

UTILISATION DE LA METHODE CSAMT EN HYDROGEOLOGIE

LAJAUNIE M.¹, SAILHAC P.², MALET J-P.¹, MATTHEY P-D.¹

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS UMR7516), Université de Strasbourg, France (mlajaunie@unistra.fr)

² Géosciences Paris Sud (GEOPS UMR8148), Université de Paris-Saclay, Orsay, France (pascal.sailhac@u-psud.fr)

RÉSUMÉ

La méthode de magnétotellurie aux fréquences audio à source contrôlée (CSAMT) offre l'avantage intéressant, parmi les méthodes géophysiques, d'une profondeur d'investigation potentiellement élevée (quelques centaines de mètres). En hydrogéologie, cette méthode est envisagée en complément d'autres méthodes électriques et électromagnétiques pour contraindre les modèles de résistivité du sol en profondeur. Des mesures de CSAMT ont été réalisées au bassin versant du Strengbach, les traitements ainsi qu'une analyse des résistivités apparentes est présentée.

Mots clés : Méthodes électromagnétiques, Audio Magnetotellurique à Source Contrôlée (CSAMT), Traitement, Modélisation, Bassins versants

ABSTRACT

APPLICATION OF THE CSAMT METHOD IN HYDROGEOLOGICS

The controlled source audio-frequency magnetotelluric method (CSAMT) allows for deep investigations, compared to most active geophysical methods (hundreds of meters). In hydrogeology, this method can be used to complement other electrical and electromagnetic methods, in order to constrain the resistivity models at depth. CSAMT measurements have been realized at the Strengbach catchment (Vosges), data processing and analysis are presented.

Key words: Electromagnetic methods, Controlled source Audio Magnetotellurics (CSAMT), Processing, Modeling, Catchment aquifers

INTRODUCTION

Dans les systèmes montagneux, la structure générale de la subsurface est complexe, car elle provient d'une dynamique longue de mise en place des matériaux (tectonique, héritage glaciaire) et de processus biologiques (végétation, altération). Les écoulements au sein de ces structures doivent être caractérisés à plusieurs échelles spatiales et pour des profondeurs parfois importantes (pouvant aller jusqu'à quelques centaines de mètres). Dans de nombreux cas, ces écoulements s'effectuent le long de chemins préférentiels formés par un réseau de discontinuités (failles, fissures).

Plusieurs méthodes géophysiques permettent une sensibilité à la présence d'eau et aux structures contrôlant l'hydrogéologie dans la subsurface. Parmi celles-ci, la méthode CSAMT est une méthode électromagnétique en domaine fréquentiel qui permet une investigation à plus grande profondeur que des méthodes plus courantes telles que l'ERT (plusieurs centaines de mètres).

Ce travail présente une application à l'étude hydrogéologique du bassin versant granitique du Strengbach (Vosges). Une méthodologie de mesure et de traitement des données est proposée, ainsi qu'une analyse des premiers résultats obtenus.

METHODOLOGIE

Principe de la méthode CSAMT

Les méthodes magnétotelluriques (MT) sont basées sur la réponse de la subsurface aux variations du champ électromagnétique, réponse liée aux propriétés électriques du sous-sol. On utilise le tenseur d'impédance MT du milieu, qui est défini par le rapport entre l'amplitude des champs électrique et magnétique mesurés en un même point (**Eq. 1**), qui dépend de la fréquence du signal, qui définit le volume du milieu auquel la mesure est sensible (effet de peau), et de la résistivité apparente (Cagniard (1953), **Eq. 2**).

$$Z = \frac{E_z}{H_\phi} = \frac{E_\phi}{H_z} \quad (1)$$

$$\rho_{app} = \frac{1}{5f} |Z|^2 \quad (2)$$

avec f la fréquence en Hz, E en mV/km et H en nT

De manière classique, en AMT, les signaux électromagnétiques d'origine naturelle (orages lointains, courants ionosphériques) sont utilisés comme signaux source pour réaliser ce type de mesures. La théorie implique cependant que ces signaux soient assimilables à des ondes planes, i.e. que le signal atteignant la station de mesure soit en champ lointain.

Les fréquences permettant d'être sensible aux variations de proche surface de la résistivité électrique (premières centaines de mètres) sont les fréquences audios (100 Hz à 10 kHz). Sur cette bande de fréquences, les sources naturelles ne produisent pas un signal MT suffisamment fréquent et énergétique pour permettre une imagerie électromagnétique du sous-sol. L'utilisation d'une source artificielle est nécessaire pour pouvoir réaliser des mesures de résistivité. De même qu'en MT, il est alors possible de calculer la résistivité apparente à partir des formules de Cagniard, si tant est que l'hypothèse de champ lointain est satisfaite. Pour ce faire, l'émetteur de signal électromagnétique doit être situé assez loin du site d'étude (minimum 3 km). En pratique, satisfaire cette condition est difficile, et les mesures sont très souvent réalisées à des distances empêchant l'approximation du champ lointain ; dans ce cas il est néanmoins possible de considérer une autre approximation, celle du champ proche avec une source locale, une résistivité apparente peut toujours être calculée (**Eq. 3**, Zonge et Hughes, 1991), mais des

traitements spécifiques sont nécessaires pour remédier à la complexité induite par le schéma de radiation des ondes.

$$\rho_{app} = r\pi 10^{-4} \frac{E_r}{H_\phi} = 2r\pi 10^{-4} \frac{E_\phi}{H_r} \quad (3)$$

avec r la distance émetteur - récepteur en m.

Mesures en CSAMT

Le signal est produit par l'injection d'un courant alternatif aux bornes d'un long dipôle (> 200 m) connecté au sol par des électrodes. Les données consistent en la mesure des séries temporelles du champ électrique horizontal et des 3 composantes du champ magnétique, conjointement à l'émission du signal. La synchronisation des acquisitions avec l'émission est réalisée à l'aide du GPS.

Traitements des signaux mesurés

Le traitement appliqué aux données vise à calculer les résistivités apparentes pour chaque fréquence, et à évaluer une incertitude sur les calculs. Ce traitement consiste en cinq étapes, décrites **Fig.1**.

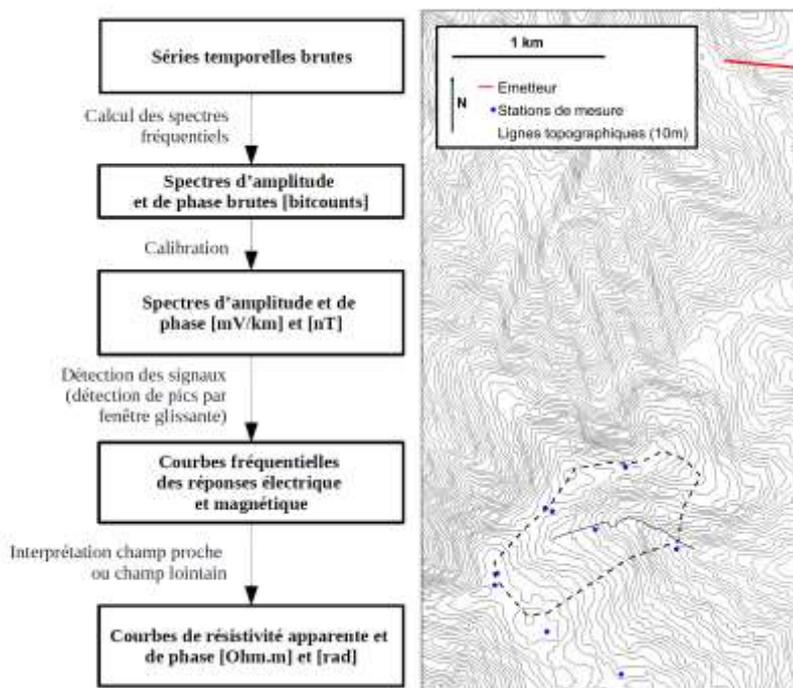


Fig. 1 – Organigramme des traitements appliqués aux données de CSAMT

Fig. 2 – Carte de la campagne de mesures CSAMT au bassin versant du Strengbach

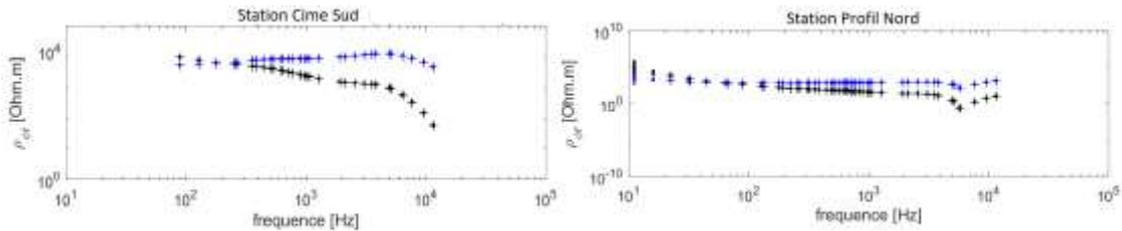


Fig. 3 deux courbes de résistivité apparente au sud et au nord du bassin versant. En bleu, la résistivité calculée en champ proche, en noir, celle en champ lointain.

APPLICATIONS

Le bassin versant du Strengbach est un bassin versant granitique localisé dans les Vosges. Ce site a fait l'objet d'études géophysiques. Des données d'ERT et EM, d'AMT et de CSAMT ont été collectées. La méthode CSAMT a été envisagée sur ce site en complément des autres méthodes électriques et électromagnétiques, qui ont une résolution plus fine mais sont sensibles exclusivement aux premières dizaines de mètres du milieu.

La **Fig. 2** présente les dispositifs de mesures mis en œuvre en CSAMT. L'émetteur a été localisé à 3 km au Nord du site d'étude, et un jeu de données a été acquis sur 7 stations à des fréquences allant de 100 à 9600 Hz. Les valeurs de résistivité sur les premiers 30 m s'étendent de 100 à 10⁴ Ohm.m.

Des courbes de résistivité apparentes ont été calculées en champ proche et en champ lointain, mais la complexité du milieu ne permet pas de déterminer la limite d'interprétabilité en champ proche, qui semble toutefois se situer entre 100 et 500 Hz (cf. **Fig. 3**).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La complexité du milieu (due au 1^{er} ordre à la topographie) ne permet pas une interprétation directe des courbes de résistivité apparente. Des travaux d'interprétation sont en cours pour déterminer les structures d'aquifères plus profonds, en bénéficiant de l'apport de méthodes complémentaires (gravimétrie, mesures en puits) mises en œuvre dans le cadre de l'ANR HydroCriZStO.

L'évaluation de la sensibilité des mesures et l'effet de la topographie et de la proximité de l'émetteur seront étudiés à l'aide de deux outils de modélisation numérique : CustEM (calcul des champs EM générés par un dipôle de courant dans un milieu 3D), et ModEM (calcul de la réponse MT d'un milieu 3D).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAGNIARD L., 1953 – Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics. Vol. 18(3), pp. 605-635. Society of Exploration Geophysicists.*

ZONGE KL. AND HUGHES LJ., 1991 – Controlled source audio-frequency magnetotellurics. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B.*, pp. 713-810. *Society of Exploration Geophysicists.*