

Suivi d'un milieu immergé par identification de la résistivité : dispositif de mesure et choix de la paramétrisation

Wael Karam¹, Yann Lecieux¹, Mathilde Chevreuil¹, Franck Schoefs¹, Magda Torres Luque²

¹Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

²CAPACITES SAS, 16 Rue des Marchandises, 44200 Nantes

RESUME La méthode de résistivité électrique est l'une des techniques non destructives utilisées pour le contrôle de santé des structures en génie civil. Cet article présente différentes stratégies de paramétrisation et d'inversion permettant d'identifier les résistivités du milieu investigué à partir de mesures des différences de potentiels. Le processus d'inversion est appliqué à des modèles synthétiques utilisant deux formes de paramétrisations différentes. L'effet du bruitage des données sur l'inversion est étudié. Enfin, une validation expérimentale est réalisée sur une dalle de béton formée de deux zones de concentrations différentes en NaCl préparée au laboratoire.

Mots-clefs Résistivité, béton, chlorure, paramétrisation, inversion

Key-words Resistivity, concrete, chloride, parametrization, inversion

I. INTRODUCTION

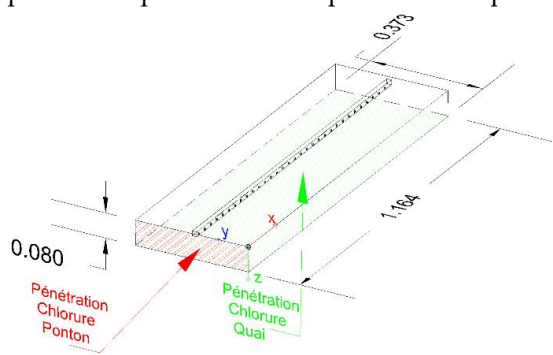
La résistivité électrique quantifie la capacité d'un matériau à s'opposer au passage du courant électrique. Cette grandeur est mesurée depuis de nombreuses années dans le génie civil pour diverses applications notamment le suivi de la corrosion [Polder, 2001]. Il est également possible, en calibrant la mesure de résistivité, d'évaluer la concentration des chlorures dans un béton donné [Lecieux et al., 2015]. Ce résultat est particulièrement intéressant dans le cadre du contrôle de santé des structures en milieu maritime puisque la corrosion des armatures en acier est la principale cause de détérioration du béton armé. La pénétration des ions chlorures dans la porosité du béton provoque la piqûre des armatures tandis que la gravité de la pathologie augmente avec la teneur en ions Na^+ et Cl^- . Ainsi, la mesure de résistivité a été choisie pour la surveillance de structures portuaires à La Turballe (France, Loire Atlantique). L'objectif est d'analyser l'effet couplé de l'immersion et de la présence de bio colonisation sur la pénétration des chlorures dans le béton.

Au préalable à l'analyse des données, il est nécessaire de se doter d'algorithmes permettant de cartographier la résistivité à partir de mesures de potentiels. Il s'agit d'un problème inverse qui repose sur une paramétrisation de la résistivité du milieu puis sur la minimisation d'un résidu. Différentes stratégies de paramétrisation de la résistivité sont proposées puis analysées à partir d'essais numériques d'une part et suite à l'analyse de mesures enregistrées dans une éprouvette comportant deux zones de résistivités différentes d'autre part.

II. MATERIEL ET METHODE

A. Structure d'étude et éprouvettes

Les structures à surveiller sont deux ouvrages neufs réalisées en béton armé : un quai et un ponton flottant situés tous deux à l'entrée du Port de la Turballe. Dans ce projet, plutôt que de les instrumenter, ce sont des dalles qui ont été équipées avec des capteurs de résistivité et de température noyés dans le béton. Elles sont fixées aux ouvrages portuaires sur des supports en acier inoxydable pour bénéficier des mêmes conditions environnementales. Cinq éprouvettes de dimensions 1164 mm × 373 mm × 80 mm (longueur suivant l'axe \vec{x} , largeur suivant l'axe \vec{y} , hauteur suivant l'axe \vec{z}) sont placées en sous face du quai, tandis que quatre éprouvettes sont fixées sur l'about d'un ponton. Les éprouvettes sont fixées avec l'axe \vec{x} à l'horizontale sur le quai et \vec{x} à la verticale sur le ponton. Le sens de pénétration privilégié des chlorures est ainsi l'axe \vec{z} pour les éprouvettes placées sous le quai et l'axe \vec{x} pour les éprouvettes placées sur le ponton (Fig. 1a).



a) Schéma des éprouvettes destinées au suivi des structures portuaires de la Turballe.



b) Epreuve constituée de deux bétons de résistivités différentes.

FIGURE 1. Epreuves destinées au suivi sur site et aux essais en laboratoire.

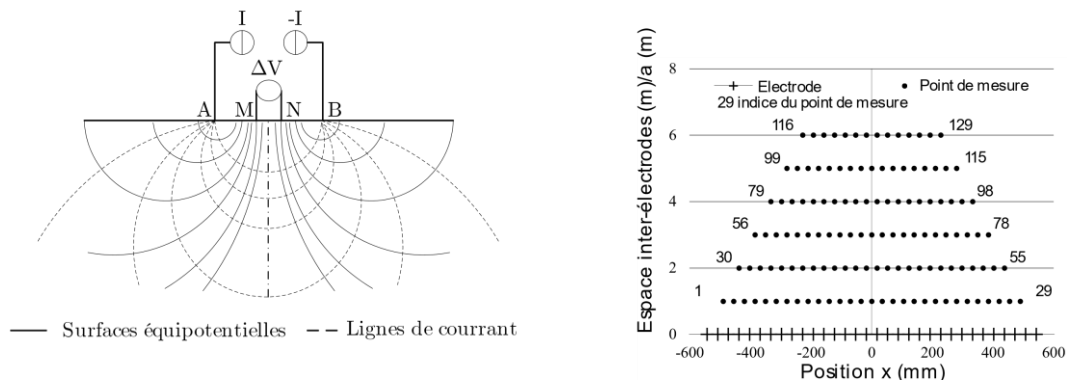
Une éprouvette, de même géométrie et équipée du même capteur que les éprouvettes destinées à la surveillance *in situ* à La Turballe (Fig. 1b), a été fabriquée pour évaluer les algorithmes d'analyse de la résistivité. La formulation du béton est donnée dans le tableau 1, sa résistance à la compression est de $(40 \pm 1,0 \text{ MPa})$ à 28 jours) et sa porosité $(11,8 \pm 0,3 \%)$. Pour discriminer deux concentrations en chlorures libres dans le béton, des ions chlorure ont été dissous dans l'eau de gâchage suivant deux concentrations différentes avant l'introduction dans le malaxeur [Lecieux et al., 2015] soit 0 g/L de NaCl dans la zone 1 (ρ_1 sur la Fig. 1b) et 60 g/L dans la zone 2 (ρ_2 sur la Fig. 1b). Cette configuration correspond au sens de propagation attendu des ions chlorures sur l'about du ponton. L'éprouvette a été stockée à 20°C, 50 % HR pendant 200 jours.

TABLEAU 1 Formulation du béton à 0g /L de NaCl

Type d'agrégats	Quantité (/m ³ de béton)
Ciment : CEM V/A 42,5	376 kg
Sable 0-4	770 kg
Granulats : 4-10	280 kg
11,2-22,4	790 kg
Eau	168 kg
Superplastifiant	2,35 L

B. Tomographie électrique, capteur et séquence de mesure

La tomographie électrique à courant continu consiste à utiliser des électrodes positionnées à la surface du volume étudié pour obtenir une mesure de résistivité. Deux électrodes respectivement nommées A et B sont utilisées pour injecter un courant électrique (voir Fig. 2a). Les deux autres électrodes référencées M et N sont utilisées pour mesurer une différence de potentiel ΔV . L'interrogation des quadripôles de longueur croissante (écart entre électrodes de 35 à six fois 35 mm) selon une séquence de mesure donnée (*i.e.* Wenner α), permet d'augmenter les profondeurs d'investigations pour ensuite cartographier le milieu sondé (Fig. 2b).



a) Principe de la mesure de résistivité
 (Configuration Wenner α : $AM=MN=NB=cste$).

b) Représentation de la séquence de mesure pour des écartements d'électrodes de 35 à six fois 35 mm

FIGURE 2. Principe et séquence de mesure de résistivité (Wenner α).

Le capteur mis en œuvre dans le cadre de cette étude est destiné à être noyé dans une structure en béton. Il est constitué de multiples électrodes en acier inoxydable (32 comme présenté sur la Fig. 2b), de 5 mm de longueur espacées de $a = 35$ mm. Elles sont vissées dans une barre en PVC de 1,135 m de long, 34 mm de large et 15 mm de haut.

III. CARTOGRAPHIES DE RESISTIVITE

Cartographier la résistivité d'un milieu consiste à établir une relation entre un jeu de mesures de différences de potentiel $\Delta V^{ref} = (\Delta V_1^{ref}, \dots, \Delta V_M^{ref})^T \in \mathbb{R}^M$ et une représentation spatiale de la résistivité ρ . La résistivité dite « vraie » est un modèle paramétré du milieu étudié obtenu par identification des paramètres d'un modèle physique liant intensité injectée I et différence de potentiel $\Delta V = F(\rho, I)$. La résolution de ce problème suppose de modifier itérativement la valeur de ρ , jusqu'à obtenir une différence de potentiel calculée $\Delta V = (\Delta V_1, \dots, \Delta V_M)^T \in \mathbb{R}^M$, coïncidant avec la différence de potentiel mesurée ou de référence ΔV^{ref} :

$$\min_{\rho} \sum_{j=1}^M r_j \quad \text{avec} \quad r_j = (\Delta V_j - \Delta V_j^{ref})^2 \quad (1)$$

où r_j est la fonction de coût quadratique et $j = 1, \dots, M$ fait référence aux différentes combinaisons des points de source de courant utilisées dans le protocole Wenner [Loke, 2000].

A. Modélisation de la diffusion du courant électrique

Les équations qui régissent la diffusion du courant électrique dans le milieu sondé Ω de frontière $\partial \Omega = \partial \Omega_D \cup \partial \Omega_N$, avec $\partial \Omega = \partial \Omega_D \cap \partial \Omega_N = \emptyset$, sont telles que le potentiel V est solution de :

$$\begin{aligned} \bar{\nabla} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \bar{\nabla} V \right) + \delta_A I - \delta_B I &= 0 && \text{dans } \Omega \\ -\frac{1}{\rho} \bar{\nabla} V \cdot \vec{n} &= 0 && \text{sur } \partial \Omega_N \\ V &= 0 && \text{sur } \partial \Omega_D \end{aligned} \quad (2)$$

où $\delta_A I$ et $\delta_B I$ sont des sources de courant ponctuelles d'intensité I imposées et connues avec des électrodes placées respectivement aux points A_j et B_j . Les conditions aux limites sont : un potentiel nul en un point du volume sondé et un courant nul sur les bords extérieurs du domaine et sur les bords du capteur (bord isolant). Le problème (2) est résolu avec une méthode éléments finis, développée en Matlab, afin de calculer la différence de potentiel $\Delta V^j = V_{M_j} - V_{N_j}$ pour les différentes positions des 4 électrodes A_j, B_j, M_j, N_j pour $j \in 1, \dots, M$ du protocole Wenner représenté sur la Fig. 1b.

B. Stratégie d'identification

Une modélisation paramétrique de la résistivité ρ est choisie *a priori* selon les connaissances du problème : $\rho = g(\mathbf{p})$ où $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_p) \in \mathbb{R}^P$ est le vecteur des paramètres de la modélisation.

L'algorithme retenu pour l'identification des paramètres de résistivité $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_p)$ est celui de Levenberg–Marquardt. La fonction objectif à minimiser à l'itération k est définie comme la somme quadratique des déviations des mesures aux prédictions à laquelle est ajoutée un terme de régularisation (3) :

$$\varphi_k = \sum_{j=1}^M (\Delta V_j(\mathbf{p}^{k+1}) - \Delta V_j^{ref})^2 + \lambda_k \sum_{i=1}^P (p_i^k - p_i^{k+1})^2 \quad (3)$$

où λ_k est le coefficient de régularisation et \mathbf{p}^{k+1} est le vecteur contenant les P paramètres à l'itération $k + 1$. La mise à jour des paramètres est calculée avec $p_i^{k+1} = p_i^k + \delta p_i^k$ selon l'équation (4) :

$$\delta \mathbf{p}^k = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda_k \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{J}^T (\Delta \mathbf{V}^{ref} - \Delta \mathbf{V}(\mathbf{p}^k)) \quad (4)$$

avec \mathbf{J} la matrice Jacobienne de dimension $P \times M$ telle que $J_{ji} = \frac{\partial \Delta V_j}{\partial p_i}(\mathbf{p}^k)$, et $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$ une matrice de filtrage diagonale définie positive égale à la matrice identité ici. La valeur initiale de λ est fixée à $\lambda_0 = 10^{-2}$. Elle est mise à jour à chaque itération telle que : $\lambda_{k+1} = \frac{\lambda_k}{10}$ lorsque $(\varphi_{k+1} < \varphi_k)$ et $\lambda_{k+1} = \lambda_k \times 10$ sinon.

IV. CAS D'ETUDE NUMERIQUE ET PARAMETRISATIONS ASSOCIEES

Afin d'évaluer les algorithmes d'identification qui seront mis en œuvre pour l'analyse des données réelles, des modèles numériques simplifiés ont été considérés. L'étude a porté sur des domaines de dimensions 640 mm × 120 mm × 80 mm avec 16 électrodes distantes de 40 mm placées à 10 mm de la sous face (voir Fig. 3). Le volume est partitionné en deux domaines de résistivités respectives $\rho_1 = 500 \Omega \cdot m$ et $\rho_2 = 100 \Omega \cdot m$ (risques de corrosion faible et élevé pour un ciment portland à 20°C selon la recommandation RILEM TC 154-EMC) avec un front horizontal dans un cas et vertical dans l'autre pour se conformer aux configurations attendues *in situ* sur le ponton et sur le quai.

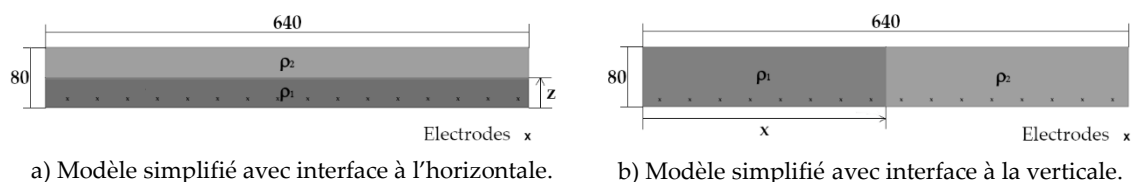


FIGURE 3. Cas tests considérés pour l'évaluation des algorithmes de résistivité.

Deux paramétrisations différentes sont envisagées pour cette étude. Dans le premier cas, la résistivité est définie par $P = 3$ paramètres [Fargier et al., 2021] : deux paramètres de résistivité ρ_1 , ρ_2 , ainsi qu'un paramètre de géométrie z ou x (voir la Fig. 3). La seconde paramétrisation est défini par des blocs de résistivités constantes. Elle est construite en deux étapes. Pour commencer, le volume est découpé en 264 blocs de dimensions identiques $20 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. À ce stade, les sensibilités de la mesure j par rapport à la variation de résistivité dans le bloc associé au paramètre i notées $S_i^j = \frac{\partial \Delta V^j}{\partial p_i}$ sont calculées numériquement pour évaluer l'influence des paramètres i sur l'ensemble des mesures selon (5) :

$$I_i = \sum_{j=1}^M |S_i^j|. \quad (5)$$

La carte de la Fig. 4a montre l'influence des différentes zones du domaine sur les mesures. Les blocs aux extrémités du domaine présentent une influence quasi nulle sur les mesures *a contrario* des blocs situés dans la partie centrale. Ainsi l'identification pourrait ne pas donner des résultats pertinents en raison du mauvais conditionnement du problème. Pour contourner cette difficulté, il est proposé de regrouper les blocs de faibles influences avec un algorithme de clustering pour aboutir à un nouveau paramétrage dans lequel l'influence de chaque zone est du même ordre de grandeur. Cette nouvelle paramétrisation constituée de 200 blocs est présentée sur la Fig.4b.

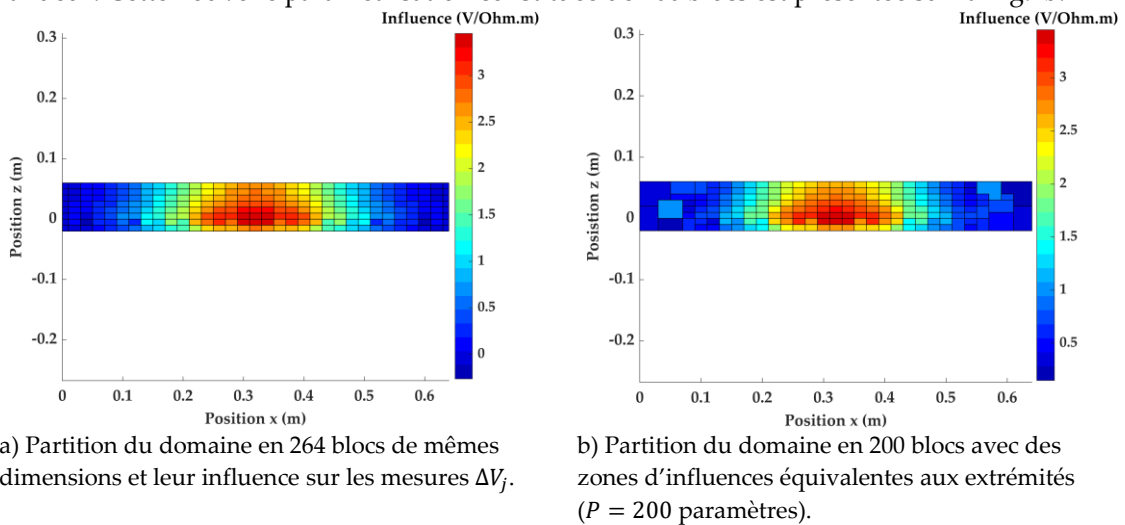


FIGURE 4. Définition d'une paramétrisation avec une résistivité constante par blocs.

L'utilisation de cette deuxième paramétrisation nécessite plus de temps de calcul et présente un risque accru de non convergence mais elle offre la possibilité de cartographier le milieu sondé.

V. RESULTATS DES TESTS NUMERIQUES

Les résultats de différents cas test numériques dans le cas d'une interface horizontale entre deux bétons de résistivité différentes $\rho_{1,ref} = 500 \Omega.m$ et $\rho_{2,ref} = 100 \Omega.m$ (soit la configuration de l'éprouvette en sous-face du quai) sont présentés sur la Fig. 5. Plusieurs positions de l'interface sont envisagées : $z_{ref} = 2, 4$ et 6 cm . Le maillage est conforme avec ces trois positions de l'interface. Les Fig. 5a, 5b, 5c correspondent à la mise en œuvre d'une paramétrisation à 3 paramètres $\mathbf{p} = (\rho_1, \rho_2, z)$ avec des niveaux de bruit variables qui entachent les mesures numériques soit respectivement 0%, 2% et 5%.

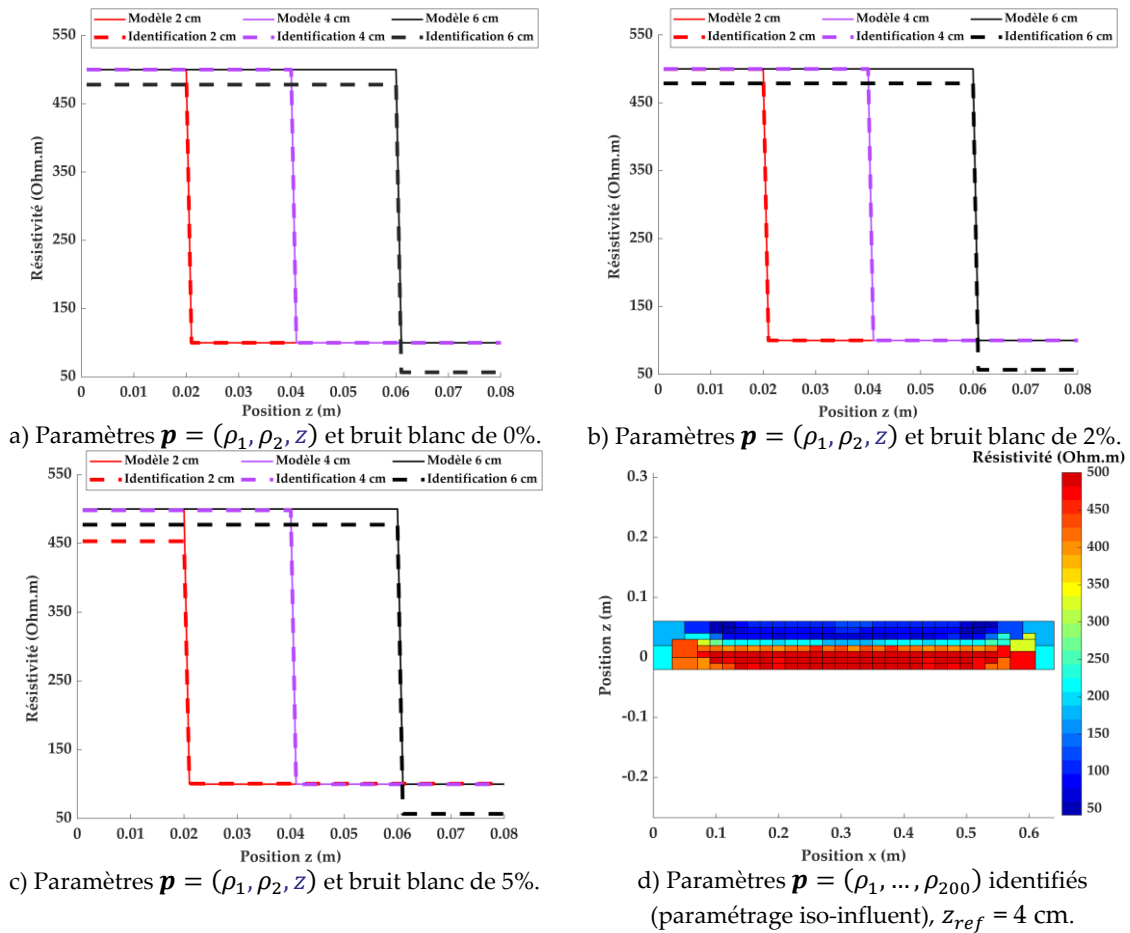


FIGURE 5. Résultats de l'identification des paramètres de résistivité avec interface horizontale.

La Fig. 5a montre que la première paramétrisation à 3 paramètres et l'algorithme employés, ont permis, sur ce cas de maillage conforme avec l'interface, de retrouver la résistivité du modèle de référence pour les cas où l'interface des deux domaines se situe à $z_{ref} = 2$ cm et $z_{ref} = 4$ cm. Cependant pour $z_{ref} = 6$ cm, les résultats d'inversion restent satisfaisants pour la couche proche du capteur ($\rho_{1,identifié} = 95,6\% \rho_{1,ref}$) mais la valeur de la résistivité identifiée pour la couche supérieure est plus éloignée de la valeur cible ($\rho_{2,identifié} = 59,75\% \rho_{2,ref}$). Ce résultat est à mettre en perspective avec la moindre influence de la couche de résistivité ρ_2 sur les mesures. D'autre part, la Fig. 5b montre que l'ajout d'un niveau de bruit de 2% ne modifie pas ces résultats. Avec un niveau de bruit de 5% (Fig. 5c) ceux-ci sont légèrement modifiés dans le cas où $z_{ref} = 2$ cm ($\rho_{1,identifié} = 90,6\% \rho_{1,ref}$).

Pour la paramétrisation à 200 paramètres et $z_{ref} = 4$ cm, les valeurs de résistivités identifiées sont présentées à la Fig. 5d. L'interface entre les deux zones de résistivités ρ_1 et ρ_2 est clairement visible et correctement positionnée à 4 cm tandis que les valeurs de résistivités dans les deux couches sont homogènes et conformes au modèle de référence. Malgré le paramétrage iso-influent, les extrémités gardent une faible influence (voir la Fig. 4b) et la géométrie de ces zones ne permet pas une description fine de l'interface ce qui explique une moins bonne identification de la résistivité à cet endroit. Sur la Fig. 6 sont présentés les résultats des tests numériques menés dans le cas d'une interface verticale entre deux bétons de résistivité différentes $\rho_{1,ref} = 500 \Omega.m$ et $\rho_{2,ref} = 100 \Omega.m$

(soit la configuration de l'éprouvette sur l'about du ponton). Les positions de l'interface verticale envisagées sont $x_{ref} = 16, 32$ et 48 cm pour le paramétrage à 3 paramètres et $x_{ref} = 32$ cm pour le paramétrage à 200 paramètres.

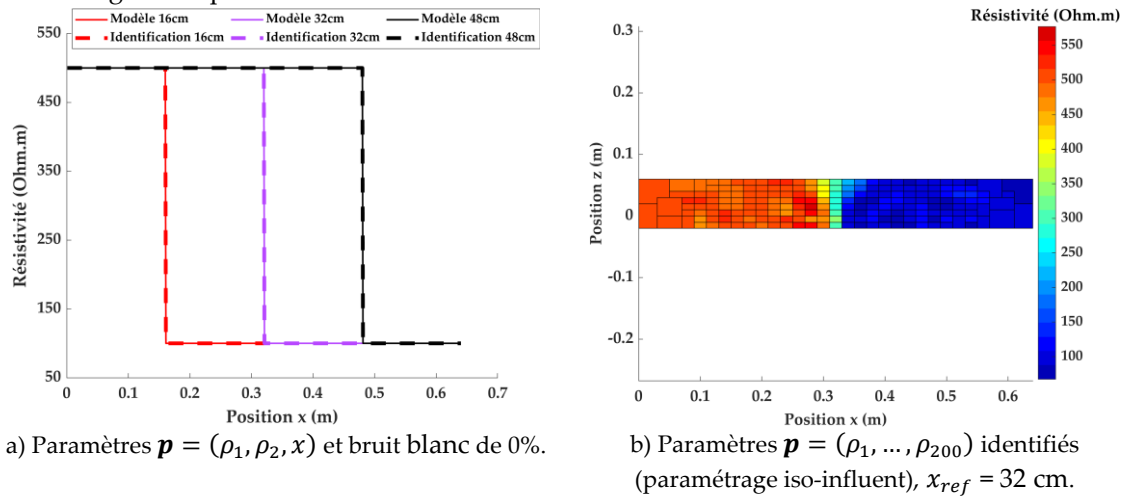
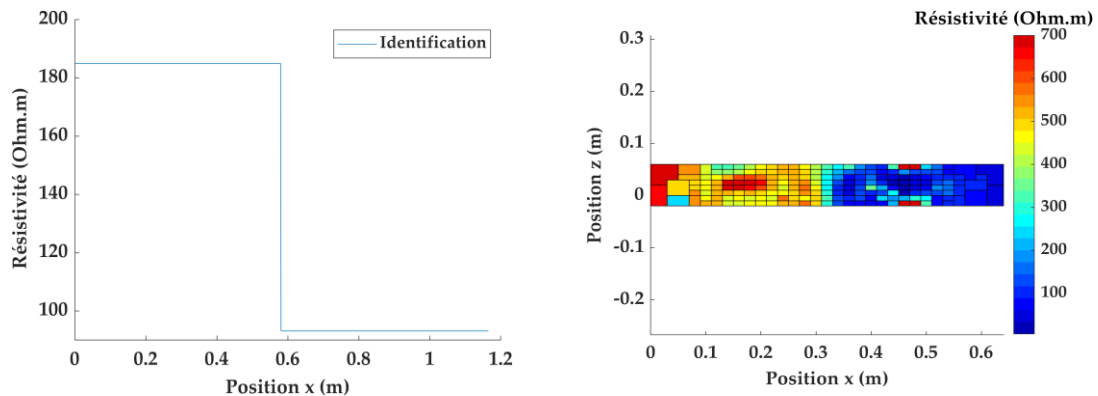


FIGURE 6. Résultats de l'identification des paramètres de résistivité avec interface verticale.

Les résultats d'inversion présentés sur la Fig. 6a avec le modèle à 3 paramètres pour les trois positions d'interface sont conformes au modèle réel puisque ρ_1 , ρ_2 et x sont identifiés exactement. Il en est de même pour le modèle à 200 paramètres (Fig. 6b) pour lequel les résistivités identifiées dans les blocs correspondent aux valeurs de référence $\rho_{1,ref}$ et $\rho_{2,ref}$ et où l'interface des deux domaines adjacents est identifiée à 4 cm près (soit la dimension suivant x des blocs initiaux utilisés pour définir le paramétrage).

VI. IDENTIFICATION DE LA RESITIVITE À PARTIR DE MESURES REELLES

Après avoir évalué la méthode d'inversion sur différents cas numériques, elle est testée avec les mesures réelles acquises sur la dalle formée de deux zones de béton différents (0g/L et 60g/L de NaCl) présentée dans la section II avec des sources d'intensité $I=5$ mA imposées. La Fig. 7a illustre les résultats d'inversion obtenus à partir des données expérimentales mesurées 200 jours après le coulage du béton avec le paramétrage à trois paramètres $\mathbf{p} = (\rho_1, \rho_2, x)$ sur un modèle numérique conforme à l'éprouvette. Les résistivités identifiées dans les deux zones et la position de l'interface sont respectivement $\rho_{1,identifié} = 186 \Omega.m$, $\rho_{2,identifié} = 93 \Omega.m$ et $x_{identifié} = 580 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. La position x de l'interface est identifiée à la même position que celle mesurée directement au réglet ($580 \pm 2 \text{ mm}$) sur l'éprouvette au niveau du front visible entre les deux zones, tandis que les valeurs des résistivités sont contrastées comme attendu dans les deux zones du béton. En revanche l'algorithme converge vers des valeurs aberrantes avec le paramétrage à 200 paramètres. Ce constat est à mettre en relation avec la dégradation des résultats obtenus à partir des données simulées sur le modèle numérique simplifié dès lors que les données sont bruitées (voir Fig. 7b).



a) Paramètres $\mathbf{p} = (\rho_1, \rho_2, x)$ identifiés à partir des données expérimentales.

b) Paramètres $\mathbf{p} = (\rho_1, \dots, \rho_{200})$ identifiés à partir de données synthétiques bruitées (5%).

FIGURE 7. Résultats de l'identification des paramètres : a) $\mathbf{p} = (\rho_1, \rho_2, x)$ à partir des mesures acquises sur l'éprouvette constituée de deux bétons de résistivités différentes avec un modèle numérique conforme à l'éprouvette, b) $\mathbf{p} = (\rho_1, \dots, \rho_{200})$ à partir de données synthétiques bruitées avec un modèle simplifié.

VII. CONCLUSION

Dans cet article, différentes stratégies de paramétrisation et d'inversion sont présentées dans le but d'identifier la résistivité d'un milieu sondé à partir de mesures des différences de potentiels. Deux schémas de paramétrisation ont été présentés et testés sur des données simulées et expérimentales : une paramétrisation à trois paramètres (ρ_1, ρ_2 et x ou z) et une paramétrisation formée de 200 blocs de résistivités constantes iso-influents. L'association du paramétrage à 3 paramètres avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt s'est avérée robuste et fiable lors de tous les essais. A l'inverse, l'association du paramétrage iso-influent avec le même algorithme de minimisation s'est révélé sensible au bruitage des données et n'a pas permis d'obtenir des résultats cohérents à partir des mesures expérimentales. Des techniques de filtrage et de régularisation devront être testées pour permettre l'utilisation de ce paramétrage qui offre théoriquement plus de flexibilité afin d'obtenir *in fine* une véritable cartographie des résistivités dans les ouvrages en béton à l'instar de ce qui est fait en géophysique [Loke, 2000].

REFERENCES

Fargier, Y., Villain, G., Lopes, S.P., Fares, M., (2021). Optimized retrieval of 1D-resistivity profiles in cover concrete by electrical sounding measurements. *J. Appl. Geophys.* 193, 104413. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104413>

Lecieux, Y., Schoefs, F., Bonnet, S., Lecieux, T., Lopes, S.P., (2015). Quantification and uncertainty analysis of a structural monitoring device: detection of chloride in concrete using DC electrical resistivity measurement. *Nondestruct. Test. Eval.* 30, 216–232. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1029476>

Loke, M.H., (2000). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies A practical guide to 2-D and 3-D surveys. RES2DINV.

Polder, R.B., (2001). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete a RILEM TC-154 technical recommendation. *Constr. Build. Mater.* 15, 125–131. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)