

Partie 2 – Corrosion des aciers du béton armé

INFLUENCE DES CONDITIONS DE MESURE ET DE LA CONTAMINATION INITIALE DU BÉTON, SUR LES VALEURS DE RÉSISTANCE DE POLARISATION MESURÉES AVEC UN GECOR6[®]

INFLUENCE OF THE TESTING CONDITIONS AND CONCRETE CONTAMINATION ON CORROSION ASSESSMENT USING A GECOR6[®]

Elisabeth MARIE-VICTOIRE^(a*), Véronique BOUTELLER^(b), Julien SCHNEIDER^(c), Carmen ANDRADE^(d)

a. Université Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques,
LRMH, CNRS-USR 3224, Champs-sur-Marne, France

b. UPE, IFSTTAR, Département Matériaux et Structures, Laboratoire Sécurité et Durabilité des Ouvrages d'Art,
77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée Cedex 2, France

c. CEREMA, Direction territoriale Ile-de-France, 120 route de Paris, BP216 Sourdun, 77487 Provins Cedex, France

d. IETcc, C/Serrano Galvache, N°4, 28033, Madrid, Espagne

* auteur correspondant : elisabeth.marie-victoire@culture.gouv.fr

RÉSUMÉ

La corrosion induite soit par la carbonatation du béton, soit par la présence d'ions chlorure est la principale source de dégradation des bâtiments et des ponts construits en béton armé. Dans ce contexte, le diagnostic de la corrosion constitue un paramètre crucial dans l'élaboration de la stratégie d'intervention la plus adaptée à l'ouvrage : entretien ou réparation ? Si les cartographies de potentiel ou de résistivité peuvent apporter de précieuses informations qualitatives sur le risque de corrosion, seules les mesures de résistance de polarisation

permettent une évaluation quantitative de la vitesse de corrosion. Pour ce type de mesure, parmi les outils de terrain disponibles, l'un des plus utilisés est le Gecor6[®], qui est composé d'un capteur circulaire équipé d'une série d'électrodes (cuivre/sulfate de cuivre pour les électrodes de référence, acier inoxydable pour la contre-électrode), incluant un anneau de confinement, associé à un système d'acquisition. Dans le cadre d'un projet plus vaste, dédié à l'étude de la durabilité des bétons [1], l'objectif de cette étude était de contribuer à l'identification des facteurs pouvant générer des disparités de résultats de diagnostic électrochimique in situ. Deux principaux paramètres ont été

considérés : la contamination du béton et les conditions de mesure. Une série de mesures de potentiel, de résistivité et de résistance de polarisation a été réalisée sur 4 dalles de béton armé, exposées en conditions de vieillissement naturel et présentant des contaminations initiales distinctes : béton sain, ions chlorure introduits au gâchage, ions chlorure introduits par immersion/séchage et carbonatation. Pour les mesures de résistance de polarisation, deux paramètres ont été modulés : la durée de polarisation et la position du capteur.

Les résultats de ces mesures ont mis en évidence un impact plus important de la durée de polarisation que de la position du capteur pour le béton pollué par les chlorures, alors qu'à l'inverse dans le cas du béton carbonaté, l'impact de la position du capteur est prépondérant.

ABSTRACT

Rebars corrosion, either induced by carbonation or chloride pollution, is the main source of degradation of reinforced concrete buildings or bridges. Therefore, corrosion assessment is a crucial input data to establish the adequate level of intervention on those structures: maintenance or repair? If potential or resistivity mappings can give useful qualitative information about the risk of corrosion, linear polarization resistance measurements constitute the exclusive possibility to evaluate precisely ongoing corrosion.

Among the onsite devices available, one of the most used is the Gecor6®, which is composed of a circular sensor equipped with a series of electrodes (copper/copper-sulfate for the reference ones, stainless steel for the counter-electrode), including a confinement ring, connected to a data acquisition system.

As part of a larger project dedicated to concrete durability assessment [1], the purpose of the present study was to contribute to identify factors influencing electrochemical on site diagnosis disparities.

Two main parameters were considered: the contamination of the concrete cover and the testing conditions. A series of potential, resistivity and LPR measurements was performed on 4 reinforced concrete slabs exposed to natural weathering and presenting distinct initial contamination: reference concrete, endogenous chloride pollution, exogenous chloride pollution, and carbonation. For the LPR measurements, two parameters were modulated: polarization time and sensor position.

The results evidenced a clear impact of the polarization time versus the sensor position for the chloride polluted concrete, when contrarily the sensor position was the main disruptive parameter for the carbonated concrete.

Mots-clés : Corrosion, résistance de polarisation, Gecor6®, ions chlorure, carbonatation.

* * *

1. INTRODUCTION

Si depuis l'invention du béton armé, d'importants progrès ont été réalisés en termes de qualité des matériaux et de maîtrise des techniques de construction, le béton reste malgré tout un matériau poreux, sensible à son environnement. Dans les ouvrages les plus anciens, qui cumulent erreurs de conception ou de réalisation et agressivité de l'environnement, la corrosion des armatures génère d'importantes pertes de matière susceptibles de nuire à la fonction première de ces ouvrages (impact sur le trafic...), mais aussi à la lisibilité de certaines œuvres (sculptures, vitraux...). Le diagnostic de la corrosion constitue donc un paramètre clé de la gestion opérationnelle et patrimoniale des ouvrages en béton armé. Or les modèles de calcul de durée de vie résiduelle largement développés ces dernières années, et qui constituent de prometteurs outils de gestion, nécessitent des données d'entrée, telles que la vitesse de corrosion des aciers, avec une bonne précision. Les valeurs de vitesse de corrosion généralement utilisées dans ces modèles sont calculées à partir de mesures de résistance de polarisation réalisées in situ. Or plusieurs études ont montré des disparités de résultats en fonction des appareils de mesure utilisés, sans totalement expliquer ces différences [2][3]. Certains auteurs supposent que l'utilisation de systèmes de confinement (voire leur géométrie), impactant la surface d'armature polarisée lors de la mesure, est à l'origine de ces écarts [4] [5] [6]. D'autres suspectent que le problème réside dans la technique de mesure de la résistance de polarisation (*galvanostatic* ou *potentiostatic pulse*, ou *linear sweep*) ou encore dans la prise en compte de la chute ohmique [7].

L'objectif de cette étude était de contribuer à la compréhension de ces écarts de résultats en menant une série de mesures à l'aide d'un Gecor6®, sur des corps d'épreuve en béton armé, de composition, de géométrie d'armature et de contamination connues, soumis à des conditions environnementales propices à la corrosion.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Corps d'épreuve

Les corps d'épreuve étaient des dalles de 30x30x5cm, avec une armature centrale en fer à béton (Fe24) rond, lisse et poli de 6mm de diamètre, soit un enrobage de béton de 2.2cm (fig. 1).

La formulation du béton répondait à la norme EN1766, avec un rapport eau sur ciment de 0.7¹, une quantité de ciment (CEM I 52.5 Holcim, usine de Dannes) de 275 kg/m³ et des granulats (Palvadeau) de 16 mm de taille maximale. Les aciers ont été usinés, polis et les surfaces d'étude soigneusement délimitées (20cm de longueur utile, par peinture cataphorèse et gaine thermo-rétractable). Les

¹ Un rapport E/C=0,7 est assez représentatif du patrimoine des ouvrages en béton armé qui font l'objet de surveillance.

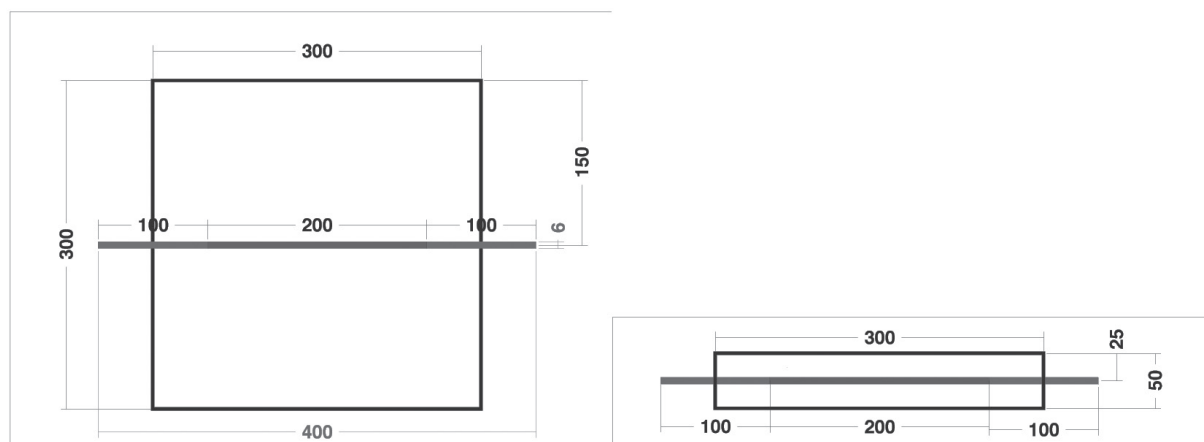


Figure 1 : Plans de ferrailage des corps d'épreuve.

dalles ont été coulées à l'horizontale, démoulées à 24h et ont subi une cure dans l'eau de 28j. Quatre états initiaux du béton ont été considérés :

- un témoin sain (**T**),
- un béton contaminé par des ions chlorure apportés au gâchage (**G**), sous forme de NaCl à 5 % en masse par rapport au ciment sec (seuil critique récurrent dans la littérature pour lequel la corrosion peut s'amorcer [8]),
- un béton contaminé par des ions chlorures apportés par immersion-séchage (**I**) dans de l'eau salée (solution de NaCl à 35 g/L, cycles de quatre jours d'immersion dans la solution et de trois jours de séchage à 60 % d'humidité relative), avec une concentration finale en chlorures libres au niveau de l'acier égale ou supérieure à 0.4 % par rapport à la masse de ciment sec (seuil critique récurrent dans la littérature pour lequel la corrosion peut s'amorcer [8]),
- et un béton artificiellement carbonaté (**C**), après pré-conditionnement (4 semaines à 45°C et 65%HR), dans une enceinte régulée à 60 % d'humidité relative, avec une teneur en dioxyde de carbone de 50 %.

A l'issue d'une première campagne de mesure destinée à vérifier l'initiation de la corrosion dans l'ensemble des corps d'épreuve, une corrosion intentiostatique a été réalisée sur les aciers des dallettes de type C (béton carbonaté), (courant de 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ imposé pendant 48 heures) afin d'amorcer la corrosion.

L'ensemble des dallettes a ensuite été entreposé en banlieue parisienne (fig. 2) dans des conditions environnementales extérieures naturelles.

2.2. Matériels

Les mesures de résistance de polarisation ont été réalisées à l'aide d'un Gecor6®. Cet appareil permet de mesurer une résistance de polarisation, par application de paliers successifs et croissants de courant [9]. La zone de polarisation est confinée à l'aide d'un anneau de garde externe, équipé de deux électrodes de référence, permettant de moduler le confinement. Il s'agit donc d'un montage à trois électrodes : avec une électrode centrale de référence au cuivre/sulfate de cuivre « E », une contre-électrode centrale en acier inox « CE », et l'armature en acier comme



Figure 2 : A l'issue de leur fabrication et de leur contamination, les dallettes ont été exposées aux intempéries en banlieue Parisienne.

électrode de travail ; associé à une contre-électrode périphérique en acier inox et à deux électrodes de référence au cuivre/sulfate de cuivre (S), placées entre la contre-électrode et l'anneau de garde, pour le confinement du courant (Fig. 3).

Afin de qualifier les conditions de mesure de résistance de polarisation, des mesures de potentiel et de résistivité ont été réalisées, respectivement avec un corrosimètre CANIN®, et le capteur de résistivité du Gecor6® (méthode du disque [10]), tous deux équipés d'électrodes de référence au cuivre/sulfate de cuivre.

2.3. Protocole d'essais

Les essais ont été réalisés en période hivernale, après plus d'une année de vieillissement en extérieur. Vue leur durée, afin de limiter l'impact des conditions environnementales locales (variation de température et d'humidité d'un moment à l'autre de la journée...), l'ensemble des mesures a été mis en œuvre en intérieur, à température et humidité relative constantes : $20 \pm 1^\circ\text{C}$, $69 \pm 4\% \text{HR}$, les dallettes étant extraites une à une de leur conditions d'exposition en extérieur. Les protocoles de mesure, ainsi que les seuils recommandés par la RILEM ont été adoptés pour l'ensemble des caractérisations électrochimiques.

Pour la résistance de polarisation, quatre configurations de mesure ont été considérées : axe du capteur aligné sur l'armature (pa), axe du capteur perpendiculaire à l'armature

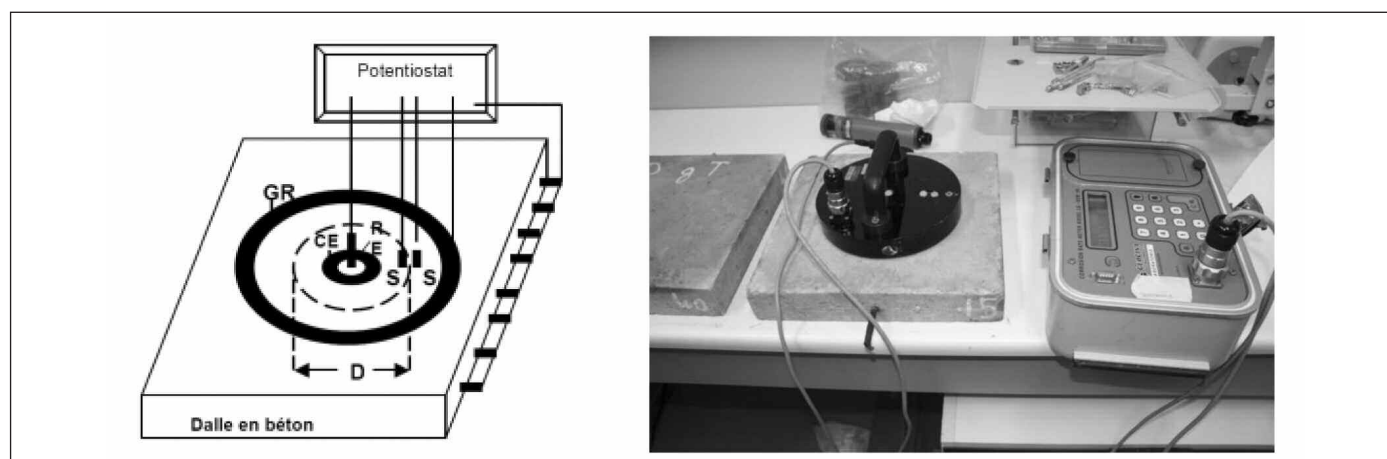


Figure 3 : Schéma de principe du Gecor6® et Gecor6® mis en œuvre sur les dalles de l'étude.

(pe), durée de polarisation de 100 secondes (100), durée de polarisation de 30 secondes (30). Pour chaque configuration, neuf mesures successives ont été réalisées avec une vérification de la dépolarisation des armatures entre chaque mesure.

3. RÉSULTATS

Les mesures de potentiel ont essentiellement été utilisées comme indicateur de dépolarisation. Par ailleurs, selon les seuils établis par la RILEM [10], pour l'ensemble des corps d'épreuve, les valeurs de résistivité mesurées (Tableau 1) étaient indicatives d'un risque de corrosion modéré ($10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm} < \text{Résistivité} < 50 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$). Enfin, la répétabilité des mesures de résistance de polarisation s'est révélée bonne, les écarts types des vitesses de corrosion

Daliette	Potentiel (mV, Cu/CuSO ₄)	Résistivité (k $\Omega\cdot\text{cm}$)
T	-119 \pm 29	28
C	-466 \pm 4	32
G	-267 \pm 10	20
I	-531 \pm 2	19

Tableau 1 : Résultats des mesures de résistivité et de potentiel réalisées sur les daliettes.

n'ayant varié que de 0.002 à $0.087 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ selon la position du capteur et la durée de polarisation.

Pour le **béton sain** (T), quelle que soit la configuration de mesure (fig. 4), des vitesses de corrosion négligeables ont été enregistrées ($0.02 \pm 0.002 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), confirmant la passivité des armatures.

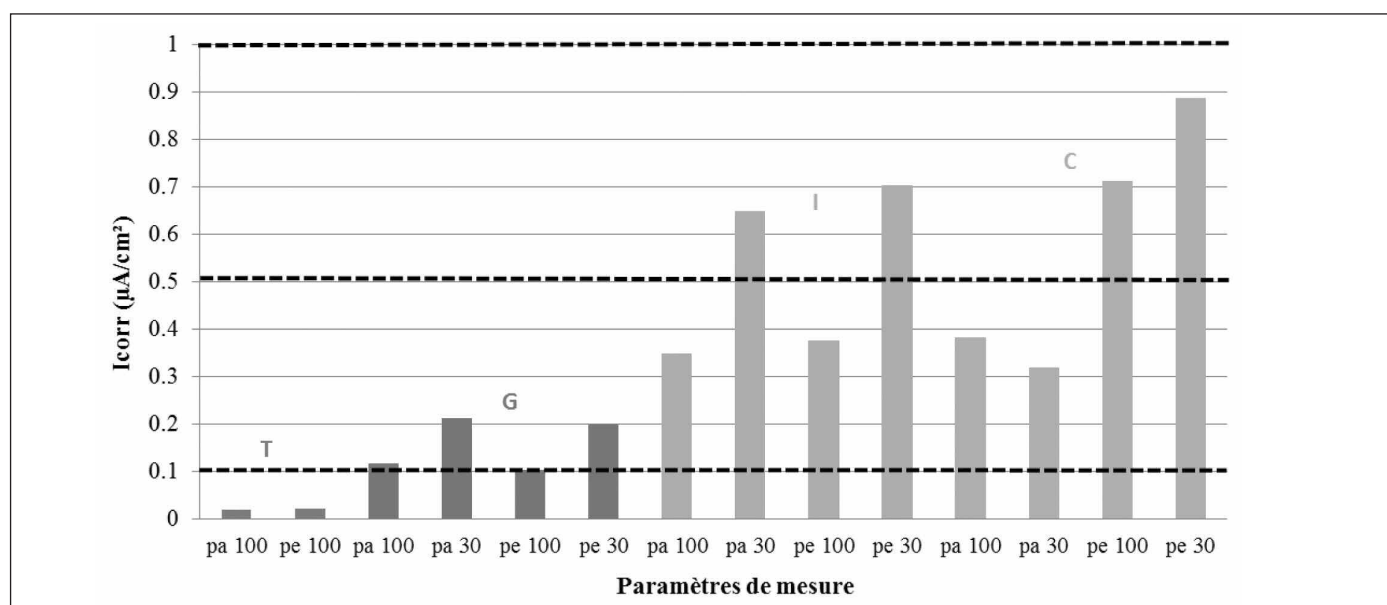


Figure 4 : Vitesse de corrosion par type de béton (T : béton sain, G : béton contaminé par des ions chlorure au gâchage, I : béton contaminé par des ions chlorure introduits par immersion-séchage, C : béton carbonaté) et par conditions de mesures (axe du capteur parallèle à l'armature (pa) ou perpendiculaire à l'armature (pe), durée de polarisation de 100 ou 30 secondes.). NB : Les lignes noires hachurées indiquent les seuils de corrosion de la recommandation de la RILEM [11].

Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Icorr > 1	$0.5 < \text{Icorr} < 1$	$0.1 < \text{Icorr} < 0.5$	Icorr < 0.1
Niveau de corrosion	Elevé	Modéré	Faible	Négligeable

Tableau 2 : Seuils de corrosion de la recommandation de la RILEM [11].

Pour les 3 autres dalles, la corrosion était amorcée, mais plus ou moins active. Ainsi, les vitesses de corrosion les plus élevées ont été constatées pour le béton carbonaté, les plus basses ayant été relevées pour le béton pollué par des ions chlorure introduits au gâchage (Fig. 4).

Les deux dalles contaminées par les ions chlorure ont montré une sensibilité marquée vis-à-vis de la durée de polarisation, les vitesses de corrosion variant du simple au double suivant la durée de polarisation et induisant un changement de seuil. Ainsi pour le béton contaminé par des ions **chlorure introduits au gâchage** (G), le niveau de corrosion passe de « négligeable » à « faible » pour une durée de polarisation variant de 100 à 30 secondes. Pour le béton contaminé par des ions **chlorure introduits par immersion-séchage** (I), le niveau de corrosion passe de négligeable à modéré pour une durée de polarisation variant de 100 à 30 secondes. Par contre pour les deux dalles, la position du capteur n'a eu aucun impact.

A contrario, dans le cas du **béton carbonaté** (C), c'est la position du capteur qui a eu le plus d'impact. Ainsi, les résultats de vitesse de corrosion varient du simple au double suivant la position du capteur pour une durée de polarisation de 100 secondes, et du simple au triple pour une durée de polarisation de 30 secondes. Là encore si on se réfère aux seuils établis par la RILEM, le niveau de corrosion passe de faible lorsque le capteur est aligné sur l'armature à modéré lorsque l'axe du capteur est perpendiculaire à l'armature et ce quelle que soit la durée de polarisation.

4. DISCUSSION

Ces essais montrent tout d'abord que malgré la géométrie axiale du capteur du Gecor6®, la position des électrodes de régulation du confinement peut impacter le résultat de mesure. Selon les simulations de Clément et Al. [6], lorsque les électrodes de régulation du confinement sont alignées avec l'armature, un sur-confinement est généré, une partie du courant issu de l'anneau de garde étant intégrée au courant de corrosion. Il en découlerait une surévaluation de la résistance de polarisation et donc une sous-évaluation du courant de corrosion, ce qui semble être le cas pour les mesures réalisées sur la dalle de béton carbonaté, pour laquelle un phénomène de corrosion généralisé est suspecté.

Dans le cas du béton contaminé par les chlorures, une corrosion non uniforme par piqûres est plus probable, d'autant plus qu'au vu des valeurs de vitesse de corrosion évaluées sur les deux dalles, la corrosion ne semble dans les deux dalles qu'au stade de l'initiation. Il est donc possible que dans ce cas, la distribution du courant soit plus hétérogène dans la zone polarisée (succession de micro anodes/cathodes) et que cette hétérogénéité soit plus impactante que l'intégration d'une partie du courant issu du système de confinement.

Par ailleurs du fait de la nature même de la corrosion par piqûre, l'équilibre du système, indispensable à une correcte évaluation de la résistance de polarisation est difficile à atteindre, ce qui pourrait expliquer l'impact de la durée de

polarisation observé pour les dalles de béton contaminées par les chlorures.

5. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de contribuer à l'identification des facteurs pouvant générer les disparités de résultats de diagnostic électrochimique in situ, souvent constatées. Une série de mesures de potentiel de résistivité et de résistance de polarisation a donc été réalisée sur des éprouvettes de béton armé de géométrie et de composition connues, présentant respectivement un état sain, une pollution endogène ou exogène par des ions chlorure, ou une carbonatation totale. Ces éprouvettes ont été exposées en extérieur durant une année, afin de favoriser la corrosion des armatures. D'un point de vue qualitatif, l'ensemble des techniques de diagnostic sont concordantes et indiquent une passivation des armatures dans le béton sain, alors que la corrosion a démarré dans les bétons contaminés par des ions chlorure ou carbonatés. Par contre, des variations significatives ont été observées sur les résultats de mesure de résistance de polarisation réalisées avec un Gecor6® en fonction des conditions d'analyse. Ainsi, dans le cas du béton carbonaté, un net impact de la position du capteur a été observé, alors que pour les bétons contaminés par les ions chlorure, la durée de polarisation s'est révélée être le facteur le plus perturbant. Une complémentarité entre résultats expérimentaux et numériques serait pertinente afin d'affiner la connaissance des mesures de vitesse de corrosion et par conséquent leur fiabilité dans le cadre d'un diagnostic d'ouvrage.

RÉFÉRENCES

- [1] Cremona C., Adélaïde L., Berthaud Y., Bouteiller V., L'Hostis V., Poyet S., Torrenti J.-M., Probabilistic and predictive performance-based approach for assessing reinforced concrete structures lifetime: The applet project, in: K.P. V.L'Hostis, R.Gens and C.Gallé (Eds.) (Ed.) AMP 2010 – International Workshop on Ageing Management of Nuclear Power Plants and Waste Disposal Structures (EFC Event 334), EPJ Web of Conferences, Toronto, Ontario, Canada, 2011.
- [2] Poupard O, L'Hostis V., with contributions from Bouteiller V, Capra B, Catinaud S, Francois D, et al. Corrosion diagnosis of reinforced concrete beams after 40 years exposure in marine environment by non destructive tools. *Revue Européenne de Génie Civil*. 2007;11(1-2):35-54.
- [3] Luping T., Calibration of the electrochemical methods for the corrosion rate measurement of steel in concrete, Nordest Project No. 1531-01, Boras, Sweden, 2002, 54p.
- [4] Wojtas H., Determination of corrosion rate of reinforcement with a modulated guard ring electrode; analysis of errors due to lateral current distribution, *Corrosion Science*, Vol. 46, 2004, pp.1621-1632.
- [5] Elsener B., Corrosion rate of steel in concrete – Measurements beyond the Tafel Law, *Corrosion Science*, Vol.47, 2006, pp. 3019-3033.

- [6] Clement A., Laurens S., Arliguie G., Analysis of a LPR On-site device based on FEM simulations, NDTCE'09 : proceedings of the international conference on non-destructive testing in civil engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009, pp 509-514.
- [7] Martinez I, Andrade C, Rebollo N, Bouteiller V, Marie-Victoire E, Olivier G. Corrosion characterization of reinforced concrete slabs with different devices. *Corrosion*. 2008;64(2):107-23.
- [8] Angst U., Elsener B., Larsen C.K., Vennesland O., 2009. Critical chloride content in reinforced concrete – A review. *Cement and Concrete Research*, 39, 1122-1138.
- [9] Andrade C., Alonso C., 2001. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 15, 141-145.

- [10] Polder R. with contributions from Andrade C., Elsener B., Vennesland O., Gulikers J., Weidert R. and Raupach M., RILEM TC 154-EMC, Recommendations: Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 33, December 2000, pp 303-611.
- [11] Andrade C. and Alonso C. with contributions from Gulikers J., Polder R., Cigna R., Vennesland O., Salta M., Raharinaivo A. and Elsener B., RILEM TC 154-EMC, Recommendations: Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarisation resistance method, *Materials and Structures*, Vol. 37, November 2004, pp 623-643.