

ANALYSE DES DONNÉES MAGNÉTOTELLURIQUES (MT), DU RIFT D'ASAL, RÉPUBLIQUE DE DJIBOUTI

Rachid Robleh Rageh^{1,3}, Pascal Tarits^{1,2}, Sophie Hautot², Mohamed Jalludin³

¹ University Western Brittany, Brest, France

² IMAGIR Sarl, Saint Renan, France

³ Center for Studies and Research of Djibouti (CERD)

Résumé

La structure souterraine du rift d'Asal, Djibouti, a été étudiée à l'aide de la méthode magnétotellurique (MT). Afin d'obtenir les informations de la dimensionnalité de la structure régionale et déterminer la direction régionale de la zone d'étude. L'analyse du tenseur de phase a été effectuée sur cette zone. Les résultats montrent que les structures en surface présentent des caractères 1D et 2D, alors que les structures intermédiaires et profondes sont dominées par des structures tridimensionnelles 3D. Nous avons également calculé les principaux axes du tenseur de phase. Le résultat présente que la direction régionale de la zone d'étude est d'environ N305°E. Selon les résultats de l'analyse du tenseur de phase, il faudrait tourner le tenseur de phase N305 °E et effectué une inversion 3D sur les données MT du rift d'Asal.

Introduction

Pour les explorations géothermiques, pétrolières, du gaz et ainsi que d'autres ressources naturelles, il est cruciale grâce à des méthodes géophysiques d'évaluer les profondeurs d'investigation et les propriétés physiques du sous-sol. La magnétotellurique est l'une de ces méthodes, qui permet avec une bonne résolution verticale de caractériser les distributions de résistivités électriques et également donner des informations a priori structurales notamment les réseaux des failles du ressource géothermale. La modélisation de la structure souterraine grâce à la méthode MT, des informations sur la dimensionnalité et la direction structurale de la zone d'étude sont important. Sans cette information, nous ne pouvons choisir une meilleure hypothèse de modélisation (1D, 2D ou bien 3D) des données MT. Dans cette étude, nous analysons les données MT, en utilisant le tenseur de phase (Cadwell, 2004) pour étudier la dimensionnalité et la direction régionale du rift d'Asal.

1. Géologie

Le rift d'Asal (en République de Djibouti) est situé à la jonction entre trois rifts : la dorsale de la mer rouge, le golfe d'Aden et le rift continental Est-Africain (Fig. 1A). Il est comme l'Islande l'un des deux dorsales océaniques émergé. Avec une longueur d'environ 40 km, dont 15 km émergé, il s'ouvre actuellement à 16 ± 1 mm/an, se propageant dans la direction N40 $\pm$ 5°E (Ruegg et Kasser, 1987, Magnighetti et al., 1998, Vigny et al., 2007). Etant caractérisé par un réseau dense de fissure et de faille normale N130 $\pm$ 10°, délimités par le lac Asal à l'ouest jusqu'à le détroit de Ghoubbet à l'Est (Fig. 1B). Le lac Asal, situé à -150m

sous le niveau de la mer est un lac hypersalin bordé au nord par une banquise de sel avec des manifestations hydrothermales (Gasse et fonte, 1989). Ce site présente au total 7 puits de forages (Fig. 2).

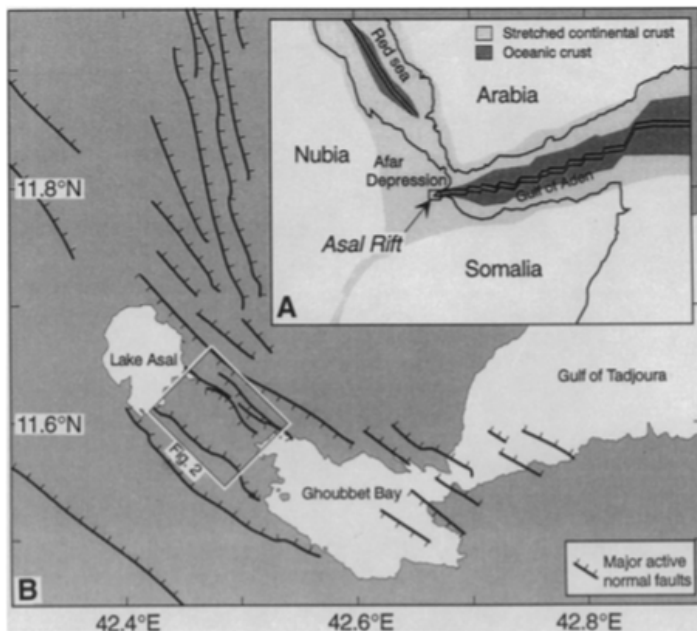


Figure 1 : (A) Carte d'Afar Triple Jonction, (B) Carte structurale de la région d'Asal-Ghoubbet [D'après, De Chabalier, 1984,].

2. Méthode MT

La magnétotellurique (MT) est une technique électromagnétique passive (EM), qui consiste à mesurer les fluctuations des champs électrique E et les champs magnétiques M , qui s'étalent sur un large spectre de fréquence (Simpson and Bahr, 2005). Afin de fournir des informations sur la distribution des conductivités des roches souterraines à des profondeurs pouvant atteindre à plusieurs centaines de kilomètres. La résistivité électrique des roches est une propriété physique, importante à mesurer pour la compréhension de la structure et des processus géologiques. Le tenseur d'impédance Z , permet de relier les composantes du champ électrique et magnétique sous la forme d'une relation qui peut être définie comme étant linéaire :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad 1$$

Avec E_i et H_i ($i \in [x, y]$), respectivement les composantes horizontales des champs électriques et magnétiques et la perméabilité magnétique μ_0 , de l'espace libre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

La résistivité apparente ρ_a est déterminée à partir du tenseur d'impédance complexe Z_{ij} :

$$\rho_{aij} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \quad 2$$

Où ω est la fréquence angulaire.

2.1. Acquisitions des données MT

Nous avons utilisé lors de cette étude 109 sondages MT (Fig. 2), qui proviennent d'une exploration entreprise 2008 grâce à la collaboration entre la société ISOR en Islande et le Centre d'étude et de recherche de Djibouti (CERD). Les données ont été enregistrées grâce à un système de Phoenix MTU-5A (Phoenix Geophysics, 2009). Qui a mesuré les deux composantes du champ électrique (E_x et E_y) ainsi que les trois composantes du champs magnétiques (H_x , H_y et H_z). Le temps d'enregistrement est de 48 h. Afin de réduire les bruits locaux, une station de référence, "remote referencing" (Gamble and al, 1979) a été installé à une distance de 10 Km par rapport à la zone d'étude (Sakindi, 2015). Les séries temporelles ont été traitées par station avec un programme fourni par Phoenix (Phoenix Geophysics, 2005), qui utilise le traitement robuste d'Egbert et Booker (1986).

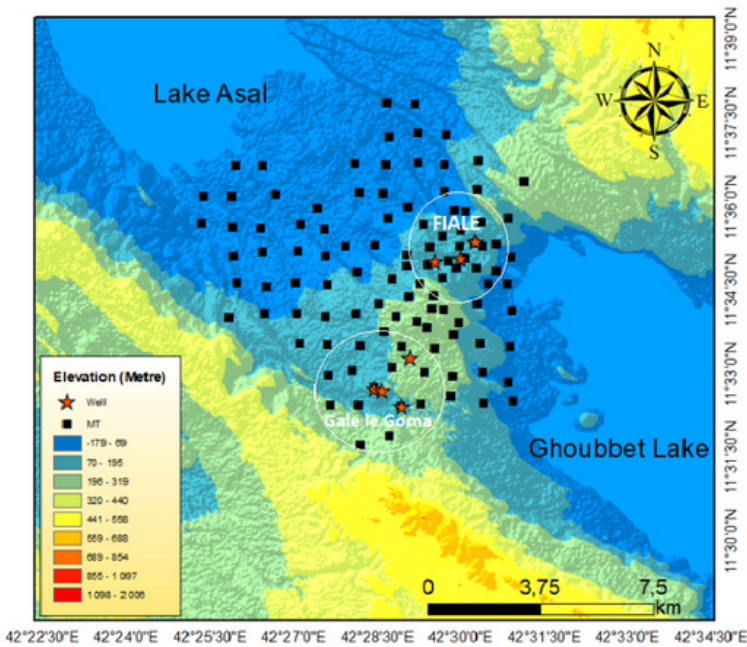


Figure 2 : Zone d'étude du Rift d'Asal, en noir les données MT et en étoile rouge les principaux forages, les cercles en blanc sont les zones de forage (Fialé et Gale le Goma)

2.2. Analyse du tenseur de phase

Afin d'avoir une bonne compréhension de cette méthode, avant la modélisation et inversion des données, il est tout d'abord important d'évaluer le tenseur de phase. Ce tenseur contient des informations sur la dimensionnalité et direction de la structure (Simpson and Bahr, 2005, Chave and Jones, 2012). Il ne fait aucune hypothèse a priori concernant la structure de résistivité régionale. De plus, le tenseur de phase est peu affecté par les effets galvaniques (Caldwell and al., 2004) qui biaisent les données.

Le tenseur de phase Φ est un rapport de la partie réelle et imaginaire du tenseur d'impédance (Caldwell and al., 2004). Il est graphiquement représenté par une ellipse complètement caractérisée par une direction α , et trois invariants de coordonnées, $\Phi_{\max}$, $\Phi_{\min}$ et β (Figure 3).

$$\Phi = X^{-1}Y \text{ et } \beta = \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi_{xy} - \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}} \right) \quad 3$$

Avec β , étant l'angle d'inclinaison (Skew angle).

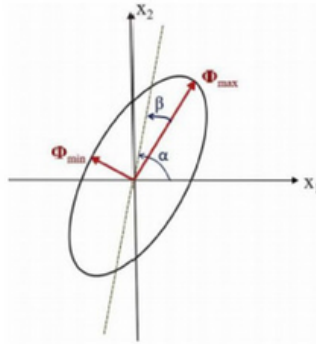


Figure 3 : Le tenseur de phase est tracé graphiquement sous la forme d'une ellipse. Les principaux axes de maximum et de minimum sont représentés par $\Phi_{\max}$ et $\Phi_{\min}$ respectivement. Si le tenseur de phase est non symétrique, un troisième invariant de coordonnées est nécessaire pour caractériser le skew angle : β . l'angle $\alpha - \beta$, donne l'orientation du grand axe de l'ellipse, définit la relation entre le tenseur et la référence d'observation (X_1 et X_2).

Dans le cas d'une structure 1-D, le tenseur de phase est caractérisé par une forme circulaire ($\Phi_{\max} = \Phi_{\min}$). Pour une structure de résistivité régionale 2D, le tenseur de phase sera représenté par une ellipse et β étant très petit, proche de zéro ($\beta = \pm 3^\circ$). Si le milieu est 3-D, le tenseur de phase est non symétrique et l'angle β a une grande valeur. Une autre indication d'une structure 3D est un rapide changement latéral de la direction des axes principaux entre les sites.

Les ellipses de tenseurs de phase, superposées aux vecteurs d'induction (Parkinson, 1962), sont largement utilisées. Ces vecteurs d'induction (ou tipper) sont des représentations graphiques de la fonction de transfert entre le champ magnétique vertical et horizontal

$$H_z = K * H$$

4

Avec H champ magnétique horizontale, H_z , champ magnétique vertical et vecteur d'induction (Tipper) K .

2.3. Résultat et discussion

Les ellipses de tenseur de phase des données du rift d'Asal sont tracées pour des périodes courtes, intermédiaires et longues (Fig. 4).

À des périodes courtes (environ 1 s), la plupart des sites présentent un caractère 2D, indiqué par des tenseurs de phase en forme des ellipses ($\Phi_{\max} \neq \Phi_{\min}$), avec des petites valeurs des angles de skew ($-3^\circ < \beta < 3^\circ$, Fig. 4). Mais nous pouvons également remarquer des formes circulaires ($\Phi_{\max} = \Phi_{\min}$) au niveau NW du rift Asal qui peuvent indiquer un caractère 1-D.

Pour les longues et intermédiaire périodes (9.3 s, 91 s et 182.s), la plupart des sites possèdent des grandes valeurs d'angle (c'est-à-dire $\beta > 3^\circ$ ou $\beta < -3^\circ$, comme indiqué par les couleurs bleu ou marron, Fig. 4). Les vecteurs d'induction ne sont alignés sur aucun des axes principaux du tenseur de phase. Ceci indique une structure de conductivité asymétrique ou un caractère 3D, notamment dans les zones de forage fialé et Gola le Goma (Fig. 2).

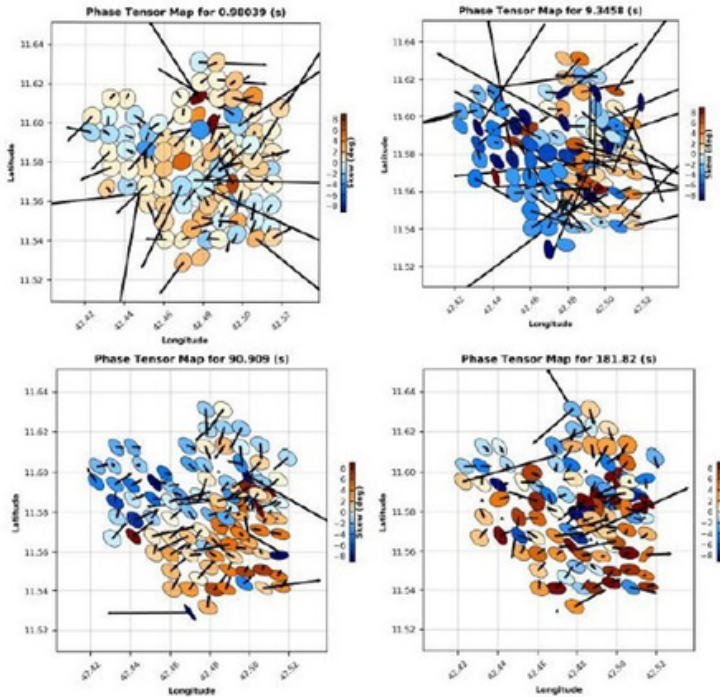


Figure 4 : Cartes de tenseur de phase et vecteurs d'inductions pour les différents périodes (1s, 9.3s, 91s et 182s), sur l'ensemble des stations MT.

La direction de la structure régionale (strike) a été estimée par un programme python open source MTpy (Krieger et Peacock, 2014). Cette direction est estimée au N305°E (Fig. 5), ce qui est cohérent et proche avec la direction du système des failles normales du rift d'Asal (Magnighetti and al, 1998).

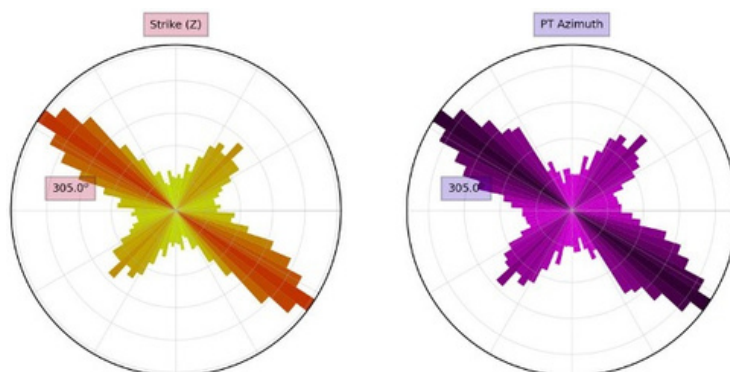


Figure 5 : Diagramme en rose des estimations du strike (N305°E) pour l'ensemble de données MT de la zone géothermique du rift d'Asal. L'analyse de cette direction est effectuée pour toute la gamme de fréquences.

Conclusion

En conclusion, nous avons analysé la dimensionnalité grâce au tenseur de phase et le vecteur d'induction sur les données du rift d'Asal. Donc nous pouvons dire que la structure régionale de ce site est assez complexe. Ceci peut s'expliquer que les structures présentent en courte période, possèdent des caractères 1D et 2D. Alors que pour la longue et intermédiaire période la structure régionale est majoritairement 3D. La direction régionale est donnée par le N305°E (NW-SE). Mais quant à l'existence de l'autre direction orientée NE-SW, cela peut être correspondre à la propagation de l'extension du rift N40°E.

Références bibliographiques

- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., & Brown, C. 2004: The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158(2), 457-469.
- De Chabaliér, J. B., & Avouac, J. P. (1994). Kinematics of the Asal Rift (Djibouti) determined from the deformation of Fieale Volcano. *Science*, 265(5179), 1677-1681.
- Egbert, G. D., Booker, J.R., 1986 : Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*87,173-194.
- Gamble, T.D., Goubau, W.M., Clarke, J., 1979 : Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, V. 44, 53-68.
- Manighetti, I.; Tapponnier, P.; Gillot, P.Y.; Jacques, E.; Courtillot, V.; Armijo, R.; Ruegg, J.C.; King, G, 1998, Propagation of rifting along the Arabia-Somalia Plate Boundary: Into Afar. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 103, 4947-4974.

- Parkinson W.D., 1962. The influence of continents and oceans on geomagnetic variations, *Geophys. J. R. astron. Soc.*, 6, 441–449
- Phoenix Geophysics, 2005 : Data Processing User Guide, Phoenix Geophysics Limited, 3781 Victoria Park Avenue, unit 3, Toronto, ON Canada M1W 3K5.
- Phoenix Geophysics, 2009: V5 system 2000 MT/MTU-A User Guide. Phoenix Geophysics. 178 p.
- Sakindi, G. Three-Dimensional Inversion of Magnetotelluric Data, 2015: Geological-Geothermal Interpretation of Asal Geothermal Field, Djibouti. Master's Thesis, United Nations University, Reykjavik, Iceland.
- Simpson, F., & Bahr, K. 2005. Practical magnetotellurics. Cambridge University Press.