

Étude et correction de l'effet des électrodes pour les mesures TRE à petite échelle et application

Verdet C.¹, Sirieix C.¹, Anguy Y.¹, Gaborieau C.¹, Clément R.²

¹ University of Bordeaux / CNRS, I2M, UMR 5295, UMR 5295, 33400 Talence, France.

² Irstea, 5 rue de la Doua, Villeurbanne Cedex 69626, France.

RÉSUMÉ. La tomographie de résistivité électrique (TRE) est une méthode géophysique permettant d'estimer indirectement les variations du degré de saturation des matériaux. On adapte cette méthode pour un diagnostic par imagerie électrique à petite échelle d'une paroi naturelle ou bâtie. On montre que la taille finie des électrodes impacte la mesure électrique quand le ratio enfoncement / espacement des électrodes est supérieur à 20%. On corrige cet effet fallacieux via une inversion des résistances de transfert mesurées en surface avec une électrode équivalente ponctuelle (EEP) placée en profondeur à 73% de la longueur de l'électrode. Cette correction est appliquée à des mesures de micro-TRE à la paroi d'une carrière calcaire. On peut ainsi suivre les mouvements d'eau dans la paroi durant plusieurs mois, avant et après des feux, démontrant un impact durable de ces feux sur les premiers centimètres de la roche.

Mots-clefs Tomographie de résistivité électrique, Inversion, Paroi calcaire, Mouvements d'eau

I. INTRODUCTION

La résistivité électrique est très utilisée en contrôle non destructif car elle donne un accès indirect à la teneur en eau des matériaux. L'imagerie de résistivité électrique, ou tomographie de résistivité électrique (TRE), permet la reconstitution en 2D ou en 3D de cette propriété. Les profils d'acquisition TRE sont typiquement faits d'électrodes *de taille finie* disposées en ligne et en surface. La résistivité des matériaux mesurée est apparente car intégrant pour chaque quadripôle les différents matériaux traversés par les lignes de courant. La reconstitution de la distribution des résistivités vraies s'accordant aux résistances de transfert mesurées en surface nécessite une procédure d'inversion. A ce jour, la forme complète des électrodes n'est pas prise en compte dans les procédures d'inversion 2.5D standards considérant une électrode ponctuelle de courant en surface. La validité de cette hypothèse (absence d'effet lié à la taille des électrodes) a été montrée pour des rapports entre enfoncement et espacement des électrodes inférieurs à 20% (Rücker et Günther, 2011). Aux petites échelles, où les données de TRE doivent satisfaire une résolution centimétrique, le dispositif d'acquisition utilisé peut montrer un espacement et un enfoncement des électrodes du même ordre. Ceci peut fausser la mesure électrique, déformer les tomogrammes et conduire à une interprétation incorrecte. On s'appuie sur une étude métrologique pour vérifier si la taille des électrodes impacte les sections de résistivité inversées en cas de fort ratio entre enfoncement et écartement. Le cas échéant, une correction est mise en œuvre.

II. MODELISATION NUMERIQUE : MISE EN EVIDENCE ET CORRECTION DE L'EFFET D'ÉLECTRODE

Plusieurs modèles de résistivité sont convertis en jeux de données de résistance de transfert synthétiques en prenant en compte la géométrie complète des électrodes dans la modélisation directe du champ de potentiel électrique (équation de Poisson avec conditions aux limites de Neumann) pour différents ratios entre enfoncement et espacement des électrodes (jusqu'à 75%). On adopte le modèle de la cellule conductrice (CCM) (Clément et Moreau, 2016) selon lequel les électrodes sont décrites par des cylindres conducteurs (10^{-4} S.m^{-1}). Le maillage est raffiné autour des électrodes et le courant est injecté en un point à la surface de l'électrode (Figure 1). Le champ de résistivité apparente est généré à partir de 350 quadripôles. L'inversion 2.5D a été menée avec le code BERT (Günther et al., 2006). La figure 2b montre qu'un effet d'électrode est inclus dans les modèles de résistivité inversés avec un modèle d'électrode équivalente ponctuelle (EEP) en surface (EEP 0% sur la Figure 1). Cet effet fallacieux s'explique par un effet de « court-circuit » impactant le potentiel électrique calculé en surface et donc, les résistances de transfert (Verdet et al., 2018).

Equivalent Electrode Point (EEP) position (% of electrode extension)

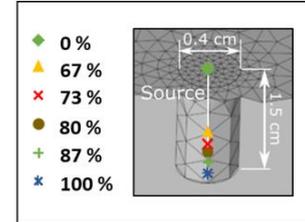


Figure 1 : Détail de l'électrode modélisé (modèle de la cellule conductive).

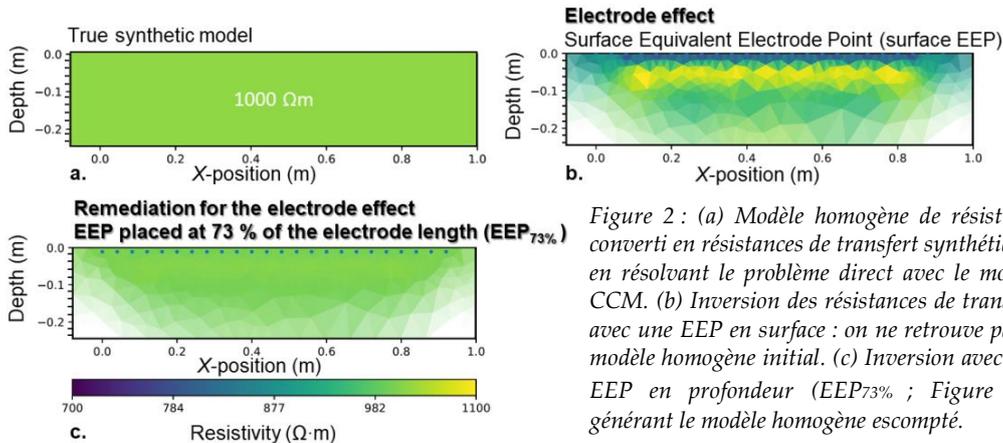


Figure 2 : (a) Modèle homogène de résistivité converti en résistances de transfert synthétiques en résolvant le problème direct avec le modèle CCM. (b) Inversion des résistances de transfert avec une EEP en surface : on ne retrouve pas le modèle homogène initial. (c) Inversion avec une EEP en profondeur (EEP_{73%} ; Figure 1) générant le modèle homogène escompté.

Cet effet (Figure 2b) est corrigé (Figure 2c) en implémentant dans l'inversion une EEP positionnée sous la surface (Figure 1). L'EEP placée à 73% de la longueur de l'électrode (Figure 1) produit les lignes de courant les plus proches de celles obtenues en tenant compte de la géométrie complète des électrodes. La correction proposée est efficace pour des ratios élevés entre enfoncement et espacement des électrodes (jusqu'à 50% ; partie droite de l'Eq. 1) (Verdet et al., 2018). Rücker et Gunther (2001) ont montré qu'une distribution inhomogène de résistivité au voisinage des électrodes peut exacerber l'effet d'électrode. On évalue donc numériquement pour un écartement d'électrodes donné l'épaisseur minimale d'une couche superficielle, plus résistive ou plus conductrice que le substrat pouvant être délimitée avec exactitude par imagerie TRE. On montre que la correction de l'effet d'électrode reste efficace si l'Eq. 1 est vérifiée (Figure 3).

$$\frac{\text{Épaisseur de l'hétérogénéité superficielle}}{0.75} \geq \frac{\text{Écartement des électrodes}}{\text{des électrodes}} \geq \frac{\text{Enfoncement des électrodes}}{0.5} \quad \text{Eq. 1}$$

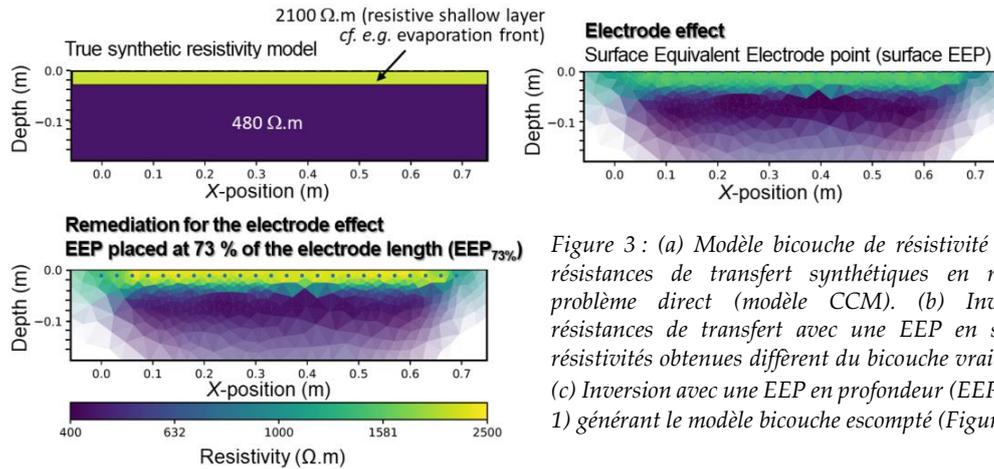


Figure 3 : (a) Modèle bicouche de résistivité converti en résistances de transfert synthétiques en résolvant le problème direct (modèle CCM). (b) Inversion des résistances de transfert avec une EEP en surface. Les résistivités obtenues diffèrent du bicouche vrai (Figure 3a) (c) Inversion avec une EEP en profondeur (EEP_{73%}; Figure 1) générant le modèle bicouche escompté (Figure 3a).

III. APPLICATION A DES DONNEES ELECTRIQUES ACQUISES A LA PAROI

Cette correction est appliquée à des résistances de transfert réelles mesurées aux parois d'une carrière calcaire souterraine près de Bordeaux (France) où des expériences de feux contrôlés ont été menées en novembre 2016. La carrière traverse le calcaire Rupélien montrant des faciès variés. Un profil TRE submétrique de 24 électrodes espacées de 4 cm est installé sur une paroi exposée aux feux. Ce profil recoupe 3 faciès (Figure 4). Une paroi non exposée aux feux est équipée du même dispositif. Le calcaire étant poreux et friable, les électrodes doivent être enfoncées de 1.5 cm. On s'intéresse au faciès 3c bien échantillonné par les deux profils. Dans la paroi exposée aux feux comme dans la paroi non exposée, l'imagerie TRE révèle trois couches (Figure 5) dont l'évolution de la résistivité au cours du temps est donnée sur la Figure 6. L'évolution de la résistivité de la couche profonde (zone 3) et de la couche intermédiaire (zone 2), comparable sur les deux profils TRE, reflète les variations saisonnières de la saturation en eau du massif (Figure 6). La différence majeure entre les deux parois concerne la couche superficielle conductrice (zone 1 sur les Figures 5 et 6). Cet horizon faisant 3 cm d'épaisseur, l'équation 1 est vérifiée et la correction de l'effet d'électrode réputée efficace. Dans la paroi non exposée au feu, la résistivité de cet horizon superficiel, constante au cours du temps, sous-tend une saturation constante pilotée par la condensation à la paroi (toujours humide) sans échange avec les couches plus profondes dont la résistivité décroît liée à la reprise en eau du massif à cette époque. Dans la paroi exposée aux feux, la résistivité de cet horizon est plus faible et décroît avec le temps (Figure 6), sous-tendant que le teneur en eau de l'horizon est pilotée par la condensation et par l'eau percolant depuis la surface à travers le massif. Cet horizon superficiel échange de l'eau avec les couches sous-jacentes lié à une modification par les feux de sa porosité et sa connectivité avérée par des analyses complémentaires cf e.g., porosimétrie au mercure (Verdet et al., 2018).

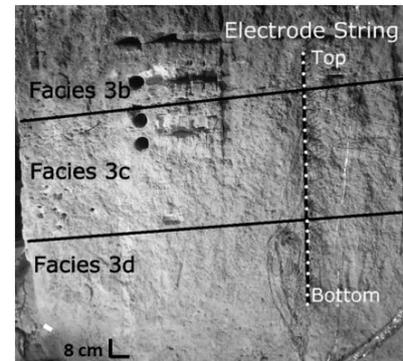


Figure 4 : Profil de micro-TRE à la paroi exposée aux feux. Les lignes noires délimitent les faciès 3b, 3c et 3d. Les points blancs repèrent les électrodes.

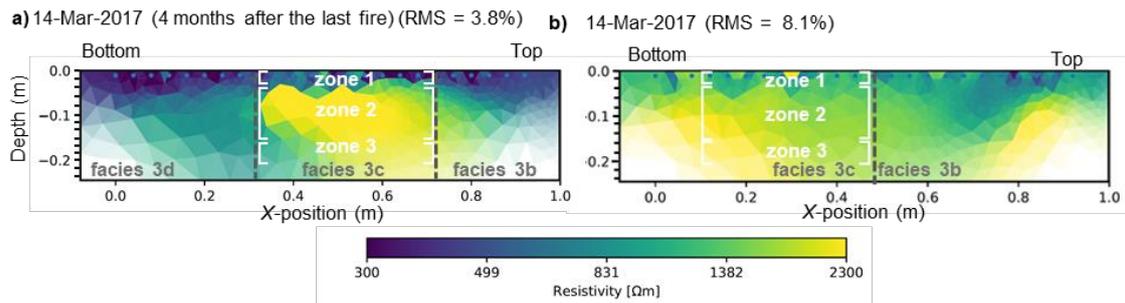


Figure 5 : Inversion des profils TRE (a) à la paroi exposée aux feux et (b) non exposée, 4 mois après le dernier feu.

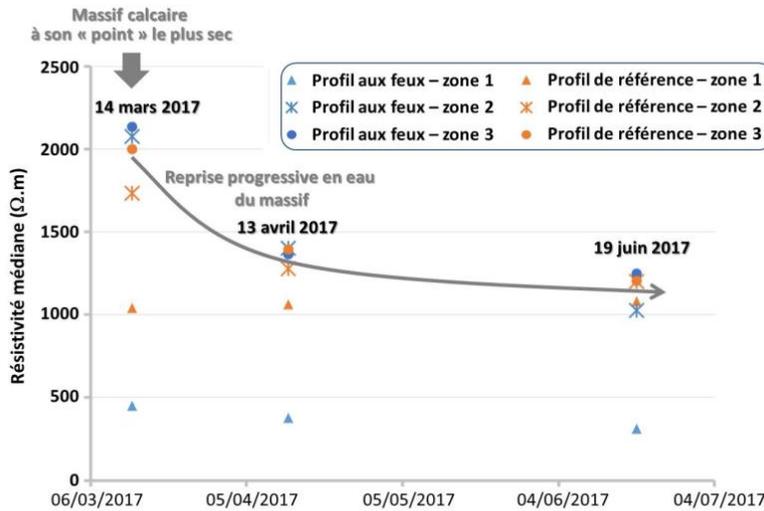


Figure 6 : Résistivité médiane des 3 zones identifiées par imagerie TRE dans le faciès 3c. Dans la salle des feux, comme dans la salle non exposée, la résistivité médiane de la couche intermédiaire (zone 2) et de la couche profonde (zone 3) montre une décroissance comparable au cours du temps liée à la reprise en eau progressive du massif : en Mars, le massif est encore à son point le plus sec et les eaux d'infiltration de surface atteignent les parois de la carrière entre Mars et Avril (donc avec un décalage temporel). L'horizon superficiel conducteur (zone 1) montre un comportement résistif très différent sur les deux profils (voir dans le texte).

CONCLUSION

La littérature rapporte que la taille des électrodes doit être considérée en TRE en cas d'espacement et d'enfoncement des électrodes du même ordre cf e.g. à petite échelle. Nous montrons l'existence d'un effet d'électrode fallacieux et proposons une correction efficace soumise aux conditions décrites par l'Eq. 1. L'intérêt de cette correction est illustré par une étude de TRE à petite échelle permettant de comprendre l'impact de feux sur les premiers centimètres d'une paroi calcaire. Nous montrons ainsi que les feux modifient le calcaire et l'affaiblissent sur les 3 premiers centimètres.

RÉFÉRENCES

- Clément R., & Moreau S. (2016). How should an electrical resistivity tomography laboratory test cell be designed? Numerical investigation of error on electrical resistivity measurement. *Journal of Applied Geophysics* 127, 45–55.
- Günther T., Rücker C., & Spitzer K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography II. Inversion. *Geophysical J. Int.* 166, 506–517.
- Rücker C., Günther T., 2011. The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model. *Geophysics* 76, F227–F238.
- Verdet, C., Anguy, Y., Sirieix, C., Clément, R., Gaborieau, C., 2018. On the effect of electrode finiteness in small-scale electrical resistivity imaging. *Geophysics* 83, EN39–EN52.