

# Mesure de la résistivité électrique par capteurs noyés pour évaluer les profils de teneur en eau dans le béton

Joanna Badr<sup>1</sup>, Jean-Paul Balayssac<sup>2</sup>, Géraldine Villain<sup>1</sup>, Sérgio Palma-Lopes<sup>1</sup>, Yannick Fargier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MAST – LAMES, Université Gustave Eiffel, Nantes 44344 Bouguenais, France; joanna.badr@univ-eiffel.fr, geraldine.villain@univ-eiffel.fr, sergio.palma-lobes@univ-eiffel.fr, yannick.fargier@univ-eiffel.fr

<sup>2</sup> LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS, 31077 Toulouse, France; balayssa@insa-toulouse.fr

## RESUME

La teneur en eau est un paramètre conditionnant le développement des dégradations des structures en béton armé telles que la corrosion des armatures. Afin de surveiller le profil de teneur en eau sur une grande épaisseur d'une structure en béton, un capteur multi-électrodes permettant la mesure de la résistivité électrique est développé dans cet article. Un capteur en forme d'anneau, conçu en circuit imprimé, placé à une profondeur donnée, a l'avantage de moyenniser plusieurs points de mesure entre les électrodes à cette profondeur, et ainsi d'intégrer l'effet de la variabilité naturelle de la résistivité donc de la teneur en eau. Des validations expérimentales utilisant des solutions salines de conductivité connue ainsi que des éprouvettes de béton soumises au séchage sont étudiées pour valider la réponse du capteur en utilisant différents points de mesure. Les résultats démontrent la capacité du capteur proposé à surveiller les profils de résistivité dans le béton en intégrant la variabilité latérale du matériau.

## Mots-clefs

Capteur noyé, circuit imprimé, électrolytes, durabilité

## I. INTRODUCTION

Les principales dégradations des structures en béton armé sont dues à la corrosion des armatures déclenchée par la carbonatation, la pénétration des ions chlorures ainsi qu'aux réactions de gonflement interne. Le paramètre conditionnant le développement de ces dégradations est la teneur en eau. Plusieurs méthodes d'évaluation non destructive permettent de mesurer la teneur en eau du béton (TDR, sondes capacitatives, radar GPR, sondes de résistivité électrique...) (Balayssac et al., 2015). La méthode de résistivité électrique (à courant continu CC), basée sur la diffusion d'un champ électrique, est la méthode utilisée dans cette étude.

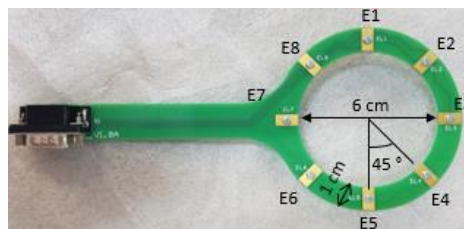
Nous y abordons la problématique du suivi du profil de teneur en eau des structures en béton sur toute leur épaisseur en développant un prototype de capteur noyé basé sur la mesure de la résistivité électrique. Badr et al., (2019) ont développé un capteur en forme d'échelle en circuit imprimé qui présente divers avantages tels que la résolution centimétrique des profils mesurés

sur toute l'épaisseur d'une structure en béton armé permettant de diminuer les problèmes d'encombrement des câblages et en assurant une précision géométrique élevée ainsi qu'un faible coût de fabrication. Une nouvelle forme de capteur en circuit imprimé est présentée dans cet article. Ce capteur de forme annulaire dit « Anneau », placé à une profondeur donnée, a l'avantage de moyenniser plusieurs points de mesure entre les électrodes à cette même profondeur et ainsi d'intégrer l'effet de la variabilité naturelle de la résistivité.

Tout d'abord, la géométrie du capteur est présentée ainsi que les deux configurations de mesure associées. Une campagne expérimentale est ensuite menée sur des électrolytes de conductivités connues montrant la capacité du capteur à mesurer les valeurs de résistivité avec précision ainsi que sur des éprouvettes de béton montrant la sensibilité du capteur à la dessiccation du béton.

## II. Conception du capteur de résistivité électrique

Le capteur Anneau (Figure 1) est constitué de 8 électrodes de dimensions  $1 \times 0.4 \times 0.1 \text{ cm}^3$  espacées d'un angle de  $45^\circ$  et réparties sur un anneau de 8 cm de diamètre extérieur et 6 cm de diamètre intérieur. L'adhérence avec le béton est assurée en ajoutant des vis inox aux électrodes.



**FIGURE 1.** Photo du capteur noyé avec dimensions et numérotation des électrodes

Le dispositif Anneau permet plusieurs configurations de mesure. Nous présentons ici les configurations Wec et Q\_I12 sachant que d'autres configurations sont envisageables (Badr, 2019). Dans la configuration Wec, les mesures quadripolaires C1P1P2C2 (où les électrodes C1 et C2 sont utilisées pour l'injection de courant et les électrodes P1 et P2 sont utilisées pour les mesures de différence de potentiel) sont successivement E1E2E3E4, E2E3E4E5, ..., E8E1E2E3 (Figure 1). Dans la configuration Q\_I12, les mesures quadripolaires sont successivement E1E5E6E2, E2E6E7E3, ..., E8E4E5E1 (Figure 1). Notre objectif est de déterminer le profil de résistivité en fonction de la profondeur  $z$ . Chaque dispositif Anneau est donc placé dans le plan perpendiculaire à une profondeur  $z$  donnée. La résistivité apparente mesurée correspond à la moyenne des 8 mesures quadripolaires pour chaque configuration, assortie de son écart-type, afin de tenir compte des hétérogénéités du béton.

## III. Validation expérimentale du capteur

Afin de valider le capteur Anneau, des essais dans quatre solutions de chlorure de sodium NaCl de conductivité connue et dans des éprouvettes  $\varnothing 16 \times 22 \text{ cm}$  béton ont été réalisés.

### A. Validation expérimentale en solution

L'objectif de cette partie est d'évaluer la sensibilité et la répétabilité des mesures par le biais de mesures réalisées dans quatre solutions de NaCl dont la résistivité théorique a été déterminée

dans l'étude (Chapellier, 1987) (Tableau 1). Le capteur est placé au centre d'un réservoir cubique de 30 cm de côté contenant la solution. Pour chaque quadripôle, la répétabilité est évaluée en prenant trois fois la mesure. De plus, les valeurs sont comparées à celles obtenues par une sonde de conductivité commerciale dont l'incertitude de mesure est égale à 3%. L'étude expérimentale est réalisée à une température constante de  $T = 20 \pm 1$  °C.

Les résultats sont présentés dans le tableau 1. En moyenne, un écart relatif de 2,6% est observé entre la résistivité théorique et celle mesurée avec la sonde de conductivité et un écart relatif de 2,2% est calculé pour la configuration Wec et 5,2% pour la configuration Q\_I12. Le CV de répétabilité pour les solutions 1 à 4 varie de 0,1% à 0,3%. Le CV de variabilité du matériau à une profondeur donnée en faisant le tour complet de l'Anneau (noté CV var.) varie de 0,5% à 0,9%.

**TABLEAU 1.** Caractéristiques des électrolytes utilisés et résistivités électriques mesurées avec la sonde de conductivité et le capteur en configurations Wec et Q\_I12

|   | Solution 1      | Solution 2     | Solution 3     | Solution 4     |
|---|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| Concentration NaCl [mg/L]                   | 50              | 90             | 200            | 1000           |
| $\rho$ théorique [ $\Omega.m$ ]             | 100             | 63             | 25             | 5.5            |
| $\rho$ sonde de conductivité [ $\Omega.m$ ] | $98 \pm 3$      | $60 \pm 2$     | $25 \pm 1$     | $5,3 \pm 0,2$  |
| $\rho$ Wec [ $\Omega.m$ ]                   | $99,9 \pm 0,3$  | $58,6 \pm 0,2$ | $25,6 \pm 0,1$ | $5,4 \pm 0,01$ |
| CV rép. %                                   | 0,3             | 0,3            | 0,3            | 0,1            |
| CV var. %                                   | 0,9             | 0,6            | 0,6            | 0,6            |
| $\rho$ Q_I12 [ $\Omega.m$ ]                 | $104,6 \pm 0,3$ | $61,0 \pm 0,1$ | $26,6 \pm 0,1$ | $5,6 \pm 0,01$ |
| CV rép. %                                   | 0,3             | 0,2            | 0,2            | 0,1            |
| CV var. %                                   | 0,8             | 0,5            | 0,7            | 0,6            |

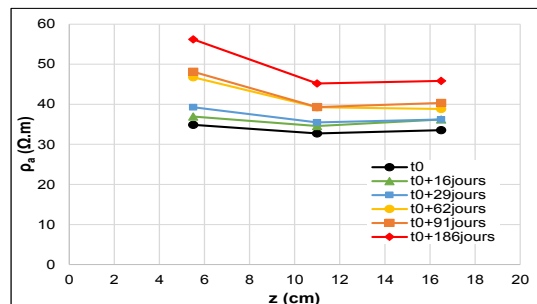
Les capteurs anneaux, sensibles à des variations de résistivité de 5 à 100  $\Omega.m$ , fournissent des mesures très répétables et de la même « qualité » qu'une sonde commerciale de conductivité.

### B. Validation expérimentale dans le béton

Deux éprouvettes cylindriques ( $\varnothing 16 \times 22$  cm) sont utilisées pour quantifier la variabilité de la mesure obtenue avec le capteur Anneau. Pour chacune, trois dispositifs Anneau sont placés au centre du cylindre à des profondeurs différentes  $z = 5,5$  cm, 11 cm et 16,5 cm (Figure 2.a). Le béton étudié est à base de ciment de type 1 (CEM I) avec un rapport eau sur ciment E/C de 0,59 et une porosité de  $15,0\% \pm 0,9\%$ . Les échantillons de béton sont soumis à une cure humide ( $T = 20 \pm 2$  °C, HR =  $95 \pm 5$  %) pendant 28 jours, ensuite ils sont protégés sur le pourtour pour assurer un séchage unidirectionnel selon  $z$  et séchés à  $20 \pm 2$  °C pendant 186 jours (Figure 2.b).



(a)



(b)

**FIGURE 2.** (a) Photo des capteurs dans l'éprouvette avant coulage, (b) Variation relative de la résistivité apparente en fonction de la profondeur lors du séchage, t0 marque le début du séchage à 20 °C.

Des tests de répétabilité (mesures répétées trois fois espacées de 5 min) et de reproductibilité (variabilité du capteur et du béton dans les 2 éprouvettes) montrent des valeurs stables et reproductibles. La variation du profil de résistivité apparente en fonction du temps est représentée dans la Figure 2 qui montre une augmentation des valeurs de résistivités apparentes au cours du temps lors du séchage, en particulier pour l'Anneau situé à 5,5 cm de profondeur (celui le plus proche de la surface en contact avec l'air). A t0+186 jours, le coefficient de variation des valeurs de résistivités apparentes obtenues avec les configurations Wec et Q\_I12 pour chaque profondeur est compris entre 1,4 à 1,7%, ce qui est conforme aux attentes.

#### IV. Conclusion

Dans cet article, une forme de capteur en circuit imprimé annulaire (Anneau) est développée pour évaluer les profils de résistivité électrique dans les structures en béton afin de contrôler les gradients de teneur en eau. Une validation du capteur Anneau réalisée dans des solutions de conductivités connues montre la capacité de l'Anneau à remonter aux valeurs de résistivités vraies des solutions. Une deuxième validation expérimentale est réalisée sur des éprouvettes cylindriques en béton en évaluant le profil de résistivité apparente à différentes échéances de séchage. Il est démontré la capacité du capteur Anneau à suivre l'évolution du profil de résistivité durant le séchage du béton. En perspective, il est important de qualifier le comportement du capteur Anneau dans un environnement moins contrôlé donc plus proche des conditions réelles recherchées pour évaluer les profils de teneur en eau à travers des calibrations (résistivité – teneur en eau) dépendantes du matériau (Villain et al., 2018).

#### REFERENCES

- Badr, J. (2019). Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, Université Gustave Eiffel, Nantes, France.
- Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J.-P., Delepine-Lesoille, S., Cottineau, L.-M., Villain, G. (2019). Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>
- Balayssac, J.-P., Garnier, V., Villain, G., Sbartai, Z.-M., Dérobert, X., Piwakowski, B., Breyse, D., Salin, J. (2015). An overview of 15 years of French collaborative projects for the characterization of concrete properties by combining NDT methods, in: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015)*, 15-17 September 2015. p. Berlin, Germany, 15–17.
- Chapellier, D. (1987). *Diagraphies appliquées à l'hydrologie*, Collection Technique et documentation. ed. Lavoisier, Paris, France, 165p.

Villain, G., Garnier, V., Sbartai, Z.M., Derobert, X., Balayssac, J.-P. (2018). Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators. *Materials and Structures*, 51, 40.