

Partie 2 – Corrosion des aciers du béton armé

MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE OPÉRATIONNELLE ET ORIGINALE DE LA MESURE DE RÉSISTANCE DE POLARISATION AFIN D'ESTIMER LA CORROSION DU BÉTON ARMÉ SUR LES AÉRORÉFRIGÉRANTS

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD OF MEASUREMENT OF THE POLARIZATION RESISTANCE TO ESTIMATE THE LEVEL OF CORROSION OF THE REINFORCED CONCRETE OF COOLING TOWERS

M.E. MITZITHRA^(a-b*), F. DEBY^(b), S. LAURENS^(b), J.P. BALAYSSAC^(b), J. SALIN^(a)

a. EDF R&D, 6, quai Watier, 78401 Chatou Cedex, France

b. Université de Toulouse, UPS, LMDC, 135, avenue de Rangueil, 31077, Toulouse

* auteur correspondant : me.mitzithra@gmail.com

RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats obtenus des simulations numériques d'un mode opératoire de la mesure de résistance de polarisation pour l'évaluation de la corrosion du béton armé des aéroréfrigérants. Un mode opératoire simple est proposé, adapté aux aéroréfrigérants soumis à la corrosion due à la carbonatation. Via des essais numériques, des abaques et des lois de correction sont construits et le rôle des paramètres influents (l'enrobage, la résistivité et le courant injecté par la contre-électrode), est examiné. Enfin, la méthode proposée est testée en laboratoire, sur des corps d'épreuve reproduisant les conditions du site.

ABSTRACT

This paper summarises the results obtained from the numerical simulations of an operative measurement mode of polarization resistance adapted for evaluating the corrosion of reinforced concrete on cooling towers. A simple operative measurement mode of R_p is proposed, adapted for cooling towers submitted to corrosion due to carbonation. By means of numerical experimentations, abacuses and correction laws are built involving the different influencing parameters: steel reinforcement's concrete cover, concrete resistivity and current intensity injected from the counter electrode. Finally, a first application of the proposed procedure for calculating the real value of R_p in laboratory conditions is presented.

Mots-clés : corrosion; carbonatation; résistance de polarisation; modèle numérique; abaques.

* * *

1. INTRODUCTION

Le suivi de l'état des ouvrages de génie civil est très important pour EDF (Electricité de France) qui possède un grand nombre des structures différentes, i.e. des aéroréfrigérants, des réacteurs, des barrages. La raison principale de la dégradation des structures en béton armé est la corrosion des armatures. Dans cette étude, le cas des aéroréfrigérants a été examiné. Il s'agit des structures de large surface, de grande hauteur et de faible épaisseur. Ces tours ont plus de 20 ans et jouent un rôle important pour les sites de production d'énergie.

Cet article décrit un mode opératoire et original de la mesure de résistance de polarisation (R_p) proposée pour la caractérisation précise de l'état des zones potentiellement affectées par la corrosion. Les techniques existantes de la mesure de R_p souffrent d'un manque de fiabilité [1]. Ainsi, un mode opératoire original de la mesure de R_p , est suggéré, adapté aux aéroréfrigérants soumis à la corrosion due à la carbonatation. La sonde consiste en une contre-électrode (plus petite que celles-ci des dispositifs commerciaux) et une électrode de référence (Fig.1a). La mesure est réalisée sur un seul point sur la surface de la structure (Fig.1b). A l'aide de simulations numériques, des relations ont été établies afin de remonter aux propriétés électrochimiques de l'acier (potentiel et courant) à partir des valeurs mesurées à la surface du béton. Des abaques sont construits en prenant en compte les paramètres influents : l'enrobage des armatures, la résistivité du béton et l'intensité du courant injecté par la contre électrode. La fiabilité et l'efficacité du modèle dans son

domaine de définition a été démontrée dans l'environnement du laboratoire.

2. ETAT DE L'ART SUR LA MESURE DE RÉSISTANCE DE POLARISATION LINÉAIRE, R_p

La résistance de polarisation linéaire est définie par la pente de la partie linéaire de la courbe de polarisation (I-E), autour du potentiel de corrosion, E_{corr} , d'un système électrochimique réversible. Afin d'estimer la valeur correcte de R_p , la chute du potentiel ohmique, attribuée à la résistance de l'électrolyte R_o (i.e. béton), doit être prise en compte. Stern & Geary (1957) [3] relient la résistance de polarisation à la densité de courant, j_{corr} , via l'équation:

$$j_{corr} = B / R_p \quad (1)$$

Où B est une constante, égale à 26mV pour un acier en état actif et à 52 mV pour un acier en état passif [1].

Les dispositifs commerciaux qui sont utilisés pour la mesure de R_p fonctionnent de la même façon : un courant est injecté par la contre-électrode de la surface du béton vers la surface de l'armature et une réponse en potentiel est mesurée par l'électrode de référence. En même temps, un courant secondaire est injecté par un anneau de garde afin que la polarisation soit confinée dans la surface de l'acier supposée polarisée [4]. Cependant, des travaux scientifiques ont démontré la complexité de la mesure au niveau pratique via ces dispositifs commerciaux. [5], [6]. De plus, la présence de l'anneau de garde pendant la mesure peut modifier la polarisation de l'acier : des phénomènes de sur ou sous-polarisation peuvent conduire à une fausse interprétation de la résistance de polarisation [7], [8], [9]. En outre, l'hypothèse d'une distribution homogène de la densité du courant sur la surface supposée polarisée conduit à des erreurs sur l'estimation de R_p [1].

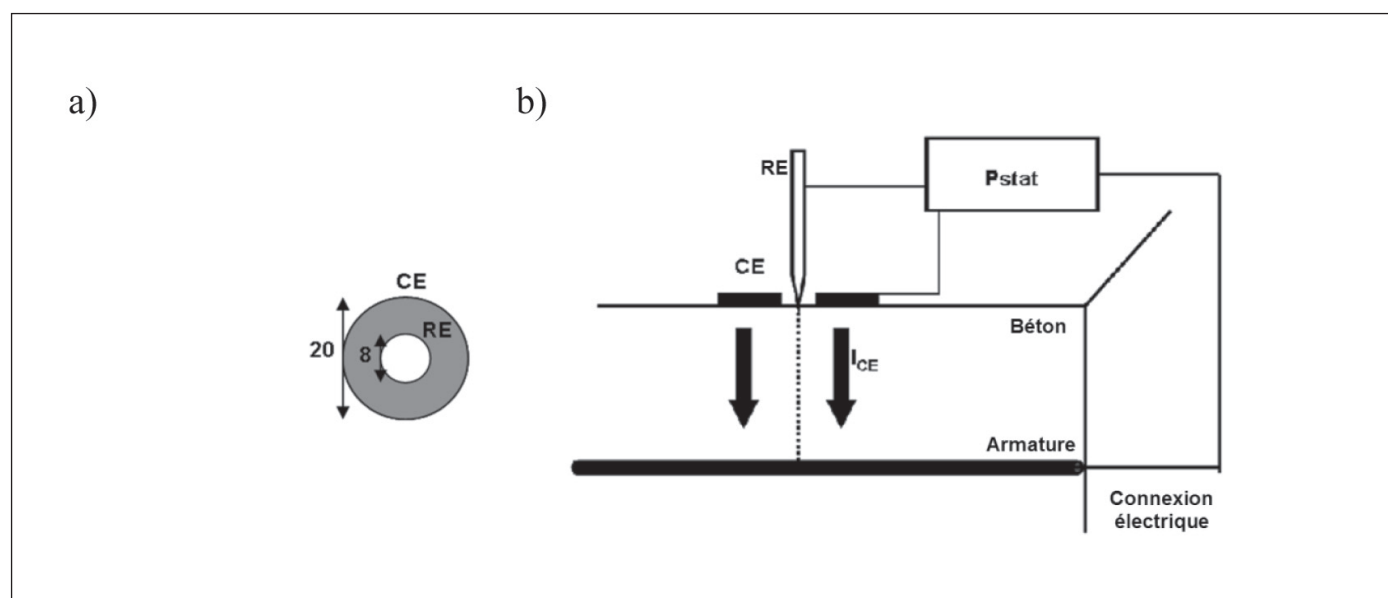


Figure 1 : a) Schéma de la sonde du modèle proposé (dimensions à mm). b) Schéma de la mesure de R_p proposée. La contre-électrode (CE) injecte du courant (I_{ce}) de la surface du béton vers l'armature. Une électrode de référence (RE) mesure la réponse du système en potentiel sur la surface du béton. La connexion électrique à l'armature est requise.

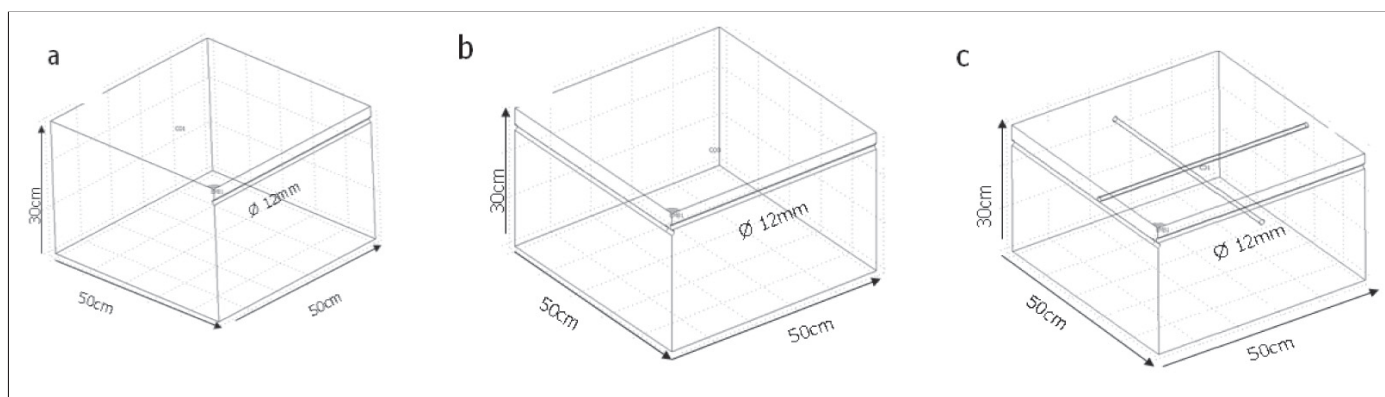


Figure 2 : Géométries des blocs de béton simulés avec : a) une seule armature b) deux armatures croisées à un seul point de contact c) 4 armatures croisées avec deux points de contact.

3. MODÈLE NUMÉRIQUE DE LA MESURE DE R_p PROPOSÉE SUR LES AÉRORÉFRIGÉRANTS

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du module « DC conductive media » du logiciel commercial en éléments finis (FEM), Comsol Multiphysics®.

Des blocs de béton prismatiques ont été simulés avec des dimensions de 1m x 1m x 30 cm. Trois configurations différentes des armatures ($\varnothing 12\text{mm}$) ont été testées (Fig.2). Cet article présente les résultats obtenus pour la géométrie avec une seule armature (Fig.2a).

Pour chaque géométrie simulée, la symétrie permet de réaliser des expérimentations numériques dans un volume qui correspond au $\frac{1}{4}$ de la géométrie globale. De plus, dans cette étude particulière, les blocs de béton sont considérés des milieux homogènes, avec une résistivité électrique uniforme ; les gradients de teneur en eau dans le volume sont négligés. Les équations qui gouvernent les phénomènes électriques sont la loi d'Ohm qui lie la densité du courant locale au gradient du potentiel $\nabla \varphi$ (2) et la conservation de charge (3) :

$$j = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla \varphi \quad (2)$$

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (3)$$

Dans chaque simulation, une densité du courant est injectée à l'interface contre-électrode-béton. Les autres surfaces qui déterminent le domaine du béton sont isolées électriquement. Dans toutes les configurations, les armatures se trouvent soit en état actif, soit en état passif. Ainsi, les interfaces acier-béton ont été caractérisées par la relation de Butler-Volmer intégrée dans le code. Cette étude particulière utilise les paramètres de l'équation de Butler-Volmer testée dans le travail numérique de Laurens et al. [1]. Les simulations sont réalisées pour toutes les combinaisons possibles des paramètres suivants :

- Courant injecté de la contre-électrode: $I_{CE}=1, 5, 10, 20, 30$ and $50 \mu\text{A}$
- Enrobage (par rapport à l'armature supérieure): $e=1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ cm}$
- Résistivité: $\rho=50, 150, 300, 600, 1000, 2000 \text{ Ohm.m}$

Un exemple de résultats est proposé sur les figures 3a & 3b qui illustrent la distribution de la densité du courant sur la longueur de la fibre supérieure de l'armature dans la configuration d'une seule armature à 6cm, en état actif et une résistivité du béton de 50 Ohm.m et 2000 Ohm.m.

La densité du courant locale au point de la surface de l'armature (« point d'intérêt » ou « p.o.i ») qui se trouve au-dessus du point de mesure sur la surface du béton, est utilisée pour l'évaluation de R_p . Le point (0,0) sur l'axe-x

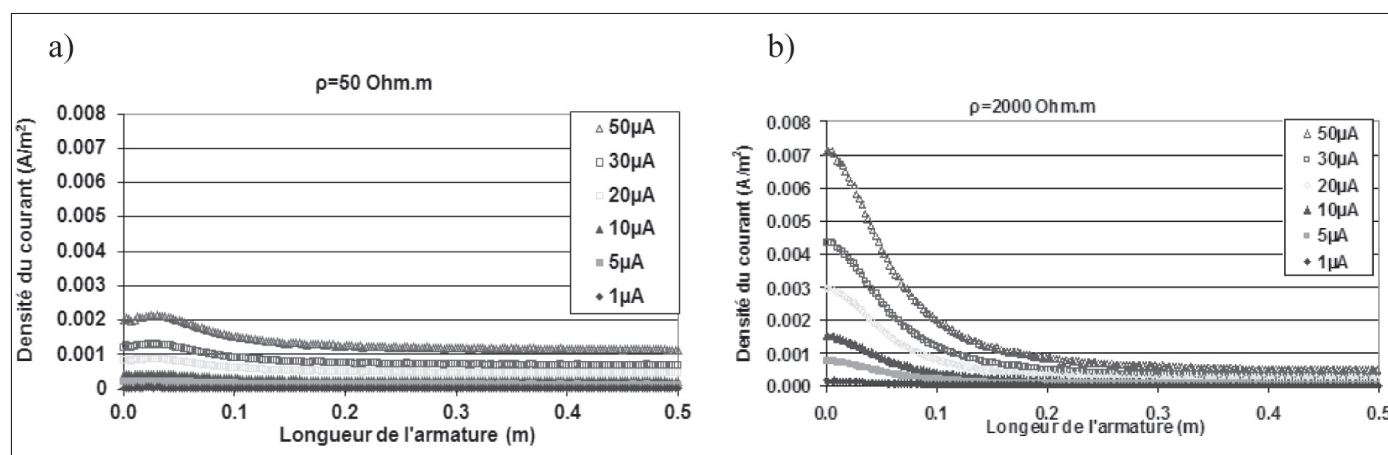


Figure 3 : Distribution de la densité du courant sur la longueur de l'armature de la configuration d'une seule armature, à 6cm, en état actif, pour chaque courant injecté et a) $\rho=50 \text{ Ohm.m}$ b) $\rho=2000 \text{ Ohm.m}$

correspond donc au « p.o.i » qui reçoit le plus de courant injecté. On constate de façon évidente que le « p.o.i. » est d'autant plus polarisé que le courant injecté est important. L'augmentation de la résistivité influence la polarisation du « p.o.i. » de la même manière que le courant injecté.

De plus, un effet géométrique dû au ratio entre les dimensions de la contre-électrode et l'épaisseur d'enrobage a été constaté. Pour un enrobage plus faible que le diamètre de la contre-électrode, le « p.o.i. » reçoit moins de courant que pour un enrobage plus fort : la distance n'est alors pas assez longue pour que toutes les lignes de courant rejoignent le « p.o.i ».

R_p est alors calculée selon l'équation:

$$R_p = \frac{\Delta E_p}{j_{ar}} = \frac{E_{ar} - E_{corr}}{j_{ar}} \quad (4)$$

où: ΔE_p (polarisation) est la différence entre E_{ar} sur le « p.o.i » et E_{corr} de l'armature et j_{ar} est la densité de courant locale au « p.o.i. ».

La chute ohmique, c'est-à-dire la relation entre la valeur du potentiel mesuré en surface E_{re} et la valeur E_{ar} sur le « p.o.i », est évaluée par les simulations numériques (eq. 5 & 6). De la même manière, la densité de courant locale j_{ar} est évaluée numériquement (eq. 7). Dans les deux cas, la résistivité, l'enrobage et le courant injecté sont pris en compte explicitement.

$$\Delta E_{\Omega} = E_{RE} - E_{ar} = k \cdot \rho \quad (5)$$

$$\text{ou } E_{ar} = E_{RE} - k \cdot \rho \quad (6)$$

$$\ln \left(\frac{j_{ar}}{i_{CE}} \right) = A + B \cdot e \quad (7).$$

Les abaques $k=f(e, I_{CE})$ et $A, B=f(\rho)$ sont créés pour une seule armature en état actif. Ces abaques sont donc valables dans la gamme des valeurs des paramètres testés dans les simulations numériques.

4. APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE MESURE DE R_p PROPOSÉE DANS LE LABORATOIRE

Les géométries simulées avec armatures seules ont été reproduites dans les conditions du laboratoire. Une dalle de béton a été fabriquée avec 4 épaisseurs d'enrobage différentes (2, 3, 4 et 5cm). La dalle a été stockée dans une salle de carbonatation accélérée (50% CO₂, 60% RH) afin que les aciers se corrodent de façon uniforme (état actif). Tout d'abord, une mesure de résistivité du béton en configuration Wenner (Fig.4a) est réalisée, puis, la mesure du potentiel de corrosion et de polarisation est effectuée (Fig.4b). Pour une mesure réalisée au-dessus de l'armature à 2cm de la dalle carbonatée, voici les étapes suivies pour estimer la valeur de R_p réelle sur la surface de l'armature:

- Mesure de la résistivité du béton carbonaté : la résistivité moyenne est à 584 Ohm.m \pm 34 Ohm.m.
- Mesure du potentiel de corrosion: 0,446V \pm 0,002V.
- Lancement des séquences de polarisation (une polarisation-cible sur la surface de l'acier est fixée à 20mV):
 - Injection de 1μA du courant. Mesure du potentiel sur la surface du béton: $E_{RE} = -0,442V$
 - Calcul du potentiel sur le « p.o.i », E_{ar} , en utilisant le coefficient k (Fig. 5a) et l'eq. 6: $E_{ar} = -0,445V$.
 - Calcul de la densité de courant locale sur le « p.o.i. », j_{ar} , en utilisant les coefficients A et B (Fig.5b) et l'eq. 7: $j_{ar} = 0,001A/m^2$

Ensuite, la polarisation sur l'armature est calculée :

$$\Delta E_p = E_{ar} - E_{corr} \quad (8)$$

Dans cet exemple, la polarisation effectuée est inférieure à la polarisation cible de 20mV. Un courant plus élevé peut alors être injecté. Afin d'estimer la valeur de résistance de polarisation, la polarisation réelle, ΔE_p est tracée en fonction de la densité du courant locale, j_{ar} , pour chaque niveau de courant injecté, jusqu'à ce que la valeur de I_{CE} produise la polarisation cible de 20mV (Fig. 6).

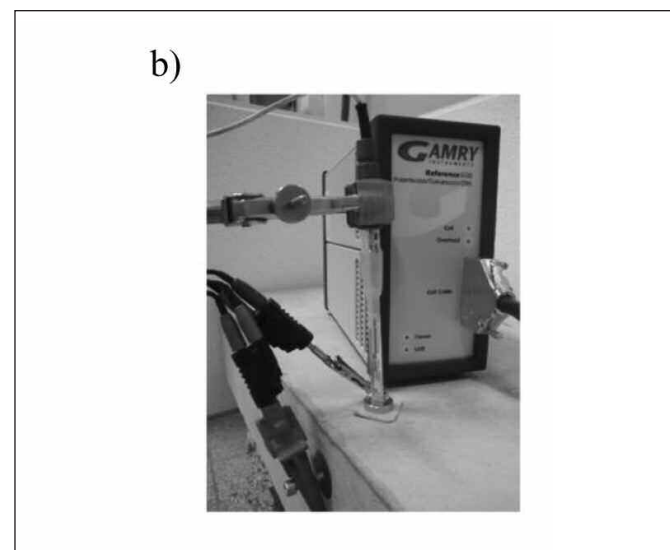
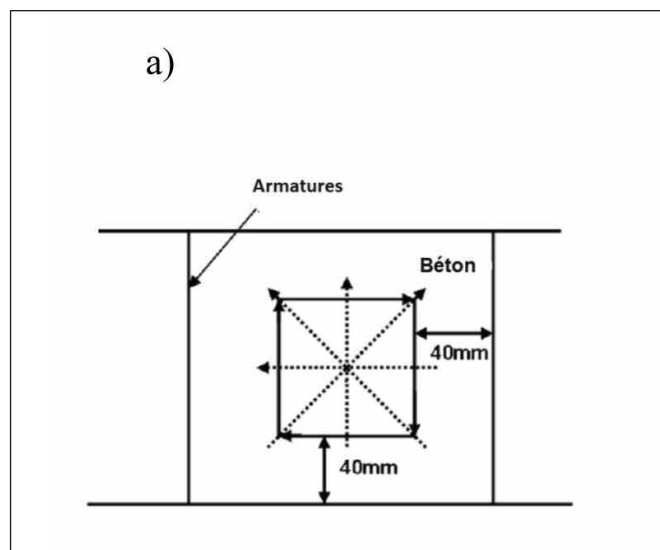


Figure 4 : a) Positions successives de la sonde Wenner pour la mesure de résistivité du béton indiquées par les flèches. b) Montage expérimental de la mesure de R_p . CE (rouge), Electrode de référence (bleu), Electrode de travail/armature (vert).

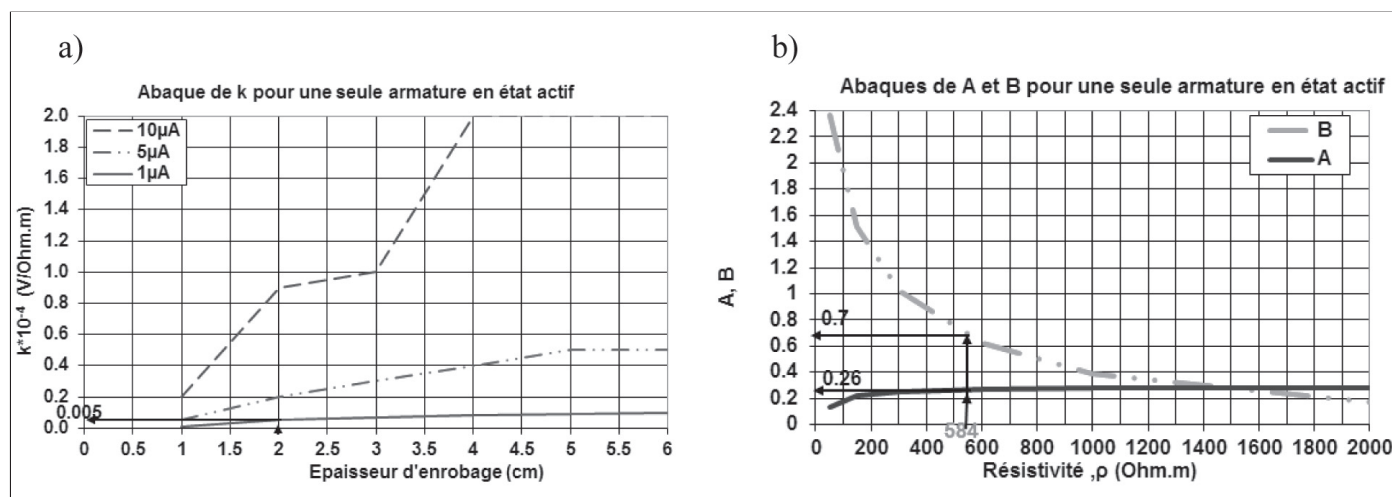


Figure 5 : a) Estimation de k pour un courant injecté de 1 μA . b) Estimation de A, B pour un courant injecté de 1 μA .

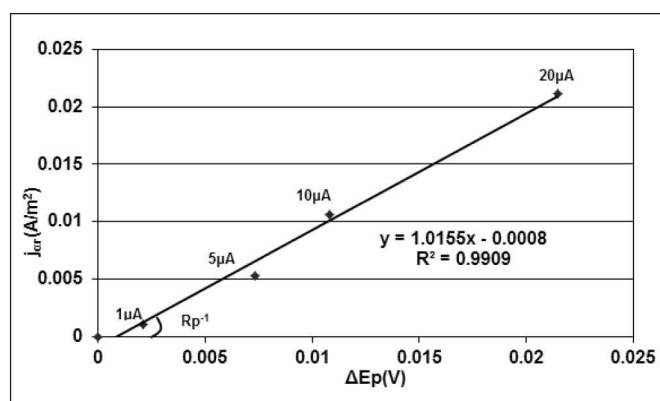


Figure 6 : $\Delta E_p \text{ (V)}$ fonction de $i_{or} \text{ (A/m}^2\text{)}$ autour E_{corr} pour une armature active à 2cm. La pente de cette courbe représente l'inverse de la valeur $R_p \text{ (Ohm.m}^2\text{)}$ de l'armature.

La figure 6 démontre que la condition de linéarité est bien respectée. $R^2=0.99$ pour la courbe de polarisation établie (un critère de $R^2>0.85$ est retenu pour la condition de linéarité). La valeur de R_p obtenue par le calcul de la pente de la droite est de 1 Ohm.m^2 .

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article décrit un mode opératoire original de la mesure de résistance de polarisation proposée pour l'estimation précise de l'état de corrosion des armatures des aéroréfrigérants. Via des simulations numériques, des abaques et des lois de correction sont construits, en prenant en compte les paramètres influents : résistivité du béton, enrobage et courant injecté. L'application expérimentale de la procédure proposée dans des conditions du laboratoire a confirmé la faisabilité de la technique. Des essais sur site restent à faire afin d'en valider la robustesse.

RÉFÉRENCES

- [1] Laurens et al, 2010, Simulation numérique de la mesure de résistance de polarisation linéaire des armatures du béton, ANR-2006- PGCU-001-01: Projet Applet L3-3/2
- [2] C. Andrade, (2004), Test methods for on site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Materials and Structures 37: 623-642
- [3] M. Stern, A.L. Geary (1957), Electrochemical Polarization I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, Journal of the Electrochemical Society 104-1, pp.56-63
- [4] Nygaard et al, 2009, Corrosion rate of steel in concrete: evaluation of confinement techniques for on-site corrosion rate measurements, Materials and Structures 42, pp1059-1076
- [5] Wojtas, 2004, Determination of corrosion rate of reinforcement with a modulated guard ring electrode; analysis of errors due to lateral current distribution, Corrosion Science 46, pp 1621-1632
- [6] Andrade et al, 1995, The importance of geometrical considerations in the measurement of steel corrosion in concrete by means of AC impedance, Corrosion Science 37, No 12, pp 2013-2025
- [7] Andrade et al, 1995, Galvanic Corrosion of steel in Concrete, Materials Science Forum 192-194, pp 899-906
- [8] Andrade, Alonso, 2004, Test methods for on site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Materials and Structures 37, pp 623-642
- [9] Andrade et al, 2011, Numerical modelling of current lines of on site corrosion rate meters used in concrete, MAI Workshop 2012