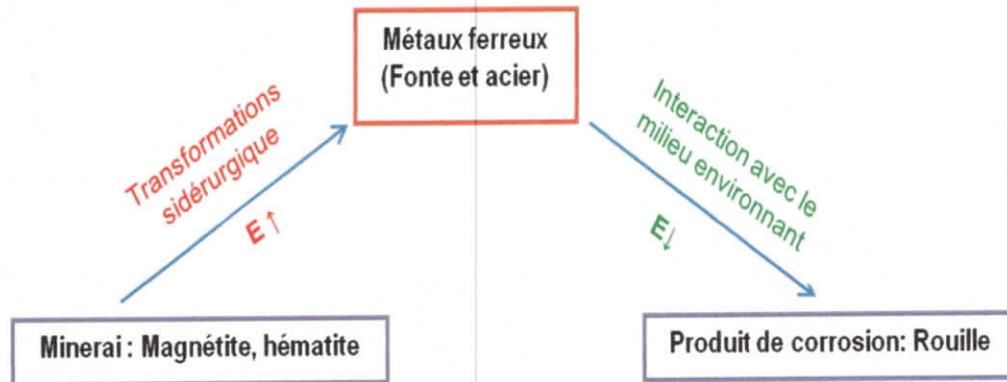


Figure 4 : Exemple traduisant la cause essentielle de la corrosion des métaux

II. 4. Classification de la corrosion

II. 4.1. Corrosion chimique

C'est la réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. Si cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée corrosion sèche ou corrosion à haute température.

Au cours de la corrosion chimique l'oxydation du métal est la réduction de l'oxydant se fait en un seul acte. C'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence du métal.

II. 4. 2. Corrosion bactérienne la bio corrosion

La corrosion bactérienne, appelée encore bio corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement.

II. 4. 3. Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique est essentiellement l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxyde. Elle fait appel à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion, nécessite la présence d'un réducteur (H_2O , O_2 , H_2 ...etc.), sans celui-ci, la corrosion du métal (réaction anodique) ne



peut se produire. Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables.

II. 5. Morphologie de la corrosion

La première approche de la corrosion étant généralement visuelle, la corrosion peut être divisée, d'un point de vue aspect morphologique, en deux grandes classes : corrosion généralisée et corrosion localisée appelée encore corrosion « zonale ».

II. 5. 1. La corrosion uniforme

Cette corrosion se caractérise par une attaque de toute la surface de l'échantillon exposée au milieu. Elle se définit par un taux de corrosion qui peut s'obtenir par essais dans le milieu touché Cette usure se reconnaît au relief de la surface, aux aspérités de la couche brunâtre d'oxyde, pour le fer, répartie sur toute la surface exposée [15].



Figure 5 : Corrosion généralisée d'une porte et d'un véhicule.

II. 5. 2. La corrosion localisée (zonale)

C'est la forme la plus insidieuse et elle ne peut être évaluée convenablement par le calcul de son taux. En effet, pour une perte minime, la corrosion localisée peut être catastrophique, par la mise hors service d'une partie de l'équipement. Ce type de corrosion peut se manifester sous différents aspects, à savoir :

a. La corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie.

b. La corrosion caverneuse

Est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique on observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.

c. La corrosion par piqûres

Est produit par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités De quelques dizaines de micromètres de diamètre.

d. La corrosion inter granulaire

Est une attaque sélective aux joints de grains. Souvent, il s'agit de phases qui ont précipité lors d'un traitement thermique [3].

e. La corrosion sélective

Dans des structures multiphasées, ce même type de corrosion galvanique peut dissoudre sélectivement l'une des phases. Dans la graphitisation des fontes par exemple, la phase ferrite (fer à basse teneur en carbone) se dissout totalement dans les eaux acides, en laissant derrière elle une structure poreuse non dissoute de cémentite (carbure de fer). De même, certaines brassures à l'argent ont l'une de leurs multiples phases qui est presque instantanément soluble dans l'eau.

Est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [3],

f. La corrosion érosion

Est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide. Se manifeste dans les condenseurs marins sur les parois intérieures des tubes en milieu d'écoulement. Elle se produit chaque fois que des grosses bulles d'eau turbulente éclatent sur la paroi du tube et amorcent des toute en forme de fer à cheval.

g. La corrosion sous contrainte

Est une fissuration du métal, qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique

h. Fragilisation par l'hydrogène

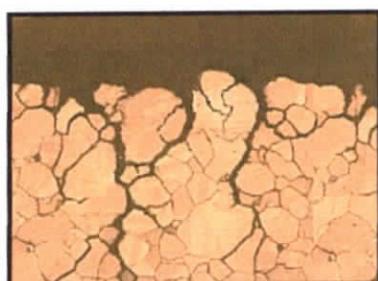
Dans les structures cathodiques des ions H^+ traduisent une production d'atomes d'hydrogène absorbés sur cette surface. Ceci crée de très fortes pressions à l'intérieur du métal pouvant aboutir à une rupture différée.



Corrosion caverneuse



Corrosion par piqûre



Corrosion sous contrainte



Corrosion par érosion



Corrosion généralisée



Fragilisation par hydrogène



Corrosion galvanique



Corrosion sélective

Figure 6 : Aspect morphologique de la corrosion

II. 6. Facteurs de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un nombre de facteurs généralement en relation les uns avec les autres de manière complexe pouvant réagir avec un effet de synergie, ces facteurs sont de deux types : externes et internes. Ils sont résumés de la manière suivante :

a. Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque

- Concentration du réactif ;
- Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO_2 , NH_3 , H_2S , ...);
- Acidité, salinité, résistivité, du milieu ;
- Température, pression ;
- Présence de bactéries.

b. Facteurs métallurgiques

- Composition d'alliage, hétérogénéités cristallines ;
- Procédés d'élaboration ;
- Impureté dans l'alliage, (inclusions) ;
- Traitements thermiques, mécaniques ;
- Additions protectrices.

c. Facteurs définissent les conditions d'emploi

- Etat de surface, défauts de fabrication ;
- Formes de pièces ;
- Sollicitations mécaniques ;
- Emploi d'inhibiteurs ;
- Précédés d'assemblage (couples galvaniques soudures ...) ;
- Croûtes d'oxydes superficielles ;
- Force électromotrice extérieure (électrolyse).

d. Facteurs dépendant du temps

- Vieillissement ;
- Tensions mécaniques internes ou externes ;
- Température, modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous ;
- Modification des revêtements protecteurs ;
- Apparition d'un dépôt (calcaire ou autre) [16].

II. 7. Protection contre la corrosion

La prévention de la corrosion doit commencer déjà dans la phase de planification. En d'autres mots, on doit prendre en considération la corrosion depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation. Il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, pour un coût minimal, comprenant tant les frais d'investissement que d'entretien. En plus, la solution adoptée doit être compatible avec la prescription concernant la protection de l'environnement naturel et doit permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation. Dans Certains cas (aviation, centrales nucléaires, réacteurs chimique, etc.), la minimalisation des risques d'accidents prime sur toute autre considération.

La lutte contre la corrosion englobe les méthodes suivantes :

- Prévention par une forme adaptée des pièces,
- Prévention par un choix judicieux,
- Protection par revêtement,
- Protection par inhibiteurs,
- Protection électrochimique.

II. 8. Aspect thermodynamique de la corrosion électrochimique

Une électrode et une phase, la plus par du temps métallique, en contact avec un électrolyte. Par extension, l'ensemble métal -solution est souvent appelé électrode.

II. 8. 1. Potentiel d'équilibre d'une électrode

Le potentiel d'équilibre ou potentiel réversible d'une électrode représente la différence de potentiel électrique entre le métal et la solution contenant l'un de ses sels à l'équilibre, les deux potentiels (du métal et de la solution) étant uniformes.

Le potentiel d'une électrode ne peut se mesurer dans l'absolu, car un expérimentateur ne mesure qu'une différence de potentiel entre deux électrodes formant une pile électrochimique. Il peut être déterminé par la loi de Nernst [14].

II. 8. 2. Equation de Nernst

L'équation s'applique à une réaction d'électrode à l'équilibre. Elle sert à calculer son potentiel réversible à partir du potentiel standard en fonction des concentrations et de la

température [3]. Pour dériver cette équation, il faut se référer à la réaction d'oxydoréduction.



$$E_{rev} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{oxydant}]}{[\text{réducteur}]} \dots \dots \dots \text{équation de Nernst}$$

$$\text{On peut écrire aussi : } E = E^0 + 2.3 \frac{RT}{nF} \text{Log} \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]}$$

$$\text{Avec : } 2.3 \frac{RT}{F} = 0.059 \quad \text{à } T = 300\text{K} \quad \text{et } n=1.$$

$$\text{Donc : } E = E^0 + 0.059 \text{Log} \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]}$$

E^0 : est le potentiel normal d'équilibre du métal en contact avec une solution à la concentration unité $[\text{ox}] = 1$. Il ne dépend que de la nature du système considéré, le tableau 1 présente quelques valeurs pour des systèmes red/ox.

Tableau 1 : potentiel standard de quelques métaux :

Métal	Li/Li ⁺	Mg/Mg ²⁺	Al/Al ³⁺	Zn/Zn ²⁺	Cr/Cr ³⁺	Fe/Fe ²⁺	Sn/Sn ²⁺	Ag/Ag ⁺
E⁰(V/ENH) A 25°C	-3,05	-2,37	-1,66	-0,76	-0,74	-0.44	0.14	0.80

II.8.3. Potentiel de dissolution ou de corrosion :

Lorsqu'un un métal est plongé dans une solution quelconque, des ions vont passer dans la solution, le métal se dissout (se corrode). Il se charge négativement et prend, par rapport à la solution, un potentiel qui évolue dans le temps et se stabilise à une valeur appelée potentiel de dissolution E_d OU corrosion E_{corr} .

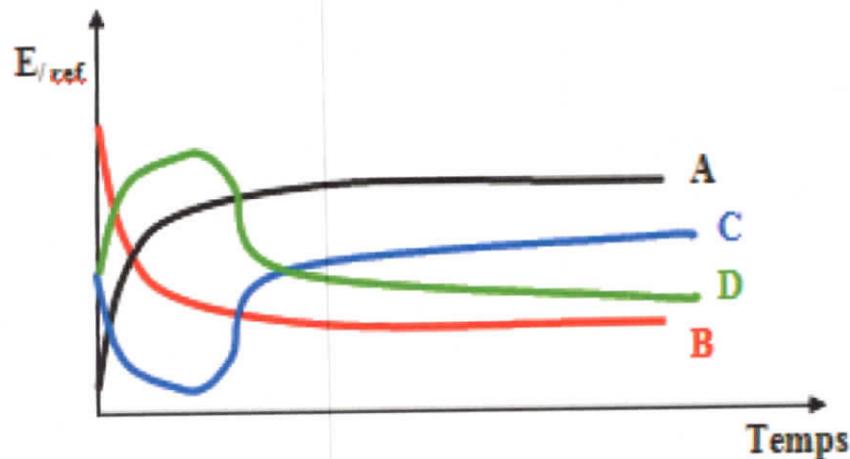


Figure 7 : Différentes allures de potentiel de dissolution d'une électrode.

A : le potentiel de l'électrode est de plus en plus noble (cathodique) dans le temps, il y a une Passivation de la surface ;

B : le potentiel est de plus en plus anodique (moins noble) il y a une attaque (dissolution) ;

C : la passivation du métal intervient après une attaque continue du métal ;

D : c'est le cas d'un film protecteur préexistant avant immersion qui disparaît.

Les métaux peuvent être classés suivant leur potentiel de dissolution dans une solution. Le tableau suivant donne une classification type pour une solution de NaCl 3% à température ambiante.

Tableau 2: Classification des métaux selon le potentiel de dissolution en Solution NaCl 3%.

Métal	Mg	Fe	Sn	Ag
Potentiel initial [V/ENH]	-1,45	-0,34	-0,25	+0,24
Potentiel final [V/ENH]	-1,47	-0,50	+0,25	+0,20

La mesure du potentiel s'effectue à l'aide d'un millivoltmètre à très grande impédance d'entrée ($10^{+12}\Omega$).

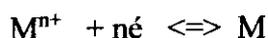
II. 8. 4. Diagramme de Pourbaix

Le potentiel réversible de nombreuses réactions d'électrodes, notamment celles faisant intervenir des oxydes, dépend du pH. Les diagrammes potentiel-pH, aussi appelés

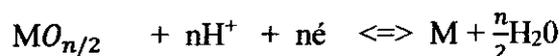
diagrammes de Pourbaix, représentent le potentiel réversible calculé par l'équation de Nernst en fonction du pH.

Pour un métal donné, on trace généralement un diagramme en tenant compte de différentes réactions d'électrode et réactions chimiques possibles :

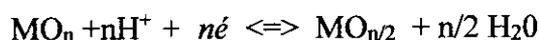
Equilibre électrochimique entre un métal et ses ions :



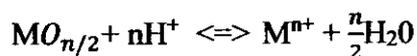
Equilibre électrochimique entre un métal et son oxyde :



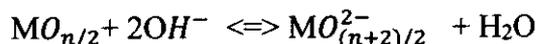
Equation électrochimique entre deux oxydes de degrés d'oxydation différents :



Equilibre chimique en milieu acide entre un oxyde et des ions dissous :



Equilibre chimique en milieu alcalin entre un oxyde et des ions dissous [8] :



II. 8. 4. 1. Diagramme potentiel-pH du fer

Le comportement à la corrosion du fer est particulièrement important. La figure ci-dessous montre le diagramme potentiel-pH du fer. On tien compte de deux oxyde :

Le Fe_2O_3 hydraté et le Fe_3O_3 (magnétite). La concentration des espèces dissoutes vaut 10^{-6} mol/l. Nous remarquons que le fer peut réagir avec les protons en milieu acide et neutre, accompagné d'un dégagement d'hydrogène. En milieu alcalin, par contre, il résiste à la corrosion, car les oxydes formés ne se dissolvent pas facilement par réaction avec les ions hydroxydes.

Ce comportement correspond aux observations pratiques : en milieu acide et neutre, l'acier non protégé se corrodé facilement, alors qu'en milieu alcalin, comme le béton, il résiste bien.[14]

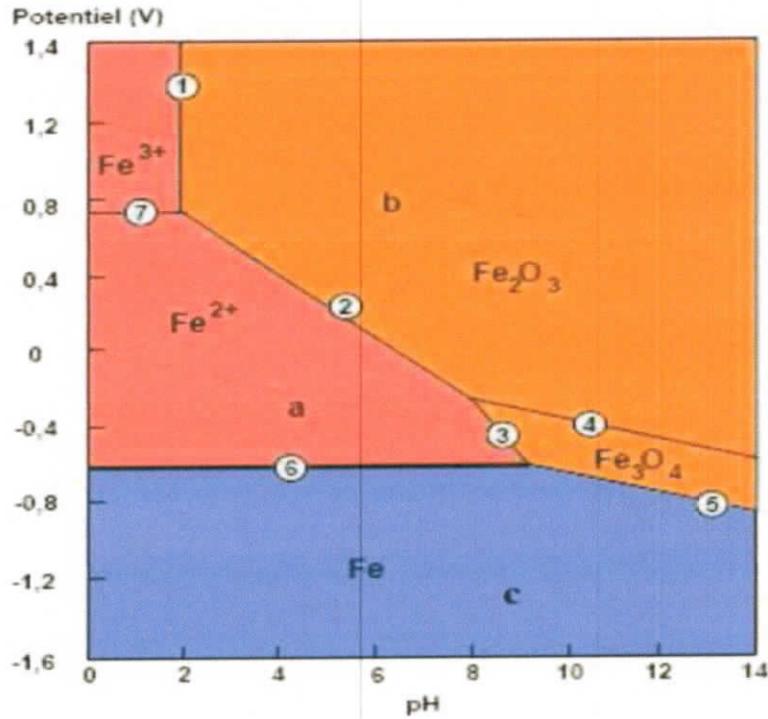
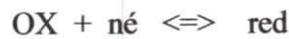


Figure 8 : Diagramme de Pourbaix (Potentiel-pH) relatif au fer en milieu aqueux (Fe-H₂O)

II.9. Aspect cinétique de la corrosion électrochimique

II.9.1. Généralités

Soit le système :



La loi de Nernst permet de déterminer le potentiel « E_{eq} » de l'électrode métallique, au contact avec ses ions, à l'état d'équilibre ceci implique que le courant global est nul ($i=0$) et le système est réversible au sens thermodynamique.

On est donc en présence d'un équilibre dynamique du fait qu'il existe une quantité égale de courant qui circule dans les deux sens (anodique et cathodique).

Nous avons :

$$(I_a)_{eq} = - (I_c)_{eq} \quad \text{Implique} \quad (I_a)_{eq} - (I_c)_{eq} = 0, \text{ c'est-à-dire : } I_a = |I_c| = I_0$$

I_a : courant anodique.

I_c : courant cathodique.

I_0 : s'appelle le courant d'échange de cet équilibre.

Si on fait circuler du courant à travers l'électrode, celle-ci se polarise, les phénomènes ne sont plus réversibles du point de vue thermodynamique, par conséquent une réaction est privilégiée vis-à-vis de l'autre. Le potentiel prend alors une valeur : $E = f(I)$.

On peut ainsi définir une surtension d'électrode (notée η) telle que :

$$\eta = E(I) - E_{eq}(I=0).$$

- η positive indique qu'un courant anodique traverse l'interface métal/solution.
- η négatif signifie un courant cathodique traverse l'interface solution/métal.

La cinétique électrochimique du processus d'oxydoréduction sera alors d'écrite par la relation :

$$I = f(E) \quad \text{ou} \quad I = f(\eta)$$

Les graphes obtenus s'appellent « courbes de polarisations ».

II. 9. 2. Courbes de polarisation

La vitesse des réactions d'électrode dépend du potentiel. Par ailleurs, elle varie linéairement avec la densité de courant, selon la loi de Faraday. La densité de courant mesurée en fonction du potentiel donne une courbe de polarisation qui renseigne sur la cinétique des réactions d'électrode en jeu. Selon la méthode employée, contrôle du courant, on obtient

Respectivement des courbes de polarisation potentiostatique, $i = f(E)$, ou de polarisation galvanostatique, $E = f(i)$.

Pour contrôler une courbe de polarisation potentiostatique, on applique, à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail (à étudier) et une électrode de référence. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre l'électrode de travail et une contre-électrode. Un potentiostat est une source de courant qui, au moyen d'un amplificateur, maintient le potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence constante et égale à la valeur désirée par l'opérateur.

La densité de courant i est égal au courant mesuré I , divisé par la surface A de l'électrode de travail :

$$i = I/A$$

II. 9. 3. Etude de la surtension

Il existe différentes causes de surtension que l'on considère comme additionnelles, car elles caractérisent les mécanismes physiques différents et indépendants :

Surtension ohmique

Elle peut être liée à la formation d'un film superficiel non conducteur, solide (phénomène de passivation), ou gazeux (dégagement d'oxygène et l'hydrogène). Il apparaît donc une résistance supplémentaire au passage du courant.

Surtension de cristallisation

Pour de nombreuses réactions cathodiques de dépôt métallique (électrocristallisation) les atomes qui viennent de se décharger sont dans un état énergétique différent de celui de l'état de base. Les atomes ont tendance à se déposer ou diffuser vers des sites de plus haute énergie qui modifient en conséquence le potentiel d'électrode.

Surtension de concentration

Elle est due à l'apparition de différentes concentrations des ions entre l'interface électrode/solution et le sein de la solution. Cette surtension dépend de la vitesse de diffusion et de différents ions en présence de la vitesse de diffusion maximale limite la vitesse de réaction sur l'électrode.

Surtension d'activation

Cette théorie permet de déterminer la vitesse d'un processus électrochimique dans le cas d'un transfert de charges qui règle seul la vitesse du processus global (étape la plus lente). Un tel régime cinétique est dit régime de transfert électronique ou régime d'activation.

II. 9. 4. Vitesse des réactions de corrosion

En cinétique chimique la vitesse d'une réaction est définie à partir d'un nombre de moles transformé par unité de temps.

En cinétique électrochimique cette vitesse est associée à une intensité du courant (quantité d'électricité transférée par unité de temps).

II.9. 5. Relation fondamentale entre le courant et le potentiel :

La relation entre le courant et le potentiel est donnée par l'équation de BUTLER-VOLMER cette équation exprime la loi fondamentale de la surtension en régime pur de transfert de charges :

La relation de Bulter-Volmère appliquée à la corrosion permet alors de décrire le comportement du système selon l'équation :

$$I = I_{\text{corr}} \{ \exp [2,3(E - E_{\text{corr}})/b_a] - \exp [2,3(E_{\text{cor}} - E)/b_c] \}.$$

b_a et b_c (appelés les coefficient de Tafel) étant des paramètres faisant intervenir des données cinétiques.

Cette expression, permettant d'obtenir simplement la valeur du courant du système, est valable sous certaines conditions :

- il n'y a pas de chute ohmique dans l'électrolyte et les films de surface,
- il n'y a pas de limitation due à la diffusion,
- le potentiel de corrosion E_{corr} n'est pas trop proche du potentiel réversible de chacune des réactions élémentaires,
- le métal joue simultanément le rôle d'anode et de cathode,
- il n'y a pas de réaction électrochimique secondaire, mais un moteur de corrosion exclusif.

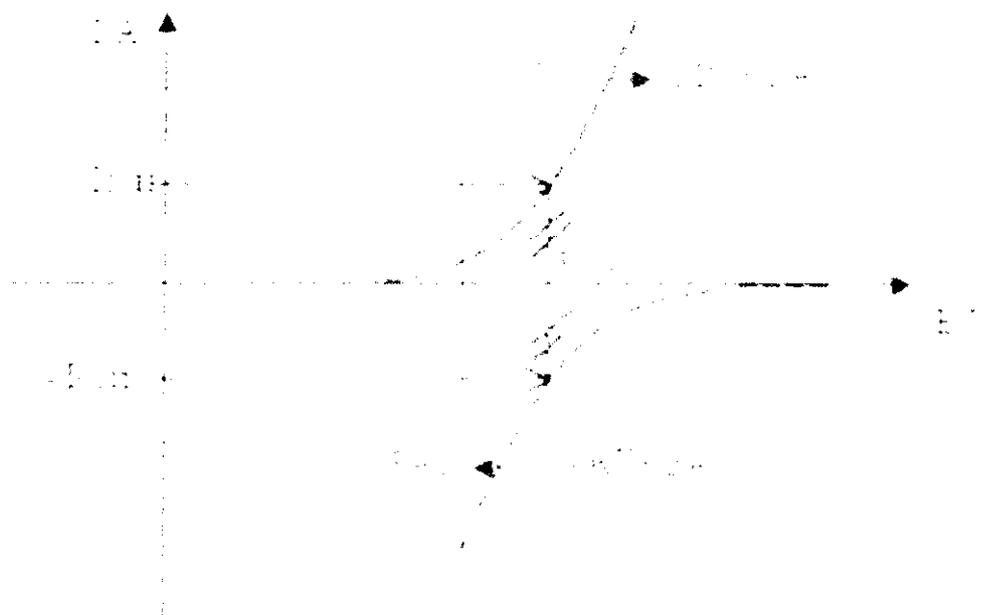


Figure 9 : Contrôle de la relation électrochimique de corrosion par un processus de transfert

II.10. Corrosion des armatures dans le béton.

L'étude des mécanismes de corrosion dans le béton a capté l'attention des chercheurs, ingénieurs et propriétaires d'ouvrage d'art depuis plusieurs années. Différents facteurs de dégradation des aciers d'armature ont été ciblés, la principale cause étant l'interaction avec l'environnement extérieur. La grande utilisation des sels de déglaceage, les cycles de gel-dégel, les contraintes imposées ainsi que les variations d'humidité sont des exemples de conditions favorisant la dégradation des armatures.

II.10. 1. Processus de la corrosion dans le béton :

La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément [19].

- Un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- Une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- La présence d'agent agressif.

Le processus de corrosion des aciers d'armature au sein du béton peut être représenté par le schéma de la figure suivante :

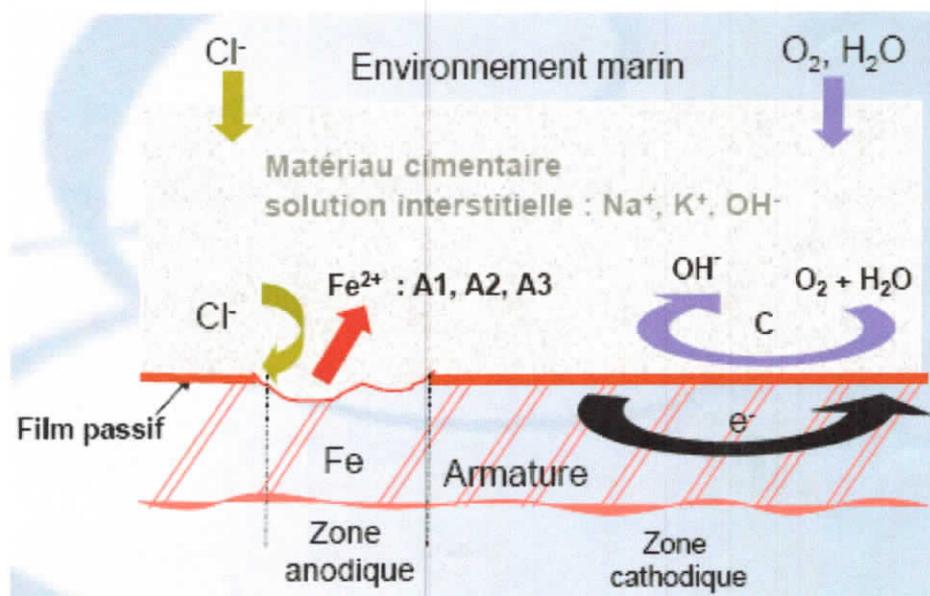


Figure 10 : Mécanisme de corrosions des aciers d'armature

Habituellement, le processus peut être divisé en processus électrochimique fondamental et secondaire :

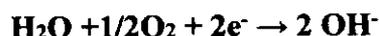
Processus électrochimique fondamental (primaire) :

Les réactions chimiques de base dans les régions anodiques et cathodiques sont les suivantes (en milieu alcalin):

Anode:



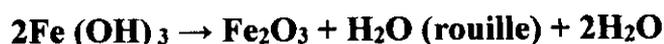
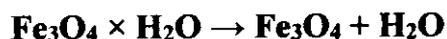
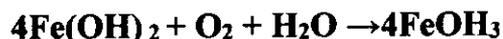
Cathode:



L'anode et la cathode sont reliées par le métal conducteur qui permet le passage des électrons. Le milieu électrolyte environnant (solution interstitielle du béton) assure le transport des ions par diffusion. La rouille apparaît lorsque les ions ferreux (Fe^{2+}) réagissent avec les ions OH^- pour former de l'hydroxyde ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$).

**Processus électrochimiques secondaire :**

En présence d'oxygène, les réactions d'oxydation se poursuivent pour former de nouveaux produits dont certains sont très expansifs. La rouille est formée d'un mélange de ces produits ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Fe_3O_4) selon les réactions ci-dessous.



Pendant le processus, un courant de corrosion se développe entre la cathode et l'anode le taux de corrosion (quantité de fer dissous) est proportionnelle à la valeur de ce courant.

II.10. 2. L'acier dans le béton sain :

L'espace entre les constituants du ciment hydraté est constitué de pores, remplis d'air ou de l'excédent de l'eau introduite lors du gâchage. La solution contenue dans ces pores est en équilibre chimique avec les divers constituants solides, à son contact. Elle est

basique, son pH est de l'ordre de 13, lorsque le béton est sain. Au jeune âge, cette solution est composée essentiellement de calcium (Ca^{2+}) associé à l'ion hydroxyle (OH^-), mais après quelques semaines, ce sont le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) qui sont associés à l'hydroxyle

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

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

L'eau de gâchage du béton permet donc de former autour de l'acier des produits, qui le protègent par passivation. Plus exactement, sous la rouille, une armature est recouverte d'une fine couche protectrice de produits blancs, à base de ferrite et d'hydroxyde de calcium.

Une telle protection disparaît si la solution interstitielle a disparu (cas des grandes fissures qui atteignent les armatures) ou ne correspond plus à un béton sain.

II.10. 3. Etapes de corrosion des armatures dans le béton :

Selon Tuutti [20], l'évolution de la corrosion des aciers d'armature s'effectue généralement en deux étapes, figure 11 :

Au début, l'acier est stabilisé par la couche de passivation qui empêche la formation de rouille.

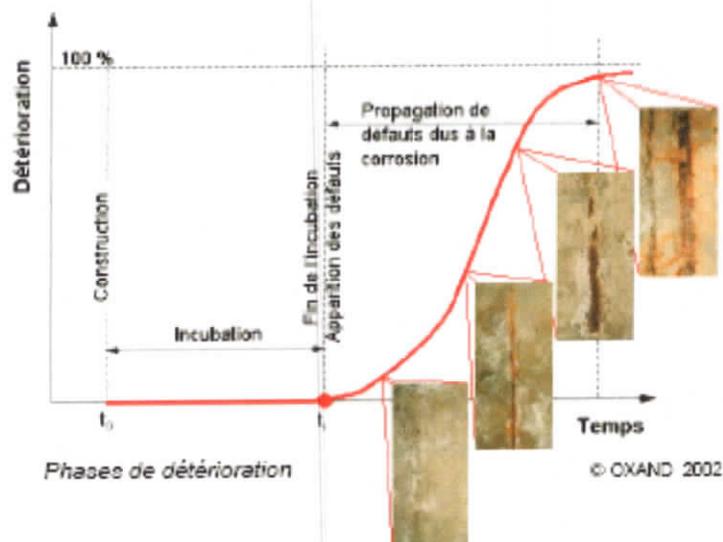


Figure 11 : Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton d'enrobage [20].

Etape 1 (amorçage) :

Durant la phase d'amorçage, appelée encore d'incubation, se produit la dé passivation progressive de l'acier. Cette dé passivation peut être engendrée par de nombreux facteurs :

- Carbonatation (baisse du pH).
- Penetration des ions chlorure

Etape 2 (propagation):

Durant la deuxième phase se produit la propagation de la rouille produite par des réactions d'oxydation à la surface du métal. La formation des produits d'oxydation provoque un gonflement qui fini par provoquer la fissuration de l'enrobage.

En pratique, on doit donc faire en sorte que la période d'amorçage soit la plus longue possible. On peut allonger cette étape en prévoyant des épaisseurs de recouvrement suffisantes et en choisissant une formule de mélange permettant de diminuer la perméabilité du béton (eau, gaz).

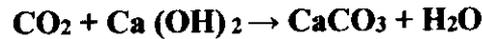
II.10. 4. Dépassivation des armatures

Deux agents extérieurs contribuent à la dépassivation des aciers : le dioxyde de carbone (carbonatation) et les ions Chlorures (pénétration des Chlorures).

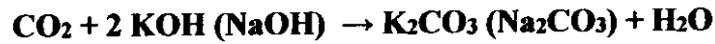
II.10.4. 1. La carbonatation

La carbonatation entraîne des modifications notables dans la structure du matériau. Le Dioxyde de carbone CO_2 qui pénètre dans le béton se dissout dans l'eau qu'il contient et réagit avec l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$, sous forme de portlandite, ou de silicates

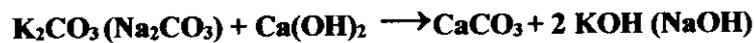
de calcium hydratés, pour former du carbonate de calcium CaCO_3 . Ce phénomène est appelé carbonatation, il entraîne une diminution du pH de la solution interstitielle.



En présence de bases alcalines (NaOH, KOH) la solubilité de la chaux est relativement faible et la réaction est ralentie. Cependant les bases alcalines peuvent se carbonater elles aussi:



La carbonatation des bases alcalines augmente la solubilité de la chaux qui peut alors se carbonater en plus grande quantité.



La carbonatation du béton est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus profondes. On peut mesurer la profondeur de carbonatation par un essai de coloration à la phénophtaléine, figure 12.

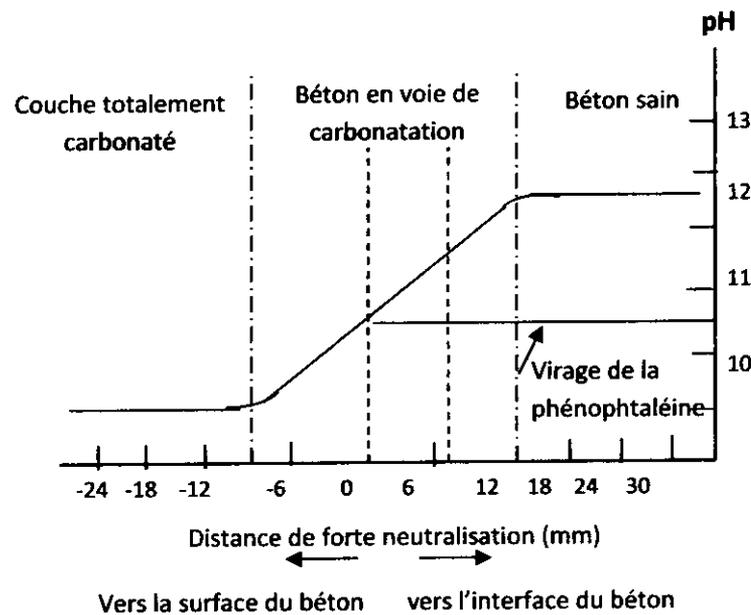


Figure 12 : Gradient de pH en fonction de la profondeur carbonatée.

La vitesse de carbonatation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la perméabilité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant. La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité comprise entre 40%, 80% et 60% (semble être la valeur la plus critique).

Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO₂. Dans les environnements très humides, le béton est saturé, ce qui ralentit considérablement la diffusion du CO₂.

On peut ralentir la progression de la carbonatation en: (i) augmentant le dosage en ciment. (ii) diminuant le rapport E/C, (iii) augmentant le temps de cure, (iiii) augmentant la résistance à la compression, du béton.

II.10.4. 2. La pénétration des chlorures :

La corrosion des armatures générée par la pénétration des ions chlorés est la principale cause de dégradation des structures à béton armé. Les chlorures peuvent être d'origine :

- Interne:** eau de gâchage, matériaux de construction contaminés,
- Externe:** environnement marin, sel de devergias.

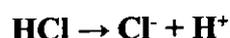
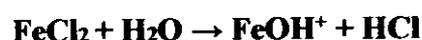
Les chlorures agissent dans le mécanisme de corrosion de deux manières :

- ils diminuent la résistance de l'électrolyte (solution interstitielle) ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre,
- ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dépassivant la couche superficielle en jouant le rôle d'un catalyseur.

II.10.4. 2. 1. Mécanisme d'attaque par les chlorures :

Aux endroits où la couche a été détruite, l'acier se dissout (zone anodique), alors que le reste de la surface encore passivée correspond à la zone cathodique. Le rapport cathode/anode élevé favorise la progression localisée et en profondeur de la corrosion (corrosion caverneuse).

Les réactions de corrosion au niveau de la cellule caverneuse sont encore mal comprises. Les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former de l'acide chlorhydrique. Ces réactions engendrent une importante baisse du pH. (pH = 3 à 5). La dissolution du fer est alors accélérée. Les ions chlorures sont constamment recyclés pendant tout le processus de corrosion.



En effet, il y a trois théories qui expliquent le mécanisme d'attaque par les chlorures :

1- Les ions Cl^- pénètrent dans le film d'oxyde à travers ses pores ou ses imperfections plus facilement que d'autres ions.

2- Les ions Cl^- sont adsorbés sur la surface du métal en concurrence avec l'oxygène dissout et les ions d'hydroxyle.

3- Les ions Cl^- rivalisent les ions OH^- pour les Fe^+ produit par corrosion est forment un complexe solubles de chlorures ferreux qui peut diffuser loin de la zone anodique en détruisant le film de passivation de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ pour permet la poursuite de la corrosion.

* Pour cette raison la corrosion induite par les chlorures est considérée comme la plus sévère, du fait que ces ions ne sont pas consommés mais ils agissent comme un catalyseur.

En pratique, il est important de limiter la quantité de chlorures dans le béton (pénétration par diffusion ou via les adjuvants, les granulats, l'eau de gâchage).

Des essais en laboratoire, suggèrent que la propagation de la corrosion s'amorce pour une concentration en ions chlorures de l'ordre de 0,5% en poids de ciment.

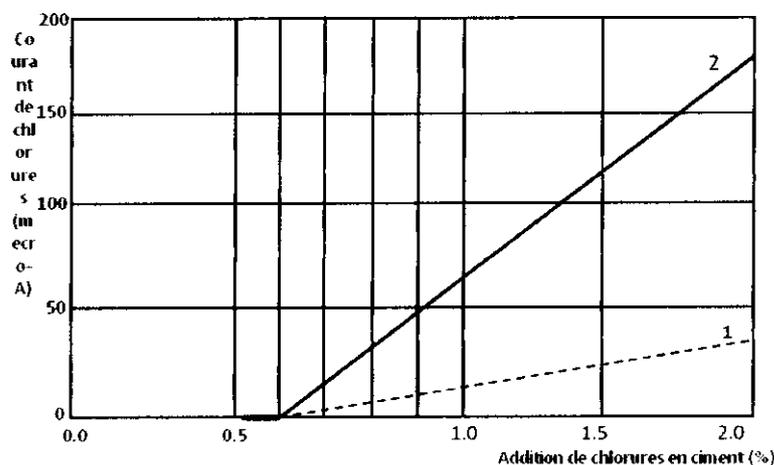


Figure 13 : Influence du pourcentage des chlorures introduits dans le béton sur le Courant de corrosion [21].

On ne peut pas établir une seule concentration maximale en chlorure puisque cette concentration critique dépend du pH. Une très faible modification du pH produit une très grande variation de la concentration en OH^- (et par conséquent de la concentration critique en chlorures). Dans le béton carbonaté (pH faible, environ 9) même une faible concentration en chlorures peut initier la corrosion.

Les chlorures peuvent être piégés chimiquement (par les aluminates) ou physiquement (par adsorption sur les parois des pores). Les chlorures piégés interviennent peu lors du processus de corrosion. Certains granulats peuvent contenir des chlorures. Ces chlorures ne peuvent pas être lixiviés dans la solution interstitielle. Ils ne jouent donc

aucun rôle dans le processus de corrosion. Dans les bétons très faiblement saturés, la corrosion ne se produit pas nécessairement même si la concentration en chlorures est très élevée (il n'y a pas assez d'eau pour amorcer la corrosion). Dans les bétons totalement saturés la corrosion ne se produit pas nécessairement (même si la concentration en CL^- est élevée) puisqu'il peut y avoir un manque d'oxygène pour entretenir le processus de corrosion [21].

II.10.4. 2. 2. Mécanisme de diffusion des chlorures :

Profil de teneur en chlorures :

La teneur en chlorures à diverses profondeurs (profil) dans le béton après un certain temps de contact est illustrée par la figure 14 a. Il s'agit, le plus souvent, de chlorures dissous dans l'eau.

Lorsque le béton subit alternativement une humidification et un séchage, la solution qui contient des chlorures peut pénétrer avec une convection de vitesse b . Ce cas correspond essentiellement aux constructions exposées aux embruns.

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

Où C est la teneur en chlorure à une profondeur x et à l'instant t et D le coefficient de diffusion, le flux dC/dt est simplement diminué la de quantité b . dC/dt .

Par ailleurs, lorsque l'humidité relative de l'atmosphère autour du béton fluctue, la teneur en eau dans le béton n'est ni homogène, ni stable. Ainsi, le cœur du matériau reste saturé d'eau, alors même que sa teneur en eau varie dans l'espace (gradient) et dans le temps. Ce fait influe sur la pénétration des l'eau chlorures dissous dans l'eau.

Plus précisément, au cours d'un séchage du béton, l'eau s'évapore et les chlorures restent dans le matériau soit sous forme adsorbée sur les parois des pores, soit en formant des cristaux de sel. Si par la suite ce béton est ré-humidifié, ces sels sont de nouveau dissous dans l'eau entrante. Le profil de teneur en chlorure peut ainsi différer de ce qui correspond à une pénétration de chlorures en immersion constante figure 14b.

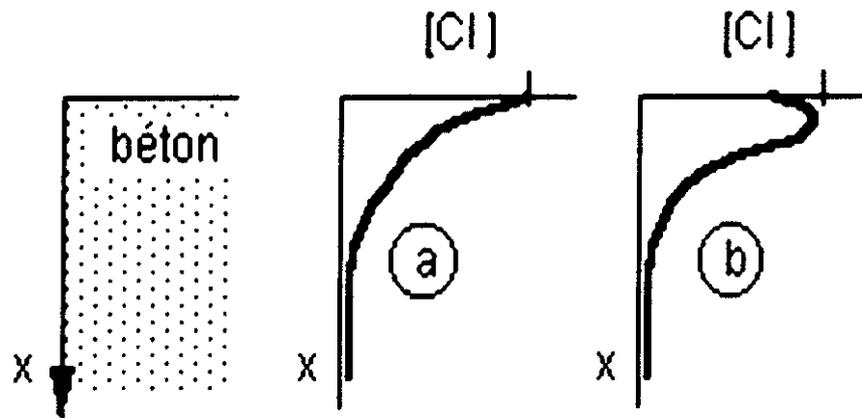


Figure 14 : Profils de la teneur en chlorure [Cl], dans un béton dans l'atmosphère

a) sous humidité relative constante, b) sous des cycles d'humidification – séchage.

II.10. 5. Facteurs influents la corrosion des armatures :

La tenue, face à la corrosion, des armatures est fonction d'un nombre de paramètres concernant le béton et l'acier ainsi que les propriétés existant à leur interface.

II.10. 5. 1. Influence de la composition du béton :

Toute modification de la formulation d'un béton produisant une augmentation de sa compacité ou une réduction de sa perméabilité a généralement un effet favorable sur la résistance à la corrosion. En effet, une bonne qualité du béton joue le rôle d'une barrière physique contre les espèces agressives pour protéger l'armature de la corrosion.

Les principaux paramètres de composition qui influencent la corrosion des aciers d'armature sont :

- Le rapport E/C: la diminution du rapport E/C améliore considérablement la protection contre la corrosion du fait qu'elle diminue la perméabilité du béton.
- Les ajouts minéraux: les cendres volantes et la fumée de silice ont généralement une influence bénéfique puisqu'elles produisent une très nette diminution de la perméabilité, du coefficient de diffusion et de la conductivité du béton.

II.10. 5. 2. Influence de l'humidité :

La vitesse de corrosion dépend fortement du taux d'humidité du béton car celui-ci influence directement la conductivité et la diffusion de l'oxygène. Pour des taux d'humidité

inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les régions anodiques mais la faible conductivité du béton limite la vitesse de corrosion. Plus le taux d'humidité augmente, plus la conductivité du béton augmente, mais alors, la diffusion de l'oxygène vers les barres se fait de plus en plus difficilement. Les vitesses de corrosion les plus élevées sont généralement observées lorsque le taux d'humidité est voisin de 95%.

II.10. 5. 3. Influence de l'épaisseur d'enrobage:

L'enrobage de béton autour d'une armature joue deux rôles dans la possibilité de corrosion de cet acier. En premier lieu, il agit comme une barrière mécanique qui freine voire arrête la pénétration des corps susceptibles de corroder les armatures.

Ensuite, ce sont les propriétés de la solution interstitielle au contact de l'acier qui indiquent les possibilités de corrosion ou de passivation de ce métal.

II.10. 6. Détermination de l'état de corrosion :

Il existe une variété de techniques expérimentales mises en œuvre pour la détermination de l'état des armatures vis-à-vis la corrosion, parmi les quelles :

a-Mesure du Potentiel de corrosion :

On peut évaluer l'état de corrosion des aciers d'armature d'une structure à béton en faisant un relevé géographique du potentiel de corrosion. La technique consiste à mesurer localement la différence de potentiel entre la surface de l'enrobage et la barre sous-jacente (half-cell potential), figure 15-a.

b-Taux de corrosion (courant de corrosion)

Le taux de corrosion est probablement la meilleure technique pour évaluer l'activité de corrosion dans le béton armé. Pour mesurer le courant de corrosion, on utilise un appareil comportant 3 canaux. Il comporte: une connexion sur une barre d'armature, une demi-cellule et une électrode auxiliaire qui permet d'appliquer un courant de perturbation, figure 15 b.

Le taux de corrosion des armatures dans le béton peut être déterminé également par la mesure de perte du poids ou par la mesure de la réduction de la section des armatures. Ces deux techniques présentent comme résultat un taux de la corrosion moyen. L'inconvénient c'est qu'elles sont méthodes destructives [23].

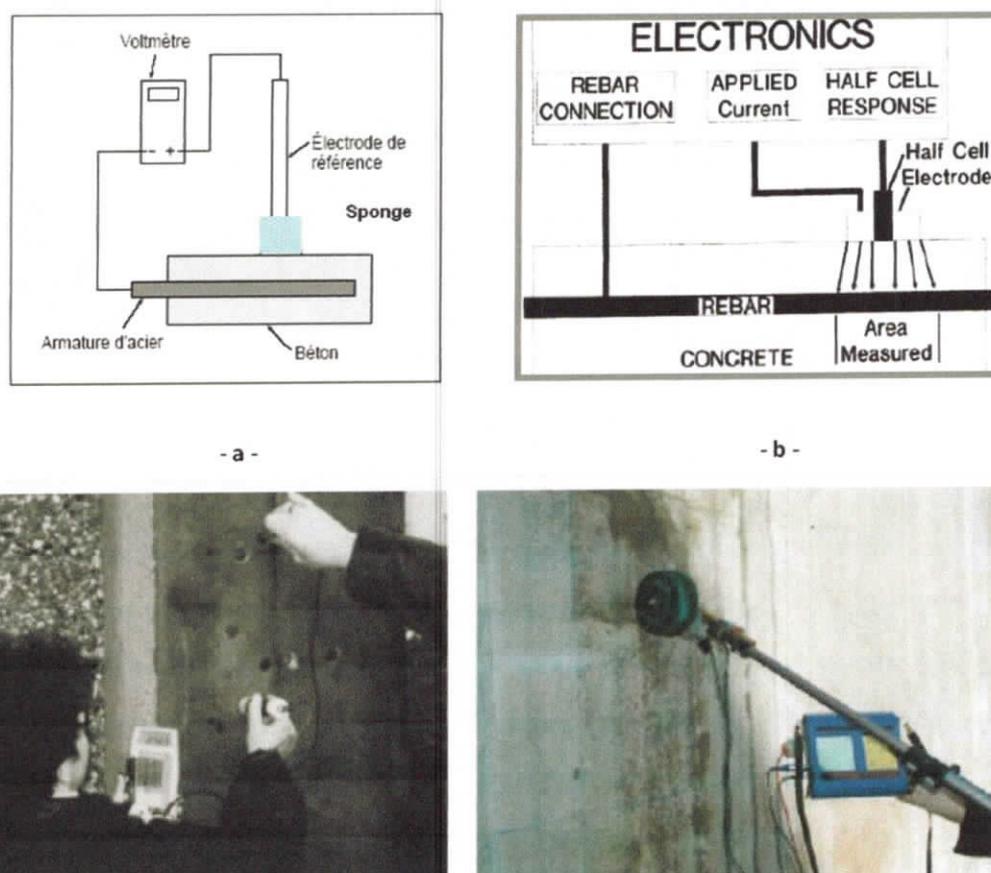


Figure 15 : Techniques d'évaluation de l'état de corrosion des armatures.

II.10. 7. Prévention contre la corrosion dans le béton

La protection offerte par le béton est fonction de la qualité du béton de recouvrement et de l'épaisseur de recouvrement. Ainsi, dans la mesure où l'on veut améliorer la tenue des ouvrages de béton armé, il faut porter une attention particulière lors de la fabrication d'un béton. Il faut également respecter l'épaisseur d'enrobage exigée par la norme.

Il existe aussi des moyens pour prévenir la détérioration du béton dans les environnements agressifs comme, par exemple, l'utilisation de la protection cathodique, les inhibiteurs de corrosion, l'utilisation d'armatures galvanisées ou le revêtement des armatures avec de l'époxy. Cependant, le coût de ces techniques est relativement élevé et n'est pas toujours justifiable. Par ailleurs, l'utilisation de ces méthodes de protection demande beaucoup de précautions: par exemple, l'utilisation d'armatures recouvertes d'époxy demande une manipulation très méticuleuse car un simple défaut de la surface de recouvrement peut annuler la protection et amplifier la dégradation due à la corrosion. En conclusion, quelque soit le type de protection contre la corrosion utilisé, il est difficile d'en prédire la performance.

II.10. 8. Etude de la corrosion des armatures dans les solutions aqueuses simulées du béton :

Le béton est un matériau poreux; ses pores retiennent une quantité considérable d'un fluide connu sous le nom de « solution des pores du béton ». La chimie de cette solution est importante pour la compréhension du processus de migration dans la pâte du ciment et la mobilité des oligo-éléments, y compris les chlorures. La composition de la solution des pores peut être déterminée en pressant la solution du cœur du béton au moyen d'un appareil spécial de haute pression. Il a été trouvé que les hydroxydes du potassium et du sodium sont les composants fondamentaux de cette la solution. La plupart des solutions simulées sont à base de KOH, NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui sont tous des produits d'hydratation du ciment. Les deux premiers éléments ont comme origine K_2SO_4 et Na_2SO_4 (dans le clinker du ciment). De ce fait, la détermination de la composition chimique de la solution des pores du béton a permis la préparation de la solution simulée du béton pour la réalisation des essais électrochimiques en laboratoire dans des conditions proches de celles en service ce qui permet également de réduire considérablement le temps d'expériences.

II.10. 9. Nature des solutions simulées :

Le travail en solution doit permettre la mise en évidence des zones de corrosion active et passive (pseudo-passive) du fer (ou de l'acier doux). Ainsi deux grandes familles de solutions

Sont utilisées dans la littérature pour reproduire les caractéristiques chimiques d'un béton sain ou carbonaté de façon simplifiée.

- Solution alcaline pour le béton sain : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à saturation, NaOH ou KOH
- Solution à base de carbonate : NaHCO_3 , Na_2CO_3

Différents ajouts d'espèces sont souvent considérés pour être plus représentatif du milieu considéré ;

- Les chlorures sous forme de NaCl ou CaCl_2 ,
- Les silicates sous forme de Na_2SiO_3 ,
- Les sulfates sous forme de Na_2SO_4

Les solutions à base de carbonate sont toujours réalisées en système fermé. Deux types de solution à base de carbonate sont réalisés :

- Les solutions à pH constant mais à force ionique variable. Dans ces conditions le rapport :

$$\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-} \text{ est constante en solution } (\sum \text{HCO}_3^-) \text{ est variable.}$$

- Inversement, les solutions à pH variable mais à force ionique constante. Dans ce cas, le rapport : HCO_3^- / CO_3^{2-} est variable mais la somme des carbonates en solution ($\sum HCO_3^-$) est constante.

Certains auteurs n'ont pas considéré l'évolution du pH avec le rapport HCO_3^- / CO_3^{2-} et la pression partielle de CO_2 , il paraît alors nécessaire de réinterpréter leurs résultats expérimentaux.

Dans la littérature, aucune étude ne présente les résultats relatifs au système CO_2 / H_2O ouvert, à l'équilibre avec la pression partielle de CO_2 de l'atmosphère, pour lequel l'évolution de la teneur en carbonate avec le pH est différente de celle notée en système fermé.

Il est important de noter que de très nombreux auteurs ont utilisé les solutions alcalines avec ajouts de chlorures afin d'étudier les mécanismes de dépassivation (cas de notre étude). En revanche, peu d'auteurs ont utilisé des solutions de carbonate tamponnées pour étudier l'évolution des zones d'activité et de passivité des armatures en acier dans le béton armé.

Néanmoins, ces solutions sont utilisées très largement pour simuler de manière simplifiée différents milieux carbonatés où apparaissent des cas de corrosion, tels que :

- Corrosion des canalisations de gaz et de pétrole dans les sols en relation avec la corrosion sous contrainte (CSC) de ces structures.
- Corrosion des aciers doux dans les saumures
- Corrosion des aciers doux en milieu géologique dans le contexte du stockage des déchets nucléaires

Ces solutions sont également utilisées pour la synthèse des produits de corrosion intermédiaires du fer (rouille vert chlorurée, sulfatée ou carbonatée) et pour l'étude de leurs propriétés physico-chimiques.

Ces travaux permettent d'identifier les paramètres dimensionnant relatifs à la corrosion du fer ou des aciers doux dans les milieux carbonatés, bien que ces solutions simulées ne reproduisent pas fidèlement la chimie de la solution interstitielle d'un béton. En particulier, pour un béton déradé chimiquement (lixiviation ou carbonatation), la présence non négligeable de silicates en solution pourrait avoir un rôle passivant vis-à-vis de l'armature.

CHAPITRE III

Modes et méthodes opératoires

III.1. But du travail

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet de l'addition du liège sur les propriétés anticorrosion du béton. A cet effet nous avons choisi de travailler dans deux milieux distincts :

- ✓ milieu aqueux : solutions simulées du béton, contaminé ou non par les chlorures,
- ✓ milieu cimentaire : spécimens en béton ordinaires préparés au laboratoire.

III.2. Matériau d'étude

Nous avons employé comme matériau un acier rond à béton utilisé dans le domaine de construction. L'acier utilisé est représenté sur la figure suivante (image du microscope optique).

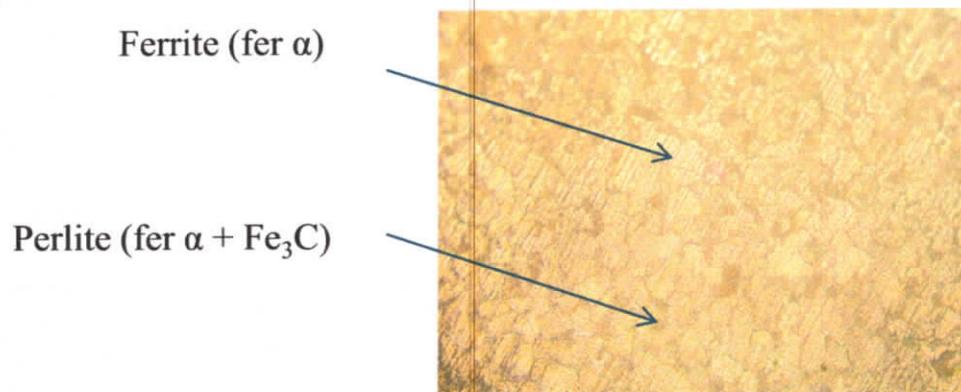


Figure16 : Structure métallographique de l'acier

Les observations au microscope métallographique ont montré que l'acier utilisé est d'une structure ferrito-perlitique, figure16, c'est-à-dire composée de deux phase cristallines distinctes : ferrite et perlite, dont la première est la plus prédominante, ce qui lui confère de bonnes propriétés de ductilité et de faibles propriétés de dureté.

III.3. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été découpés à partir d'une barre d'acier rond à béton lisse au moyen d'une scie à métaux.

Nous avons utilisé deux types d'échantillons :

➤ Echantillons ont découpés suivant la section droite de la barre d'acier de 6mm de diamètre. Après avoir effectué une connexion électrique par soudage d'un fil conducteur blindé, ces échantillons ont été enrobés de résine époxy pour obtenir une surface de travail de l'ordre de 0.28 cm^2 , (figure.17-a). Par la suite les échantillons ont subis un polissage sur du papier d'émeri de taille décroissante 220, 320, 500, 800 et 1200 dont le but est d'éliminer toute trace d'oxyde et obtenir une surface plane et bien polie .

➤ Echantillon de 10 cm de longueur et de 6 mm de diamètre (figure 17-b). Ils sont utilisés pour être incorporés dans le mortier, Dans ce cas la surface active sera celle latérale, elle a été délimité par du ruban adhésif, elle est de l'ordre de 2.5 cm². Ces échantillons ont subi un décapage mécanique à l'aide à l'aide d'une brosse métallique rotative.

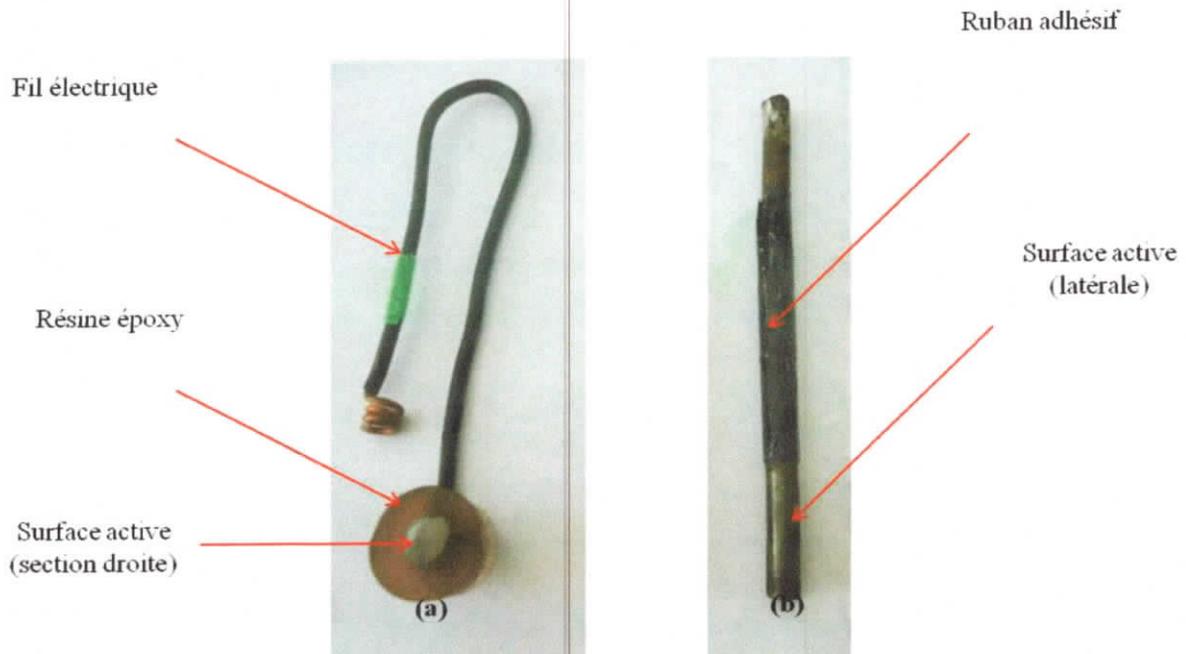


Figure17: Modèle des électrodes de travail utilisé.

* Avant chaque essai, les échantillons doivent subir une opération de dégraissage à l'acétone suivi d'un rinçage à l'eau distillée et séchage à l'air libre.

III.4. Milieu de l'étude

III.4.1. Solutions simulées du béton

Le travail dans les solutions aqueuses simulées du béton permet de réduire considérablement le temps des expériences réalisées pour l'étude de phénomène de corrosion des aciers dans le béton, de plus il permet de modifier aisément la compositions de ces milieux pour voir l'influence de telle ou tel composé chimique (éléments agressif, inhibiteurs...etc.).

La composition de la solution des pores peut être déterminée en pressant la solution du cœur du béton au moyen d'un appareil spécial de haute pression. Il a été trouvé que les hydroxydes de potassium et de sodium sont les composants fondamentaux de cette la solution. La plupart des solutions simulées sont à base de KOH, NaOH et Ca(OH)₂ qui

sont tous des produits d'hydratation du ciment. Les deux premiers éléments ont comme origine K_2SO_4 et Na_2SO_4 (dans le clinker du ciment).

A cet effet, nous avons choisi de travailler dans deux types différents de solutions simulées :

Solution simulée SS1 : c'est une solution saturée de $Ca(OH)_2$ d'un pH de l'ordre de 12,50

Solution simulée SS2 : solution constituée de 0.55M KOH + 0.16M NaOH, c'est une solution très alcaline, son pH est de 13,7

Remarque :

- ✓ L'utilisation de ces deux types de solutions simulées ayant des valeurs de pH différentes va nous permettre de mettre en évidence l'effet de l'alcalinité du milieu interne du béton qui évolue en fonction du temps,
- ✓ Afin de simuler l'environnement d'un milieu cimentaire chloruré nous avons contaminé les différentes solutions simulées par les ions chlorés introduits sous forme de NaCl une concentration de 3% (teneur de moyenne de l'eau de mer en NaCl),

III.4.2. Milieux cimentaires

Le deuxième milieu utilisé pour l'évaluation du comportement à la corrosion de notre acier d'armature est le mortier (ciment + sable).

Dans ce milieu cimentaire distinct nous allons évaluer le comportement électrochimique de l'acier sans et en présence de fines de liège.

Deux types de spécimens ont été réalisés :

- Spécimens d'une forme cylindrique de 45 mm de diamètre et 90 mm de hauteur dans lesquels sont encreées les armatures en acier pour les tests de corrosion.
- Spécimens de mêmes dimensions et même géométrie sans armatures destinés à la réalisation des essais mécaniques de compression.

III.4.2.1. Préparation des spécimens en mortier.

Les matériaux utilisés pour la préparation de spécimen en mortier sont les suivants :

- ✓ Le sable : lavage du sable avec de l'eau distillée (1 litre d'eau distillée pour 1kg du sable) récupération de l'eau de lavage, et puis le séchage du sable à $105^{\circ}C$ au four.
- ✓ Le ciment,
- ✓ L'eau distillée.

Etapes de préparation :

Après avoir effectué l'opération du malaxage à la main du mortier (223.5g du sable, 74.5g du ciment, 37.3ml de l'eau distillée), ce dernier a été coulé dans un moule en PVC de 45mm de diamètre et 90mm de hauteur. Au moment de la coulée, la barre d'acier d'armature de 10 cm de longueur et de 6 mm de diamètre, préalablement nettoyé et dégraissé ont été placé au centre et à 2cm en haut de la base du moule. Une fois le coulage du béton est achevé les spécimens ont été couverts par des couvertures en plastique afin d'évité l'évaporation de l'eau de gâchage. Après 48 heures de prise dans les moules, les spécimens ont été démoulés et immergés complètement dans de l'eau distillée pour une période de cure de 14 jours.

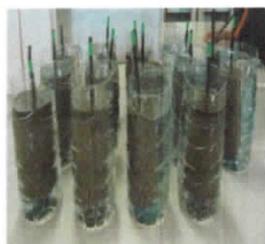
NB : La cure est une phase importante dans la préparation du mortier, elle assure l'achèvement des réactions d'hydratation du ciment ce qui donne au mortier les propriétés mécaniques demandées.



Coulage et prise des spécimens



Démoulage des spécimens



Spécimens en phase de cure

Figure 18 : Etapes de préparation des spécimens en mortier**III.4.2.2. Préparation des spécimens en mortier avec l'ajout du liège.**

Le liège est un produit agricole et un matériau présent dans l'écorce de quelques arbres, et notamment celle du chêne-liège. Il protège l'arbre des insectes, du froid et des intempéries tout en lui permettant de respirer, par de minces canaux appelés lenticelles (les

trous du liège et de certains fruits). L'arbre chêne-liège est un puits de carbone d'autant plus efficace que l'arbre est exploité à produire du liège.

Le liège est un produit de faible densité, antistatique, isolant thermique, acoustique et vibratoire. Il résiste relativement bien au feu et également à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Contrairement à la croyance populaire, le liège est inflammable au même titre que tout composé ligneux. Il est souple et se décompose lentement.

Les caractéristiques du liège (souple, isolant, etc.) font de lui un matériau très demandé pour l'élaboration d'articles particuliers : siège de voiture, articles de sports, canne à pêche, constituants de produits destinés à l'industrie de pointe, joints de dilatation destinés à l'industrie du bâtiment, etc.

La pollution atmosphérique due aux dégagements des fines de liège par l'usine de Jijel est devenue une réelle préoccupation publique suite à son impact environnemental indésirable. De ce fait, nous avons pensés à travers cette étude à la valorisation de ce type de déchet par son utilisation comme adjuvant pour la préparation du mortier.

L'objet de ce travail est de résoudre le problème de la pollution atmosphérique d'une part, et d'autre part de tester l'effet du liège sur le comportement anti corrosion des aciers dans le mortier.

Préparation du liège :

Le liège utilisé doit être tamisé pour avoir les deux granulométries (0.08mm, 0.2mm), lavé en plusieurs fois (6 à 8fois) avec du l'eau distillée ensuite le séché à l'étuve et après filtré à l'aide d'un papier filtre.

Les spécimens sont préparés de la même procédure que les spécimens en mortier avec l'addition du liège avec différentes concentrations (1%, 3%, 5%) et différentes granulométries (0.08mm, 0.2mm). les différents spécimens sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau 3 : différents concentration et granulométrie du liège utilisé :

Teneur en liège (% / ciment)	1%		3%		5%	
	0.08	0.2	0.08	0.2	0.08	0.2
Granulométrie du liège (mm)						

III.5. Techniques électrochimiques

III.5.1. Mesure du potentiel de corrosion

L'évolution du potentiel d'abandon de l'échantillon en fonction du temps, pour de longues durées d'immersion, permet de suivre l'évolution du régime stationnaire. Ces mesures permettent aussi de révéler d'éventuelles transitions d'un état actif à un état passif du métal. Cependant, ces tests ne donnent pas de renseignements sur la cinétique de corrosion.

Dans notre cas, l'évolution du potentiel de corrosion de l'acier a été suivie dans les solutions simulées chlorurées ou non, avec et sans présence d'inhibiteurs (nitrite de sodium). Les mesures en été effectuées également par rapport à une électrode de référence au calomel saturé (ECS) à l'aide d'un millivoltmètre électronique à haute impédance d'entrée.

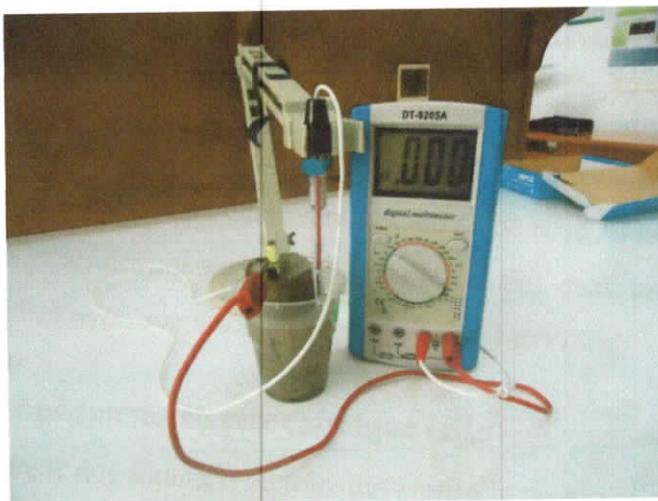


Figure 19 : Mesure de potentiel libre

III.5.2. Courbes de polarisation

Dans notre étude, les courbes de polarisations (I(E)) ont été réalisées à l'aide du montage expérimental représenté par la figure 20. Il est constitué:

- ✓ d'une cellule de mesure qui est un système à trois électrodes: une électrode de référence au calomel saturé (ECS), une contre électrode en platine pour la mesure du courant et une électrode de travail (voir forme et surface active sur la figure 17).
- ✓ d'un Potentiostat/Galvanostat de type Radio-Mater PJP 201, piloté par le logiciel VoltaMaster version 3.10.

- Cellule à trois électrodes
- Potentiostat/galvanostat



Figure 20: Montage expérimental.

Avant chaque essai électrochimique, nous avons procédé à une mesure du potentiel libre après atteinte de l'état stationnaire généralement obtenu au bout de 30 minutes. Les courbes de polarisation potentiostatiques ($I(E)$) ont été tracées dans une gamme de potentiel de -800 à $+800$ mV/Ref avec une vitesse de balayage de 1 mV/Sec.

III.5.3. Spectroscopie d'impédances électrochimique (EIS)

La SIE repose sur la mesure d'une fonction de transfert suite à la perturbation volontaire du système électrochimique étudié. Ce système peut être considéré comme étant une « boîte noire » qui réagit en émettant un signal $y(t)$ quand il est soumis à une perturbation $x(t)$ (figure I.1). Les deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ sont alors reliés par une fonction de transfert $H(\omega)$ telle que $Y(\omega) = H(\omega) X(\omega)$, $X(\omega)$ et $Y(\omega)$ étant respectivement les transformées de Fourier de $x(t)$ et $y(t)$.

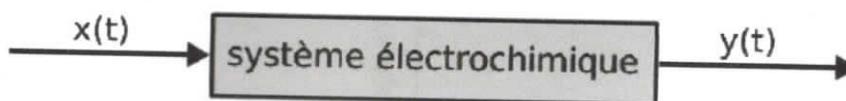


Figure 21 : Schéma d'une fonction d'état

Classiquement, la perturbation imposée est sinusoïdale. Le signal appliqué est donc de la forme : $x(t) = A \sin(\omega t)$ et la réponse du système est $y(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$ avec une fréquence f , une pulsation $\omega = 2\pi f$ et un déphasage φ . L'impédance électrochimique se définit comme étant le nombre complexe $Z(\omega)$ résultant du rapport :

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)}$$

Ou, en mode potentiostatique , $\Delta E(\omega)$ est la perturbation imposée à un potentiel choisi E_0 , et $\Delta I(\omega)$ la réponse en courant du système étudié avec une composante continue I_0 (Fig I.2). Il est aussi possible d'utiliser le mode galvano statique. Dans ce cas, c'est une perturbation en courant de faible amplitude qui est appliquée au système et c'est la réponse en potentiel qui est mesurée.

L'impédance $Z(\omega)$ est un nombre complexe qui peut être écrit sous deux formes équivalentes :

$$Z(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \text{ ou } Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_j(\omega) \text{ avec } j = \sqrt{-1}$$

$|Z|$ étant le module de l'impédance, φ le déphasage, Z_r la partie réelle et Z_j la partie imaginaire.

Pour passer d'une forme à l'autre, il suffit d'utiliser les relations suivantes :

$$|Z|^2 = Z_r^2 + Z_j^2 \text{ et } \varphi = \tan^{-1} \frac{Z_j}{Z_r} \text{ ou } Z_r = |Z| \cos \varphi \text{ et } Z_j = |Z| \sin \varphi$$

Sa représentation dans le plan de Nyquist du circuit équivalent proposé par Randles, donnée par la Figure V.8, permet d'estimer les différents paramètres caractéristiques de la réponse impédancielle du système :

- La résistance de l'électrolyte R_e donnée par la limite haute fréquence du diagramme,
- La résistance de transfert de charge R_T donnée par le diamètre du cercle haute fréquence,
- La résistance de polarisation R_p donnée par la limite basse fréquence,
- La fréquence angulaire caractéristique ω_{max} permettant de caractériser la capacité de double couche associée au système :

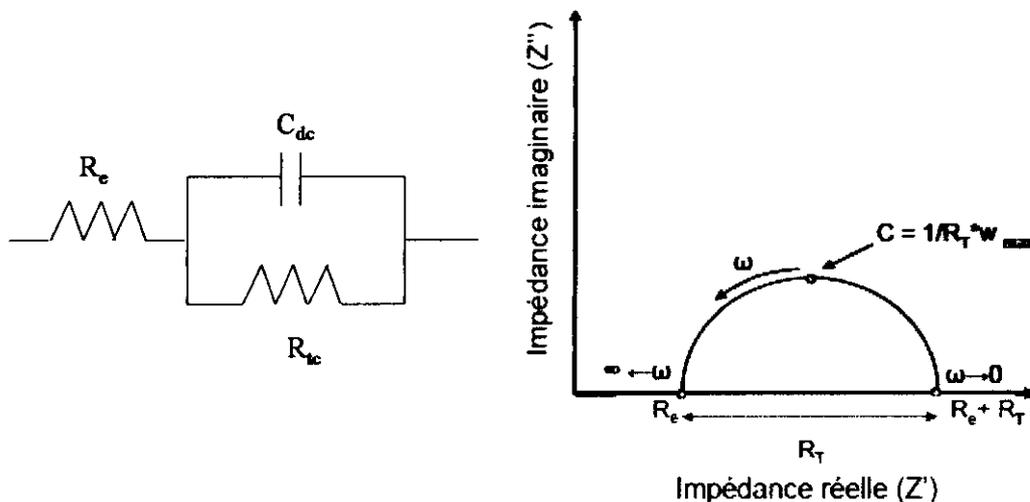


Figure 22 : Diagramme d'impédance du circuit équivalent de Randles

Dans l'ensemble de l'étude, les mesures d'impédance ont été effectuées en mode potentiostatique autour du point de polarisation E_{corr} , on prend en compte certaines considérations :

- amplitude du signal imposé 10 mV par rapport au potentiel de corrosion obtenus après différents temps d'émersion.
- Gamme de fréquences : 100KHz à 10 mHz.
- Nombre de points par décade : 5ppd.
- Temps d'intégration de 4s.

III.6. Essai de corrosion accélérée:

Les essais de la corrosion accélérée permettent d'activer le mécanisme de corrosion dans une cellule électrochimique dont le but principal est de réduire le temps d'expérience. Cette technique est largement utilisée dans le domaine d'étude de la corrosion des armatures en acier enrobé de béton.

Le principe de la corrosion accélérée est basé sur l'application d'une différence de potentiel sur une cellule constituée de l'armature en acier enrobé du béton préparé au laboratoire, l'ensemble constitue une forme de spécimen connu sous le nom de « lollipop », et une plaque d'acier ordinaire. Le tout est plongé dans un électrolyte (milieu d'étude), figure 23 :

L'acier d'armature est relié à la borne positive du générateur électrique, il joue le rôle de l'anode, tandis la plaque d'acier est reliée à la borne négative, elle représente la cathode. L'ensemble est plongé dans un électrolyte qui représente le milieu d'étude considéré. Une fois la connexion est faite on fait appliquer un potentiel de 12V.

L'évaluation du taux de corrosion des armatures se fait par :

- un suivi de la variation du courant électrique débité par la cellule avec le temps. Ce courant est mesuré par un ampèremètre branché en série avec la cellule lors de la mesure.
- Diagnostic visuel périodique permettant de définir le temps de dégradation des spécimens.

La durée des essais de corrosion accélérée est limitée par l'endommagement par éclatement des spécimens (sortie de la rouille).

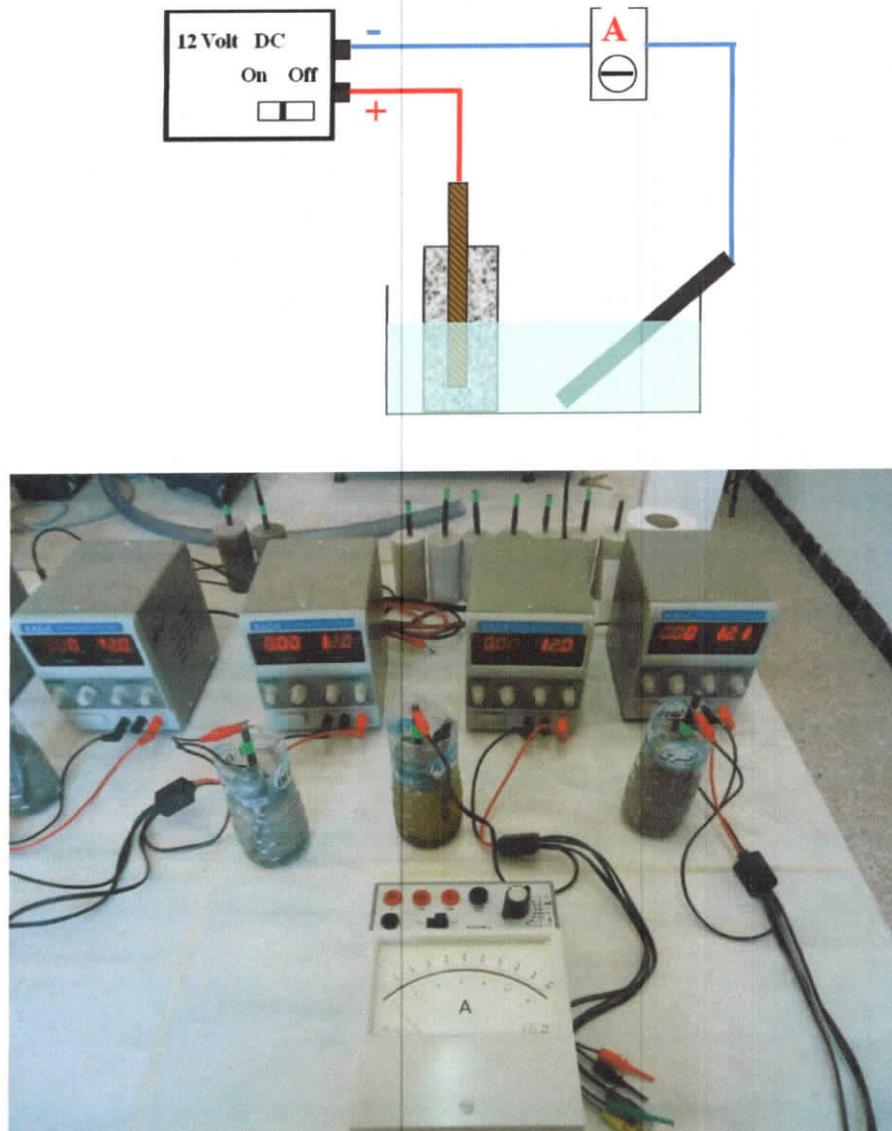


Figure 23 : Schéma de principe et montage expérimental de la cellule de corrosion accélérée

III.7. Essai de compression sur le mortier:

Parallèlement aux tests électrochimiques, nous avons effectué des essais mécaniques sur des spécimens spécifiques afin de voir l'effet de l'ajout de liège (teneur et granulométrie) sur la résistance à la compression des spécimens en mortier durci.

L'essai de compression consiste à appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue à une vitesse constante jusqu'à la rupture. La résistance en compression peut être calculée par l'équation suivante :

$$f_{cm14} = \frac{F}{A_c}$$

- f_{cm14} est la résistance moyenne en compression à 14 jours exprimée en MPa (N/mm^2),
- F est la charge maximale exprimée en N,
- A_c est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force est appliquée, en mm^2 .

Les essais ont été effectués au niveau de laboratoire de génie civil à l'université de Jijel à l'aide d'une presse hydraulique modèle CONTROLAB avec une vitesse d'écrasement de 6 MPa/s, figure 24 et figure 25.



Figure 24 : Presse hydraulique modèle CONTROLAB



Figure 25 : Specimens avant et après écrasement

CHAPITRE IV

Résultats et discussions



IV.1. Etude dans les solutions simulées

IV.1. 1. Effet des chlorures

A – Potentiel de corrosion

L'effet des chlorures sur l'évolution du potentiel à circuit ouvert de l'acier dans la solution simulée SS1 est exprimé par les courbes de la figure 26.

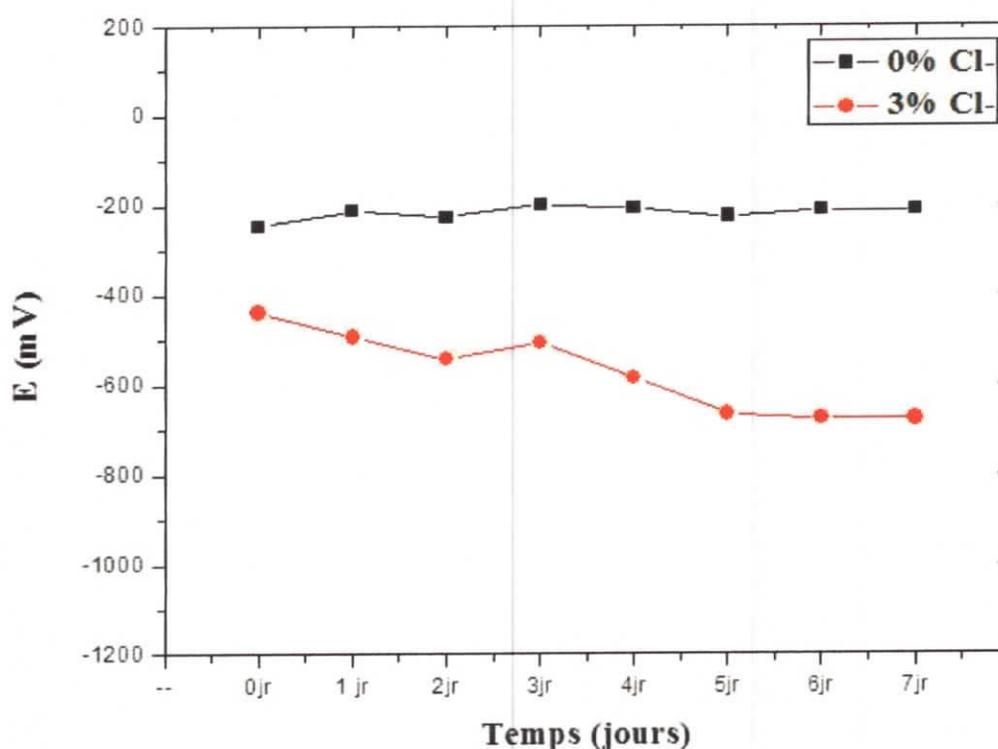


Figure 26 : Effet des chlorures sur l'évolution du potentiel de corrosion dans la solution simulée SS1

L'évolution de ces courbes dans le temps indique que la présence des ions Cl^- dans la solution rend la solution plus agressive. Les valeurs du potentiel E_{corr} de l'acier dans la solution chlorurée sont de plus en plus négatives dans le temps alors que celles de l'échantillon dans la solution non chlorurée suivent une variation inverse, elles sont de plus en plus positives.

B – Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation de la figure 27 expriment l'effet des chlorures sur le comportement électrochimique de l'acier dans la solution SS1.



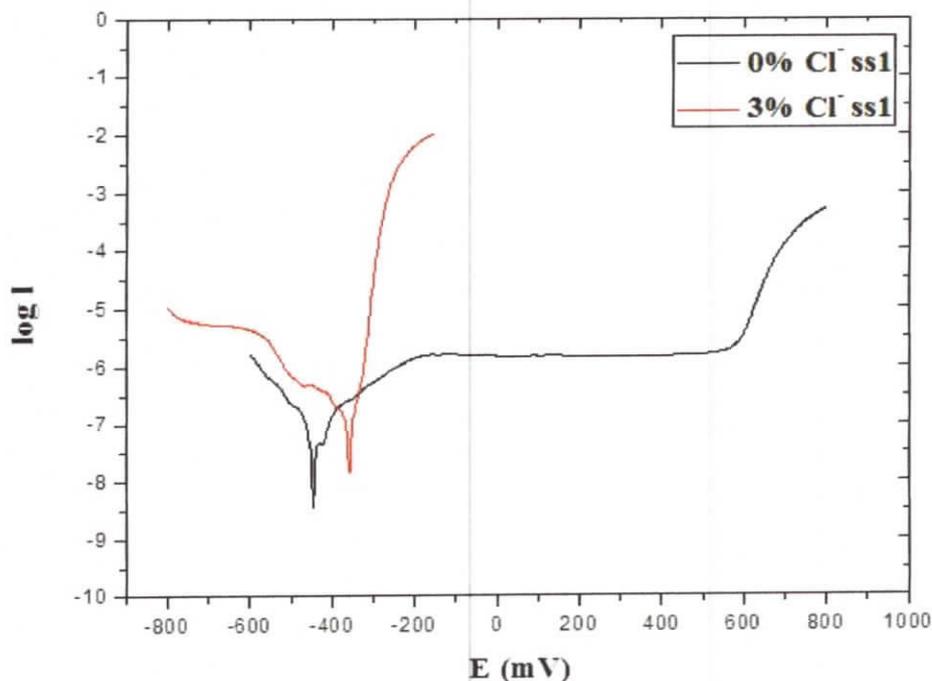


Figure 27 : Effet des chlorures sur le comportement électrochimique de l'acier dans la solution simulée SS1

L'allure des courbes obtenues indique que l'acier dans la solution exempte de chlorures est dans un état électrochimique stable. Ceci est traduit par la présence d'un palier de passivation d'une large gamme de potentiel (-250 à 600 mV) sur la branche anodique. Cependant, en présence des chlorures l'acier devient très actif, on remarque ainsi l'absence totale du domaine de passivation avec une nette augmentation de la densité du courant de corrosion et un déplacement du potentiel E_{corr} vers des valeurs plus anodiques.

C – Impédances électrochimiques

Les spectres d'impédances traduisant le comportement électrochimique de l'acier d'armature dans la solution simulée SS1 sans et avec chlorures sont représentés respectivement sur les figures 28 et 29.

L'évolution de ces spectres, tracés sur le plan Nyquis, confirme les résultats obtenus par la mesure du potentiel à circuit ouvert ainsi que le tracé des diagrammes d'Evans concernant le comportement à la corrosion de l'acier dans la solution simulée SS1 chlorurée ou non.

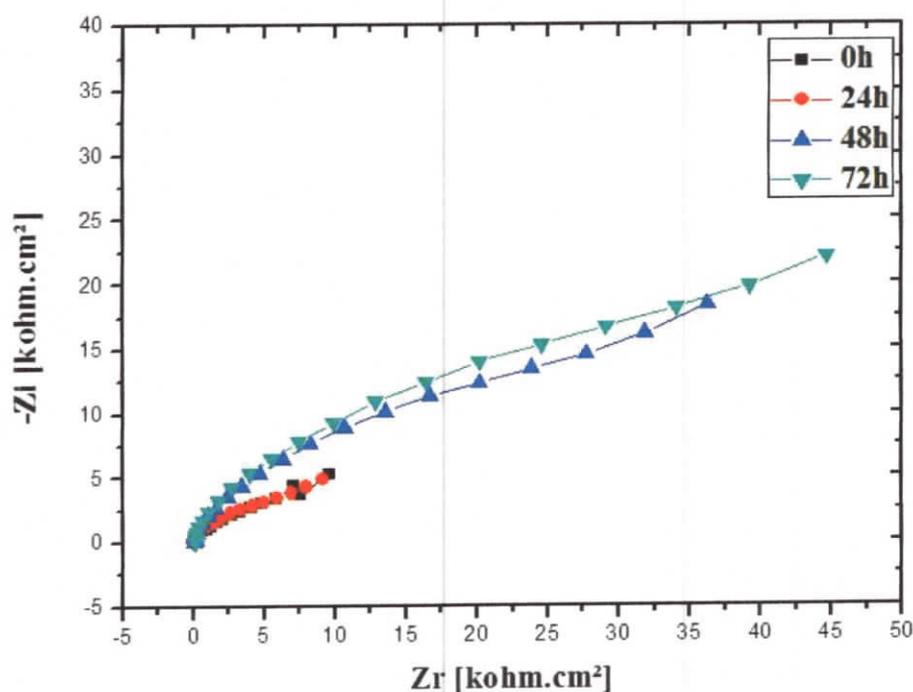


Figure 28 : Spectre EIS traduisant le comportement électrochimique de l'acier dans la solution simulée SS1 sans chlorures

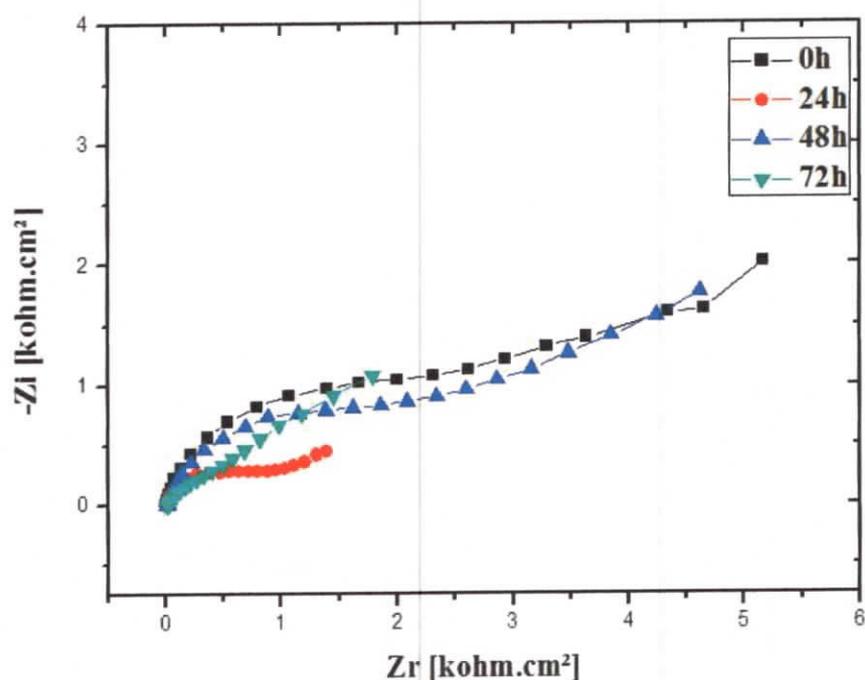


Figure 29 : Spectre EIS traduisant le comportement électrochimique de l'acier dans la solution simulée SS1 avec chlorures

De la figure 28, nous remarquons que l'acier dans la solution à 0% Cl^- résiste bien à la corrosion, cette résistance et de plus en plus remarquable avec le temps. Ceci est traduit par l'augmentation de la taille des boucles obtenues avec le temps : l'augmentation de la

taille des boucles correspond à une augmentation de la résistance de polarisation conjointement à une diminution de la capacité de la double couche électrochimique à l'interface métal-solution. Cependant en présence des chlorures le diamètre des boucles obtenues évolue dans le sens contraire, c'est-à-dire il devient de plus en plus faible dans le temps, ceci correspond bien entendu à une diminution de la résistance de l'acier qui devient de plus en plus actif dans le temps.

Sur la figure 30 sont présentés des diagrammes illustrant la différence entre le comportement de l'acier sans et avec présence des chlorures après un temps d'immersion de une heure. Comme on peut le constater la boucle obtenue dans la solution non chlorurée est d'une taille assez grande que celle obtenue dans la solution chlorurée. Ceci confirme l'effet néfaste des ions chlorures sur le comportement électrochimique de l'acier.

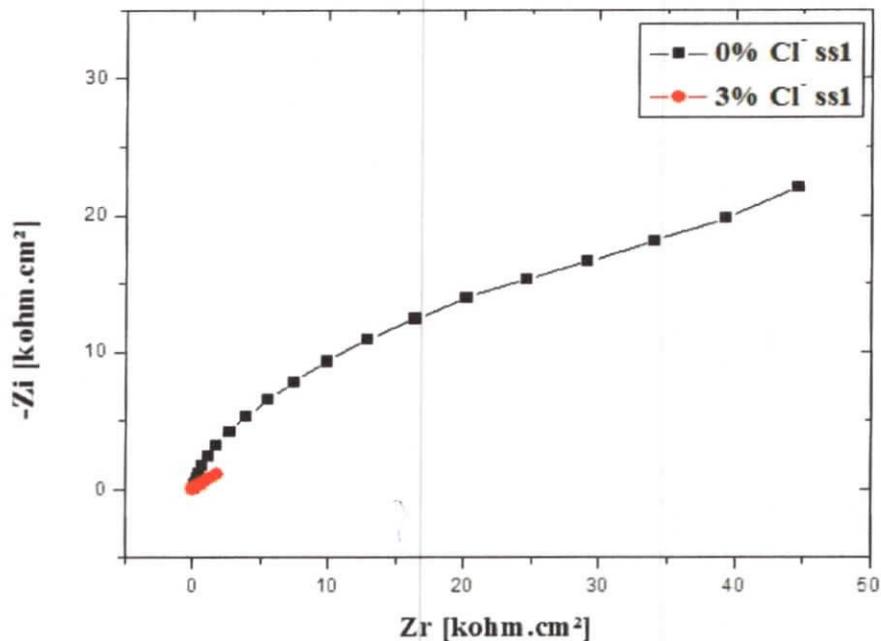


Figure 30 : Spectre EIS traduisant l'effet des chlorures sur le comportement électrochimique de l'acier dans la solution simulée SS1

IV.1. 2. Effet du pH

A – Potentiel de corrosion

L'effet du pH du milieu d'étude sur l'évolution du potentiel à circuit ouvert de l'acier sans et en présence des chlorures est exprimé par les courbes représentés respectivement sur la figure 31 et 32. Nous rappelons ici que pour étudier l'influence de ce paramètre important nous avons testé le comportement de l'acier dans deux solutions simulées ayant un pH différent : solution SS1 (pH= 12.5) et solution SS2 (pH = 13.7).

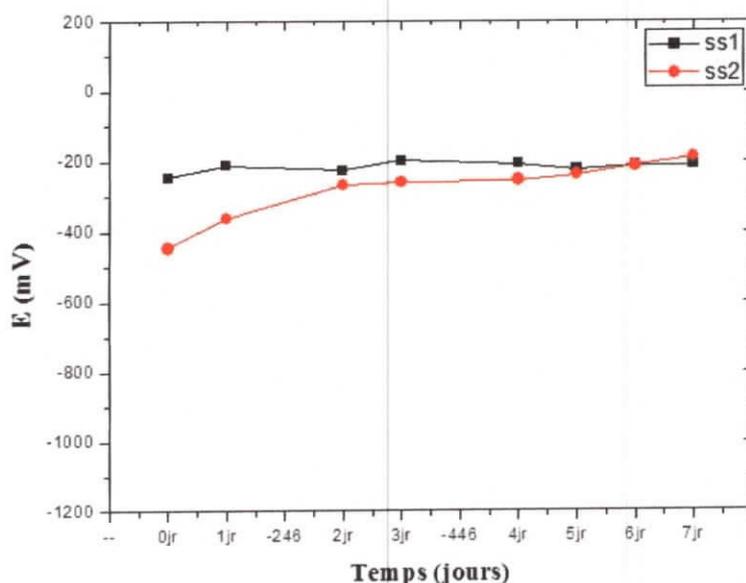


Figure 31 : Effet du pH sur l'évolution du potentiel de corrosion dans la solution simulée SS1 sans chlorures et SS2

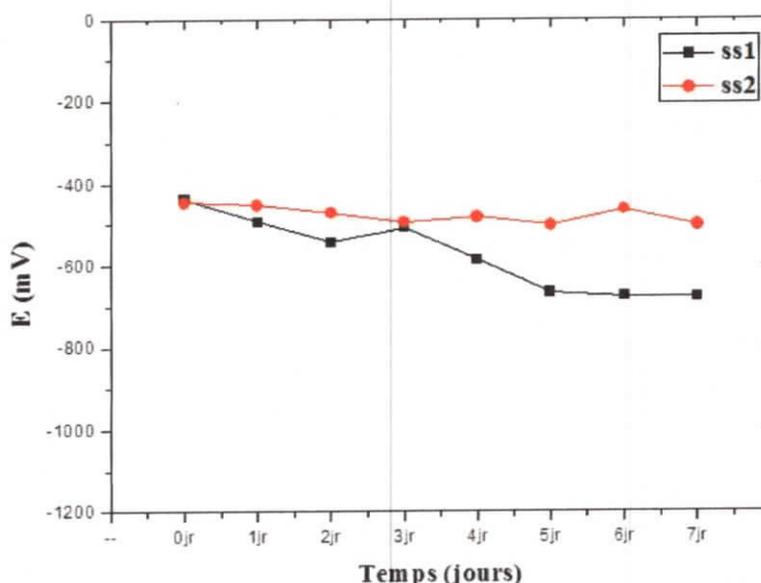


Figure 32 : Effet du pH sur l'évolution du potentiel de corrosion dans la solution simulée SS1 chlorurée et SS2

Les courbes obtenues indiquent que le pH est un paramètre qui présente une influence directe sur l'évolution du potentiel d'abandon notamment en présence des ions Cl^- . En effet, est dans le cas des solutions à 0% Cl^- le potentiel évolue vers des valeurs plus positif, cependant cette évolution est plus rapide dans le cas de la solution SS2. Avec l'ajout des chlorures le potentiel change de sens d'évolution, il de vient de plus en plus négatif, mais cette évolution pratiquement négligeable dans le cas de la solution SS2 (E_{corr} passe de -450 mV à l'immersion à -500 mV après 7 jours) ce qui n'est le cas dans la solution SS1 présentant le pH le plus faible (E_{corr} passe de -460 mV à l'immersion à -680 mV après 7 jours).

B – Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation traduisant l'effet du pH sur le comportement de l'acier sont présentées sur la figure 33 (en absence de chlorures) et la figure 34 (en présence des chlorures).

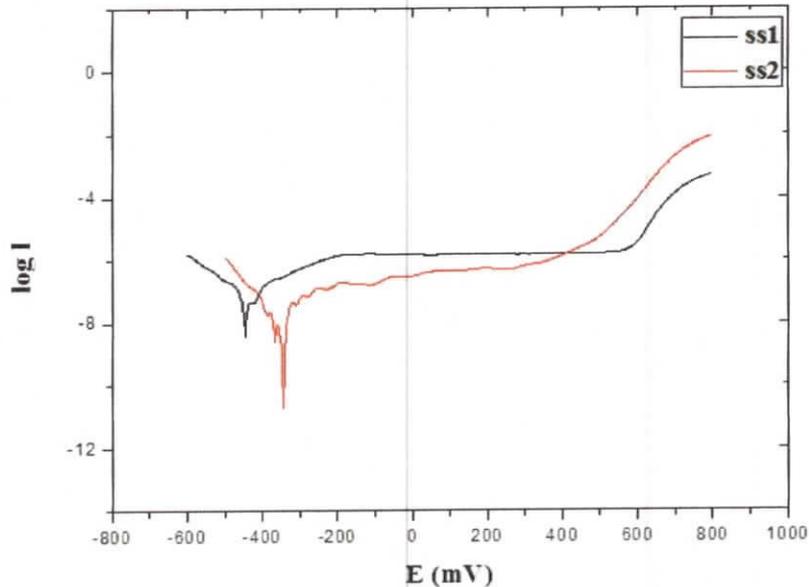


Figure 33 : Effet du pH sur le comportement électrochimique de l'acier en absence des chlorures (0%Cl⁻)

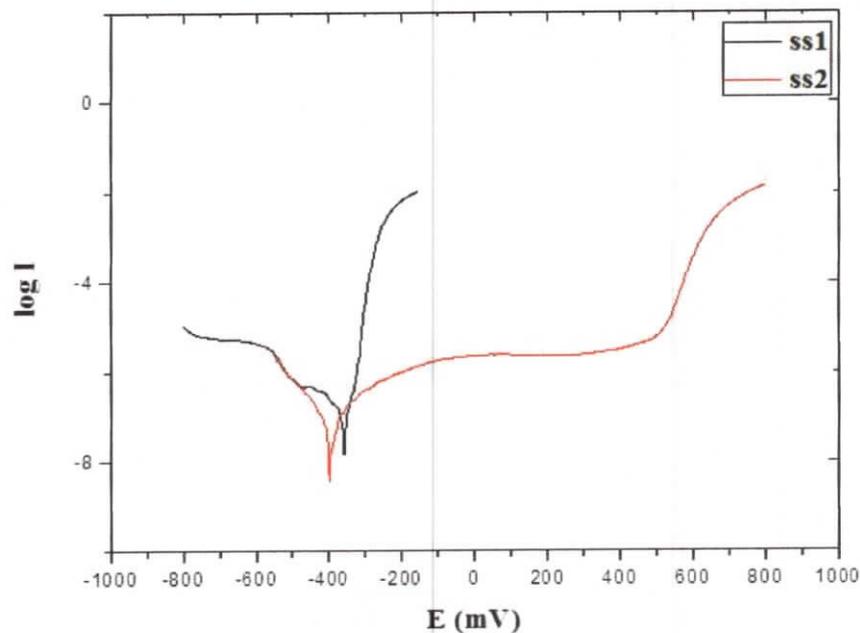


Figure 34 : Effet du pH sur le comportement électrochimique de l'acier en présence des chlorures (3%Cl⁻)

L'allure des courbes obtenues indique que le pH du milieu présente un effet assez significatif sur le comportement à la corrosion de l'acier d'armature que ce soit sans ou en présence des chlorures. Ainsi, nous remarquons que dans les deux solutions exemptes de

chlorures, nous remarquons que l'acier est stable vis-à-vis la corrosion, cependant cette stabilité est beaucoup plus remarquable dans le cas de la solution SS2 ayant un pH plus élevé, ceci est traduit surtout par une baisse dans la densité de courant I_{CORR} ainsi qu'un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs plus noble (de -450 mV à -350 mV). Cet effet de pH est plus remarquable en présence des chlorures.

C – Impédances électrochimiques

De même que pour les diagrammes d'Evans, les spectres d'impédance obtenu dans les deux solutions SS1 et SS2 chlorurées confirme en quelque sorte l'effet intéressant du pH sur le comportement à la corrosion des l'acier rond à béton. Les diagrammes de Nyquist représentés sur la figure 35 indiquent que dans le cas de la solution SS1, moins alcaline, les boucles des spectres obtenus sont d'une taille plus faible que celles obtenus dans solution SS2.

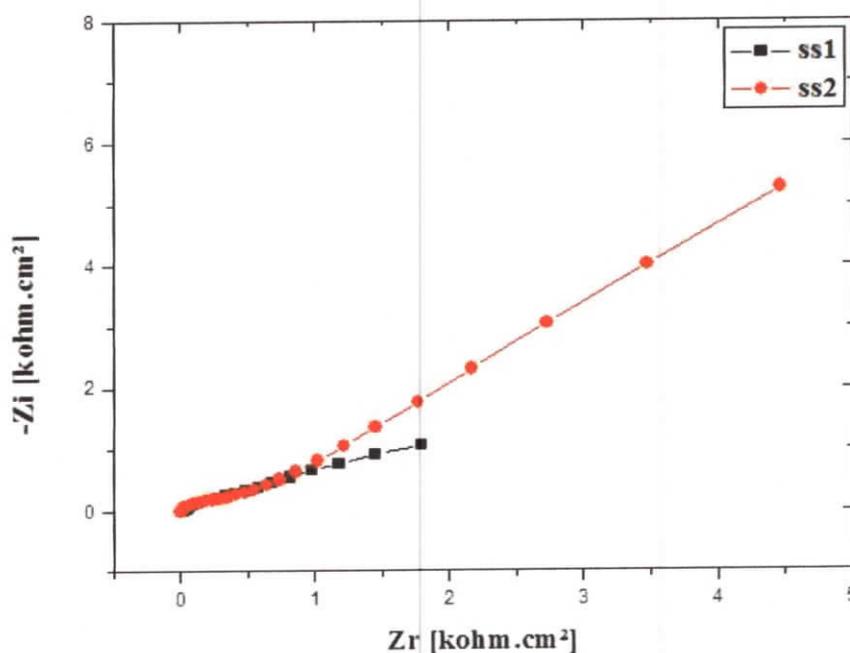


Figure 35 : Spectre EIS traduisant l'effet du pH sur le comportement électrochimique en présence des chlorures (3% Cl⁻)

F - Caractérisation de surface

Dans le but de mettre en évidence l'état de surface de l'acier en contact avec les différentes solutions d'étude et d'affermir la mise en évidence du comportement électrochimique de l'acier, ce dernier a fait l'objet d'observations macrographiques et micrographiques après immersion dans les différentes solutions (SS1 et SS2) sans et avec présence des chlorures. Les résultats de ces observations sont représentés sur la figure 36 et la figure 37.

D'après ces figures, l'effet néfaste des chlorures est facilement décelable. Ainsi nous remarquons que les échantillons, ayant été immergés pendant 7 jours dans les solutions simulées SS1 et SS2 sans la présence de chlorures, présentent un état de surface intact. En revanche les échantillons immergés dans les solutions chlorurées ont subi un attaque traduite par la présence des piqûres de corrosion. Cependant il est remarquable que la surface de l'échantillon immergé dans la solution SS2 (plus basique) est beaucoup moins attaquée que celle de l'échantillon immergé dans la solution SS1 qui se voit sévèrement attaquée avec formation de produits de corrosion. Ceci traduit bien entendu l'effet non négligeable du pH.



Figure 36 : Macrographies des échantillons en acier après immersion de 7 jours dans les différentes solutions simulées, sans et avec chlorures

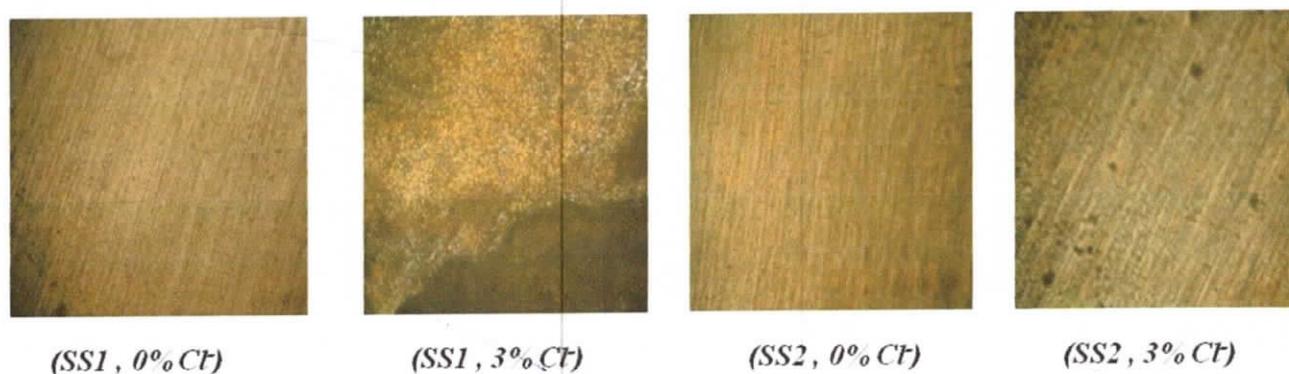


Figure 37 : Observations micrographiques des échantillons obtenues après 7 jours d'immersion de dans les différentes solutions simulées, sans et avec chlorures (250X)

IV.2. Etude dans les spécimens en mortier

L'étude dans la solution simulée du béton nous a permis d'avoir une idée préalable sur le comportement électrochimique de l'acier et d'avoir aussi une idée sur l'effet du pH et de la présence des ions chlorures. Cependant, et afin de donner une valeur plus pratique à notre étude nous avons évalué le comportement de l'acier dans un milieu cimentaire concret, il s'agit de spécimens en mortier préparé au laboratoire. Entre temps nous avons testé l'effet de l'ajout du liège, de différentes tailles de grains et à différentes teneurs, sur le comportement à la corrosion de l'acier dans ce milieu particulier.

A – Evolution du potentiel de corrosion

1 - Effet de la concentration :

L'effet de la teneur en liège sur l'évolution du potentiel libre de l'acier dans le mortier est exprimé par les courbes de la figure 38. Deux granulométries de liège ont été utilisées : 0.08 mm et 0.2 mm pour trois concentrations différentes.

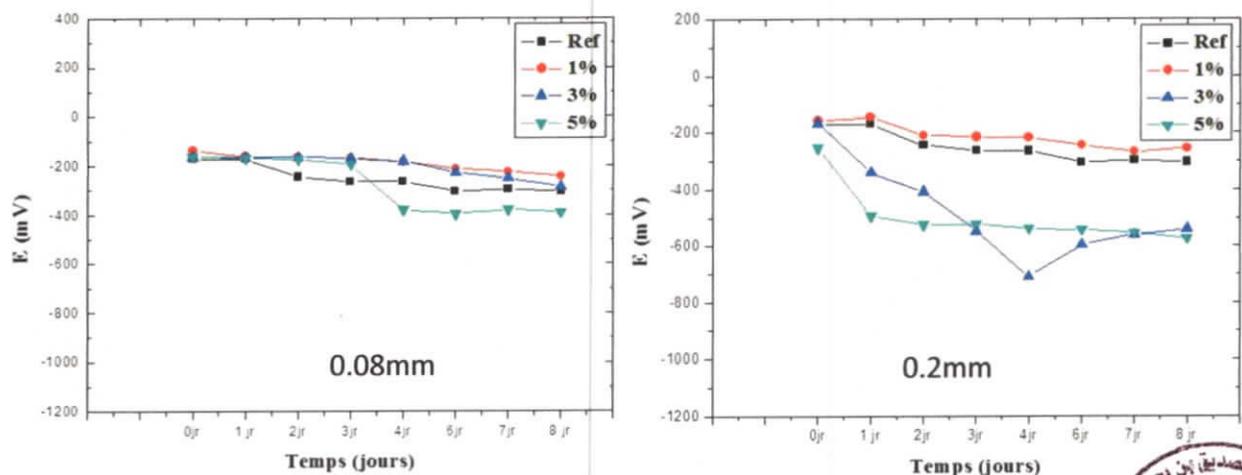


Figure 38 : Effet de la teneur en liège sur l'évolution de potentiel de corrosion (granulométrie : 0.08 et 0.2mm)

En ce qui concerne l'effet de la concentration nous constatons que plus la concentration en liège est importante plus le potentiel de l'acier est négatif, ceci est valable pour les deux granulométries de liège utilisées. A titre exemple dans le cas de la granulométrie 0.08 mm le potentiel de l'acier passe de -190 mV pour une concentration en liège de 1% à -390 mV pour une concentration de 5%, même chose pour le cas de la granulométrie 0.2 mm ou le potentiel passe de -180 mV à -590 mV pour les mêmes concentrations (1 et 5%).



2 - Effet de la granulométrie :

De même que pour la concentration, la granulométrie (taille des grains) du liège présente un effet remarquable sur l'évolution du potentiel de l'acier en fonction du temps. Les courbes de la figure 39 traduisent donc cet effet.

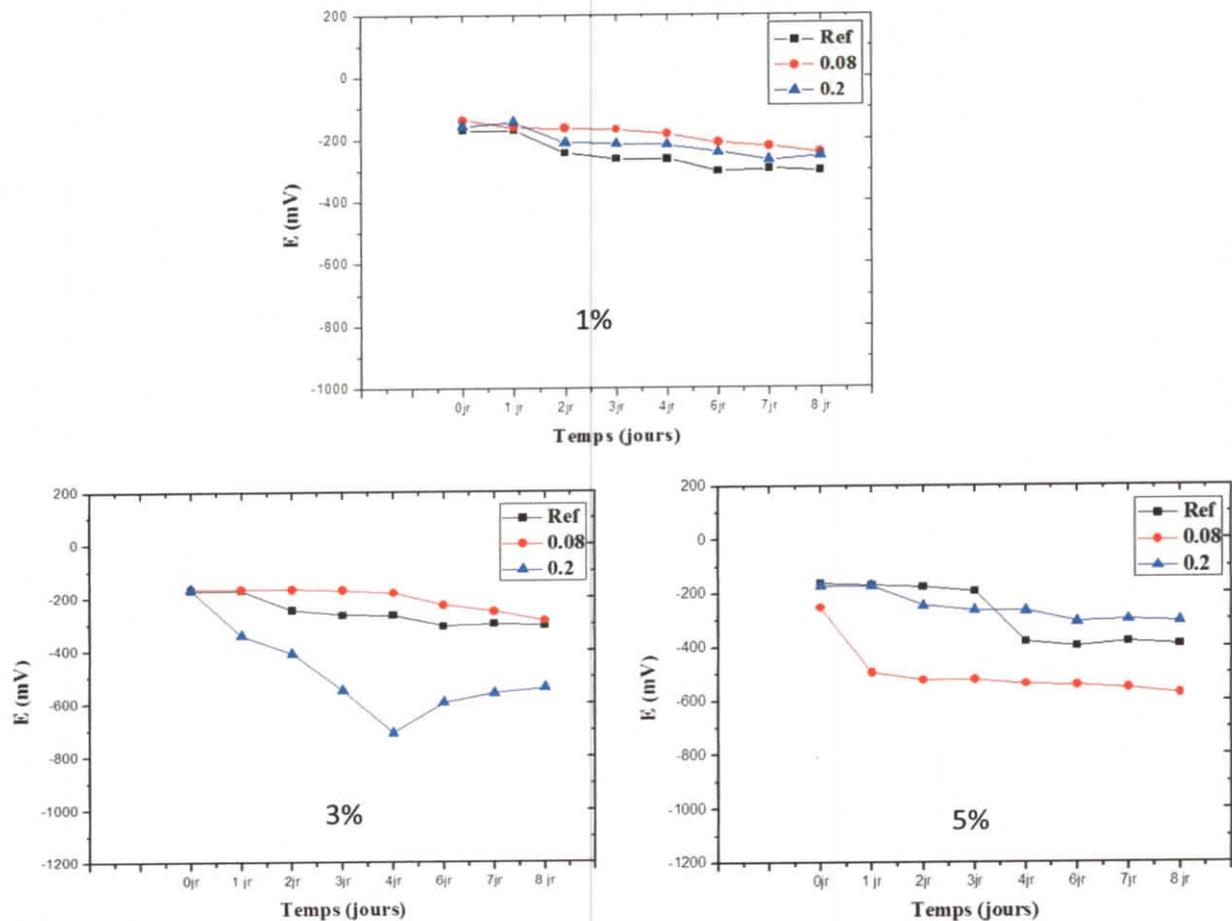


Figure 39 : Effet de la granulométrie du liège sur l'évolution de potentiel de corrosion (concentration : 1%, 3% et 5%)

D'après ces courbes nous constatons que pour l'ensemble des concentrations utilisées (1%, 3% et 5%) plus le liège introduit est d'une granulométrie faible plus le potentiel de l'acier est positif. Citons l'exemple des spécimens contenant une teneur en liège de 3% : le potentiel passe, après 8 jours d'immersion, d'une valeur de l'ordre de -220 mV pour la granulométrie 0.08 mm à une valeur de -580 mV pour la granulométrie 0.2 mm.

B – Courbes de polarisation

1 - Effet de la concentration :

Les courbes de la polarisation traduisent l'effet de l'ajout du liège à différente concentration (1%, 3% et 5%) le comportement à la corrosion de l'acier dans le mortier sont présentées par la figure 40.

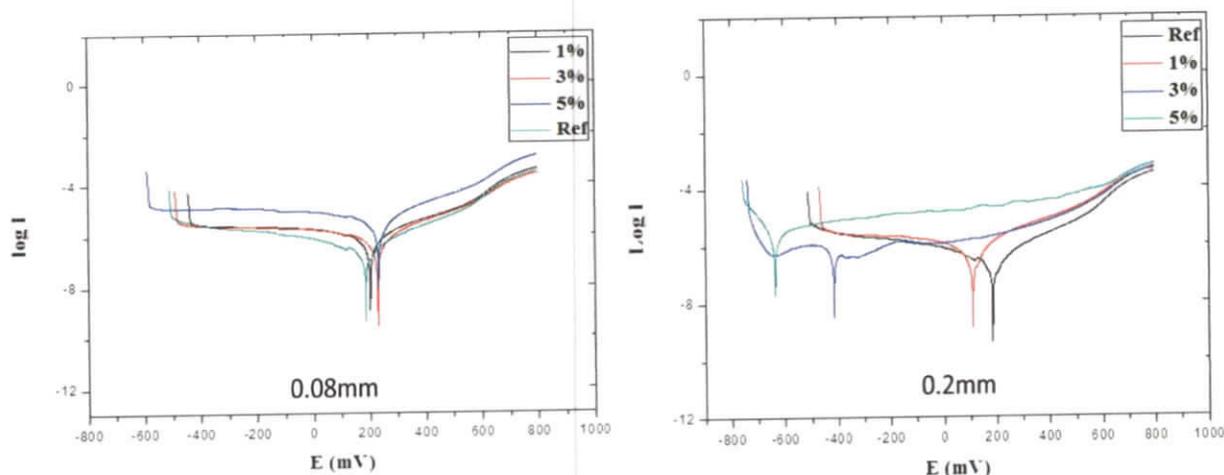


Figure 40 : Effet de la teneur en liège sur le comportement électrochimique de l'acier dans le mortier (granulométrie : 0.08 et 0.2mm)

D'après ces courbes nous pouvons facilement remarquer l'effet de la présence de liège sur la forme des courbes de polarisation obtenues et par conséquent sur son comportement électrochimique. Ainsi, nous remarquons que pour les deux granulométries utilisées (0.08mm et 0.2 mm) l'ajout du liège au milieu cimentaire pour une teneur supérieure ou égale à 3% affecte les propriétés anti corrosion de ce milieu poreux. Par rapport à l'échantillon de référence (0% liège) les échantillons en acier dans les spécimens contenant 3% et 5% de liège présentent une densité de courant plus élevée ainsi que des valeurs de potentiel E_{corr} notamment pour la granulométrie 0.2mm. En revanche, nous pouvons remarquer que, pour les deux granulométries une concentration en liège de 1% n'affecte pratiquement le comportement électrochimique de l'acier.

2 - Effet de la granulométrie

En ce qui concerne l'effet de la granulométrie, les courbes de la figure 41 obtenue pour trois concentrations différentes (1%, 3% et 5%) indique claire l'effet de la finesse du liège sur les propriétés du mortier. De ce fait, et d'après ces résultats nous pouvons que plus la granulométrie du liège est petite plus l'acier est protégé notamment pour les concentrations 1% et 3%.

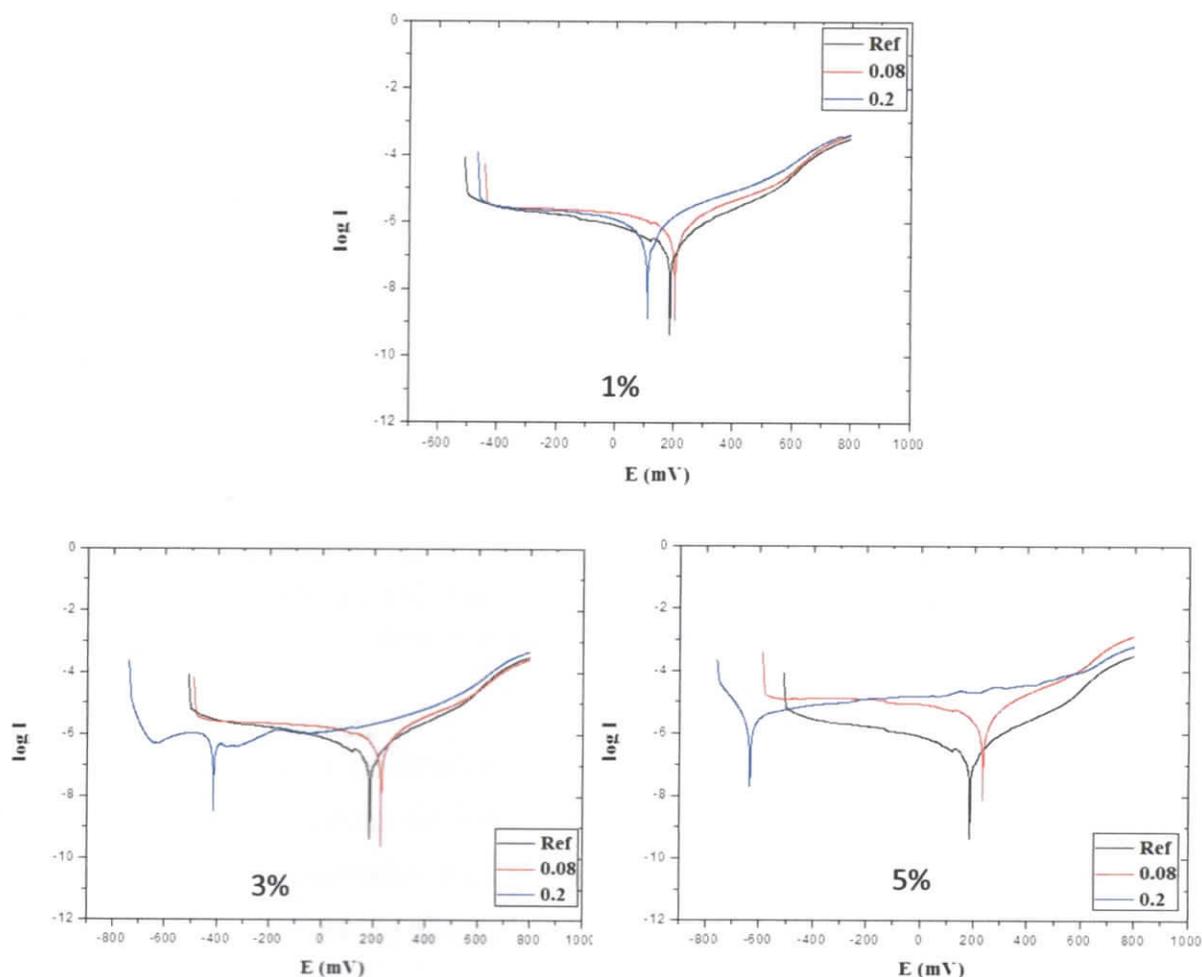


Figure 41 : Effet de la granulométrie du liège sur le comportement électrochimique de l'acier dans le mortier (concentration : 1%, 3% et 5%)

C – Impédances électrochimiques

1 - Effet de la concentration :

Les spectres d'impédance traduisent l'effet de la concentration en liège sur le comportement à la corrosion de l'acier dans le mortier sont représentés sur la figure 42.

Comme nous pouvons le constater, les diagrammes de Nyquist obtenus pour deux granulométries différentes indiquent que la concentration en liège dans le mortier peut affecter le comportement de l'acier en particulier dans le cas d'un liège d'une granulométrie importante (0.2 mm). Alors que pour le cas du liège plus fin, les diagrammes indiquent que la présence de ce dernier améliore ces caractéristiques anti corrosion notamment pour les faibles concentrations (1%).

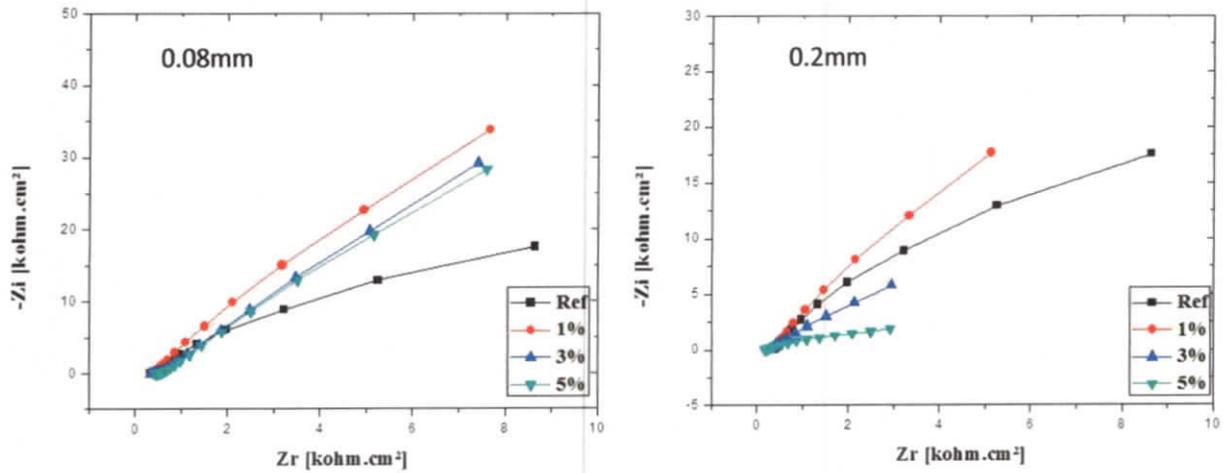


Figure 42: Spectres EIS traduisant l'effet de la concentration en liège sur le comportement électrochimique de l'acier dans le mortier (Granulométrie : 0.08 et 0.2mm)

2 - Effet de la granulométrie :

Pour l'effet de la granulométrie les spectres d'impédance obtenus, figure 43, indique la finesse des grains de liège joue un rôle bénéfique sur les propriétés anti corrosion du milieu cimentaire. Ces résultats sont en parfaite concordance avec les résultats obtenus par le suivi du potentiel à circuit ouvert ainsi que le tracé des diagrammes d'Evans.



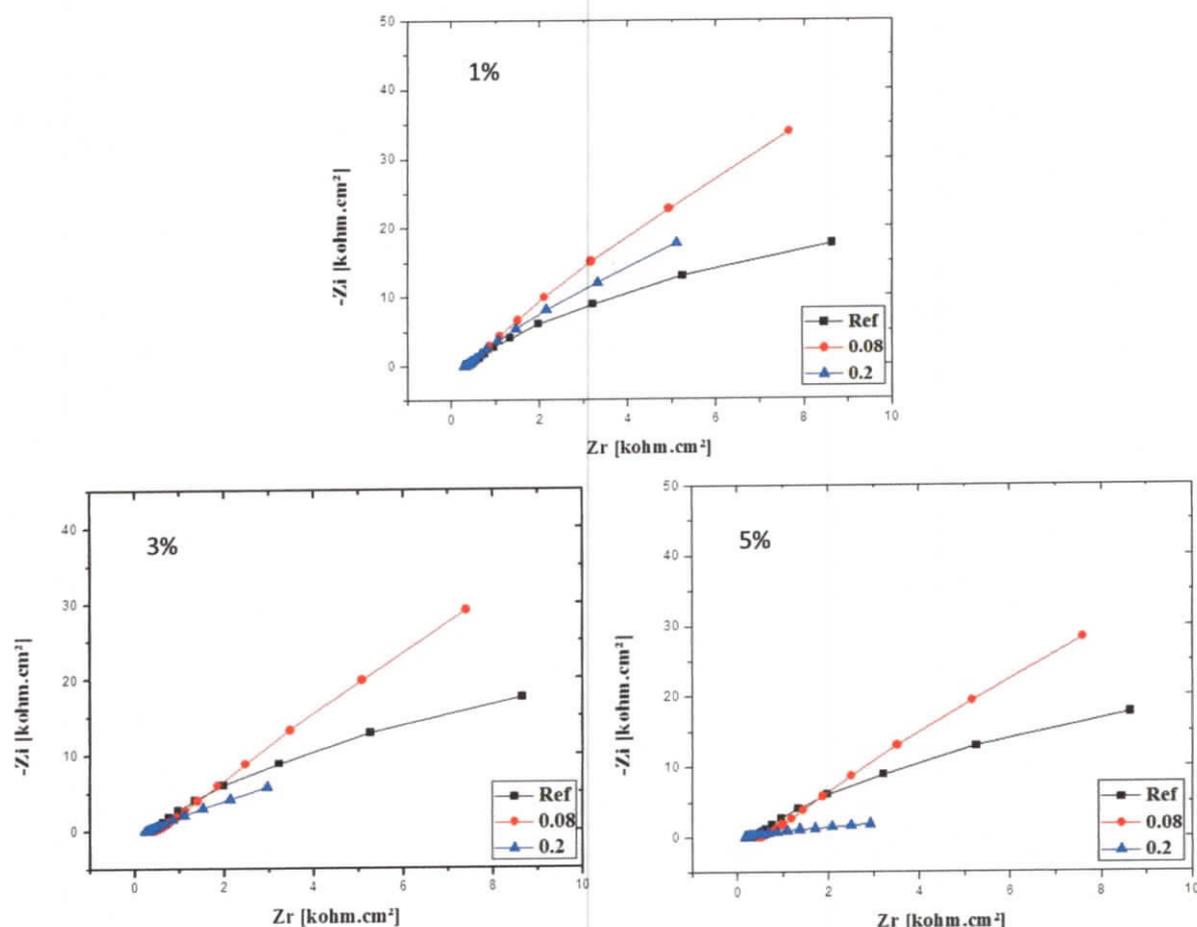


Figure 43 : Spectres EIS traduisant l'effet de la granulométrie du liège sur le comportement électrochimique de l'acier dans le mortier (concentration : 1%, 3% et 5%)

D'après la figure nous remarquons que l'acier dans le mortier, contenant du liège de 0.08 mm pour une concentration de 1 %, présente la meilleure résistance à la corrosion, il se voit même mieux protégé que l'acier dans le spécimen de référence (0% liège). Ce pendant le liège de 0.2 mm affecte clairement les propriétés anticorrosion du mortier surtout pour les concentrations 3 % et 5%.

D – Essai de compression

La modification de la composition d'un béton ou un mortier (ajout d'un tel ou tel adjuvant) ne doit en aucun cas affecter les propriétés de mise en œuvre de ces matériaux en premier lieu la résistance à la compression qui demeure une caractéristique d'une grande importance dans le domaine de génie civil. De ce fait nous avons procédé à la réalisation d'essais de compression pour voir l'effet de liège sur cette caractéristique. Ceci nous permettra dans une large mesure de définir les concentrations limites en liège ainsi que la granulométrie la plus adéquate.

Les résultats obtenus sont représentés par les histogrammes de la figure 44.

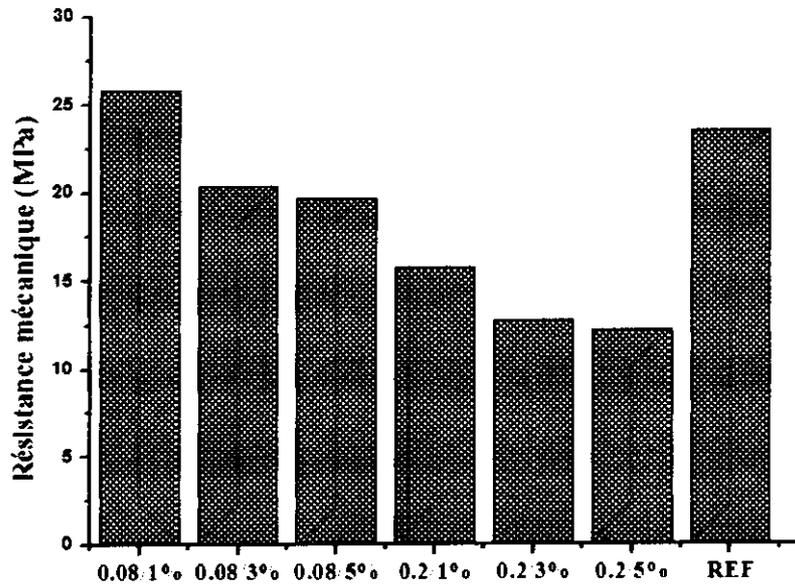


Figure 44 : Effet de la teneur et de la granulométrie du liège sur la résistance à la compression du mortier

D'après ces histogrammes nous constatons que l'ajout de liège de liège d'une granulométrie égale à 0.08 mm n'affecte pratiquement pas la résistance à la compression, au contraire, il peut même l'améliorer comme dans le cas d'une concentration égale à 1%. En revanche l'utilisation d'un liège plus grossier affecte sensiblement la résistance du mortier surtout pour des concentrations élevées (3% et 5%).

E - Caractérisation de surface

Après avoir effectué les différents tests électrochimiques, l'ensemble des spécimens a été cassé pour faire l'objet d'une observation permettant de caractériser l'état de l'acier dans chacun des spécimens. Les macrographies obtenues sont présentées par les figures 45, 46, 47 et 48.

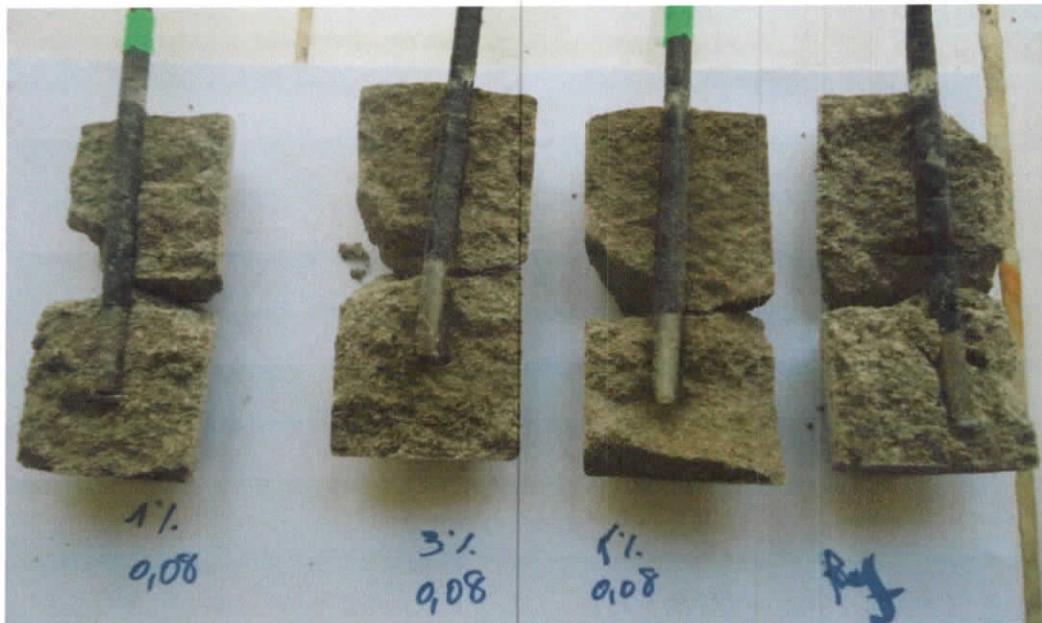


Figure 45 : Macrographies traduisant l'état de l'acier après immersion de 8 jours dans la solution 3%NaCl : Granulométrie = 0.08 mm



Figure 46 : Macrographies traduisant l'état de l'acier après immersion de 8 jours dans la solution 3%NaCl : Granulométrie = 0.02 mm

D'après ces macrographies, l'état de surface l'acier dans les différents spécimens confirme ce qui été obtenus comme résultats par voie électrochimique. Ainsi, nous remarquons que l'acier enrobé de mortier contenant le liège d'une granulométrie égale à 0.08 et pour différente concentrations présente un état de surface pratique intact. En revanche, la surface de l'acier dans les spécimens en mortier contenant du liège de 0.02 mm et complètement attaquée.



Figure 47: Macrographies traduisant l'état de l'acier après essai de corrosion accélérée : Granulométrie = 0.08 mm

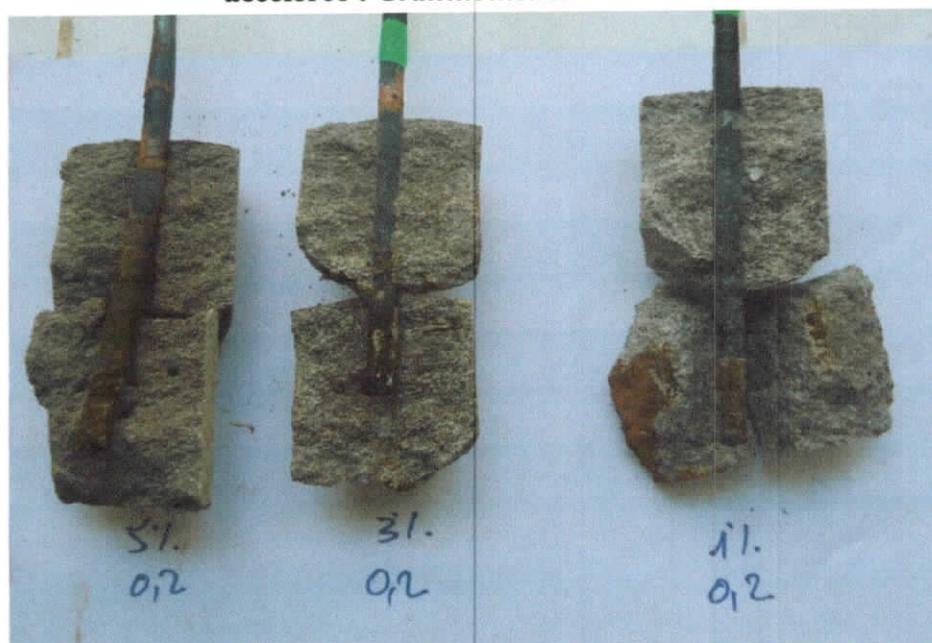


Figure 48 : Macrographies traduisant l'état de l'acier après essai de corrosion accélérée : Granulométrie = 0.2 mm

IV.3. Discussions :

L'étude dans les solutions aqueuses simulées :

A travers les résultats obtenus par les tests électrochimiques réalisés dans les solutions simulées SS1 et SS2 nous avons vu que l'acier d'armature, en absence des chlorures, est dans un état passif, cet état, traduit par l'apparition d'un palier de passivation sur la branche anodique des diagrammes d'Evans et dû à la formation d'un hydroxyde du

fer ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) à la surface. Ce film étanche est très stable d'un point de vue électrochimique isole le métal de la solution est assure l'inactivité de ce dernier. D'après la littérature le film de passivation est formé grâce à la haute alcalinité des solutions simulant le milieu interne du béton ou du mortier. Cependant en présence des chlorures, à une concentration de 3% en poids, ce film perd sa stabilité est subit un destruction locale ce qui déclenche le processus d'une corrosion par piqûres, ceci se traduit par l'absence totale du palier de passivation accompagnée d'une augmentation brusque du courant de corrosion ainsi qu'un déplacement du potentiel de piqûration (E_{pit}) et de corrosion (E_{corr}) vers des valeurs moins.

Quand à l'effet du pH les résultats obtenu dans les deux solutions simulée SS1 et SS2 présentant un pH différent (12.5 et 13.7) respectivement, nous avons vu que la meilleur protection de l'acier est assurée dans la solution présentant le pH le plus élevée, c'est-à-dire la solution SS2, que ce soit sans ou en présence des ions chlorures. Les différentes techniques techniques utilisées, mesure du potentiel à circuit ouvert, diagrammes d'Evans et spectres d'impédance, ont donné des résultats en parfaite concordance et confirment cette tendance. En effet, la protection assurée par la solution plus basique est due au fait de la concentration élevée en OH^- dans la solution permet la formation rapide du film passif d'une part, d'autre part elle assure sa stabilité notamment en présence des ions agressif tel que les Cl^- en s'opposant à toute tentative de dépassivation (destruction du film) du métal. Dans ce cas le rapport entre la concentration en ions chlorures et la concentration en ions hydroxyle ($[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$) est le paramètre qui définit la possibilité de déclenchement ou non du processus de corrosion, plus ce rapport est faible plus le métal est protégé.

L'étude dans le milieu cimentaire concret (mortier) :

Le milieu cimentaire utilisé été le mortier (composé du sable + ciment +eau), ce dernier à été modifié par l'ajout de liège broyé en poudre de granulométries différentes (0.08 mm et 0.2 mm) et à différentes concentration (1%, 3% et 3%). L'objectif été de tester la présence de cet adjuvant sur les propriétés anticorrosion du mortier et par conséquent sur le comportement électrochimique de l'acier d'armature par des techniques de caractérisation différentes : mesure du potentiel libre, tracé des courbe de polarisation, spectroscopie d'impédances électrochimiques et corrosion accélérée.

L'ensemble des résultats obtenus confirment que la présence du liège dans le mortier à sensiblement influencé le comportement électrochimique de l'acier. Ainsi nous

avons vu que l'ajout du liège d'une faible granulométrie (0.08 mm) n'affecte pas les propriétés anticorrosion du mortier au contraire il peut même les améliorer surtout pour des concentrations $< 3\%$. Cependant l'utilisation du liège plus gros (0.2 mm) affecte ces propriétés ceci a été traduit par l'évolution des paramètres électrochimiques de l'acier ainsi que l'état de surface des armatures après essai. Ceci est expliqué par le fait que les lièges fins occupent les pores et les micropores de l'épiderme cimentaire et diminuent sensiblement sa perméabilité, ce qui empêche la pénétration des ions agressifs vers la surface du métal.

Quant à l'influence du liège sur les propriétés mécaniques, les tests d'écrasement des spécimens contenant différentes concentrations et granulométries de liège ont montré que la résistance à la compression ne sera pas affectée si on ajoute du liège fin à des teneurs faibles.



Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

A l'achèvement de cette études dans le but été de tester l'effet de l'adition de liège sur le comportement à la corrosion d'un acier rond à béton dans le mortier, nous avons à conclure ce qui suit :

- Dans les solutions simulées exemptes de chlorures l'acier se trouve dans un état très stable d'un point de vue électrochimique, cette stabilité est due en premier lieu à la formation d'un film d'hydroxyde du fer passif, étanche et bien adhérent à la surface du métal ;
- La présence des ions chlorures dans les solutions simulées rend ces dernières agressive et mène ainsi l'acier à un état électrochimique très actif en raison de leur contribution à la destruction du film passif (dépassivation) formé à la surface. Les ions chlorures déclenche un mécanisme de corrosion assez ennuyeux qui se manifeste par la formation des piqûres se développant en profondeur ;
- Les résultats des tests électrochimiques réalisés dans deux solutions simulées d'un pH différents ont permis de mettre en évidence l'influence importante de la basicité du milieu sur le comportement électrochimique de l'acier. Que ce soit sans ou présence des ions chlorures l'acier présente plus de résistance à la corrosion dans le milieu plus alcalin ;
- Les tests réalisés dans le mortier ont montré que l'ajout de liège présente un effet assez significatif sur les propriétés anticorrosion de ce milieu,
- D'un point de vue granulométrie les résultats obtenus ont montré que plus le liège est fin plus l'acier est mieux protégé dans le mortier vis-à-vis l'attaque par les chlorures d'origine externe,
- La concentration de liège joue aussi un rôle sur le comportement de l'acier, celle-ci doit être optimisée et sa valeur dépend de la granulométrie du liège utilisé,

Les essais mécaniques réalisés ont montré que l'ajout du liège de faible granulométrie (0.08 mm) n'affecte pratiquement pas la résistance à la compression du mortier notamment pour des concentrations modérées (< 3%).

- [1] NDZNA AKONGO GREGOIRE et TCHOUMI Samuel Réhabilitation des ouvrages en béton armé, université de DAOULA ENSET 2007
- [2] J.POLLIVIER et A.VICHOT, la durabilité des bétons, presse de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [3] G.DREUX et J.FESTA, Nouveau guide du béton et ses constituants, huitième édition EYROLLES (1995) pp 405.
- [4] G.ARQUIE et C.TOURENQ, Granulats, Presse de l'école Nationale des ponts et chaussées, paris (1990) pp 718.
- [5] J.BARON et R.SAUTEREY, le béton hydraulique : connaissance et pratique, presse de l'école nationale des ponts et chaussées (1982) pp .560.
- [6] BRUNO HUET, comportement à la corrosion des armatures dans un béton carbonaté. Influence de la chimie de la solution interstitielle et d'une barrière de transport, thèse de doctorat de l'INSA de LYON (2005).
- [7] I. LAKHTINE ; Métallographie et traitement thermique des métaux, troisième édition. P 138.
- [8] A.KOMAR, matériaux et éléments de construction.
- [9] Techniques de l'ingénieur, traité construction.
- [10] RAHARINAIVO, la corrosion et la protection des aciers dans le béton.
- [11] Q.T. NGUYEN et al. Analyse de la fissuration du béton armé en corrosion accélérée, C.R.mécanique (2007).
- [12] J.ROBIN, introduction aux méthodes électrochimiques, Edition MASSON ET Cie (1967) PP 357.
- [13] H.E.M.C CANNON, THE MAKING, shaping and treading of steel 9th édition us steel company, Pittsburgh p1971.
- [14] DIETER LANDOLT, traité des métaux, 12- corrosion et chimie de surfaces des métaux.
- [15] JEAN- JACQUES LAMOUREUX ; Précis de corrosion Edition. Beauchemin Itée .LAVAL (Québec) 1992 p 229.
- [16] JEAN-PIERRE BOUIETTE ; protection des constructions en acier contre la corrosion technique d'ingénieur Ref 2505.
- [17] Dr. Ben sabra Hakim, cours module de corrosion TEC 749 Université de Jijel
- [18] NEVILLE, AM (2000) ; Propriété des bétons, éditions EYROLLES, 806 pages.

[19] M.F.MONTEMOR and al. Chloride- induced corrosion on reinforcing steel ; from the fundamentals to the monitoring techniques, cement and concrete composites 25 (2003) 491-502

[20] TUUTTI, K.1982 ; corrosion of steel in concrete, swedish cement and concrete research institute, ED, STOCKHOLM dans la durabilité des bétons, presses de l'école des pnts et chaussées, paris, p 453.

[21] SHAMSAD AHMED : Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction : a review .cement and concrete composites 25 (2003) pp 459- 471.

[22] RAHARINAIVO ; la corrosion et la protection des acier dans le béton.

[23] W.MORRIS, A.VICO, M. Vazquez. Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements. Electrochimica Acta 49 (2004), pp 4447-4453.