

# Inversion de mesures de résistivité 4-points non-invasives pour caractérisation de la corrosion dans les bétons armés

Julia HOLZHAUER<sup>1</sup>, Julien GANCE<sup>1</sup>, Yannick FARGIER<sup>2</sup>, Christophe CHIABERGE<sup>3</sup>, Romain RODRIGUES<sup>3</sup>, Benjarese ONIANGUE-ONGANIA<sup>1,4</sup>, Stéphanie BETELU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Iris Instruments, 1 Avenue Buffon, F- 45100 ORLEANS

<sup>2</sup>Université Gustave Eiffel, GERS, 25 avenue François-Mitterrand, F - 69675 BRON Cedex

<sup>3</sup>BRGM, 3 Avenue Claude-Guillemin, F - 45100 ORLEANS

<sup>4</sup>LaSIE - UMR 7356 - La Rochelle Université, Avenue Michel-Crépeau, F - 17042 LA ROCHELLE Cedex1

**RESUME :** Dans l'étude de la corrosion dans les bétons armés, les mesures 4-points non-invasives constituent une alternative intéressante à la caractérisation électrochimique classique par mesure 3-points avec connexion à l'armature, bien que d'approche moins immédiate que ces dernières. En effet, alors que tout le courant pénètre la barre en 3-points, en 4-points seule une partie du courant appliqué à l'électrolyte béton est transmise à l'armature. Chaque point d'acquisition fournit alors une résistivité apparente unique, qui dépend de la densité de courant de corrosion à l'armature  $j_{\text{corr}}$  et de la résistivité de la matrice cimentaire  $\rho_c$ . En multipliant les points d'acquisition jusqu'à réaliser une tomographie de résistivité électrique (ERT), il devient possible d'imager la structure armée. A cet effet, nous avons développé un dispositif de laboratoire permettant la mesure 4-points en mode switch ; il est complété par un corset de 96 électrodes pour la mesure 3D sur échantillons de dimensions  $10 \times 10 \times 40$  cm<sup>3</sup>, armés ou non. Les premiers résultats sur un échantillon armé avec hétérogénéités de matrices montrent l'aptitude de la méthode ERT à retrouver, par inversion, la distribution de résistivité dans le corps d'épreuve ainsi que la détermination d'une valeur de corrosion uniforme  $j_{\text{corr}}$  conforme aux valeurs mesurées en méthodes 3-points traditionnelles

**Mots-clefs :** corrosion, imagerie, résistivité, inversion, hétérogénéités

**Keywords :** corrosion, imaging, resistivity, inversion, heterogeneities

## I. INTRODUCTION & PRINCIPE

En 25 ans, la caractérisation de la corrosion dans les bétons armés par mesure 4-points sans connexions à la barre a fait l'objet de nombreux travaux [Rodrigues et al., 2021]. Cette mesure est régulièrement utilisée, souvent en configuration Wenner, pour caractériser la résistivité moyenne de la matrice cimentaire, comme indicateur de la durabilité des ouvrages d'art [Hornbostel et al, 2013]. Mais sous sa forme plus développée, particulièrement poussée dans le contexte de la mesure géophysique ERT, cette permet d'imager les propriétés électriques d'un milieu hétérogène, et peut notamment être mise à profit dans l'étude de l'influence d'une distribution hétérogène de résistivité

sur le taux de corrosion à l'armature [Reichling et al.,2015]. En pratique, sur la base d'un modèle électrique équivalent de l'interface béton/armature de type Randles, juste après application d'un courant, l'interface béton/armature se simplifie en un condensateur déchargé équivalent à un fil : l'impédance du système béton/armature, montrée en Fig.1, se réduit à la chute ohmique du béton seul notée  $R_\Omega$ . Une fois le condensateur chargé, le système atteint un équilibre : l'impédance est la somme d'un  $R_\Omega$  et d'une résistance de polarisation  $R_p$ , comprise comme une résistance au transfert de charge entre porteurs ioniques et électroniques. C'est à ces basses fréquences (LF) que nous menons notre étude. Celle-ci consiste à effectuer une série de mesures 4-points non-invasives sur des échantillons armés de dimensions standards, réalisés en mortier de CEM I. Cette étude a pour finalité de donner la mesure d'une unique densité de courant de corrosion (supposée uniforme à la barre), tout en imageant la matrice cimentaire et ses hétérogénéités, par inversion de données ERT.

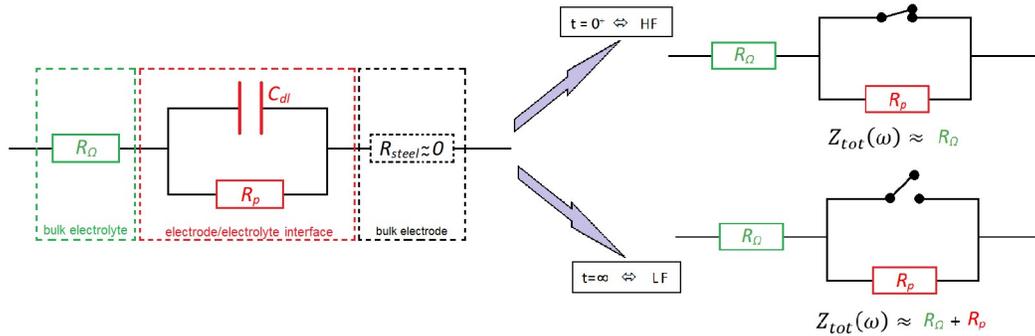


FIGURE 1. Circuits électriques équivalents du système électrolyte béton / armature métallique.

## II. MESURES

### A. Description de l'échantillon

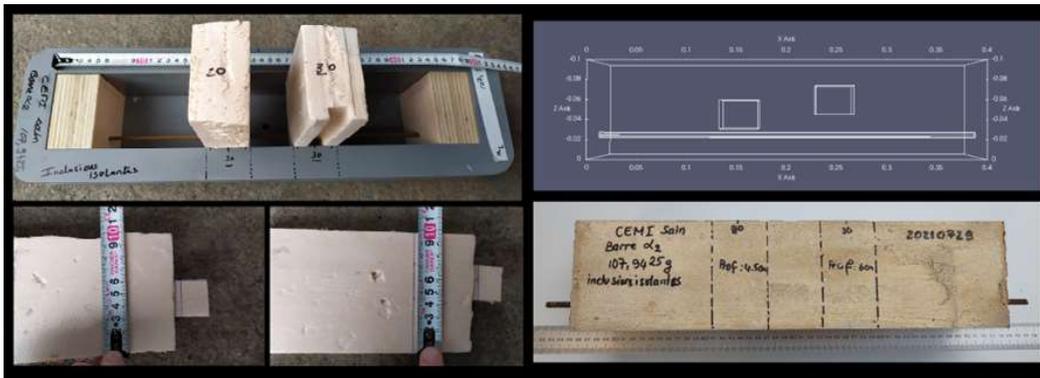


FIGURE 2. Positionnement et mise en œuvre d'un mortier de CEM I armé, contenant deux inclusions isolantes en polystyrène expansé. Les côtes sur l'échantillon tiennent compte des cales d'épaisseur 5cm.

Le prisme étudié est un mortier de CEM I, de rapport  $e/c = 0.5$  et  $s/c = 3$  et de dimensions  $10 \times 10 \times 40$  cm<sup>3</sup>. Il est armé sur sa longueur d'un fer torsadé de diamètre 6 mm, pour un enrobage de 2 cm ; l'armature dépasse à chaque extrémité de l'échantillon pour permettre des mesures contrôles en 3-points, typiques des méthodes classiques de l'électrochimie (spectroscopie d'impédance EIS,

impulsion galvanostatique GP, résistance de polarisation linéaire LPR...). Lors de sa mise en œuvre, on a introduit des hétérogénéités de matrice sous la forme de deux inclusions résistantes en polystyrène de dimensions  $4 \times 4 \times 3$  cm<sup>3</sup>. Leurs positions initiales sont repérées en Fig. 2.

L'échantillon a été maintenu en cure humide pendant 12 mois, emballé dans un sac étanche avec ajout d'un fond d'eau distillée. A la sortie de cure, l'échantillon est humide et considéré comme saturé. La conservation se poursuit en bac humide avec maintien de RH > 95%, sans contact direct de l'échantillon avec le fond d'eau. La mesure présentée plus loin a été réalisée 2 mois après la sortie de cure, sur un échantillon d'âge 14 mois toujours saturé (en l'absence de test mécanique, mais dans l'attente d'une tomographie aux rayons X).

### B. Dispositif expérimental

Nous avons conçu un corset d'électrode, adapté aux dimensions de nos échantillons, afin d'en réaliser la tomographie de résistivité électrique (ERT) en 3D. Ce dispositif, présenté en Fig. 3, est composé de 4 panneaux articulés comptant chacun 24 électrodes, soit un total de 96 électrodes. Afin de favoriser un bon contact électrique, ces électrodes sont rétractables, ce qui permet d'accommoder les petites irrégularités de surface, et équipées d'un tampon de diamètre 10 mm que l'on imbibera d'eau avant le lancement de la procédure d'acquisition. Chacune de ces électrodes peut fonctionner en injection ou en réception. L'acquisition est pilotée par un appareil CorImager Switch® à 10 canaux, développé par IRIS Instruments, permettant l'enregistrement simultané de 9 dipôles électriques en réception, ainsi que du courant  $I_{app}$  appliqué au dipôle d'injection. En pratique, l'appareil applique des créneaux périodiques de courant d'intensité  $\pm I_{app}$ , de période sélectionnable parmi des valeurs allant de 4s à 64s, dans le but d'atteindre la réponse quasi-statique du système, tout en limitant la polarisation des électrodes.

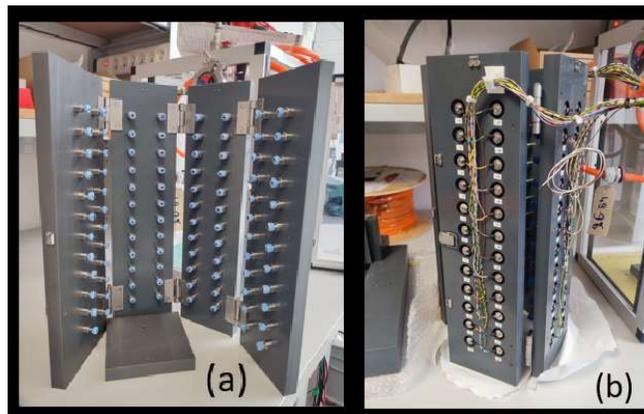


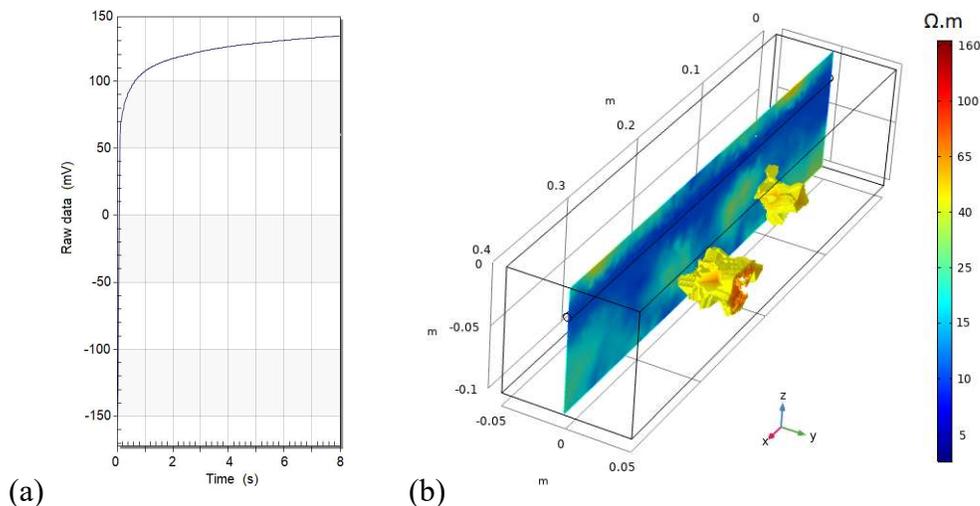
FIGURE 3. Vues du corset de 96 électrode ouvert (a) et fermé (b).

Nous avons développé une séquence d'acquisition afin d'assurer une couverture homogène de l'échantillon et de permettre la reconstruction par inversion ERT de la résistivité du volume investigué ainsi que de l'estimation d'une valeur de densité de courant de corrosion uniforme à la barre, notée  $j_{corr}$ . Cette séquence combine des acquisitions en configurations traditionnelles 1D de surface (de type Dipole-Dipole, Wenner-Schlumberger ou Wenner-Schlumberger-Réciproque),

avec des géométries d'acquisition 2D et 3D moins courantes, impliquant parfois deux panneaux distincts pour l'injection et la réception. Sur les millions de combinaisons possibles, nous avons conservé plus d'un millier de configurations associées à des facteurs géométriques  $k$  raisonnablement bas ( $k < 1$  m), arrangées de manière à optimiser le temps d'acquisitions (en limitant le nombre d'injections).

### III. RESULTATS

La Fig. 4.(a) présente une mesure 4-points brute, obtenue pour une injection en créneau de 8s stackée 5 fois (soit 10 injections). A ce stade, nous délaissons le régime transitoire pour ne nous intéresser qu'à l'état final, correspondant idéalement à un régime quasi-statique. A ce temps  $t \approx +\infty$ , alors que la capacité de la double couche électrique est complètement chargée, la différence de potentiel tend vers un plateau que l'on peut voir comme la combinaison d'une chute ohmique et d'une résistance à la polarisation de la barre. Ces données, couplées à un facteur géométrique  $k$  unique, déterminé en fonction des positions des 4 électrodes et de la géométrie d'échantillon, permettront de définir des valeurs de résistivité apparente  $\rho_{app}$ . Celles-ci constituent une 'image compressée' très partielle de l'échantillon, contenant une superposition d'informations de résistivité de matrice, ainsi que de résistances de transferts de charges à l'armature pour les lignes de courant  $y$  pénétrant (fraction de  $I_{app}$  dépendant elle-même de la valeur de  $j_{corr}$  évaluée sous la forme d'une impédance de contact ( $\Omega.m^2$ ) à l'interface béton/armature.). C'est la multiplication de ces données qui va finalement permettre la reconstruction de l'échantillon par inversion.



**FIGURE 4. (a) Exemple d'acquisition 4 points sur une injection de 8s. (b) Inversion ERT sur le prisme de mortier de CEMI contenant deux inclusions isolantes : l'inversion donne un  $j_{corr} = 16mA/m^2$ .**

En effet, lors de l'inversion, ces données (ici un peu plus de 1000 points d'acquisition) vont être recoupées et relocalisées sur la base du code d'inversion Gauss-Newton favorisant la direction de plus forte descente [Fargier, 2011 ; Fargier et al. 2017], permettant d'obtenir la tomographie de résistivité présentées en Fig 4.(b). On y retrouve une résistivité de matrice cimentaire globalement

homogène à  $15 \pm 3 \Omega.m$ , typique d'un mortier de CEM I jeune et saturé (et parallèlement retrouvée par mesures ERT sur un échantillon contrôle non-armé), ainsi que deux anomalies résistives, dont les positions centrées respectivement en  $x = 15$  et  $25$  cm et  $z = -4.5$  et  $-6$  cm, sont conformes avec la mise en œuvre. L'erreur en  $y$  est compatible avec une migration des blocs de polystyrène, peu dense, vers la surface libre pendant la prise. En revanche si les hétérogénéités de matrice sont spatialement bien délimitées, leur résistivité réelle semble largement sous-évaluée. L'inversion donne également une valeur  $j_{\text{corr}} = 16$  mA/m<sup>2</sup> en corrosion uniforme. Cette valeur inversée est conforme aux mesures 3-points, de l'ordre de  $8 \pm 2$  mA/m<sup>2</sup>, réalisées en Tafel, EIS et GP.

#### IV. CONCLUSION & PERSPECTIVE

L'investigation 3D par la méthode ERT d'échantillons de mortiers armés a prouvé la faculté de cette méthode à retrouver, par inversion, aussi bien les emplacements des hétérogénéités de résistivité de matrice, qu'une estimation fiable de la densité de courant de corrosion, sous l'hypothèse d'une corrosion uniforme à l'armature.

Afin de parfaire cette méthode d'imagerie, il convient maintenant de développer les performances de l'inversion sur la caractérisation de corrosions localisées, comprises comme des hétérogénéités de corrosion. Pour cela, nous aurons d'abord recours à des synthétiques avant de nous confronter aux mesures expérimentales sur échantillons armés, localement corrodés de manière contrôlée.

#### REFERENCES

Fargier, Y. (2011). *Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre*. Diss. Ecole Centrale de Nantes (ECN). <https://hal.science/tel-00921457/>

Fargier, Y., Antoine, R., Dore, L., Palma Lopes, S., Fauchard, C. (2017) 3D assessment of an underground mine pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods. *Geophysics*, 82(4), pp. E143–E153. <https://doi.org/10.1190/geo2016-0274.1>

Hornbostel, K., Larsen, C.K., Geiker, M.R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review, *Cement and Concrete Composites*. 39, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>

Reichling, K. Raupach, M., Klitzsch, N.(2015). Determination of the distribution of electrical resistivity in reinforced concrete structures. *Materials & Corrosion*, 66(8), 763-771. <https://doi.org/10.1002/maco.201407763>

Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., Betelu S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction & Building Materials*, 269, 121240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>