

Utilisation d'un méta-modèle pour l'identification paramétrique : application à la mesure de résistivité électrique

J. Priou¹, M. Chevreuil¹, Y. Lecieux¹

¹ GeM, Université de Nantes, {johann.priou,mathilde.chevreuil,yann.lecieux}@univ-nantes.fr

Résumé — L'objectif de cette étude est d'identifier la résistivité électrique d'un élément de structure en béton à partir d'un jeu de mesures de potentiels. Le milieu sondé est modélisé par sous-domaines de résistivité constante dont on cherche à identifier les valeurs. Numériquement cela revient à minimiser l'écart entre un jeu de données mesurées et un jeu de données calculées en faisant varier les paramètres du modèle. Ce problème classique dans le cadre de l'étude du sous-sol est habituellement résolu par la méthode de Newton puisque la géométrie du domaine sondé (milieu semi infini) permet de calculer analytiquement les directions de descente de l'algorithme de minimisation. L'adaptation de ces techniques aux structures de dimensions finies pose comme problématique majeure l'augmentation importante du temps de calcul lié à l'impossibilité d'évaluer analytiquement les directions de descente de l'algorithme de minimisation. Dans cette étude il est ainsi proposé de substituer au modèle élément finis direct de propagation du courant électrique, un modèle approché de faible rang. La méthode d'identification proposée, est une méthode basée sur des évaluations du modèle approché. Ses performances (vitesse de convergences et précision) sont évaluées à travers des tests numérique par comparaison avec une méthode d'identification classique.

Mots clés — Problème inverse, Méta-modèle, Résistivité électrique, Structural Health Monitoring (SHM).

1 Introduction et état de l'art de la mesure de résistivité électrique

La résistivité électrique est la capacité d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant. Cette caractéristique physique est liée à la nature du milieu, à sa porosité et à sa teneur en électrolytes. Les mesures de résistivité électrique en courant continu (CC) sont ainsi naturellement utilisées depuis de nombreuses années en géophysique pour obtenir des images du sous-sol par tomographie [1] et en estimer sa constitution (type de roche, présence d'eau, traces de polluants, etc.). Les mesures de résistivité sont également utilisées en génie civil pour diverses applications parmi lesquelles on peut citer la détection des fissures [2], l'évaluation de la résistance mécanique [3] ou l'évaluation de la teneur en eau du béton [4]. Le suivi de la corrosion, sujet d'intérêt de cette étude, est également un domaine d'application important pour la mesure de la résistivité [5]. Elle est utilisée comme indicateur de la probabilité de corrosion. Dans le cas de la corrosion par piqûres induite par les chlorures, il est possible, en étalonnant la mesure de résistivité, d'évaluer le niveau de chlorure libre dans un béton donné [4, 6].

La résistivité électrique, ne peut être mesurée directement. Pour l'obtenir les techniques expérimentales actuellement en usage consistent à injecter en divers points du milieu sondé des courants électriques, d'intensités maîtrisées, tout en mesurant des différences de potentiels. Le milieu sondé est ensuite modélisé par des zones de résistivité constantes par morceau dont on cherche à identifier la valeur [1]. Numériquement, cela revient à minimiser l'écart entre les différences de potentiels mesurées (ou à un facteur près les résistivités apparentes) et celles calculées avec un modèle direct. La technique la plus courante est la méthode de minimisation par les moindres carrés qui consiste à calculer une direction de recherche de minimum grâce à une jacobienne dont les composantes sont les dérivées des données mesurées par rapport aux paramètres à identifier. Dans le domaine de la géophysique, des codes commerciaux fiables et robustes permettent de calculer les paramètres de résistivité électrique du sous-sol rapidement en s'appuyant sur la spécificité de l'application au sondage du sous-sol. Ce dernier peut en effet être considéré comme un milieu semi-infini. De fait, le problème direct est simple à modéliser, peu coûteux

en temps de calcul et il existe des expressions analytiques permettant d'évaluer les composantes de cette jacobienne. Des relations analytiques permettent également de définir une résistivité dite "apparente" directement à partir des potentiels mesurés. Cette résistivité apparente constitue une bonne approximation de la résistivité réelle du milieu et est utilisée pour l'initialisation des paramètres de résistivité dans le cadre de leur identification.

L'application de la technique d'identification de résistivité aux structures de génie civil, bien qu'apparemment très proche des problématiques de la cartographie du sous-sol, pose deux difficultés liées principalement à la géométrie du milieu et de manière plus anecdotique à la présence d'éléments conducteurs, les aciers de renfort. Les dalles, poutres ou murs étant des milieux finis, il n'est plus possible d'évaluer analytiquement les dérivées des potentiels mesurées par rapport aux paramètres de résistivité. Il est bien sûr toujours possible de procéder à une évaluation purement numérique de ces termes. Toutefois, il s'agit d'une opération longue en temps de calcul, et ce d'autant plus si le problème direct est complexe (géométrie, conditions aux limites, présence d'éléments conducteurs, etc). Ainsi pour éviter de faire appel de multiples fois à un modèle éléments finis direct long à évaluer, l'approche proposée dans cette étude consiste à lui substituer un méta-modèle. On espère ainsi réaliser des gains substantiels en temps de calcul sans pour autant pénaliser la précision de l'identification. Ce méta-modèle sera également utilisé pour redéfinir la notion de résistivité apparente dans le cadre d'une application à des domaines finis afin de fournir un jeu de paramètres initiaux à la procédure d'identification.

La section 2 est consacrée à la présentation du protocole de mesure de résistivité, à la formulation du problème de propagation du courant électrique puis à la définition du problème de minimisation. La modélisation de la résistivité pour le problème direct et la construction d'un modèle approché de faible complexité sont présentées dans la section 3. La partie 4 est consacrée aux méthodes de minimisation utilisées dans cette étude, la méthode sécante et la méthode basée sur des évaluations. Enfin, les performances des deux techniques sont comparées dans la section 5, sur des cas tests numériques simples.

2 Contexte et problématique de l'identification de la résistivité électrique

Le protocole utilisé pour effectuer la mesure de résistivité est un protocole Wenner. Il consiste à placer à la surface du domaine étudié un capteur constitué de n électrodes disposées sur une ligne. Pour effectuer une mesure, quatre électrodes sont utilisées. Un courant I et $-I$ est imposé sur deux électrodes (nommées A et B) puis la différence de potentiel $\Delta V = V_N - V_M$ est mesurée entre les deux électrodes M et N, comme schématisé sur la figure 2.

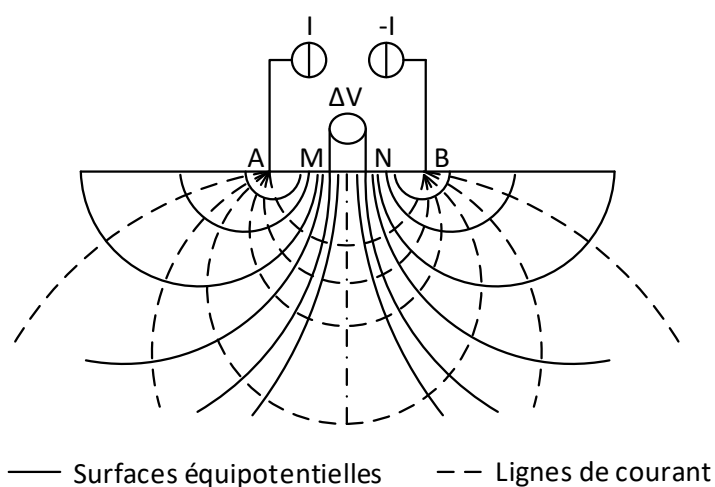


FIGURE 1 – Principe de mesure

En pratique, l'ensemble des mesures de potentiel ΔV est constitué de p mesures. Il est obtenu en utilisant différentes combinaisons de quatre électrodes et en choisissant des électrodes équidistantes. Grâce

aux n électrodes (classiquement de 4 à 64 selon les appareils), p mesures sont exploitables et l'ensemble des mesures est défini par $\Delta \mathbf{V}_{ref} = \{\Delta V_{ref}^1, \dots, \Delta V_{ref}^p\}$.

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

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

où ρ est la résistivité du milieu et $\delta_{A_j} I$ et $\delta_{B_j} I$ sont des sources d'intensité I imposées avec des électrodes placées respectivement aux points A_j et en B_j , où $j = 1, \dots, p$ fait référence aux différentes combinaisons des points de source de courant utilisées dans le protocole Wenner. Les conditions aux limites correspondraient à un potentiel nul sur les ferraillements et un courant nul sur les bords extérieurs du domaine et sur les bords du capteur (bord isolant). Le problème (1) est résolu avec une méthode éléments finis afin de calculer la différence de potentiel $\Delta V^j = V_{N_j} - V_{M_j}$ pour les différentes positions des 4 électrodes A_j, B_j, M_j et N_j , pour $j \in 1, \dots, p$, du protocole Wenner pour lesquelles la différence de potentiel est mesurée.

L'identification de la résistivité ρ se fait en minimisant l'écart entre l'ensemble des différences de potentiel mesurées $\Delta \mathbf{V}_{ref}$ et l'ensemble des différences de potentiels calculées $\Delta \mathbf{V}(\rho) = \{\Delta V^1(\rho), \dots, \Delta V^p(\rho)\}$. Le problème de minimisation s'écrit :

$$\min_{\rho \in \mathcal{P}} L(\Delta \mathbf{V}_{ref}, \Delta \mathbf{V}(\rho)), \quad (2)$$

où L est une fonction coût qui mesure l'écart entre les mesures et les calculs et \mathcal{M} est un sous-ensemble de fonctions choisi pour modéliser ρ et présenté dans la section suivante. On considère ici une minimisation basée sur les moindres carrés avec

$$L(\Delta \mathbf{V}_{ref}, \Delta \mathbf{V}(\rho)) = \sum_{j=1}^p (\Delta V_{ref}^j - \Delta V^j(\rho))^2$$

L'initialisation de la valeur des paramètres ρ avant le démarrage de la procédure de minimisation est effectuée en utilisant la résistivité apparente. Cette dernière notée ρ_{app} est une approximation conditionnelle de la résistivité qui peut être obtenue directement grâce à une relation analytique. Dans le cas d'un milieu parfaitement homogène et semi-infini, la résistivité apparente est strictement égale à la résistivité vraie. Elle est définie telle que :

$$\rho_{app} = G \frac{\Delta V}{I}, \quad (3)$$

avec G (1/m) un facteur géométrique dépendant du protocole utilisé et de la géométrie du système. Ce paramètre peut être obtenu par calcul analytique dans le cas d'étude d'un domaine semi infini ou au moyen d'un calcul numérique dans le cas d'étude d'un domaine de dimensions finies.

3 Modèle

3.1 Modélisation de la résistivité

Pour modéliser la résistivité à identifier dans le milieu, on choisit de découper le domaine étudié Ω dans \mathbb{R}^3 en d sous-domaines distincts $D_i, i \in [1, \dots, d]$, de résistivité constante ρ_i dans D_i . On a alors

$$\mathcal{P} = \left\{ \rho = \sum_{i=1}^d \rho_i I_{D_i}(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 \right\} \text{ avec } I_{D_i} = \begin{cases} 1 & \text{if } \mathbf{x} \in D_i, \\ 0 & \text{if } \mathbf{x} \notin D_i. \end{cases} \quad (4)$$

En notant $\rho = \{\rho_1, \dots, \rho_d\}$ l'ensemble des paramètres permettant de définir la résistivité, le problème de minimisation (2) peut être identifié au problème de minimisation suivant :

$$\min_{\rho \in \mathbb{R}^d} L(\Delta \mathbf{V}_{ref}, \Delta \mathbf{V}(\rho)), \quad (5)$$

Les sous-domaines \mathcal{D}_i , $i \in [1, \dots, d]$, sont définis de façon à avoir tous la même influence sur les mesures. La sensibilité des mesures aux paramètres de résistivité peut être quantifiée à l'aide d'indices de sensibilité basés sur le jacobien qui peut être coûteux à calculer voire inaccessible. On introduit ici des indices de sensibilité S_i^j qui quantifient la part de la variance sur la mesure ΔV_j due à la variabilité de ρ_i en considérant un intervalle *a priori* de valeurs possible pour la résistivité :

$$S_i^j = \frac{\text{Var}(\mathbb{E}(\Delta V^j | \rho_i))}{\max_{l=1, \dots, \rho} (\text{Var}(\Delta V^l))}. \quad (6)$$

L'espérance conditionnelle $\mathbb{E}(\Delta V^j | \rho_i)$ représente la fonction univariée de ρ_i qui approche au mieux ΔV^j , sa variance $\text{Var}(\mathbb{E}(\Delta V^j | \rho_i))$ mesure ainsi les fluctuations de ΔV^j vue comme une fonction de ρ_i uniquement, et elle est normalisée par la variance maximale des différences de potentiel pour tenir compte des mesures les plus sensibles aux variations de ρ_i . Ces indices peuvent être calculés par des méthodes de simulation de Monte Carlo ou en construisant une approximation de ΔV^j sur des bases de fonctions. Les sous-domaines sont définis tels que $S_i = \sum_{j=1}^m S_i^j$ sont du même ordre de grandeur pour tous les sous-domaines $i = 1, \dots, d$.

Lorsque le nombre de paramètres d est grand, il est avantageux de construire des approximations (ou méta-modèles) de faible complexité des fonctions de grande dimension $\Delta V^j(\rho_1, \dots, \rho_d)$. Cette approximation sera utilisée pour calculer efficacement les indices de sensibilité et pour résoudre le problème de minimisation (5).

3.2 Approximation

Une approximation de faible complexité de la fonction de grande dimension $\Delta V^j(\rho_1, \dots, \rho_d)$ est construite en exploitant des structures de faible rang de la fonction. Le sous-ensemble des fonctions de faible rang est défini par :

$$\mathcal{M} = \{v(\rho) = \Psi(\mathbf{a}^1, \dots, \mathbf{a}^m)(\rho); \mathbf{a}^k \in \mathbb{R}^{n_k}\} \quad (7)$$

où Ψ est une application multilinéaire qui constitue une paramétrisation du sous-ensemble \mathcal{M} et \mathbf{a}^k sont les paramètres. La dimension de la paramétrisation $\sum_{k=1}^m n_k$ croît seulement linéairement avec m et rend donc l'approximation en grande dimension possible. On choisit ici d'approcher la fonction $\Delta V(\rho)$ au format Tensor Train (TT) telle que $\Delta V(\rho) \approx f(\mathbf{a}^1, \dots, \mathbf{a}^m)(\rho)$ avec f de la forme :

$$f(\rho) = \sum_{k_1=1}^{r_1} \dots \sum_{k_{d-1}=1}^{r_{d-1}} \omega_{1,k_1}^{(1)}(\rho_1) \dots \omega_{k_{d-1},1}^{(d)}(\rho_d), \quad (8)$$

ou $\omega_{k_{i-1},k_i}(\rho_i)$ sont des fonctions univariées représentées dans un espace d'approximation engendré par la base de fonctions $\{\varphi_l^{(i)}(\rho_i)\}_{l=1}^{n_i}$ telles que :

$$\omega_{k_{i-1},k_i}(\rho_i) = \left(\varphi_1^{(i)}(\rho_i), \dots, \varphi_{n_i}^{(i)}(\rho_i) \right) a_{k_{i-1},k_i}^{(i)}, \quad (9)$$

avec $a_{k_{i-1},k_i}^{(i)} \in \mathbb{R}^{n_i}$, $1 \leq i \leq d$, les paramètres de l'approximation tels que $\mathbf{a}^i \in \mathbb{R}^{r_{i-1} \times r_i \times n_i}$.

L'approximation peut être construite par des méthodes Proper Generalized Decomposition basées sur les projections de Galerkin ou par des méthodes d'apprentissage statistique basées sur les moindres carrés comme proposé dans [7]. Cette dernière méthode est retenue dans ce travail. L'approximation est construite à partir d'un échantillon d'apprentissage $\{\rho^q, \Delta V(\rho^q)\}_{q=1}^Q$ et elle est solution du problème de minimisation $\min_{\mathbf{a}^1, \dots, \mathbf{a}^d} \sum_{q=1}^Q (f(\mathbf{a}^1, \dots, \mathbf{a}^d) - \Delta V)^2$ qui est résolu par minimisation alternée.

4 Méthodes d'identification

Cette partie présente deux méthodes pour résoudre le problème (5).

4.1 Méthode sécante

Dans cette méthode itérative basée sur la méthode de Newton, les itérés sont définis par : $\rho_{i+1} = \rho_i - J^{-1}\Delta V(\rho_i)$. Le jacobien est approché par différences finies. Pour chaque itération, le jacobien doit être calculé ce qui peut être une tâche difficile. Cette difficulté peut être surmontée par la construction d'un méta-modèle en s'assurant que les gradients du méta-modèle soient eux aussi bien approchés.

4.2 Méthode basée sur des évaluations

On propose ici de résoudre le problème (5) en se basant sur les évaluations de la fonction. Pour diminuer le coût de calcul, les fonctions $\Delta V = \{\Delta V^1, \dots, \Delta V^p\}$ peuvent être remplacées par leur approximation de rang faible construites selon la méthode présentée dans la section 3.2 :

$$\widetilde{\Delta V} = \{f^1(\mathbf{a}_1^1, \dots, \mathbf{a}_1^d), \dots, f^p(\mathbf{a}_p^1, \dots, \mathbf{a}_p^d)\}.$$

Le problème d'identification (5) est alors remplacé par $\min_{\rho \in \mathbb{R}^d} L(\Delta V_{ref}, \widetilde{\Delta V}(\rho))$.

L'influence des paramètres sur les mesures est très variable et les paramètres les moins influents peuvent varier sans impacter la mesure et donc la fonction coût. C'est pourquoi on divise le problème en sous-problèmes pour résoudre des problème de minimisation avec des paramètres ayant une sensibilité du même ordre de grandeur. Les paramètres sont triés par importance d'influences sur la mesure et on définit des sous-ensemble de paramètres $\rho_l = \{\rho_l : \sum_j S_l^j > \alpha\}$ dont la sensibilité $\sum_j S_l^j$ sur l'ensemble des mesures est supérieure à une borne α . Le but est de diminuer les dimensions de l'espace des paramètres.

Les problèmes de minimisation sont résolus à partir d'évaluation de la fonction, ici le méta-modèle dont les évaluations reposent sur l'évaluations de fonctions paramétrées $f^j(\mathbf{a}_j^1, \dots, \mathbf{a}_j^d)$ qui sont quasi-instantanées et peu coûteuses une fois cette approximation construite.

5 Cas test numérique

Les coûts des méthodes sont comparés sur un cas test numérique simple. Le domaine étudié consiste en une poutre de dimensions $\mathbf{x} = (x, y, z) \in \Omega = [0; X_l] \times [0; 140] \times [0; 70]$ mm avec n électrodes et $X_l = [210; 280; 392]$ avec l le numéro des cas tests. Le potentiel électrique est solution du problème (1) avec un courant nul sur les six faces du domaine, $\partial\Omega_N = \partial\Omega$ et $\partial\Omega_D = \emptyset$, c'est-à-dire le que le domaine ne contient pas de capteur à l'intérieur ni de ferrailage. Le problème est résolu par la méthode des éléments finis avec des éléments Q4 de taille 7 mm. Le nombre de sous-domaines définis selon la procédure de la section 3.1, et donc le nombre de paramètres de résistivité d à identifier, sont liés au nombre de mesures p . Ainsi pour $l = 1$ on a $d = 2, p = 2$; pour $l = 2$ on a $d = 4, p = 5$; pour $l = 3$ on a $d = 8, p = 12$. La figure 2 montre le cas $l = 3$ avec la ligne d'électrodes représentées en rouge. Sur cet exemple simple, la considération de $d = 8$ domaines mène à des domaines d'influence équivalente à peu près de même volume et la position du capteur ne permet pas d'observer des variations de résistivité dans la dimension y . Les domaines retenus pour représenter la résistivité sont donc de volumes égaux et de résistivité constante selon la direction y .

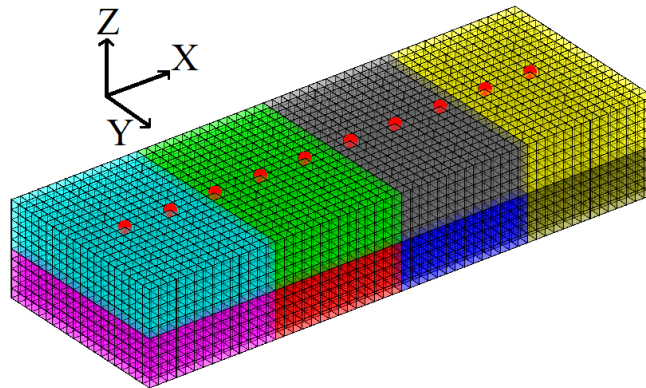


FIGURE 2 – Domaine Ω découpé en $d = 8$ sous-domaines de résistivité constante. Les points rouges représentent les positions des électrodes de mesure.

Dans cet exemple les mesures ΔV_{ref} sont issues d'essais numériques. Pour l'initialisation du problème de minimisation (5), on introduit la résistivité apparente dans un sous-domaine D_i déterminée par :

$$\rho_{app,i} = \frac{\sum_{j=1}^m S_i^j \rho_{app}^j}{\sum_{j=1}^m S_i^j} \quad (10)$$

avec ρ_{app}^j la résistivité apparente liée à ΔV_{ref}^j selon la relation (3) dans laquelle le facteur géométrique G est déterminé numériquement *a priori*. Les paramètres ρ sont ainsi initialisés avec $\rho_{app} = \{\rho_{app,1}, \dots, \rho_{app,d}\}$ déterminés à partir des mesures ΔV_{ref} .

La méthode sécante est utilisée avec le modèle direct éléments-finis et la méthode par tirages est utilisée avec le méta-modèle. Il est possible d'utiliser la méthode par tirages avec un modèle éléments-finis cependant le temps de calcul des tirages serait beaucoup trop important. Inversement, utiliser la méthode sécante avec le car la précision sur gradient de l'approximation n'est pas garantie.

Considérons le cas $l = 1$ avec $\rho_{ref} = \{140; 40\}$. La résistivité initiale des blocs est $\rho_{app} = \{124.2; 44.2\}$. On procède identiquement pour les cas $l = 2$ avec $\rho_{ref} = \{100; 80; 70; 50\}$ et $l = 3$ avec $\rho_{ref} = \{100; 80; 60; 70; 90; 70; 50; 30\}$. La figure 3 montre le temps de calcul des deux méthodes pour une même précision relative sur les paramètres identifiés ρ de $\varepsilon = 10^{-4}$, en fonction de $p + d$. Sont affichés le coût complet pour la méthode utilisant un métamodèle, le coût complet de construction du métamodèle (phase offline) et le coût de l'identification (phase online). Le coût de la méthode sécante sur le modèle direct augmente exponentiellement avec d le nombre de paramètre. Dans le cas de la méthode sécante, quand d augmente, le nombre de mesures p augmente et avec le nombre de jacobiens à déterminer. *A contrario*, la méthode par évaluation sur méta-modèle croit peu. L'utilisation de métamodèle est intéressante avec l'augmentation de paramètres, notamment pour une utilisation in-situ du protocole Wenner, la phase online étant quasi instantanée.

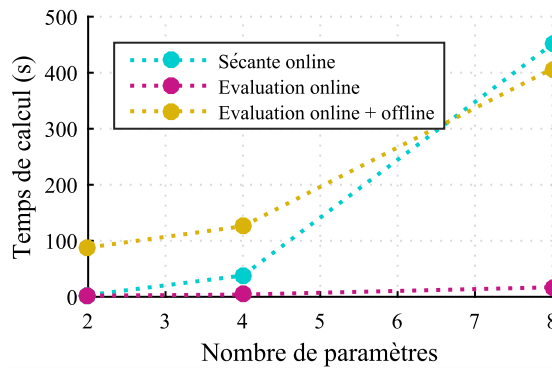


FIGURE 3 – Coût de calcul en fonction de d pour une précision minimum de $\varepsilon = 10^{-4}$

Les figures 4, 5 et 6 tracent les cartes de résistivité de référence et celles identifiées avec les deux méthodes après convergence pour les trois cas test. On peut voir sur ces figures l'erreur globale sur l'ensemble du domaine Φ .

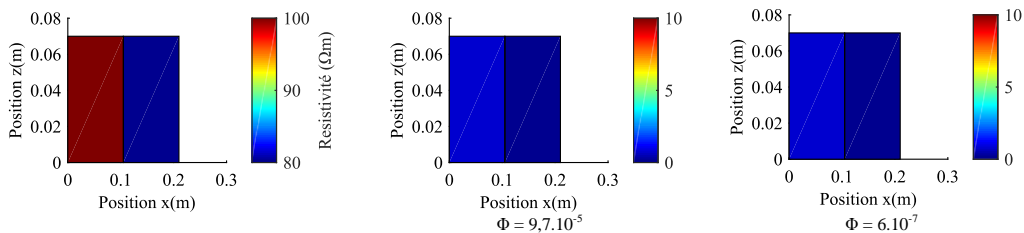


FIGURE 4 – Cas test $l = 1$; de gauche à droite : a) Résistivité imposée; b) Erreur relative entre la résistivité retrouvée par méthode sécante et la résistivité imposée; c) Erreur relative entre la résistivité retrouvé par méthode d'évaluation et la résistivité imposée.

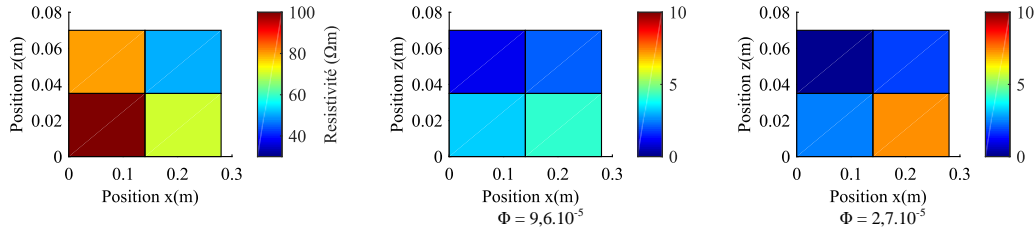


FIGURE 5 – Pour $l = 2$; de gauche à droite : a) Résistivité imposée ; b) Erreur relative entre la résistivité retrouvée par méthode sécante et la résistivité imposée ; c) Erreur relative entre la résistivité retrouvée par méthode d'évaluation et la résistivité imposée.

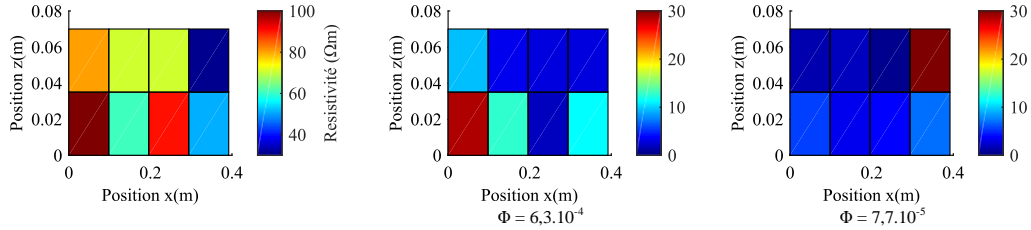


FIGURE 6 – Pour $l = 3$; de gauche à droite : a) Résistivité imposée ; b) Erreur relative entre la résistivité retrouvée par méthode sécante et la résistivité imposée ; c) Erreur relative entre la résistivité retrouvée par méthode d'évaluation et la résistivité imposée.

6 Conclusion

Caractériser finement un milieu expérimental nécessite d'identifier de nombreux paramètres. Le temps d'inversion peut ainsi devenir trop important pour obtenir le résultat *in situ* avec des moyens de calculs limités. Il peut alors s'avérer intéressant de développer des techniques permettant de scinder le calcul en une étape offline et une étape online. C'est la démarche proposée dans cette étude. La méthode par évaluations permet de résoudre le problème inverse quasiment en temps réel. La partie offline qui comprend la construction du méta modèle et l'initialisation de la procédure d'inversion, est réalisée en amont du traitement final puisqu'elle est extrêmement coûteuse en temps de calcul. Le calcul online est ainsi séparé de la partie offline pour être effectuée *in situ* le plus rapidement possible.

On peut toutefois constater que la méthode de minimisation basée sur l'évaluation d'un méta modèle est plus efficace que la méthode sécante lorsque le nombre de paramètres augmente même en cumulant le temps de calcul online et offline. De plus, le temps de traitement pour résoudre le problème de minimisation étant très faible, il est possible d'augmenter la précision souhaitée sans pour autant augmenter de façon importante le temps de calcul.

Les cas tests traités dans cette étude permettent de mettre en lumière les apports de la méthode de minimisation basée sur des évaluations du modèle approximé. Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec des méthodes de minimisation plus poussées pour identifier les limites de la méthode proposée. Des résultats sur des cas tests avec un nombre de variables plus important seront ainsi nécessaires pour valider l'approche destinée à l'identification de paramètres pour des domaines de grandes dimensions.

L'identification de paramètres proposée ici revient à minimiser une fonctionnelle en s'appuyant sur la méthode des moindres carrés. Une autre piste d'amélioration consisterait à construire une fonctionnelle à minimiser plus adaptée à la problématique de la mesure de résistivité. Il pourrait par exemple être intéressant de pondérer les mesures par leur sensibilité aux variations des paramètres.

Références

- [1] M.H. Loke. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Technical report, 2000.
- [2] J.F. Lataste, C. Sirieix, D. Breysse, and M. Frappa. Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *NDT & E International*, 36(6) :383–394, September 2003.
- [3] Zhiyong Liu, Yunsheng Zhang, and Qian Jiang. Continuous tracking of the relationship between resistivity and pore structure of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 53 :26–31, February 2014.
- [4] M. Saleem, M. Shameem, S. E. Hussain, and M. Maslehuddin. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 10(3) :209–214, April 1996.
- [5] Rob B Polder. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete a rilem tc-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, 15(2) :125–131, March 2001.
- [6] Yann Lecieux, Franck Schoefs, Stéphanie Bonnet, Trystan Lecieux, and Sergio Palma Lopes. Quantification and uncertainty analysis of a structural monitoring device : detection of chloride in concrete using DC electrical resistivity measurement. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 30(3) :216–232, July 2015.
- [7] M. Chevreuil, R. Lebrun, A. Nouy, and P. Rai. A least-squares method for sparse low rank approximation of multivariate functions. *SIAM/ASA J. Uncertainty Quantification*, 3-1 :897–921, 2015.