
Mesure de la résistivité du béton simultanément à la mesure de la résistance de polarisation d'une armature

Samson Gabriel¹, Fabrice Deby², Jean-Luc Garciaz³, Jean-Louis Perrin⁴

¹ LMDC, INSAT/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse. samson@insa-toulouse.fr

² LMDC, INSAT/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse. f_deby@insa-toulouse.fr

³ LERM SETEC, 23 Rue de la Madeleine, 13631 Arles. jean-luc.garciaz@lerm.setec.fr

⁴ LERM SETEC, 23 Rue de la Madeleine, 13631 Arles. jean-louis.perrin@lerm.setec.fr

RÉSUMÉ. Le projet DIAMOND a pour objectif de mesurer la vitesse de corrosion des structures en béton armé avec la méthode de la mesure de la résistance linéaire de polarisation. Le courant est injecté au travers d'une contre électrode annulaire et la potentiel mesuré au centre avec une électrode de référence. La vitesse de corrosion est évaluée au niveau du point le plus polarisé de l'interface acier-béton, le point d'intérêt (PI) grâce à l'équation de Stern-Geary. Des abaques liant le courant injecté et celui perçu au niveau du PI en fonction de l'enrobage du béton et de la résistivité ont été introduits dans de précédents travaux. Sur site, la mesure de l'enrobage est aisée. En revanche, la mesure de la résistivité est plus difficile et moins précise. Un modèle numérique (Comsol®) est développé afin de relier la résistivité du béton à sa résistance pour différents enrobages et résistivités. La chute ohmique instantanée mesurée au début de la mesure de polarisation peut maintenant être utilisée pour obtenir la résistivité moyenne du béton entre la surface et l'armature. La théorie développée est ensuite validée grâce à la réalisation d'un montage expérimental.

ABSTRACT. The DIAMOND project aims to create a new device to measure reinforced concrete corrosion rate based on linear polarization resistance measurement. The current is injected through an annular counter electrode and the potential is measured at the centre with a reference electrode. The corrosion rate is evaluated on the most polarized point of the steel-concrete interface, the point of interest with the Stern-Geary equation. Abacus linking injected current density on the counter electrode to the current density at the POI depending on concrete cover and resistivity were introduced on previous work. On site, concrete cover can easily be determined. However, concrete resistivity measurement is more difficult. The aim of this work is to use the DIAMOND device to determine concrete resistivity. A numerical model was developed on Comsol® to create abacuses that link concrete resistivity and concrete resistance. The instantaneous ohmic drop measured at the beginning of the polarization can now be used to determine concrete average resistivity between concrete surface and steel rebar. The theory developed was then confirmed using an experimental setup.

MOTS-CLÉS : Résistivité, corrosion uniforme, résistance de polarisation (R_p), point d'intérêt (PI).

KEY WORDS: Resistivity, uniform corrosion, polarization resistance (R_p), point of interest (PI).

1. Introduction

La plupart des constructions sont plutôt résistantes par rapport aux phénomènes de corrosion en raison de la barrière naturelle formée par le béton entre les armatures et le milieu extérieur. Cependant, sous certaines conditions, le béton n'assure plus ses fonctions de protection et la corrosion peut s'initier. Pour les structures du Génie Civil en béton armé, la corrosion représente 80% des pathologies observées. La réparation et la réhabilitation de bâtiments peuvent coûter aussi chères que la construction neuve. Plusieurs méthodes de mesure de la corrosion existent : résistivité, potentiel de demi-cellule et la résistance de polarisation linéaire (R_p). La vitesse de corrosion peut être déterminée grâce à la mesure de la R_p tandis que les autres méthodes citées ne fournissent qu'une estimation du risque de corrosion. Les appareils utilisés pour déterminer la vitesse de corrosion sont peu nombreux (Galvapulse, GECOR, Icorr). Les vitesses de corrosion mesurées par ces dispositifs diffèrent fortement. De plus, l'étude bibliographique réalisée dans la thèse de Mitzithra [MIT 13] révèle que les hypothèses de calcul utilisées sont insuffisantes pour décrire le caractère tridimensionnel du problème.

Afin d'obtenir une mesure précise de la résistance de polarisation, il est tout d'abord indispensable de connaître l'enrobage et la résistivité du béton. Sur site, la mesure de l'enrobage est facilement réalisée (méthodes électromagnétiques). Cependant, la mesure de la résistivité est plus difficile et se base habituellement sur des méthodes insuffisamment précises (méthode à 4 points, type Wenner ou autre, méthode du disque). Cette étude indique que la sonde développée pour mesurer la vitesse de corrosion peut également servir à mesurer avec précision, et simultanément, la résistivité du béton au PI.

Sur la base de ces constats, le projet DIAMOND vise à développer une solution technique permettant un diagnostic et un suivi in situ de la corrosion. Une nouvelle sonde de mesure de la vitesse de corrosion et un traitement original et performant des données permettront une évaluation plus précise de l'état de corrosion des structures auscultées.

La sonde DIACOR développée au sein du projet DIAMOND et les aspects théoriques associés sont tout d'abord présentés. Le modèle numérique utilisé pour modéliser le comportement de la sonde est ensuite introduit. Afin de vérifier les résultats du modèle numérique, un dispositif expérimental est introduit. Les résultats sont ensuite présentés. La mesure expérimentale de chute ohmique et l'utilisation des abaques construits numériquement permettent de retrouver la résistivité du milieu expérimental ce qui permet de valider la démarche.

2. Présentation de la sonde et théorie associée

La sonde produite possède une géométrie plus simple et beaucoup plus petite que les sondes disponibles sur le marché. Une vue en coupe de l'implantation de la sonde au niveau de la surface du béton est présentée sur la Figure 1. L'anneau de confinement a été supprimé. Le courant est injecté au travers d'une contre-électrode (CE) annulaire (dite « ponctuelle » en raison de ses faibles dimensions) et le potentiel est mesuré au centre au niveau de l'électrode de référence (Figure 1). La vitesse de corrosion sera évaluée sur le point le plus polarisé de l'armature, le point d'intérêt (PI) grâce à l'équation de Stern-Geary [RIL04]. Ce point est placé sur la partie supérieure de l'armature, sous l'électrode de référence.

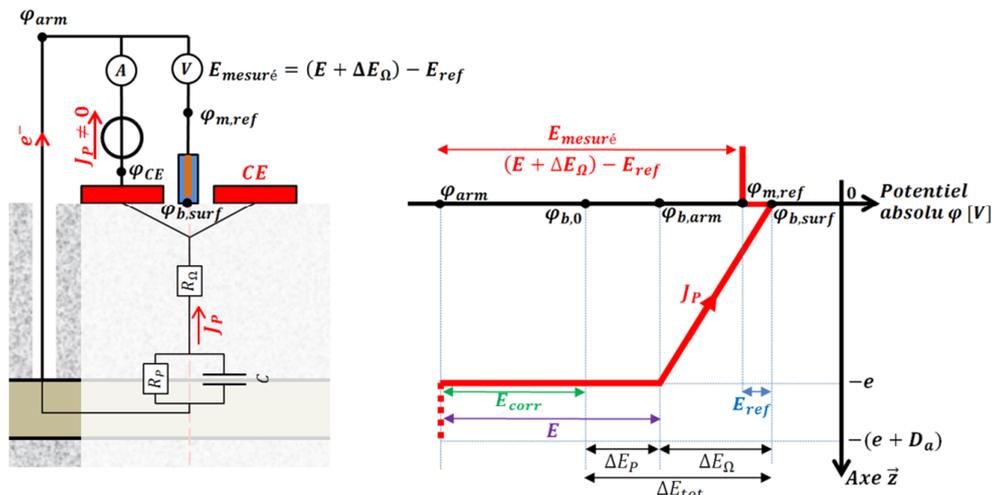


Figure 1. Corrosion uniforme, comportement sous polarisation anodique.

La Figure 1 permet de présenter l'influence de l'injection d'un courant J_P sur la répartition du courant le long de l'axe \vec{z} , sous l'électrode de référence, en régime permanent. Le courant injecté J_P est positif, ce qui provoque la circulation de courant de l'armature vers la CE. L'utilisation de l'électrode de référence permet de garantir que la différence entre le potentiel absolu du métal de référence $\varphi_{m,ref}$ et le potentiel absolu de la solution électrolytique $\varphi_{sol,ref}$ de l'électrode de référence est constante ($E_{ref} = \varphi_{m,ref} - \varphi_{sol,ref}$).

En régime établi, sous l'effet d'une polarisation extérieure, le potentiel absolu du béton au niveau de l'armature $\varphi_{b,arm}$ devient différent du potentiel absolu initial dans le béton $\varphi_{b,0}$. Le potentiel de demi-cellule de l'armature E ($\varphi_{arm} - \varphi_{b,arm}$) devient différent du potentiel d'équilibre de l'armature E_{corr} . Cette variation de potentiel ΔE_P correspond à la polarisation de l'armature ($\Delta E_P = E - E_{corr}$). La variation de potentiel total ΔE_{tot} est la somme du potentiel de polarisation ΔE_P et de la chute ohmique dans le béton ΔE_Ω . La chute ohmique ΔE_Ω dépend du courant J_P traversant la partie de béton située entre l'armature et l'électrode de référence et de la résistance électrique du béton R_Ω . Cette chute ohmique intervient instantanément après l'injection du courant J_P . Toutefois, au début de la polarisation, la résistance totale entre l'électrode de référence et l'armature est R_Ω (Figure 1) car le condensateur est déchargé et se comporte comme un fil. A $t = 0$, la mesure de la différence de potentiel totale et du courant injecté permet d'obtenir la résistance R_Ω ($\Delta E_{tot}/J_P$) et ainsi de remonter à la résistivité.

3. Modèle numérique

L'étude numérique est réalisée à l'aide du logiciel Comsol®. Une CE est positionnée au-dessus d'une armature de diamètre D_a positionnée à une profondeur e (appelé enrobage) dans un bloc de béton. La double symétrie du problème permet sa réduction à l'étude d'un quart de pavé d'un matériau possédant une résistivité ρ homogène (Figure 2 - gauche). Ces dimensions sont (0,25, 0,25, 0,3 m). Les diamètres intérieurs et extérieurs de la CE sont respectivement de 8 et 22 mm. Le diamètre de l'armature est compris entre 4 et 32 m. L'enrobage peut varier entre 5 et 80 mm.

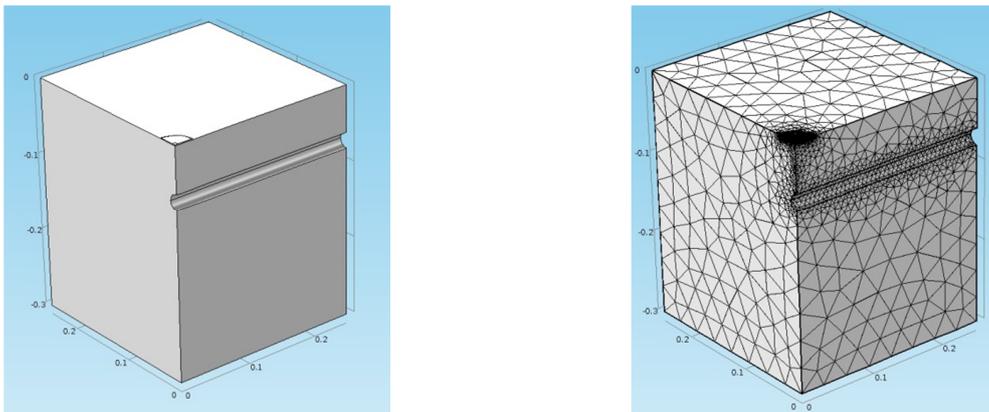


Figure 2. Géométrie du modèle numérique : notation (gauche), maillage (droite).

D'un point de vue de la modélisation, on considère donc qu'il existe une très faible résistance au niveau de l'armature R_{arm} . La densité de courant est simplement proportionnelle à la différence de potentiel entre l'armature et le potentiel d'équilibre E_{corr} . La résistance surfacique R_{arm} est très faible. Elle est arbitrairement fixée à $0.001 \Omega.m^2$. A $t = 0$, l'armature n'est pas polarisée, numériquement, la différence de potentiel totale est :

$$\Delta E_{tot} = J_P \cdot (R_\Omega + R_{arm}/A) \approx J_P R_\Omega \quad \text{Éq. 1}$$

4. Procédure expérimentale

La théorie développée numériquement a ensuite été confrontée à des essais expérimentaux. Un contenant en plastique a été rempli avec des mélanges eau distillée / eau normale, dont la résistivité est mesurée en laboratoire, et dans laquelle une barre métallique a été immergée. Six résistivités différentes ont été utilisées : de 14 à $1000 \Omega.m$. Quatre diamètres d'armatures (8, 16, 32 et 50 mm) et sept enrobages (5 à 50 mm) sont testés afin de modéliser les différentes configurations pouvant être rencontrées sur site réel.

5. Résultats et conclusions

Les différentes modélisations permettent d'obtenir un coefficient de proportionnalité k entre la chute ohmique et la résistivité. Ce coefficient k dépend de l'enrobage et du diamètre d'armature (et du diamètre de la contre électrode, considéré comme étant fixé ici) mais ne dépend pas du courant injecté. L'évolution de la pente k en fonction de l'enrobage et du diamètre d'armature est présentée sur la Figure 3. La Figure 3 (gauche) est obtenue pour un enrobage inférieur ou égal à 10 mm.

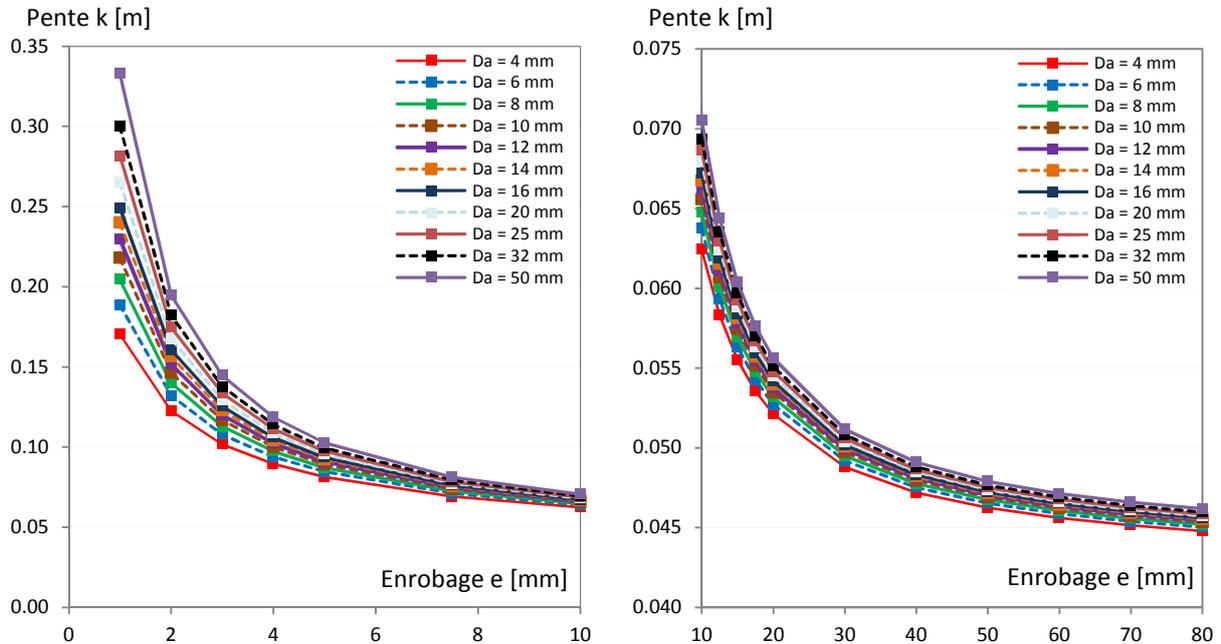


Figure 3. Pente k en fonction de l'enrobage et du diamètre d'armature ($1 < e < 10$ mm - gauche ; $10 < e < 80$ mm - droite).

La Figure 3 (droite) présente l'évolution du facteur k dans une gamme d'enrobage correspondant à ce qui devrait être trouvé in situ ($10 < e < 80$ mm). Une évolution sensible du paramètre k en fonction de l'enrobage est constatée dans toute la gamme d'enrobage. De plus, une influence non négligeable du diamètre d'armature est constatée, surtout quand l'enrobage devient faible. La Figure 3 (gauche) présente l'évolution de ce même facteur mais pour un enrobage très faible $1 < e < 10$ mm. La dispersion du facteur k en fonction de l'enrobage est encore plus marquée qu'avec des enrobages plus épais (Figure 3 - droite). Ce cas de figure est prévu pour l'étude des structures métalliques immergées (gangue de concrétions).

In Situ, lors de la mesure de polarisation, les paramètres géométriques (enrobage et diamètre de l'armature) auront été déterminés par des essais préliminaires. La résistivité est initialement inconnue. La mesure de la chute ohmique ΔE_{Ω} à l'instant initial permet de remonter à la résistance du béton R_{Ω} . Enfin, l'utilisation de la Figure 3 permet de remonter à la résistivité du béton. Ainsi, l'utilisation de la mesure de polarisation à l'instant initial permet d'obtenir la résistivité du béton. Toutefois, on notera également que cette technique suppose que la résistivité du béton soit homogène.

Enfin, les mesures de chute ohmique expérimentales et les abaques (Figure 3) sont utilisées pour calculer la résistivité de l'eau dans les diverses configurations présentées dans la partie 4. Les résultats expérimentaux confirment une très bonne prédiction des calculs numériques et confirment que la méthode de mesure de la résistance de polarisation peut être utilisée pour mesurer simultanément et avec précision la résistivité du béton au PI.

6. Références

- [MIT13] MITZITHRA, MARIA ELENI: *Detection of corrosion of reinforced concrete on cooling towers of energy production sites*, Université de Toulouse, LMDC - Paul Sabatier, PhD, 2013
- [RIL 04] RILEM TC 154: *Test Methods for on Site Corrosion Rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method* (2004)