

Conception et validation d'un capteur multi-électrodes pour évaluer les profils de résistivité dans le béton

Joanna Badr^{1, 2}, Yannick Fargier^{2, 3}, Sérgio Palma-Lopes², Fabrice Deby¹, Jean-Paul Balayssac¹, Sylvie Delepine-Lesoille⁴, Géraldine Villain²

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil, Toulouse 31077, France ; badr@insa-toulouse.fr, f_deby@insa-toulouse.fr, balayssa@insa-toulouse.fr

² IFSTTAR, Site de Nantes, Bouguenais 44344, France ; joanna.badr@ifsttar.fr, geraldine.villain@ifsttar.fr, sergio.lopes@ifsttar.fr, Site de Bron, Bron 69675, France ; yannick.fargier@ifsttar.fr

³ CEREMA, Site de Blois, Blois 41029, France ; yannick.fargier@cerema.fr

⁴ Andra, French National Radioactive Waste Management Agency, Chatenay-Malabry 92298, France ; Sylvie.Lesoille@andra.fr

RÉSUMÉ. La résistivité électrique est sensible à différentes propriétés du béton, comme la teneur en eau qui est l'un des principaux paramètres gouvernant sa durabilité à long terme. Ce travail présente le développement d'un capteur multi-électrodes noyé dans le béton pour surveiller le profil de résistivité sur la profondeur et remonter ainsi à sa teneur en eau. La géométrie du capteur et les configurations de mesure sont d'abord présentées. Une modélisation numérique de la réponse électrique du capteur montre sa capacité à remonter au profil de résistivité imposé. Une validation expérimentale sur des échantillons de béton soumis au séchage est également réalisée. Les résultats démontrent la capacité du capteur à évaluer les profils de résistivité dans le béton avec une résolution centimétrique.

ABSTRACT. Electrical resistivity is sensitive to various properties of concrete, such as water content which is one of the main parameters governing the long-term durability of concrete structures. This work introduces the development of a multi-electrode embedded sensor for monitoring the resistivity profile over depth in order to quantify concrete durability. The geometry of the sensor and the measurement configurations are first presented. Moreover, a numerical modelling of the sensor electrical response shows its ability to assess an imposed resistivity profile, together with an experimental validation on concrete specimens subjected to drying. The results demonstrate the capability of the sensor to evaluate resistivity profiles in concrete with centimetre resolution.

MOTS-CLÉS : Monitoring; capteur noyé; résistivité électrique; béton; modélisation par éléments finis.

KEY WORDS : Monitoring; embedded sensor; electrical resistivity; concrete; finite element modelling.

1. Introduction

La teneur en eau est l'un des principaux paramètres gouvernant la durabilité à long terme des structures en béton. Diverses méthodes permettent de mesurer et de surveiller la teneur en eau du béton (TDR, sondes capacitatives, radar GPR, sondes de résistivité électrique...). Ces différentes techniques ont leurs propres résolutions et contraintes (liées à la mesure physique mais également au traitement du signal).

Dans ce travail, nous abordons la problématique de la surveillance du profil de teneur en eau du béton sur toute son épaisseur en utilisant une approche électrique comme méthode de mesure. Cela revêt une grande importance pour les structures de stockage en béton utilisées pour les déchets radioactifs et pour les applications nécessitant une résolution centimétrique sur une grande épaisseur. Les techniques de mesure de surface sont donc exclues car leur profondeur d'investigation ne dépasse généralement pas quelques centimètres et leur résolution est intrinsèquement dégradée avec la profondeur. De plus, pour ces mêmes techniques de surface, divers problèmes (irrégularités de surface, variabilité des matériaux, etc.) génèrent une dispersion des mesures et pénalisent l'accès à des informations plus profondes. Ainsi, l'objectif principal de ce travail est de concevoir un prototype de capteur noyé dans des structures en béton afin d'évaluer le profil de résistivité en profondeur.

Tout d'abord, un aperçu général du principe de la résistivité électrique est introduit. La géométrie du capteur est ensuite présentée, ainsi que la configuration de mesure associée. Les capacités du capteur développé sont ensuite démontrées et validées par : 1) une étude numérique, qui montre que le dispositif conçu permet d'estimer

directement le profil de résistivité et 2) une campagne expérimentale réalisée sur des échantillons de béton montrant la sensibilité du dispositif au séchage du béton.

2. Principe de résistivité électrique

La résistivité électrique d'un matériau est une propriété caractérisée par la mobilité des ions existants dans la solution interstitielle. La relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau du béton est étudiée dans de nombreux ouvrages de la littérature [BAL 15, DUP 13, FAR 15].

Dans le cas d'un milieu hétérogène, c'est une résistivité « apparente » qui est mesurée, reliée à la résistance R par un facteur géométrique G_R qui dépend des positions et de la forme et taille des électrodes ainsi que de la géométrie de la structure auscultée [LOK 99]. Ce coefficient géométrique est déterminé par une modélisation numérique basée sur les éléments finis.

La mesure de la résistivité électrique se fait en général en injectant un courant sur deux électrodes et en mesurant la différence de potentiel entre les mêmes électrodes (dipôle) ou entre deux autres électrodes (quadripôle). Différentes versions de la méthode des électrodes à 4 points sont utilisées en géophysique, mais pour une application sur le béton, la configuration Wenner [WEN 15] est souvent utilisée car elle présente un bon rapport signal / bruit et une bonne sensibilité aux variations de résistivité entre la surface et la profondeur. Pour cette configuration, les électrodes sont alignées avec un espacement inter-électrodes constant. Le courant est injecté sur les électrodes externes et la différence de potentiel est mesurée sur les électrodes internes. Différentes méthodes de mesure de la résistivité électrique de surface sont utilisées. Une cellule de résistivité à plusieurs anneaux [DUP 13] pour l'évaluation d'échantillons de béton et une sonde de résistivité de surface à plusieurs électrodes pour des applications sur site [DUP 13, FAR 15] sont capables d'identifier les profils de résistivité sur la profondeur. Cependant, le problème associé à ces méthodes est celui d'obtenir un contact électrique suffisant et stable entre les électrodes et le béton. Ces méthodes ne sont pas optimales pour le monitoring car l'estimation du profil de la teneur en eau est indirecte et nécessite une procédure dite d'inversion. Voilà pourquoi cette étude propose de noyer le capteur dans le béton.

3. Conception du capteur

Le capteur est conçu sous la forme d'un circuit imprimé (CI) présentant plusieurs avantages, notamment la précision géométrique et la diminution de l'encombrement du câblage, minimisant ainsi son caractère invasif. Le capteur CI est conçu en forme d'échelle afin de garantir son ancrage dans le béton mais aussi pour limiter la mesure d'une infiltration préférentielle le long l'axe de l'échelle. Cette forme permet d'obtenir des informations sur le profil le long de l'axe z , c'est-à-dire dans la direction du profil à établir. Le capteur se compose de 19 électrodes, de dimensions $5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ chacune, décalées de chaque côté du circuit. Le nombre d'électrodes peut évoluer en fonction de l'épaisseur de la structure à étudier. L'espacement entre les électrodes est de 2 cm de chaque côté. Les lignes d'électrodes gauche et droite de la figure 1 sont décalées de 1 cm dans la direction z pour qu'il y ait une électrode tous les centimètres dans cette direction, afin d'augmenter la résolution en profondeur.

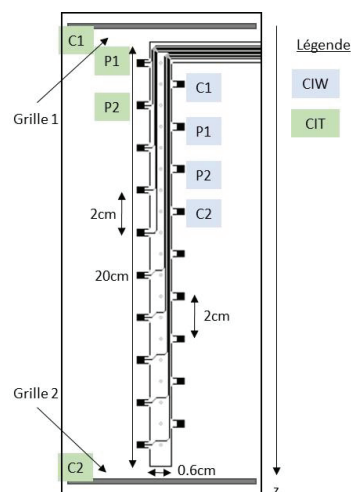


Figure 1. Schéma du capteur et de la configuration de mesure.

Le capteur en échelle présente deux modes de configuration de mesure. Tout d'abord la configuration en transmission CIT, dans laquelle le courant est injecté à travers des grilles métalliques en acier inoxydable placées de

part et d'autre du capteur et où la différence de potentiel est mesurée entre deux électrodes voisines situées du même côté du capteur (P1 et P2 sur la figure 1 par exemple, puis P2 et P3, etc.). Ensuite la configuration Wenner CIW, dans laquelle quatre électrodes voisines sont utilisées du même côté du capteur : le courant est injecté sur les électrodes externes (C1 et C2) et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes internes (P1 et P2). Pour les deux configurations, chaque valeur de résistance mesurée (sensible à un certain volume autour des électrodes) est affectée à une position moyenne au milieu des électrodes où le potentiel est mesuré, comme recommandé par [MCC 15].

4. Validation du capteur CI

Afin de valider le capteur CI, une modélisation numérique est réalisée pour tester la réponse du capteur dans un milieu avec un profil de résistivité imposé. En outre, une validation expérimentale sur des éprouvettes en béton est présentée pour vérifier la sensibilité des mesures de résistivité au séchage du béton. Notons que des essais dans des solutions homogènes de NaCl de conductivité connue ont été aussi réalisés montrant la capacité du capteur à remonter aux valeurs vraies de résistivité des solutions [BAD 19]. Ces essais ne sont pas présentés dans cet article.

4.1 Reconstruction numérique du profil de résistivité

Nous avons modélisé un échantillon de béton cylindrique ayant un diamètre de 11 cm et une longueur de 22 cm (géométrie standard d'échantillon). Deux grilles métalliques (de 10cm de diamètre et 0,2cm d'épaisseur) sont noyées à 5 mm des surfaces planes de l'échantillon. Le capteur CI est modélisé et placé au centre du cylindre, perpendiculairement à ses faces extrêmes (représentant les surfaces d'une structure en béton) et donc parallèle à la direction du profil de résistivité à déterminer. La forme et les dimensions des électrodes et des grilles sont modélisées avec une haute précision, cependant, les phénomènes électrochimiques et de polarisation aux interfaces entre le béton et les parties métalliques de notre capteur (électrodes et grilles) ne sont pas pris en compte dans le modèle. L'objectif est de tester la réponse du capteur à un milieu ayant un profil de résistivité imposé. Le profil imposé choisi est de forme exponentielle variant de 400 $\Omega.m$ en surface jusqu'à 50 $\Omega.m$ en profondeur.

Nous avons tracé sur la figure 2 le profil de résistivité en fonction de la profondeur pour les configurations Transmission CIT et Wenner CIW. Il est évident d'après cette figure que la différence relative entre la distribution de résistivité réelle (profil imposé) et les résistivités apparentes simulées est très faible. La moyenne quadratique normalisée de l'erreur (NRMSE) est calculée entre le profil imposé et les profils calculés avec le capteur simulé. Nous avons trouvé une NRMSE de 0,36% pour la configuration CIT et 3,98% pour la configuration CIW. Ce résultat prometteur prouve que cette géométrie de capteur permet de déterminer le profil de résistivité électrique avec une bonne résolution pour les deux configurations.

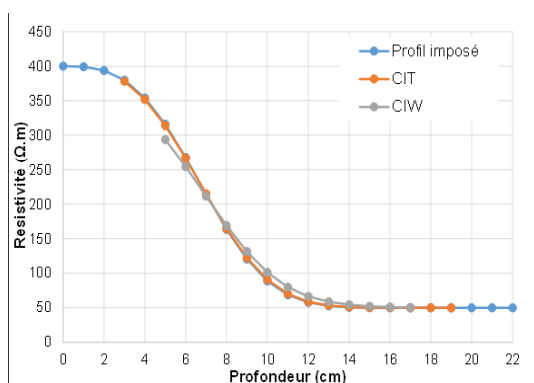


Figure 2. Variation des profils de résistivités apparentes comparés au profil de résistivité imposé.

4.2 Validation expérimentale dans le béton

Cinq éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de longueur 22 cm sont utilisées pour quantifier la variabilité de la mesure avec le même capteur dans toutes les éprouvettes. Le capteur est placé au centre du cylindre et deux grilles métalliques en acier inox sont placées sur les surfaces externes du moule, noyées dans le béton à une profondeur de 5 mm, comme dans le modèle numérique (paragraphe 4.1). Les tests sont effectués après 28 jours de cure, les échantillons de béton sont séchés à 20 °C pendant 28 jours, puis séchés à 45 °C pour accélérer l'établissement du profil de résistivité.

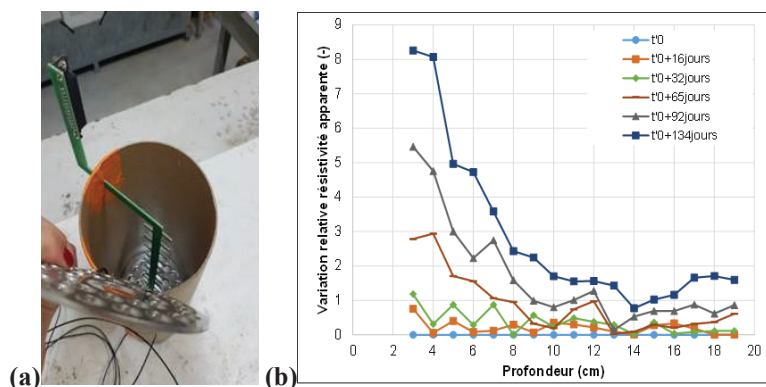


Figure 3. (a) Photo du capteur et des grilles dans une éprouvette 11x22 cm avant coulage, (b) Variation relative de la résistivité apparente pour la CIT en fonction de la profondeur lors du séchage.

Des tests de répétabilité (mesures répétées trois fois espacées de 5min) et reproductibilité (variabilité du capteur et du béton dans les 5 échantillons) sont effectués, montrant des valeurs stables et reproductibles. Nous avons représenté sur la figure 3.b la variation du profil de résistivité pour la configuration CIT en fonction de la profondeur avec t_0 marquant le début du séchage à 45 °C. Nous observons que la variation relative de résistivité apparente augmente en fonction du temps plus rapidement près de la surface qu'à cœur. Cela est dû au séchage unidirectionnel du béton. Des tendances similaires sont observées dans des études précédentes concernant la détermination de gradients de teneur en eau, tels que [BAL 15, FAR 15]. Cela démontre la capacité du capteur conçu à suivre le profil de résistivité dû au séchage du béton avec une résolution spatiale d'environ 1 cm.

5. Conclusion

Dans cet article, un capteur en circuit imprimé est développé pour évaluer le profil de résistivité électrique dans le béton afin de contrôler les profils de teneur en eau dans les structures réelles. Une étude numérique est réalisée pour valider la réponse du capteur. Les résultats montrent que les profils de résistivité apparente simulés pour les configurations Transmission et Wenner sont assez proches du profil de résistivité réel. Une validation du capteur est aussi réalisée sur des éprouvettes cylindriques en béton et le profil de résistivité apparente est évalué à différentes échéances de séchage. Il est démontré que les données de résistivité apparente mesurées sont sensibles à l'évolution du béton au cours du séchage. En perspective, le capteur CI peut être utilisé dans de nombreuses structures pour évaluer les profils de résistivité et ainsi les profils de teneur en eau moyennant des calibrations dépendantes du matériau [VIL 18].

6. Bibliographie

- [BAD 19] Badr, J.; Fargier, Y.; Palma-Lopes, S.; Deby, F.; Balayssac, J.P.; Delepine-Lesoille, S.; Cottineau, L.M.; Villain, G.: Design and Validation of a Multi-Electrode Embedded Sensor to Monitor Resistivity Profiles over Depth in Concrete. Submitted to: *Construction and Building Materials*, March 2019, p. 27.
- [BAL 15] Balayssac, J.P.; Garnier, V.; Villain, G.; Sbartai, Z.M.; Dérobert, X.; Piwakowski, B.; Breyse, D.; Salin, J.: An overview of 15 years of French collaborative projects for the characterization of concrete properties by combining NDT methods. In: *Proceedings of Int. Symp. on NDT-CE*, 2015, p. 15–17.
- [DUP 13] Du Plooy, R.; Palma-Lopes, S.; Villain, G.; Dérobert, X.: Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. In: *NDT & E International Bd.* 54 (2013), p. 27–36.
- [FAR 15] Fares, M.; Villain, G.; Fargier, Y.; Thiéry, M.; Dérobert, X.; Palma-Lopes, S.: Estimation of water gradient and concrete durability indicators using capacitive and electrical probes. In: *NDT-CE 2015, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2015, p. 9.
- [LOK 99] Loke, M.H.: Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. In: *A practical guide to* Bd. 2 (1999).
- [MCC 15] McCarter, W.J.; Taha, H.M.; Suryanto, B.; Starrs, G.: Two-point concrete resistivity measurements: interfacial phenomena at the electrode–concrete contact zone. In: *Measurement Science and Technology* Bd. 26 (2015)
- [VIL 18] Villain, G.; Garnier, V.; Sbartai, Z.M.; Dérobert, X.; Balayssac, J.P.: Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators, *Materials and Structures*, 51 (2018), p. 40.
- [WEN 15] Wenner, F.: A method for measuring earth resistivity. In: *Journal of the Washington Academy of Sciences* Bd. 5 (1915), p. 561–563.