

Application de l'indice DOI à l'imagerie électrique 2D pour les sous-sols à forts contrastes de résistivité

Laurent MARESCOT^{1,3} & Meng Heng LOKE²

laurent.marescot@ig.unil.ch, laurent.marescot@lcpc.fr

¹Institute of Geophysics, University of Lausanne, 1015 Lausanne, Switzerland

²School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800 Penang, Malaysia

³Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 44341 Bouguenais, France

Abstract

To assess whether features in 2D imaging results for subsurface with high resistivity contrasts are demanded by the data or are artefacts of the inversion process, a special inversion algorithm was applied to process DOI (Depth Of Investigation) index maps. This method carries out two inversions of the same data set using different values of the reference resistivity. The two inversions reproduce the same resistivity values in areas where the data contain information about the resistivity of the subsurface whereas the final result depends on the reference resistivity in areas where the data do not constrain the model. As can be inferred from synthetic and field data, this methodology helps explaining the occurrence of erratic and non-geologic structures at depth.

Introduction

Lors de l'application des méthodes d'imagerie électrique à l'étude des sous-sols présentant de forts contrastes de résistivité vers la surface (permafrost, cavités, dalles), il est nécessaire de déterminer si les anomalies modélisées sont demandées par les données ou sont des artefacts du processus d'inversion en quantifiant la profondeur d'investigation de l'étude. Les approches les plus traditionnelles calculent le signal maximum en profondeur (Roy and Apparao, 1971) ou la profondeur médiane d'investigation (Edwards, 1977) pour un terrain homogène. Lorsque le sous-sol présente de forts contrastes de résistivité, ces méthodes ne sont plus applicables. Notre approche consiste à utiliser le calcul de l'indice DOI (« Depth Of Investigation ») pour évaluer la profondeur sous laquelle les données ne sont plus sensibles aux paramètres physiques du sous-sol (Oldenburg and Li, 1999). Dans ce travail, l'implémentation du calcul de l'indice DOI est décrit et son utilisation est illustrée à l'aide d'un exemple synthétique.

Inversion et indice DOI

Le programme Res2Dinv, basé sur un algorithme d'ajustement par moindres carrés (norme L_2), est utilisé pour inverser les résistivités apparentes mesurées (Loke and Barker, 1996 ;

Ellis and Oldenburg, 1994 ; Farquharson and Oldenburg, 1998) selon la formulation suivante :

$$\left(\mathbf{J}_k^T \mathbf{R}_d \mathbf{J}_k + \lambda_k \mathbf{F}_R \right) \Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{J}_k^T \mathbf{R}_d \mathbf{g}_k - \lambda_k \mathbf{F}_R (\mathbf{q}_{k-1} - \mathbf{q}_0) \quad (1)$$

$$\text{avec } \mathbf{F}_R = \alpha_s \mathbf{R}_s + \alpha_x \mathbf{C}_x^T \mathbf{R}_x \mathbf{C}_x + \alpha_z \mathbf{C}_z^T \mathbf{R}_z \mathbf{C}_z \quad (2)$$

où k est l'itération courante, $\Delta \mathbf{q}_k$ est la modification à apporter aux paramètres du modèle, \mathbf{q}_{k-1} est le vecteur contenant le logarithme des résistivités du modèle, \mathbf{q}_0 est un modèle de référence homogène, \mathbf{g}_k est le vecteur des différences entre les logarithmes des résistivités apparentes mesurées et calculées. \mathbf{R}_d , \mathbf{R}_x , \mathbf{R}_z et \mathbf{R}_s sont des matrices de pondération. \mathbf{C}_x et \mathbf{C}_z sont des matrices de lissage. α_s , α_x , α_z et λ_k sont des facteurs d'amortissement. \mathbf{J}_k est la matrice jacobienne des dérivées partielles. La méthode de calcul de l'indice DOI (Oldenburg and Li, 1999) effectue deux inversions à partir du même jeu de données en utilisant différentes valeurs pour le modèle de référence \mathbf{q}_0 dans l'équation (1). La valeur du DOI pour une cellule du modèle est donnée par :

$$R_{AB}(x, z) = \frac{q_A(x, z) - q_B(x, z)}{q_A - q_B} \quad (3)$$

avec q_A et q_B les deux modèles de référence utilisés. La valeur de R va approcher 0 dans les parties du modèle où les deux inversions reproduisent la même valeur de résistivité. La résistivité des cellules est alors bien contrainte par les données. Dans les régions où les données ne fournissent que peu d'information, R va approcher la valeur de 1 car la résistivité de ces cellules sera similaire à la résistivité du modèle de référence. Ceci va particulièrement se produire à grande profondeur ainsi que sur les côtés des profils. Afin de réduire l'effet du choix du facteur α_s ainsi que des résistivités initiales q_A et q_B , un indice DOI normalisé a également été proposé par Oldenburg and Li (1999) :

$$R(x, z) = \frac{q_A(x, z) - q_B(x, z)}{R_M(q_A - q_B)} \quad (4)$$

avec R_M la valeur maximale de l'indice DOI calculée avec l'équation (3) sur le modèle.

Optimisation du maillage et choix des paramètres

L'extension verticale du modèle doit être prolongée à une profondeur suffisante de façon à ce que les données mesurées contiennent très peu d'information concernant la résistivité des cellules les plus profondes. La figure 1 montre l'agencement des cellules du modèle que nous avons utilisé pour le calcul de l'indice DOI dans Res2Dinv. Nous avons utilisé la profondeur médiane d'investigation (Edwards, 1977) du plus grand dispositif de mesure pour estimer la profondeur d'investigation maximale de la série de mesures. Pour déterminer la profondeur optimale à accorder à nos maillages tout en optimisant le temps de calcul, nous avons répété les calculs d'indice DOI en utilisant des modèles où la profondeur maximale de la dernière couche variait de 2 à 5 fois la profondeur d'investigation maximale. Nous avons constaté que les valeurs de DOI sont généralement beaucoup plus grandes que 0.2 pour des profondeurs supérieures à 3 fois la profondeur d'investigation maximale. Suivant Oldenburg et Li (1999), la valeur de DOI augmente rapidement avec la profondeur pour des valeurs supérieures à 0.1. C'est pourquoi nous avons choisi d'étendre la profondeur du maillage à 3.5 fois la profondeur d'investigation maximale estimée. La valeur du facteur α_s , qui détermine le degré d'impact du

modèle de référence sur le processus d'inversion, a été fixée à 0.01 fois la valeur des facteurs d'amortissement α_x et α_z (fixés à 1.0). Nous avons utilisé des modèles perturbés symétriquement avec une résistivité valant 0.1 et 10 fois la valeurs de q_0 . En outre, nous avons effectué des tests avec des valeurs extrêmes pour le facteur multiplicatif (jusqu'à 100). Les figures de DOI qui en résultent se sont montrées très semblables, avec quelques variations qui n'auraient pas eu de grandes conséquences sur l'interprétation. Cela s'explique en partie par l'opération de normalisation de R.

Exemple d'application

Un exemple synthétique simple est illustré figure 1, où une acquisition en dipôle-dipôle est simulée sur un modèle présentant une cavité (résistivité très élevée) dans un substratum plus conducteur (1000 $\Omega.m$). La figure 1 présente le modèle inversé avec des profondeurs étendues ainsi que le profil de l'indice DOI (modèles perturbés symétriquement avec une résistivité valant 0.1 et 10 fois la valeurs de $q_0=1915.64 \Omega.m$). L'augmentation rapide de l'indice DOI sur la droite du profil indique que la profondeur d'investigation est plus faible où la cavité est située ($DOI \geq 1$ à moins de 10 m de profondeur). La profondeur d'investigation est plus importante sur la gauche du profil où la résistivité est plus faible. Certains artefacts produits par l'inversion (probablement dues aux contraintes de lissage et au fort contraste de résistivité) sont également mis en évidence par l'indice DOI. L'utilisation de résistivités valant 0.01 et 100 fois la valeurs de q_0 donne des résultats très semblables.

Des profils d'imagerie électrique ont été effectués afin d'étudier plusieurs permafrosts dans les Alpes suisses (Marescot *et al.*, 2003). Comme le montre le calcul des indices DOI, il n'est pas possible d'obtenir des informations fiables sur les propriétés ainsi que la profondeur du substratum situé sous les corps gelés.

Références

- Edwards L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Ellis R.G., Oldenburg D.W., 1994. Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, 116, 5-11.
- Farquharson C.G., Oldenburg D.W., 1998. Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure. *Geophysical Journal International*, 134, 213-227.
- Loke M.H., Barker R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Marescot L., Loke M.H., Chapellier D., Delaloye R., Lambiel C., Reynard E., 2003. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the Depth Of Investigation index method. *Near Surface Geophysics*, 1, 57-67.
- Oldenburg D.W., Li Y., 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, 64, 403-416.
- Roy A., Apparao A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 943-959.

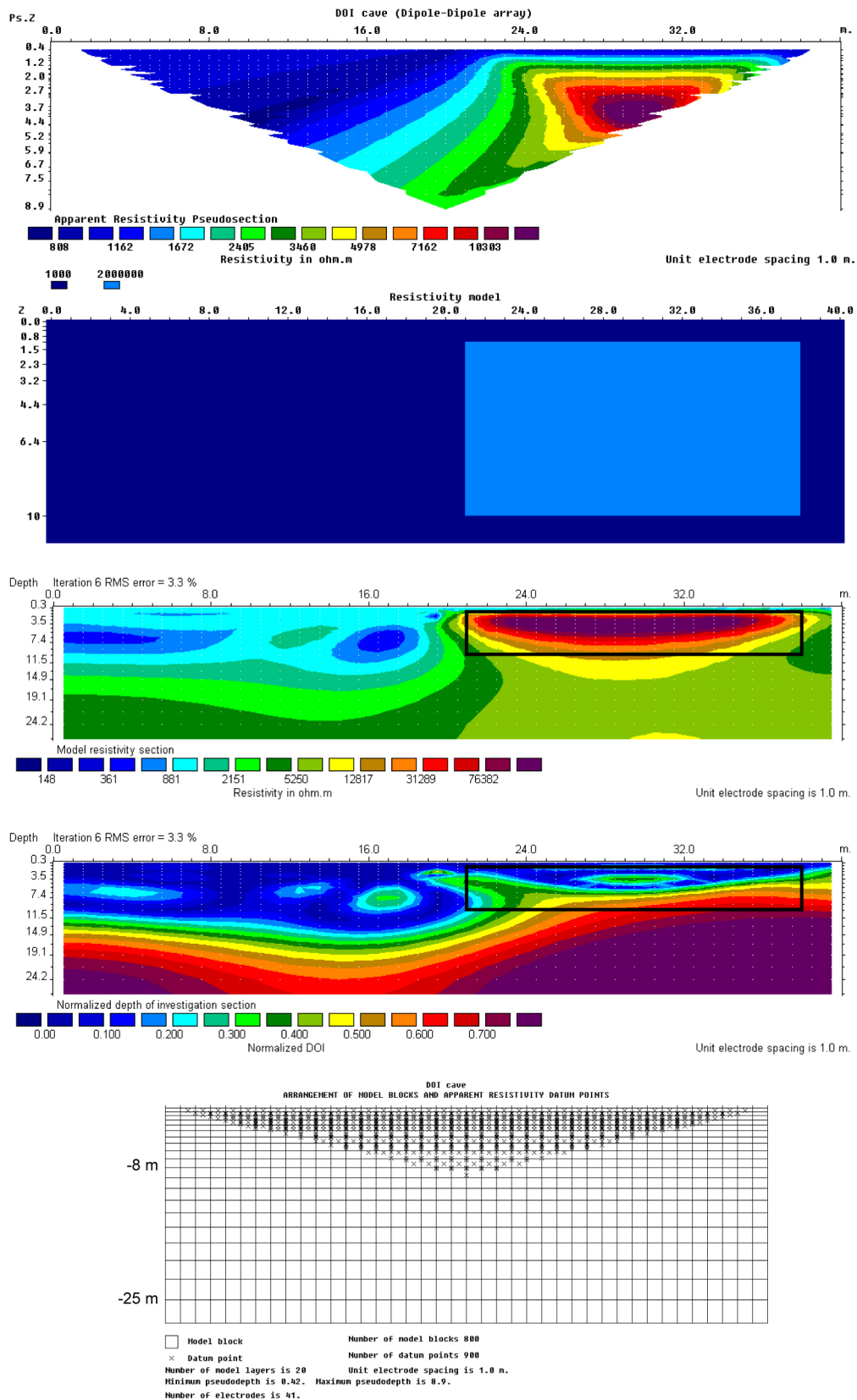


Figure 1 : De haut en bas. Pseudo-section en resistivité apparente, modèle de cavité, modèle inversé avec un maillage étendu, coupe des valeurs de l'indice DOI et maillage étendu ainsi que positions des points de mesure en resistivité apparente (échelles non respectées).