

L'influence du sable de mer sur la durabilité du béton

M.R.BOUATIAOUI, A.H.ALAOUI

Université ABDEL MALEK ESSADI Faculté des sciences et technique de Tanger BP416.Maroc
Laboratoire de génie civil et mécanique
Equipe Mécanique et matériaux

Résumé

La corrosion des armatures dans le béton armé est un problème des plus importants dans l'évaluation de la durabilité des structures. L'objectif de notre travail est de générer de l'information qualitative au niveau de l'influence du sable de mer de la région du nord du Maroc sur l'initiation et la propagation de la corrosion. Cette information permettra de prédire la durée de vie des ouvrages en béton armé. L'évolution de la corrosion est suivie par la méthode électrochimique, sur des éprouvettes de mortier armé. La méthode de courant imposé est utilisée pour accélérer le phénomène de corrosion. L'initiation de la corrosion est déterminée par la mesure de potentiel d'électrode (méthode de Half-Cell).

Abstract :

Corrosion reinforcement steel in concrete is a major problem in assessing the durability of structures. The aim of our work is to generate qualitative information at the influence of sea sand to the north of Morocco on the initiation and propagation of corrosion. The evolution of corrosion is monitored by the electrochemical method on reinforced mortar specimens. The impressed current method is used to accelerate corrosion. The corrosion initiation is determined by the electrode potential drop measured by the method of Half-Cell

Mots clés : durabilité, corrosion, sable, chlorure, fissuration

1 Introduction

La dégradation des ouvrages armés constitue un grave problème, du point de vue économique, et engendre des problèmes importants en terme d'entretien et de réhabilitation. Dans le futur proche le gouvernement Marocain et ses municipalités feront face à un grand défi au niveau de la gestion des infrastructures. En absence des statistiques au Maroc, à titre d'exemple, le gouvernement de Québec estime à 25% des ouvrages en béton armé sont affectés. Vézina (1998)

Lors de la construction d'un ouvrage d'art ou d'une structure du génie civil, un des aspects à prendre en considération est la pérennité des ouvrages.

La durabilité du béton armé, est influencée par la corrosion des armatures, provoquée par des agents agressifs tels que les chlorures [1, 2, 4, 8] (notamment présents dans le sable de mer HAWARA de la région nord du Maroc, largement utilisé durant les années 80 et 90). Ainsi que le dioxyde de carbone de l'atmosphère qui se dissout dans l'eau interstitielle du béton et qui engendre de la corrosion par carbonatation.

Ces agents agressifs provoquent la corrosion des armatures lorsque leur teneur dépasse un seuil critique dans le béton. La cinétique du processus de corrosion est donc essentielle pour caractériser de manière efficace la performance de l'ouvrage tout au long de sa durée de vie [5]. Il paraît ainsi essentiel de pouvoir prédire cette durée de vie d'un ouvrage en béton armé affecté par la corrosion en tenant compte des intervalles de temps nécessaires pour atteindre des phases particulières dans le processus de dégradation. Durant la durée de vie d'une structure, en distingue deux étapes la première est l'initiation de la réaction et la deuxième est sa propagation [3].

Tous ces processus sont complexes et font intervenir des mécanismes dépendant dans une très large mesure des constituants du matériau et des moyens de mise en œuvre: granulats, type de liant, quantité d'eau, conditions de cure, agressivité de l'environnement auquel est exposé le matériau.

2 Expérimental

2.1 Identification

La qualité de sable est déterminée par sa granulométrie, sa propreté et sa teneur en chlorure. La courbe granulométrique du sable est déterminée selon la norme marocaine NM 10.1.700. L'équivalent de sable ES par la norme marocaine NM10.1.283.

La teneur en chlorure dans le béton doit être inférieure à 1% pour le béton non armé et 0,2% pour le béton armé et précontraint. La teneur en chlorure de sable de mer est déterminée par le dosage acido-basique. Cette teneur est rapportée à la masse du ciment afin de pouvoir comparer les données avec les valeurs fixées par la norme NM 10.1.008[6]

2.2 Confection des échantillons

Les éprouvettes sont de géométrie cylindrique, 100mm de hauteur et 70mm de diamètre. Des barres sont insérées dans le mortier, une d'acier de 8mm de diamètre et de 100mm longueur et une autre d'inoc inoxydable de diamètre 4mm et de longueur de 100mm. Ces barres vont jouer le rôle d'armature et également pour fermer le circuit électrique.

La barre d'acier est polie avec du papier abrasif et rincée à l'eau distillée. Les extrémités des barres (acier et inox) sont protégées par un isolant pour que la corrosion soit localisée sur une surface bien déterminée (longueur de 60mm, Figure 1).



FIG. 1 – schéma descriptif de la barre d'acier avec les isolants

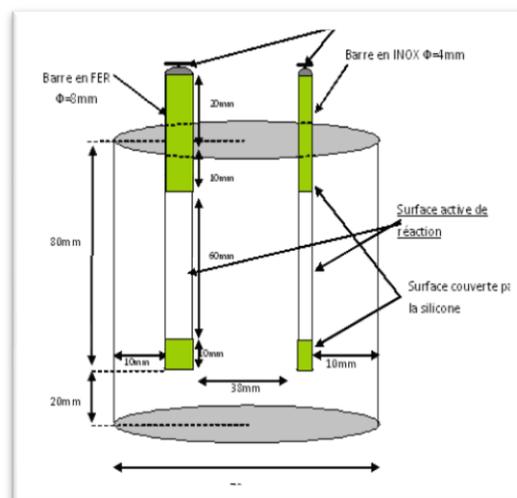


FIG .2- Schéma descriptif de l'éprouvette confectionnée au laboratoire

Les éprouvettes de mortier sont composées par le sable de mer HAWARA et le ciment de type CPJ45 de LAFARGE Tanger. Le rapport eau/ciment (E/C) égale à 0,5. Le rapport massique ciment/sable (C/S) égale à 3. Les deux barres (acier et inox) sont noyées parallèlement dans le mortier frais avec un enrobage de 8mm (Figure 2). Les éprouvettes sont compactées pendant une minute sur une table vibrante. Elles sont entreposées pendant 24 heures.

Après décoffrage, les éprouvettes sont conservées dans une salle à 100% d'humidité relative pendant 28 jours avant l'application du courant.

2.3 Test d'accélération de la corrosion

Le courant est appliqué sur les éprouvettes branchés en parallèle et liés à un générateur (figure 3). Un courant imposé est utilisée pour avoir un courant constant et direct de densité de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ entre l'acier et l'inox, cette densité est souvent choisie dans ce type d'essai pour une corrosion accéléré [7].

Après application du courant pendant une demi-heure, la polarisation est arrêtée, les échantillons sont débranchés et la lecture est effectuée après 15 min environ de la coupure du courant, la corrosion est évalué à l'aide de l'électrode Half-cell potentiel.

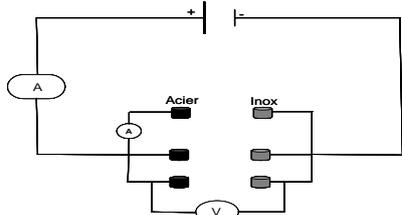


FIG.3-Schéma descriptif du montage de test de la corrosion accélérée

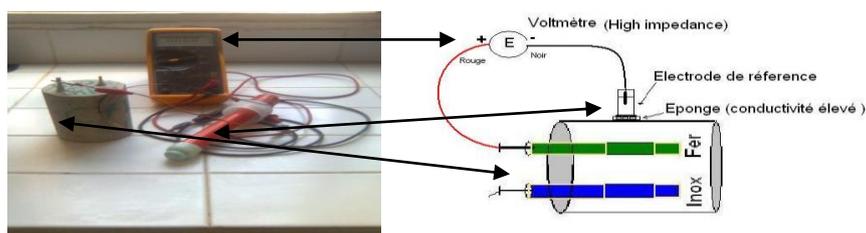


FIG.4-Schéma descriptif de la mesure du potentiel

2.4 Mesures électrochimique « Half-cell »

La corrosion des armatures en béton armé est essentiellement un phénomène électrochimique, qui met en jeu des réactions entre les ions et les électrons, le comportement et le processus de la corrosion sont décrit par la différence de potentiel entre l'acier et la surface du béton. Le potentiel ne peut pas être mesuré directement (Figure 4), il est donc mesuré relativement entre la barre d'acier (anode) et l'électrode de référence (cathode) de type cuivre/sulfate de cuivre (Cu/CuSO₄). La corrosion de l'acier dans le béton se produit généralement lorsque le potentiel d'électrode est compris entre -350 mV SCE et -600 mV [11].

3 Résultats et discussions

3.1 Identification

L'analyse granulométrique a une grande influence sur la durabilité du béton armé, la continuité de la courbe permet d'avoir une compacité maximale. En effet la granulométrie du sable HAWARA marque un caractère très fin, l'utilisation de ce dernier dans le béton armé demande une correction. La figure.5 montre l'allure de la courbe granulométrique du sable de mer HAWARA en fonction des trois courbes de référence selon Dreux[2].

Nature	Sable de mer HAWARA
Classe granulaire (mm)	0/1,25
Teneur en fines	2,1
Module de Finesse	1,58
Equivalent de sable %	81
Teneur maximale en Cl ⁻ rapportée à la masse du ciment%	0,83

Tableau.1 résumé de différent paramètre d'identification du sable de mer HAWARA

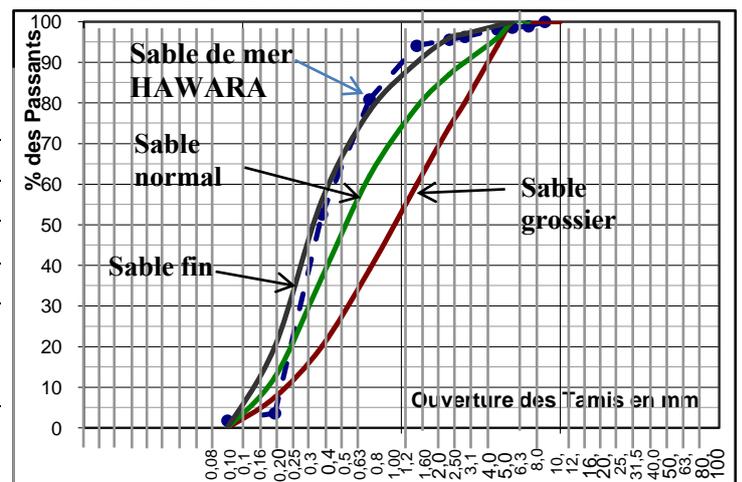


FIG.5- Courbe granulométrique de sable de mer HAWARA avec les trois courbes de référence

Le tableau 1 récapitule les paramètres d'identification déterminés sur le sable de mer HAWARA : la classe granulaire, module de finesse, la propreté et la teneur en chlorure rapportée à la masse du ciment.

En effet, selon la norme marocaine NM 10 1 008 [6] mise en application depuis juin 2010, le sable de mer HAWARA présente une ES acceptable. Par ailleurs, la teneur en chlorures limite sont utilisation pour la confection du béton armé.

3.1.1 Sable de mer HAWARA non lavé

3.1.1.1 Sans application du courant

La figure 6 montre les variations du potentiel Half-Cell de l'acier en fonction du temps sans application de courant. La valeur initiale du potentiel à t_0 est de -301mV. Elle décroît progressivement en fonction du temps jusqu'à atteindre la valeur -488mV à 316 jours. Au-delà de cette valeur, le potentiel reste stable autour de -500 mV. Aucune fissuration n'a été observée sur l'échantillon durant l'essai.

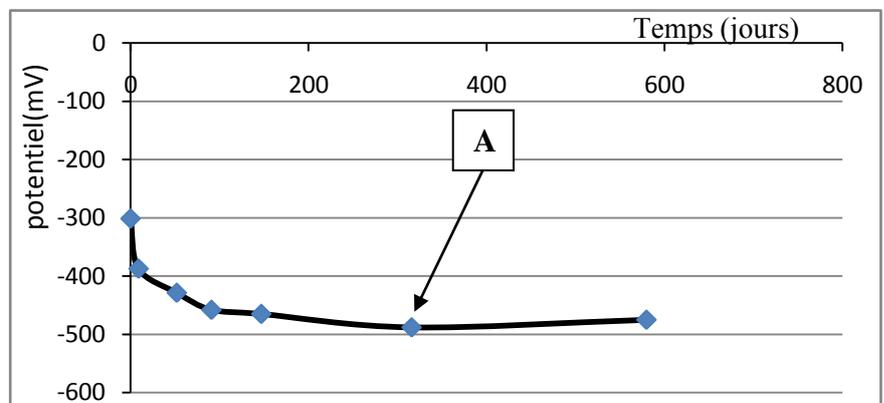


FIG.6-Variation du potentiel Half-Cell en fonction du temps sans application du courant

3.1.1.2 Avec application du courant

La figure.7 montre la variation du potentiel Half-Cell de l'acier en fonction du temps. Suite à l'application du courant de $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ sur les échantillons confectionnés avec le sable de HAWARRA, le potentiel a diminué en fonction du temps jusqu'à atteindre la valeur -555 mV au bout de 90 min, sachant que la mesure initiale à $t=0$ est de l'ordre de -308 mV . Ainsi, on peut dire que l'application du courant a accéléré le phénomène de la corrosion [5].

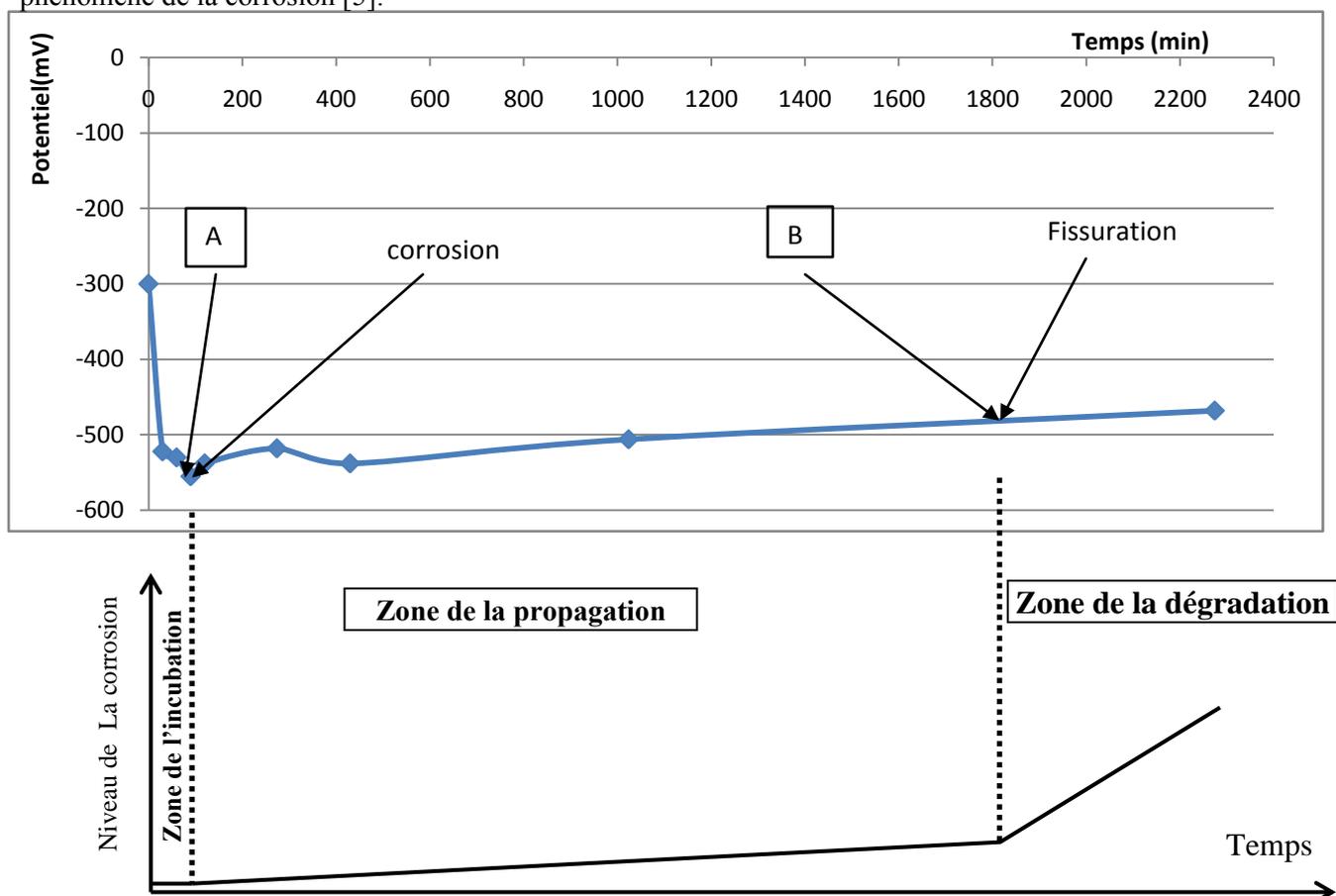


FIG.7-La variation du potentiel Half-Cell en du temps avec schéma descriptif de l'évolution de la corrosion

Par ailleurs nous avons pu mettre également en évidence la fissuration du mortier [Photo 2] après 1800 min (1,5jour). Dans la littérature, de nombreux modèles estiment le temps de la première fissure, T_C , induite par les produits de corrosion. Par exemple, selon Piltner T_C est proportionnel à l'inverse de la densité de courant dans le béton armé. La corrosion obéit à l'équation de Faraday et que les produits de corrosion sont autour des barres d'armature en acier [9].

A la fin de l'essai, l'échantillon du mortier a été écrasé par fendage. L'état de l'interface entre l'acier et le béton a été observé [Photo 2]. Ainsi, on a déduit que : En présence des chlorures dans le sable, il apparaît que la surface de l'acier a été dépassivée [Photo 2]. Ceci est expliqué dans la littérature par le fait que la surface de l'acier était couverte avec des produits verts et noirs, qui se sont transformés rapidement à la couleur rouge-noir en contact avec l'atmosphère [10].



Photo.1- Echantillon fissuré



Photo. 2- Echantillon dégradé après l'écrasement



Photo. 3- Echantillon après l'écrasement

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives[3] :

- une phase d'incubation (dite parfois d'amorçage) : qui correspond à l'altération lente du béton, sans qu'il ne se produise encore des effets visibles,
- une phase de développement (dite parfois de croissance): correspondant à des dégradations du matériau.

Selon la description de Tuuti [3], la façon la plus simple et la plus efficace d'augmenter la durée de vie des ouvrages consiste à augmenter la durée de la période d'incubation. La durée de vie des structures en béton armé est donc évaluée ici à partir de la durée de la période d'incubation. Il s'agit donc d'une approche conservatrice (sécuritaire), car cette phase ne conduit pas à une perte immédiate de capacité portante de l'ouvrage.

En effet, une présence importante des chlorures (tableau 1) risque d'entraîner la corrosion des aciers du béton armé juste après la mise en place. Pour faire face à cette contrainte, on propose d'éliminer les ions chlorures par un lavage successif du sable HAWARA à l'eau distillée.

Nous avons procédé au lavage des échantillons de sable sec de 1 kg, dans un béccher de trois litres, avec un litre d'eau distillée. Après agitation pendant 10 min, on a laissé reposer pendant une heure. Par la suite, on a siphonné sans entrainer des particules solides. Le floculat est récupéré dans un flacon et on a répété l'opération cinq fois. Le cinquième floculat est analysé par titrimétrie pour confirmer l'élimination des chlorures. Le traitement des sables a pour objectif d'obtenir un taux de chlorure nul.

3.1.2 Sable de mer HAWARA lavé

3.1.2.1 Sans application du courant

La figure.8 montre la variation du potentiel Half-Cell de l'acier en fonction du temps. La valeur initiale du potentiel mesuré sur des mortiers confectionnés avec des sables lavés est de l'ordre de -196 mv.

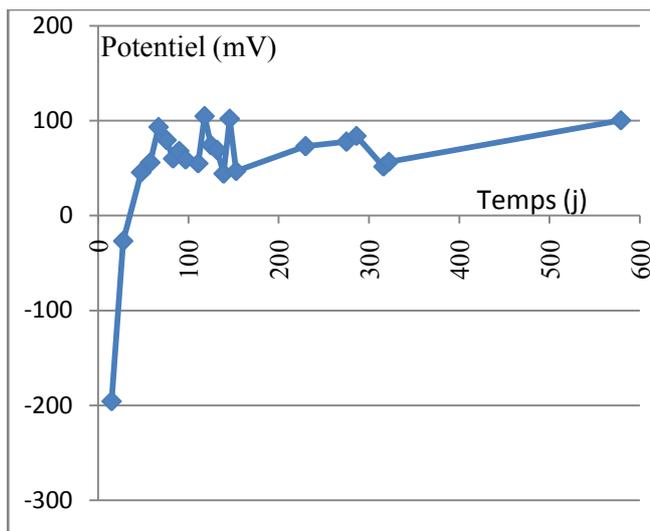


Figure.8 : la variation du potentiel Half-Cell en fonction du temps sans application du courant pour le sable HAWARA lavé

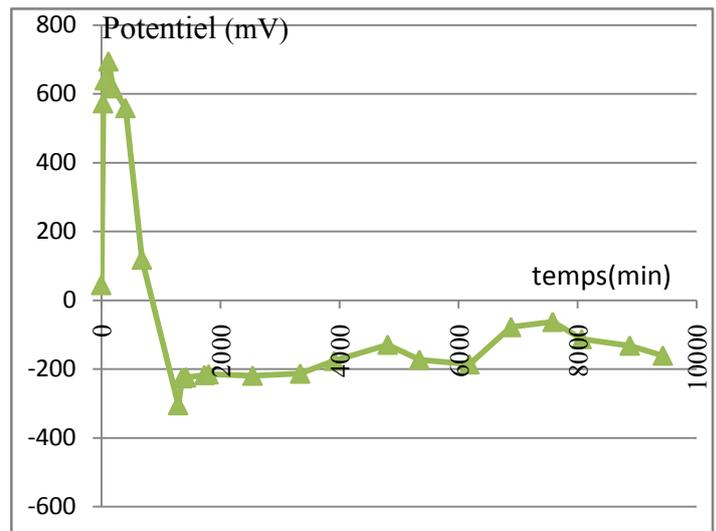


Figure.9 : la variation du potentiel Half-Cell en fonction du temps avec application du courant pour le sable HAWARA lavé

Cette dernière nous indique l'absence de la corrosion [11], par la suite, la mesure du potentiel enregistre une augmentation jusqu'à une valeur 93mv au bout de 67 jours. Cette augmentation est expliquée par la déshydratation des échantillons puisque le potentiel varie en fonction de l'humidité et les échantillons ont été entreposés au laboratoire aux conditions ambiantes. La valeur 93mv nous confirme l'absence de la corrosion [11].

Cette confirmation est approuvée par l'écrasement et l'observation visuelle des échantillons à la fin de l'essai. Comme le montre la photo n°3 aucune trace de corrosion n'est détectée. Au delà de 67 jours et jusqu'à la fin du test, la valeur du potentiel est stabilisée dans un intervalle entre 0 et 100mv

3.1.2.2 Avec application du courant

La figure 9 illustre les mesures du potentiel Half-Cell de l'acier en fonction du temps. Les valeurs initiales du potentiel mesuré sur les surfaces des mortiers confectionnés avec des sables lavés sont de l'ordre de 46mV, valeur pour laquelle la littérature confirme l'absence de la corrosion [11],

Après 30 min d'application du courant, une augmentation brutale du potentiel est mesurée 572mV. Cette valeur n'a persisté que 376 min. Ensuite, une diminution spectaculaire du potentiel est mesurée, elle atteint -227mv au bout de 1425 min. A partir de ce moment, et jusqu'à la fin de l'essai, la variation du potentiel est stabilisée dans un intervalle allant de 0 à -220mv. Toutes les valeurs des potentiels mesurés pendant cet essai sont situées dans une zone où on n'assiste pas au phénomène de corrosion suite aux observations visuelles faites après l'écrasement des échantillons par fendage (photo n°3).

Les résultats obtenus sur les échantillons confectionnés avec du sable de mer lavé sans et avec l'application du courant situent l'état de dégradation dans le stade d'incubation des structures en béton armé [11] puisque la valeur du potentiel mesuré n'a pas enregistré une valeur inférieure à -350mV.

4 Conclusion

L'essai de la corrosion accéléré par l'application du courant est une méthode validée par plusieurs études afin de suivre le phénomène de la corrosion de l'acier dans le béton. Cette étude s'ajoute aux méthodes non destructives pour la détermination de l'état de dégradation (période d'incubation, période de propagation et le développement de la corrosion) d'une structure en béton armé de notre région.

La corrosion produite par l'application du courant est similaire à celle observée dans le cas réel.

Dans les conditions naturelles, la corrosion conduit à la fissuration du béton, c'est le même phénomène qui se reproduit sous l'application du courant pour les mortiers confectionnés avec du sable HAWARA contaminé par des chlorure.

La méthode nous précise le temps de l'initiation de la corrosion par la chute du potentiel mesuré entre l'acier et la surface du mortier. Ce phénomène est confirmé par l'observation visuelle après l'écrasement par fendage des éprouvettes.

Les résultats obtenus montrent la dégradation rapide des mortiers fabriqués avec du sable non lavé en comparaison avec les mortiers confectionnés par du sable lavé sans application du courant, sous l'effet de ce dernier, le phénomène se reproduit dans un temps très faible.

Cette étude montre également que l'apparition des fissures dans le béton peut être contrôlée avec une technique non destructive.

Nous recommandons à travers cette étude, de procéder à des diagnostics des ouvrages sensibles qui ont été construits par le sable de HAWARA afin de mesurer l'état de fonctionnalité de l'ouvrage et de procéder à sa réparation avant sa ruine.

5 Références bibliographiques

- [1] T. Vidal, A. Castel, Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment *Cement and Concrete Research* 37(2007) 1551-1561.
- [2] G. Dreux et J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants Edit.Eyrolles1998.
- [3] K. Tuutti, Corrosion of steel in concrete, CBI research report no 4.82, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden,1982.
- [4] M.RICHARDSON. Fundamental of durable reinforced concrete.
- [5] A.Shamsad, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review *Cement & Concrete Composites* 25 (2003) 459-471.
- [6] NM 10.1.008 Norme Marocaine : Bétons - Spécification, performances, production et conformité 2009 correspond à la Norme Européenne EN206-1 et ses amendements A1&A2.
- [7] S. Caré, A. Raharinaivo, Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 1598-1612
- [8] S. Caré, Aggregate influence on chloride ion diffusion into mortar, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1021-1028.
- [9] R. Piltner, P.J.M. Monteiro, Stress analysis of expansive reactions in concrete, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 843-848.
- [10] J.M.R. Genin, Ph. Refait, A. Raharinaivo, Green rusts, intermediate corrosion products formed on rebar in concrete in the presence of carbonation or chloride ingress, *International Conference Understanding Corrosion Mechanisms of Metals in Concrete: A Key to Improving Infrastructure Durability*, July 27-31 1997, Cambridge, USA.
- [11] Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures Rilem TC 154-EMC