

Résumé de Thèse : Suivi Temporel Magnéto-tellurique : Application à des réservoirs géothermiques et volcaniques

Directeurs :

PASCAL SAILHAC (EOST)

GUY MARQUIS (Shell Houston)

Collaborateur :

JACQUES ZLOTNICKI (OPGC)

La Magnéto-Tellurie (MT) est une méthode de prospection géophysique de type électromagnétique à source passive. Introduite par *Cagnard* en 1954 [REF], elle couvre maintenant des fréquences allant de 0.1mHz à 10kHz. Ses sources sont de nature géomagnétiques pour les fréquences en dessous du Hertz et les éclairs atmosphériques ('*spherics*') aux fréquences supérieures. La quantité estimée au travers du champ électromagnétique naturel est la résistivité apparente du milieu en fonction de la fréquence. Elle est la seule méthode électromagnétique pouvant imager les propriétés électriques de la croûte terrestre et le manteau supérieur. Elle est particulièrement sensible aux fluides de la subsurface. Cependant, la caractéristique naturelle de sa source la soumet à des fluctuations de qualité des estimations de la résistivité apparente. Celle-ci est directement liée à l'activité géomagnétique.

Le suivi temporel Magnéto-tellurique consiste en l'étude des variations de résistivités apparentes dans le temps, observées en un lieu donné. Celles-ci peuvent être d'une part associées à des variations dynamiques des propriétés électriques du milieu prospecté, mais aussi à des phénomènes non stationnaires de la source géomagnétique ou/et du bruit anthropique (lignes haute tension, clôtures électriques, proximité d'industries, véhicules...). Au travers du développement du suivi temporel, c'est tout d'abord la question de la qualité des estimations de résistivités magnéto-tellurique qui est posée. Puis, nous abordons la notion de résolution temporelle de la méthode : quelle est la durée minimale de séries temporelles amenant à des estimations fiables? Le suivi temporel d'un réservoir géophysique est-il possible de manière fiable par méthode MT?

Le tenseur d'impédance magnéto-tellurique, relié à la résistivité apparente et à la fréquence, est calculé à partir de séries temporelles de champ électrique et magnétique. L'estimation en elle-même est une résolution, en domaine spectral, par moindres carrés pondérés de la fonction de transfert entre champ électrique et magnétique (*Sims et al.* [1971]). *Gamble et al.* [1979] introduit la technique de *Remote Reference*, qui consiste à utiliser lors du calcul du Tenseur une seconde série temporelle de champ magnétique, enregistrée simultanément, afin de filtrer le bruit présent sur les séries magnétiques initiales. La *Remote Reference* apporte une amélioration notable de la qualité des estimations. À la fin des années 80, des codes gratuits performants de calcul dits 'robustes' apparaissent (*Chave et Thomson* [1987], *Egbert et al.* [1986], *Larsen* [1980] et code d'Alan Jones). *Jones et al.* [1989] prouvent que les résultats de ces codes sont équivalents en termes de qualité d'estimation.

Cependant, dans tous les codes existants, les incertitudes sont calculées à partir de statistiques dites 'robustes' sur les populations de tenseurs estimés. *Eisel and Egbert* [2001], en effectuant des estimations successives d'impédance à un endroit fixe dénué de toutes variations significatives de propriétés électriques, démontrent que les incertitudes issues de statistiques 'robustes' sous-estiment les variabilités long et court termes des séries temporelles. Ainsi, les

méthodes actuelles ne fournissent pas d'estimateurs d'incertitudes fiables.

I- Méthodologie de l'estimation MT

Dans un premier temps, nous proposons un nouvel estimateur d'erreur sur les estimation du tenseur d'impédance Magnéto-Tellurique. Nommé Tenseur d'Erreur, il est calculé à partir de séries temporelles associées aux résidus sur le champ électrique, résultant de l'estimation du tenseur lui-même, et des séries temporelles magnétiques initiales. Testée sur des données synthétiques associés à des modèles homogènes et 1D, cette méthode est une nette amélioration de l'estimation des incertitudes en MT : *i)* les erreurs réelles sont surestimées d'un facteur raisonnable, *ii)* la corrélation entre les séries temporelles d'erreurs réelles et estimées est élevée, impliquant que la fluctuation de la qualité des estimations est représentée de manière fiable par la méthode.

Puis la méthodologie est confrontée à des données réelles, issue d'une campagne de mesure effectuée en Vendée durant la thèse. Pour jauger de la qualité du tenseur sur les données réelles, nous utilisons le critère défini par *Eisel et Egbert [2001]* : un estimateur d'erreur ne peut être considéré comme fiable que lorsqu'il englobe la variation court et long terme des séries temporelles d'estimation de tenseur successives en un lieu ou les propriétés électriques sont constantes. Nos résultats remplissent ce critères pour deux de nos trois fréquences d'études, cependant aux basses fréquences, la variabilité des estimations est trop importante pour être englobée par les incertitudes. Par la suite, nous utilisons la méthode du Tenseur d'Erreur comme critère d'analyse de la qualité des estimations de tenseur.

Les résultats de méthodologie d'estimation d'erreur ont été soumis à *Geophysical Prospecting* sous le titre '**Robust Errors On MT Impedances**'.

II- Application à un réservoir aux propriétés électriques statiques

Nous avons effectué une campagne MT dans le cadre de la recherche de zones conductrices pouvant avoir à un potentiel géothermique en Vendée, dans le massif granitique d'Avrillé. Cette mission d'un mois nous a permis d'acquérir un jeu de données important (30 sites de mesure MT), les champ ayant été enregistré à une fréquence d'échantillonnage de 1024 Hz pendant des durées de 6 heures à deux jours.

Avec ce jeu de données extensif, nous avons effectué un processing standard, avec nos propres codes de calculs, associés au programme d'estimation du tenseur d'impédance d'*Alan Chave (BIRRP : Bounded Influence Remote Reference Processing)*. Nos résultats de résistivités ont été inversé avec un code 1D, conduisant à la mise en évidence de zone conductrices en adéquation avec les données géophysiques, géochimiques et géologiques préexistantes sur la zone d'étude.

Une nouvelle analyse est alors effectuée en appliquant la méthode du tenseur d'Erreur, mais sur un jeu de données réduit. Nous donnons une estimation de la résolution temporelle, durée de signal minimale nécessaire à l'obtention d'estimation fiables du tenseur d'impédance, l'objectif étant de donner des durées de signaux nécessaires à la prospection MT (utiles à la prospection industrielle). Nous comparons alors les résultats retraités aux résultats issus du processing standard. La méthode du tenseur d'erreur nous permet d'avoir des estimations aussi fiables que les procédures standards mais réduit de beaucoup la durée des séries temporelles et améliore les résultats.

III- Application à un réservoir dynamique : Le Piton de la Fournaise (1997-1998)

Le suivi temporel MT appliqué à un réservoir dynamique nécessite une analyse approfondie de la qualité des estimations de résistivités. Nous étudions le cas du Piton de La Fournaise durant la

période 1997-1998 : après 6 années sans activité significative, le volcan entre en éruption le 9 mars 1998 pour une durée de 6 mois, impliquant la montée d'un volume de magma important. Le site est monitoré par deux stations MT permanentes (enregistrement continu à très basse fréquence : 0.05 Hz). Nos enregistrements basse fréquences sont complétés par une campagne AMT 'statique' effectué par Zlotnicki et Schnegg en 1997, couvrant une gamme de fréquences supérieures, allant de 0.1 Hz à 10kHz.

En nous basant sur la méthodologie calibrée sur le terrain par la mission de Vendée, nous étudions la résolution temporelle dans et en dehors de la période éruptive et proposons des durées d'enregistrements pour chacune de nos fréquences d'estimation de tenseur. Nous mettons en évidence des variations de résistivités apparentes importantes lors de la crise éruptive, au sein de laquelle deux régimes sont identifiés. Nous inversons les résistivités apparentes basse fréquence à 1D en utilisant les données du survey de 1997 pour contraindre les couches superficielles. Des variations de résistivités en profondeurs seront présentées et comparées aux études préexistantes de la crise (sismologie, déformation...). Les résultats font l'objet d'un article dont la soumission est prévue en Janvier 2011.

Bibliographie :

Chave, A. D., and D. J. Thomson, 1989, *Some comments on magnetotelluric response function estimation*, Journal of Geophysical Research, 94, 14215-14225.

Chave, A. D., and D. J. Thomson, 2004, *Bounded influence estimation of magnetotelluric response functions*, Geophysical Journal International, 157, 988-1006.

Chave, A. D., D. J. Thomson, and M. E. Ander, 1987, *On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions*, Journal of Geophysical Research, 92, 633-648.

Egbert, G.D., 1997, *Robust multiple-station magnetotelluric data processing*, Geophys. J. Int., 130, 475-496.

Egbert, G. D., and J. Booker, 1986, *Robust estimation of geomagnetic transfer functions*, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 87, 173-194.

Eisel, M. and Egbert, G.D., 2001, *On the stability of magnetotelluric transfer function estimates and the reliability of their variances*, Geophys. Jour. Int. 144, 65-82.

Gamble, T. D., W. M. Goubau, and J. Clarke, 1979, *Magnetotellurics with a Remote reference*, Geophysics, 61, 53-68.

Jones, A. G., A.D. Chave, G. Egbert, D. Auld, and K. Bahr, 1989, *A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation*, Journal of Geophysical Research, 94, 14201-14213.

Larsen, J .C., 1980, *Electromagnetic response functions from interrupted and noisy data*, J.Geomagn. Geoelectr. , 32, Supp.I , SI89-SI103.

Sims, W. E., F. X. Bostick, and H.W. Smith, 1971, *The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data*: Geophysics, 36, 938-942.

PUBLICATIONS :

Wawrzyniak P., Sailhac P., Marquis G., 2010, *Robust errors on the MT impedance tensor*, 20th Electro Magnetic Induction Workshop (EMIW) 2010, Expanded Abstract

Wawrzyniak P., Sailhac P., Marquis G., Zlotnicki J., Santos F., 2009, *Robust MT error estimates: an imperative for the study of magnetospheric activity*, IAGA , Sopron, Hungary, Abstract

Wawrzyniak P., Sailhac P., Marquis G., Zlotnicki J., Santos F., 2008, *Robust MT error estimates: an imperative for the study of magnetospheric activity*, EGU (European Geosciences Union), Vienna, Austria, Abstract

Wawrzyniak P., Sailhac P., Marquis G., 2010, *Robust errors on the MT impedance tensor*, submitted to Geophysical Prospecting on 26 of November 2010