
Mesure de résistivité *in-situ* dans un ouvrage en béton armé avec un capteur Wenner noyé

Johann Priou¹, Yann Lecieux¹, Mathilde Chevreuil¹, Virginie Gaillard², Cyril Lupi¹, Dominique Leduc¹, Emmanuel Rozière³, Romain Guyard¹, Franck Schoefs¹

¹ Laboratoire GeM (UMR 6183), Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3 (France)
yann.lecieux@univ-nantes.fr

² Laboratoire GeM (UMR 6183), ICAM, Département Génie Electrique, 35 Avenue du champ de Manoeuvres, 44470 Carquefou, France

³ Laboratoire GeM (UMR 6183), École Centrale Nantes, 1 Rue de la Noë, 44300 Nantes (France)

*RÉSUMÉ. L'objectif de cette communication, est de décrire le passage d'une version laboratoire d'un capteur multi-électrodes à une version sur site noyée dans du béton à la construction d'un ouvrage. Les performances de ces dispositifs utilisés jusqu'ici en laboratoire ont été évaluées sur un quai portuaire en construction à l'embouchure de la Loire dès les premiers jours après le coulage du béton. Les mesures de résistivité *in-situ* sont analysées en parallèle avec des mesures d'humidité et de température relevées sur site, ainsi qu'avec l'évolution de la résistance mécanique du béton utilisé sur chantier. La cohérence de l'évolution temporelle de la résistance mécanique et de la résistivité du béton, en conformité avec les descriptions de ces phénomènes dans la bibliographie, permet de valider le dispositif et le protocole de mesure proposés ici.*

*ABSTRACT. The purpose of this paper is to describe the transition from the laboratory to the site of multi-electrode sensors embedded in concrete during the construction of a structure. The performances of these devices used until now in laboratory have been assessed on a port dock under construction at the mouth of the Loire River in the first days after pouring concrete. Measurements of resistivity performed *in-situ* are analyzed in parallel with measurements of humidity and temperature recorded on site, as well as the evolution of the mechanical strength of concrete used on site. The coherence of the temporal evolution of the mechanical resistance and the resistivity of the concrete, in accordance with the descriptions of these phenomena in the bibliography, enable to validate the device and the measurement protocol proposed here.*

MOTS-CLÉS : Résistivité électrique, SHM, Capteurs noyés, Structures côtières, Béton

KEYWORDS: Electrical DC resistivity, SHM, Embedded sensors, Coastal structures, Concrete

1. Introduction et contexte

Les mesures de résistivité sont utilisées pour évaluer le risque de corrosion des ouvrages d'art en béton armé situés notamment en zone côtière [POL 01]. Le dispositif le plus couramment mis en œuvre pour les effectuer est la sonde Wenner portable. Simple d'utilisation et relativement peu onéreuse, elle présente toutefois deux inconvénients notables. D'une part ce système adapté à un contrôle ponctuel dans le cadre de campagne d'inspections, n'est pas conçu pour s'intégrer à une chaîne de mesure de type SHM (Structural Health Monitoring). D'autre part, les performances de répétabilité de ces sondes sont inférieures à celles observées avec des dispositifs noyés [BOU 17, LEC 15]. Les études effectuées sur le sujet [BOU 17] mentionnent les variations d'humidité de la paroi sur laquelle la mesure est effectuée avec un dispositif externe pour expliquer la dispersion des mesures de résistivité. Cette observation souligne l'importance de la qualité à apporter au contact électrique (et la difficulté à y parvenir) pour assurer la reproductibilité de la mesure.

Dans ces travaux, on s'intéresse à la mise en œuvre in-situ d'un capteur noyé constitué de multiples électrodes tel que décrit dans [PLO 13, LEC 15]. Ce dispositif présente l'avantage de fournir plus d'une centaine de mesures exploitables à l'aplomb d'un capteur d'un mètre de long environ. Il offre ainsi la possibilité d'effectuer un traitement statistique des données permettant de prendre en compte les variations de résistivité inhérentes à l'hétérogénéité du matériau. Des essais en laboratoire ont été menés sur des éprouvettes en béton dépourvues d'armatures et maintenues à température et à humidité constantes. Ils ont permis de valider les performances de ces dispositifs de mesure et d'évaluer la probabilité de détection et la probabilité de fausse alarme associées à un taux de chlorure donné [LEC 15].

L'objectif de cette communication est de décrire le passage du laboratoire au site de ces capteurs multi-électrodes. Lors de la construction d'un quai portuaire à l'embouchure de la Loire deux capteurs ont été noyés dans une même poutre en béton. Ces capteurs étant partie intégrante d'un système de monitoring global de l'ouvrage, il a été possible de croiser leurs mesures avec celles issues d'autres capteurs ainsi qu'avec des résultats de caractérisation du matériau. Puisque les désordres liés à l'apparition de dommages sur l'ouvrage n'apparaîtront que dans plusieurs années, la chaîne de mesure a été utilisée pour observer l'évolution du béton au jeune âge. L'observation des phénomènes liés à la prise a permis de valider les protocoles de mesure et des méthodes d'analyse ainsi que d'estimer les performances du capteur de résistivité noyé.

2. Matériels et méthodes

2.1. Positionnement des capteurs sur site

Le quai est constitué de coques en béton préfabriquées, reposant sur des pieux en béton à chemise métallique, comme schématisé sur la figure 1. Les jonctions entre ces éléments sont ferrillées puis remplies de béton. Les coques font ainsi office de coffrages pour les éléments structuraux du quai dans lesquels sont coulés différents capteurs. Deux de ces poutres sont instrumentées tel que décrit sur la figure 1 avec deux capteurs de résistivité, trois sondes de mesure d'humidité et de température, quatre sondes PT100, trois capteurs de chlorures et trois électrodes de mesure de potentiel d'armature (Ag). Les capteurs de résistivité sont positionnés en sous face du quai au niveau des armatures les plus proches de la surface, de manière à mesurer les variations de résistivité du béton d'enrobage. Le but de ce positionnement est de détecter un front de chlorure avant qu'il n'atteigne les armatures (voir figure 2).

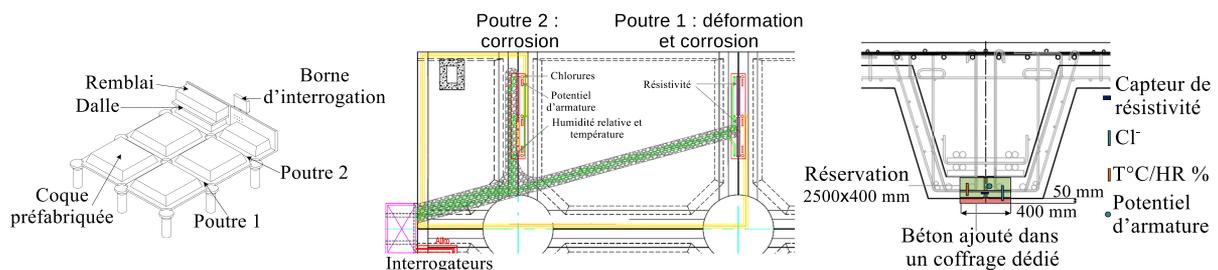


Figure 1. Positionnement des capteurs pour le suivi de pénétration des chlorures

2.2. Protocole de mesure et tests matériaux

Les 32 électrodes constituant un capteur de résistivité (voir figure 2) sont interrogées séquentiellement avec un protocole Wenner. L'interrogateur utilisé à cette fin est un appareil standard employé en géophysique pour réaliser des cartographies de résistivité du sous-sol : ABEM terrameter LS. Au cours des 28 jours après la fabrication du béton, des mesures de résistivité sont effectuées à intervalle de 4 jours au départ, puis progressivement espacées par la suite. En parallèle, la température et l'humidité au voisinage du capteur sont enregistrées en continu avec un pas de temps de 10 minutes dès lors qu'il y a suffisamment de soleil pour faire fonctionner les panneaux solaires alimentant le système d'acquisition. En complément des mesures in-situ, des éprouvettes 11-22 ont été coulées sur site avec la même gâchée de béton que celle utilisée pour couler les capteurs. Elles ont été utilisées pour caractériser le béton utilisé sur le port, notamment sa porosité et l'évolution de sa résistance mécanique au cours du temps.

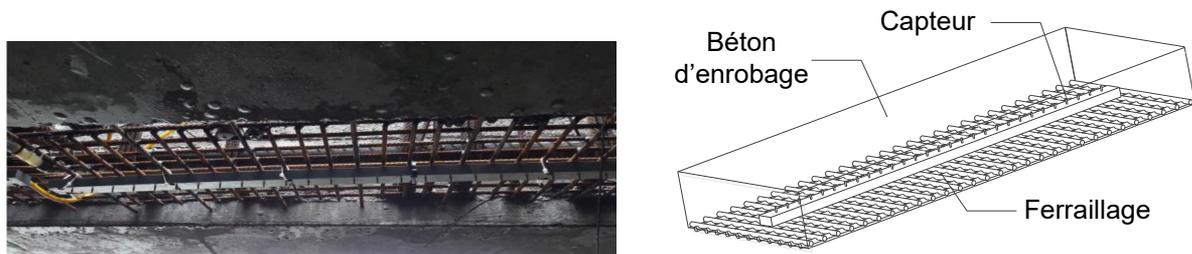


Figure 2. Capteur sur site avant coulage du béton et modèle numérique de l'ensemble ferrailage, capteur, béton d'enrobage

2.3. Analyse numérique de la sensibilité et exploitation des mesures in-situ

La technique de mesure employée ici, est une adaptation des cartographies de résistivité du sol. Dans les milieux semi-infinis, il existe une relation analytique permettant de relier la valeur de la différence de potentiel ΔV mesurée entre deux électrodes à la résistivité apparente ρ_a du milieu sondé de type $\rho_a = K\Delta V/I$. I est l'intensité du courant injecté dans le milieu et K est un facteur géométrique dépendant uniquement du protocole d'interrogation et de la distance inter-électrode a . ($K = 2 \times \pi \times a$ pour un protocole Wenner). Or il n'existe pas de formule analytique équivalente lorsque l'on applique cette technique à un volume de béton de dimensions finies incluant des ferrillages. On a donc recours à une modélisation par éléments finis du volume comprenant le béton d'enrobage, le capteur et la première nappe de ferrailage (voir figure 2) pour calculer les facteurs géométriques K correspondant à chaque jeu de 4 électrodes (soit 129 combinaisons dans notre cas d'application). Le modèle par éléments finis est également utilisé pour évaluer la sensibilité S_i d'une mesure à la variation de la résistivité dans une zone donnée (indiquée i). Les indices de sensibilité, dont le calcul est basé sur une décomposition de Sobol des différences de potentiel en fonction des résistivités, sont représentés sur la figure 3 pour différents espacements inter-électrodes. Grâce à cette étude de sensibilité, on est capable d'affirmer, que la différence de potentiel mesurée aux bornes de nos électrodes n'est fonction que de la résistivité du béton d'enrobage et n'est pas influencée par le matériau situé dans la partie centrale de la poutre. On utilise également la sensibilité pour afficher la résistivité apparente dans une zone donnée en pondérant la valeur de résistivité pour différents écartements inter-électrodes par la valeur des indices de sensibilité. On peut voir un exemple de cartographie de résistivité mesurée sur le port 300 jours après le coulage du béton sur la figure 3.

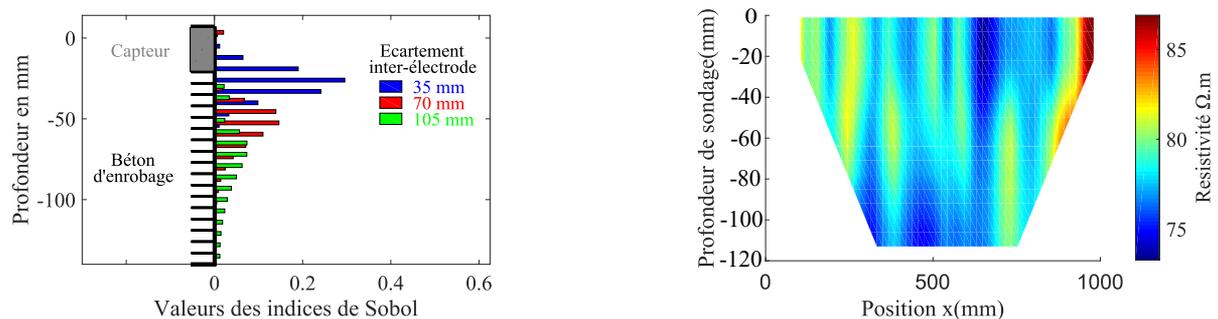


Figure 3. Indices de sensibilité et carte de résistivité apparente in-situ (300 jours après fabrication du béton)

3. Résultats

Dans le cadre d'un suivi de processus, on s'est intéressé à l'évolution de la résistivité moyenne du béton d'enrobage (voir figure 4 gauche). Chaque point de cette courbe représente la moyenne des valeurs de résistivité pour une cartographie (telle que celle de la figure 3) pour une échéance donnée. Puisque la résistivité est sensible à la température, nous avons effectué une correction thermique proposée dans les travaux de [NAA 06] pour se ramener à une température de référence (fixée ici à 15 °C, voir figure 4 droite). La barre d'erreur représente, quant à elle la dispersion totale des valeurs de résistivité autour de la valeur moyenne des mesures effectuées pour un capteur. L'allure des courbes ainsi obtenues est très similaire à celles évoquées par les auteurs ayant mené des campagnes de mesure de résistivité en laboratoire, sur des éprouvettes en béton, le plus souvent avec des dispositifs Wenner portables [POL 01] validant ainsi la pertinence des mesures obtenues avec le dispositif in-situ.

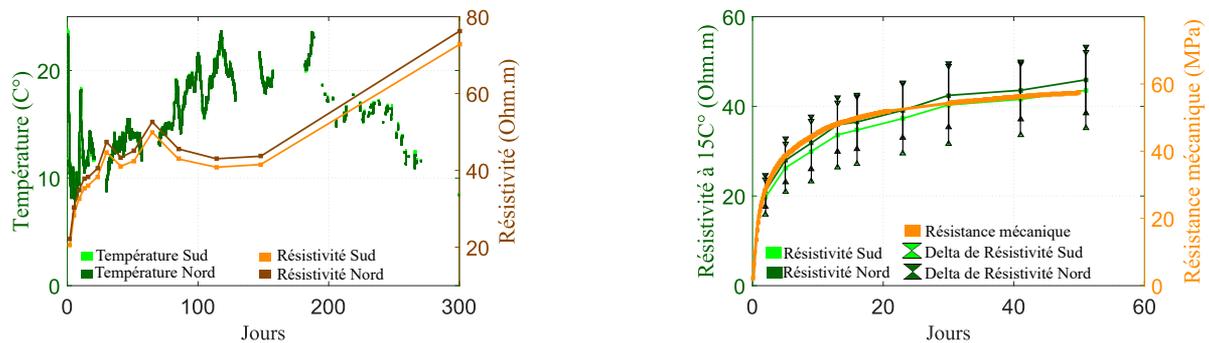


Figure 4. Évolution de la résistivité et de la résistance mécanique du béton sur site

4. Conclusion

Les mesures effectuées sur le quai ont permis de valider l'emploi du capteur noyé pour effectuer des mesures in-situ, notamment dans le cadre du suivi de l'évolution du béton au jeune âge. Dans le cadre du suivi de durabilité de l'ouvrage, les normes proposent une valeur seuil comme indicateur de corrosion [POL 01]. La probabilité d'initiation de cette dernière est jugée élevée pour une valeur de 100 $\Omega.m$. Pour le quai, sur une structure neuve, et après plusieurs mois de mesure, la résistivité est toujours en deçà de ce seuil. C'est la teneur en eau élevée du matériau, en lien avec la situation de l'ouvrage (en bord de fleuve) qui en est la cause. Une valeur particulière de la résistivité n'est donc pas exploitable dans ce cas de figure. Un indicateur plus pertinent est la différence entre deux états c'est-à-dire entre deux cartographies de résistivités telles que présentées sur la figure 3.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Pays de la Loire pour son support financier à travers le projet IMARECO porté par l'Université de Nantes, le Grand Port de Nantes-Saint Nazaire, les sociétés KEOPS, et Bouygues TPRF.

5. Bibliographie

- [BOU 17] BOURREAU L., Diagnostic de corrosion sur ouvrage : fiabilité et aide à la décision, PhD thesis, Université de Nantes, 2017.
- [LEC 15] LECIEUX Y., SCHOEFS F., BONNET S., LECIEUX T., LOPES S. P., « Quantification and uncertainty analysis of a structural monitoring device : detection of chloride in concrete using DC electrical resistivity measurement », *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 30, n° 3, p. 216-232, Taylor Francis, 2015.
- [NAA 06] NAAR S., ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DU BÉTON PAR MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET THERMOGRAPHIE INFRAROUGE PASSIVE, PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2006.
- [PLO 13] DU PLOOY R., LOPES S. P., VILLAIN G., DÉROBERT X., « Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition », *NDT & E International*, vol. 54, p. 27 - 36, 2013.
- [POL 01] POLDER R. B., « Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation », *Construction and Building Materials*, vol. 15, n° 2, p. 125 - 131, 2001, Near Surface Testing of.