

Prospections géophysiques adaptées au socle

Viviane Borne

Calligée

v.borne@calligee.fr

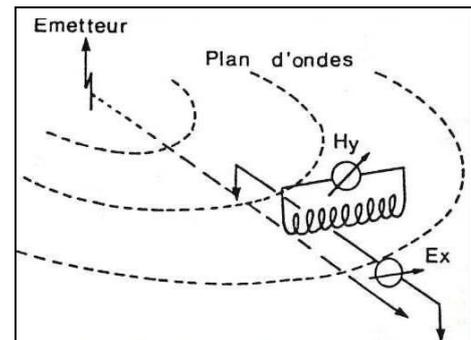
Depuis plusieurs décennies (années 80) et surtout dans l'Ouest de la France, la prospection géophysique la plus utilisée pour la recherche en eau souterraine dans le socle est la méthode VLF. Cette méthode issue de la prospection minière au Canada a été mise en œuvre pour la recherche en eau dans le socle pour la première fois en Vendée par la DDAF. Cette technique était utilisée par la COGEMA afin de localiser les contacts tectoniques entre le granite de Mortagne-sur-Sèvre et l'encaissant, lieux des minéralisations uranifères. Monsieur Bresson, alors hydrogéologue départemental, a su développer cette méthode à la recherche des structures faillées, les plus propices à la circulation des eaux souterraines.

I. PROSPECTION ELECTROMAGNETIQUE VLF

I. 1 Principe

La prospection électromagnétique est basée sur la mesure de la perturbation d'ondes électromagnétiques dans le sol. La méthode électromagnétique VLF (Very Low Frequency) utilise des ondes radio de très basses fréquences (15 à 25 kHz) émises par des émetteurs lointains et puissants, utilisés à des fins militaires.

Une onde électromagnétique est constituée de deux champs, magnétique et électrique, perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation de cette onde. Le champ magnétique (H_y) est tangential, le champ électrique (E_x) est radial au plan d'onde (Geonics Limited, 1979).



Les résistivimètres VLF mesurent, à l'aide d'une antenne croisée, les composantes magnétiques horizontale et verticales du champ magnétique. La composante électrique est mesurée par différence de potentiel entre deux électrodes classiques ou capacitives espacées de 5 ou 10 mètres. Les appareils mesurent également le déphasage entre les composantes magnétique et électrique du champ.

La résistivité apparente des terrains est une fonction de la valeur des champs électriques et magnétiques, elle est directement donnée par l'appareil.

La profondeur d'investigation varie suivant la fréquence de l'onde mais aussi suivant la résistivité des terrains. Cette profondeur est d'autant plus élevée que la fréquence est faible et la résistivité forte. La profondeur d'investigation simplifiée admise pour ce matériel est : $P = 3.6 \sqrt{\rho_a}$. Elle peut varier d'une dizaine à une centaine de mètres suivant la résistivité du terrain.

I. 2 Mesures en résistivités apparentes - Effet directionnel

Les cartes de base sont les cartes de résistivités apparentes, puisque les valeurs sont directement données par l'appareil. Ces cartes mettent en évidence la répartition des résistivités sur l'ensemble des terrains prospectés à une maille plus ou moins large. Des axes conducteurs, pouvant traduire la présence de zones fracturées, ou résistants (filons) sont ainsi révélés.

En plus de la visualisation de ces axes, cette méthode a l'avantage de mettre en évidence l'anisotropie des terrains prospectés. En effet, cette méthode est directionnelle, les mesures se font dans l'axe de l'émetteur.

Chaque mesure de résistivité concerne un parallélépipède rectangle vertical dont la largeur est la distance entre les deux électrodes et la longueur est infinie, son orientation est perpendiculaire à la direction de l'émetteur.

Les structures mises en évidence sont donc perpendiculaires à l'émetteur.

En général, on travaille avec deux émetteurs de directions perpendiculaires pour pallier les effets d'anisotropie et pour révéler toutes les anomalies existantes sur un terrain.

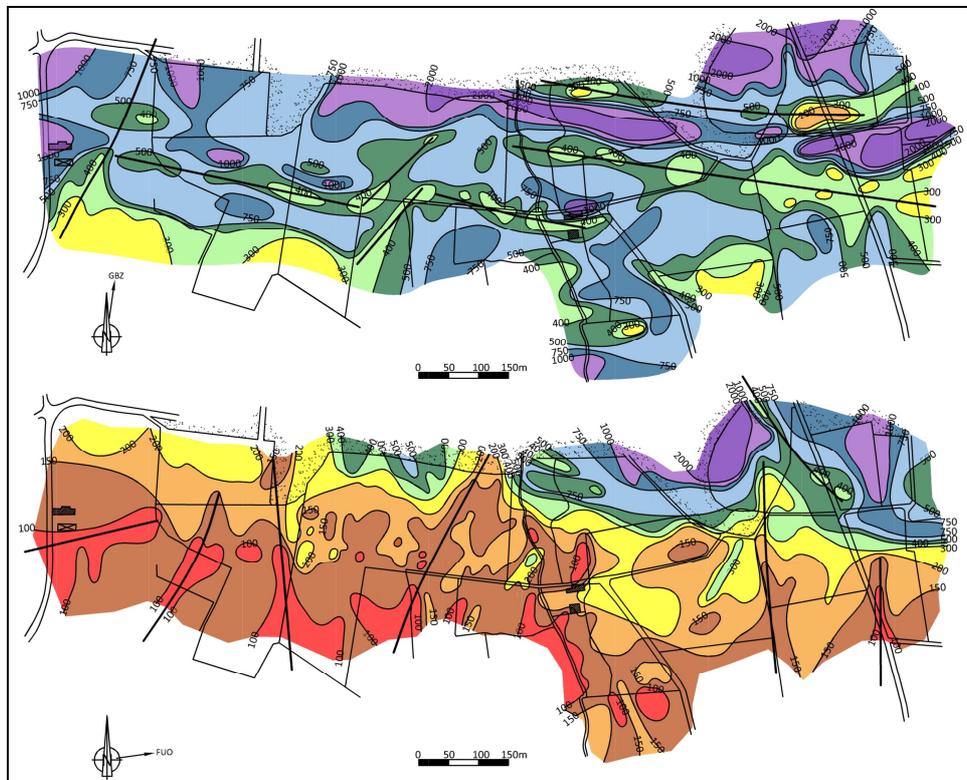
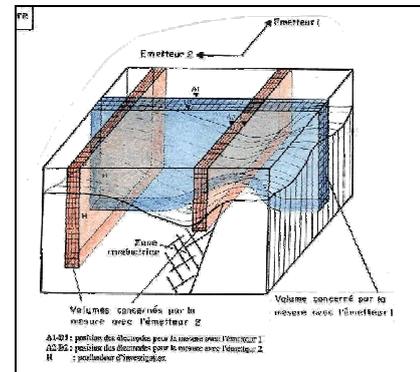


Figure 1 - Grand-Champ (Morbihan) - Mise en évidence de l'anisotropie des terrains - En haut, émetteur perpendiculaire à la schistosité - En bas, émetteur subparallèle - Dans le quart NE se trouvent les Orthogneiss de Lanvaux, au Sud, les Paragneiss et Micaschistes de Bains-sur-Oust

La connaissance de la nature et de la structure du substratum permet de mieux raisonner sur l'implantation des forages de reconnaissances. En effet, les forages productifs se trouvent souvent au contact d'intrusions granitiques dans les schistes.

I. 3 Mesures en résistivités - Interprétation en modèle bicouche

Etant donné que les cartes de résistivités apparentes ne permettent pas de positionner précisément les ouvrages de recherche en eau souterraine, on a cherché à faire des interprétations à partir des autres données enregistrées. En plus de la valeur de la résistivité apparente, les résistivimètres donnent la mesure de l'angle de phase entre les composantes magnétique et électrique du champ.

Cette valeur, appelée déphasage, permet de connaître la répartition des terrains en profondeur selon un modèle bicouche :

- angle égal à 45° , l'ensemble des terrains englobés par la mesure est homogène ;
- angle inférieur à 45° , le terrain de surface est plus conducteur que le substratum ;
- angle supérieur à 45° , le modèle est inversé, le premier horizon sera plus résistant.

Ch. Grisseman et G. Reitmayr (1978) ont proposé une méthode de calcul pour estimer l'épaisseur et la résistivité du substratum à partir de la résistivité apparente et du déphasage, en faisant une hypothèse sur la résistivité du premier terrain.

Ces interprétations permettent donc d'avoir une image de la structure du substratum et d'implanter plus précisément les forages de reconnaissance. Si on applique ces calculs aux mesures réalisées précédemment, on peut voir l'organisation des terrains en profondeur.

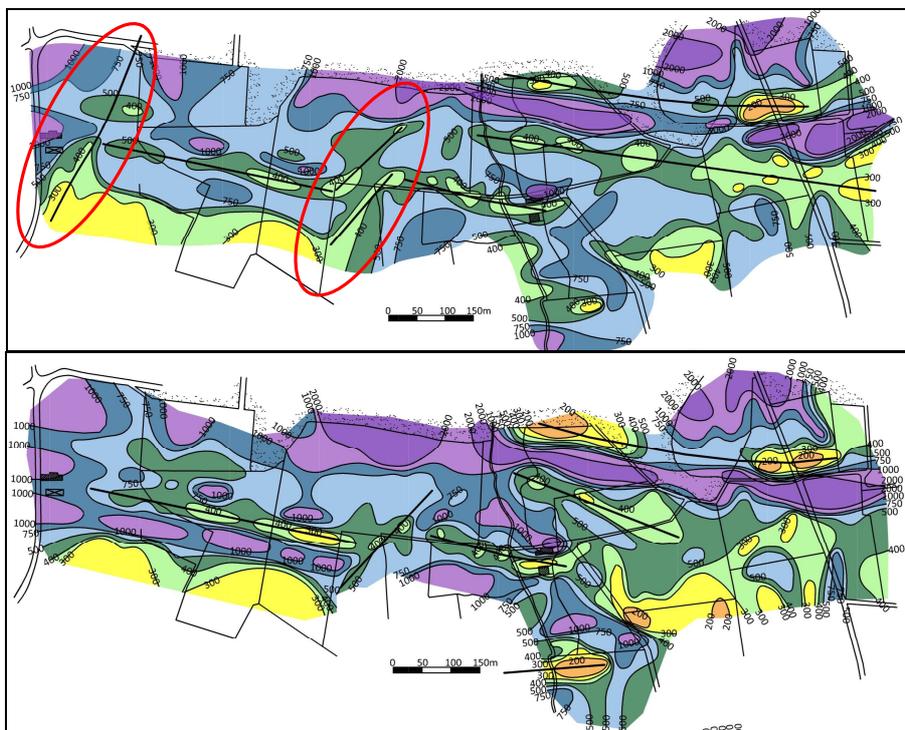


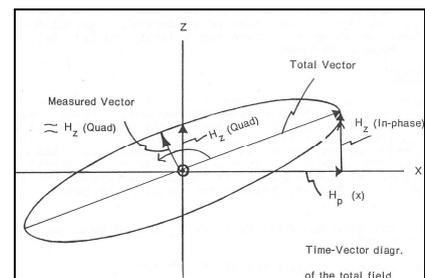
Figure 2 - Pour un même émetteur - En haut : résistivité apparente - En bas : image de la structure du substratum sous la couverture d'altérite. Les structures s'organisent différemment

I. 4 Mesures magnétiques

Toujours dans l'optique de tirer parti de toutes les mesures acquises, des interprétations ont été développées à partir des données magnétiques.

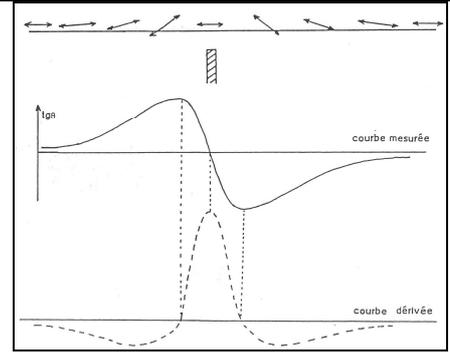
Au niveau d'un corps conducteur, les ondes électromagnétiques subissent des déformations que l'on mesure à la surface du sol.

Dans un sous-sol homogène, le champ magnétique ne possède qu'une composante horizontale, alors qu'au droit d'un filon conducteur, apparaissent deux composantes verticales, une en phase, l'autre en quadrature (Geonics Limited, 1983).



Le matériel donne la composante horizontale et les composantes verticales, en phase et en quadrature, du champ magnétique.

A partir des variations de ces données, il est possible de repérer les zones conductrices dans le socle sain. Le report de ces valeurs sur des graphiques permet de localiser la zone conductrice au niveau du point d'inflexion de la courbe.



L'exploitation des données magnétiques se fait par dérivation et lissage. Ce traitement a pour but de gommer les anomalies de hautes fréquences et de rendre plus lisible les profils ou les cartes, par transformation des points d'inflexion en maxima (Geonics Limited, 1983)

O. Martiré (1991) a élaboré une technique de calcul de la répartition de l'angle de phase en profondeur à partir des travaux de Fraser (1969) et de Karous-Hjelt (1983). Les résultats sont reportés soit sous forme de cartes, soit sous forme de coupes verticales du sous-sol. Ces dernières, appelées pseudosections, mettent en évidence les pendages des corps conducteurs.

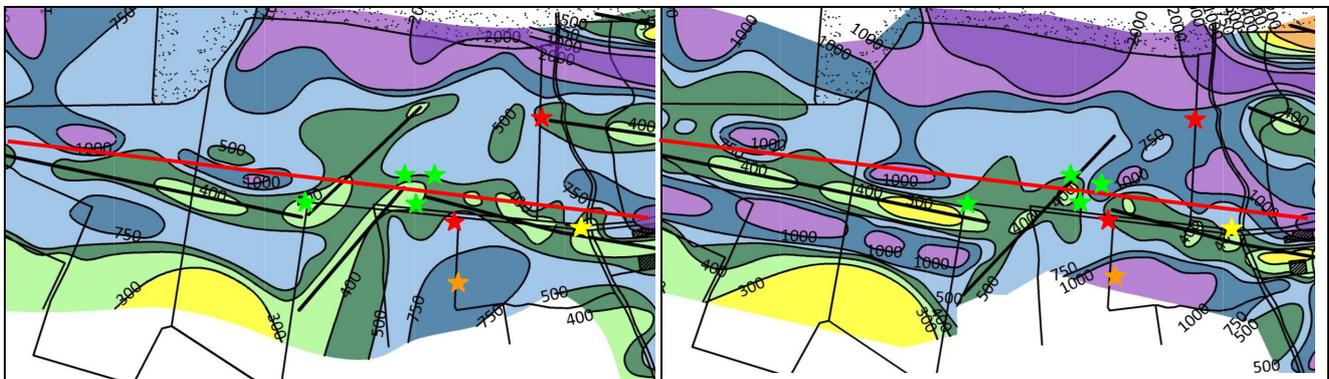


Figure 3 - Localisation du profil magnétique en travers des axes conducteurs, à gauche carte des résistivités apparentes, à droite carte des résistivités du substratum

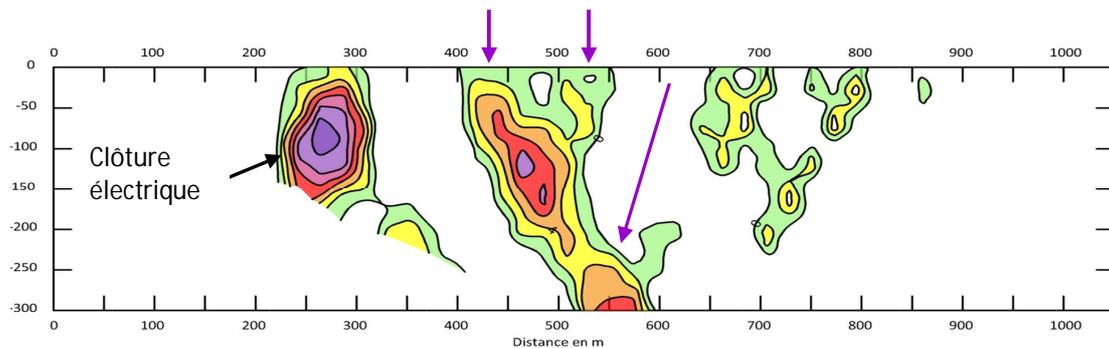


Figure 4 - Représentation de la pseudosection résultante montrant deux branches conductrices en surface et une seule en profondeur

Même avec des profondeurs théoriques, ce type de représentation permet d'implanter les forages du bon côté des structures potentiellement intéressantes.

Les résultats des recherches sur ce site ont donné des débits très importants (plus de 50 m³/h au soufflage) pour les sondages représentés par les étoiles vertes (fig. 3).

La prospection par mesures VLF, en dépit des profondeurs d'investigation limitées, donne toujours satisfaction pour la recherche en eau souterraine, car c'est une technique rapide et facile à mettre en œuvre.

Toutefois, la source des émissions n'est pas maîtrisée, les émetteurs ne sont pas toujours actifs ou orientés de façon satisfaisante. Geonics commercialise un émetteur spécifique ; mais c'est une boucle de 1 km à installer à une distance suffisante pour respecter la planéité de l'onde.

II. TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE

Comme les interprétations des mesures VLF ne sont pas toujours réalisées et/ou pour confirmer l'existence de fractures en profondeur, il est demandé de plus en plus souvent de réaliser des tomographies électriques. En général, le protocole d'acquisition est le protocole Schlumberger, qui met en évidence les structures verticales, les espacements entre les électrodes sont de 5 m, pour une longueur déployée de 315 m. Les profondeurs d'investigation sont également limitées à une cinquantaine de mètres.

Les résultats ne sont pas toujours faciles à interpréter, en raison de l'intégration importante des terrains, la localisation des fractures n'est pas précise.

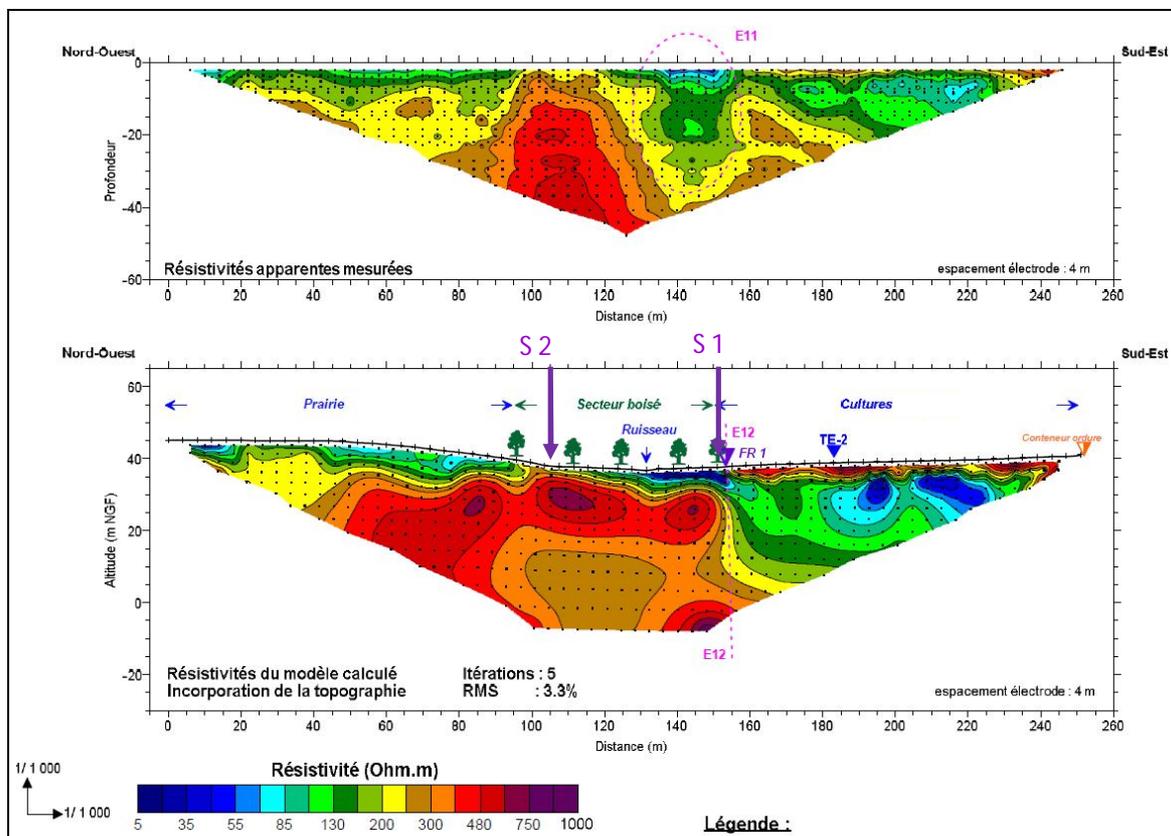


Figure 5 - Plouénan (Finistère) - Réalisation d'une tomographie électrique dans le socle - En haut, données brutes, en bas : résultats de l'inversion

Sur la tomographie (fig. 5), les résultats semblaient montrer l'existence d'un contact net entre deux compartiments résistant au N-O, plus conducteur au S-E, une implantation de forage de reconnaissance a donc été proposée à cet endroit.

Les arrivées d'eau ont été trouvées en profondeur (de 105 à 118 m) pour des débits cumulés de 11 m³/h. L'hydrogéologue qui a suivi le chantier a fait réaliser un nouveau forage de l'autre côté de la parcelle boisée, les arrivées d'eau étaient plus étalées, entre 55 et 85 m, et les débits cumulés de 38 m³/h. La tomographie montre à cet endroit des résistivités assez fortes jusqu'à 25 m (supérieures à 450 ohms.m), plus faibles en profondeurs (250 à 300 ohms.m), mais au-delà de 45 m, les informations sont inexistantes.

Pour atteindre des profondeurs plus importantes, il faut utiliser des dispositifs plus grands avec des électrodes plus espacées (et un système d'injection plus puissant), sachant que la précision sera moindre, ou travailler en protocole pôle-dipôle avec une électrode à l'infini (au minimum 6 fois la longueur du dispositif), ce qui peut poser problèmes pour son déploiement.

III. NOUVELLES PROSPECTIONS A METTRE EN OEUVRE

Etant donné que les recherches en eau souterraine se font de plus en plus profondément : 150 à 200 m, les prospections géophysiques classiques ne sont plus adaptées. D'autres méthodes doivent être utilisées pour maîtriser le positionnement des forages, aucune n'est idéale, elles présentent toutes des limites.

III. 1 Sismique Réflexion Haute Résolution

La sismique réflexion est basée sur la capacité du sous-sol à renvoyer un « écho » chaque fois que les ondes émises rencontrent un changement de propriété dans les roches traversées. Ces réflecteurs sont des surfaces qui délimitent les différentes couches du sous-sol, ou encore des fractures ou des zones hétérogènes au sein d'une même roche.

Cette méthode permet, contrairement aux autres méthodes géophysiques, d'avoir une très grande résolution même à grande profondeur. Pour que la méthode soit opérationnelle, il est nécessaire qu'il existe des réflecteurs sismiques, c'est à dire des couches de vitesse et/ou de densité contrastée. Cette méthode est particulièrement bien adaptée pour définir la géométrie des terrains et pour localiser les failles sub-verticales avec rejet, les accidents horizontaux, ainsi que les contacts géologiques dont l'inclinaison est inférieure à 45 °.

III. 2 La Résonance Magnétique Protonique (RMP)

L'intérêt de cette méthode est sa faculté de reconnaître directement et uniquement les molécules d'eau. L'interprétation hydrogéologique des signaux enregistrés complète les outils classiques d'analyse géophysique des sols pour lesquels les paramètres mesurés ne concernent pas directement l'eau souterraine, mais l'ensemble du milieu poreux.

Le principe de la RMP repose sur l'analyse du signal de résonance des noyaux d'hydrogène (ou protons) contenus dans les molécules d'eau en réponse à un signal électromagnétique de fréquence donnée.

Le signal d'impulsion est créé par la circulation, dans un câble disposé au sol, d'un courant très puissant générant un champ magnétique qui modifie l'équilibre énergétique des protons des molécules d'eau présentes dans le sous-sol. La coupure du courant au bout d'un temps bref - quelques dizaines de millisecondes - provoque un retour à l'équilibre de ces protons qui renvoient alors un signal de relaxation sous la forme d'un champ électromagnétique.

Le volume investigué lors d'un sondage RMP est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre. La profondeur d'investigation maximale de l'appareil commercialisé, en l'absence de terrains conducteurs, est de l'ordre de 120 m.

La profondeur d'investigation diminue lorsque la conductivité des terrains augmente, et en présence d'eau superficielle dans la zone d'altération, il existe un effet d'écran qui diminue la capacité de la méthode RMP pour étudier la partie profonde des aquifères du socle.

III. 3 Time Domain ElectroMagnetic (TDEM)

La méthode TDEM est basée sur la mesure de la réponse temporelle d'un champ magnétique. Le principe consiste à déployer sur le terrain une boucle de câble dans laquelle on crée un champ magnétique statique en faisant circuler un courant électrique. Ensuite, on coupe le courant le plus rapidement possible : cela crée une différence de flux et une induction dans le sol de courants induits qui créent à leur tour un champ secondaire, que l'on mesure par exemple au centre avec une bobine de câble plus petite.

Le champ secondaire est décroissant dans le temps. Plus le temps est grand, plus l'information obtenue est profonde. L'étude de la forme de sa décroissance se traduit par une courbe de sondage reliant la résistivité apparente (en ordonnée) au temps (en abscisse) de façon analogue aux sondages électriques. Cette courbe est étudiée et inversée pour reconstituer la variation de la résistivité en fonction de la profondeur.

La méthode TDEM est très sensible aux terrains conducteurs et à la position de leur toit et les détermine plus précisément que les sondages électriques. En revanche, les terrains résistants (supérieurs à 500 ohms.m) sont mal différenciés.

III. 4 Méthodes électromagnétiques multifréquences

Les méthodes électromagnétiques de type Slingram sont basées sur la mesure de la perturbation d'ondes électromagnétiques dans le sol. Ces méthodes fonctionnent de la manière suivante :

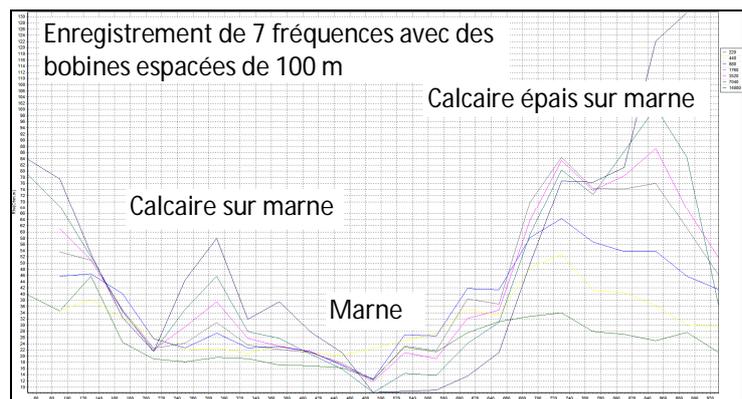
- un champ magnétique « primaire » est émis par une boucle d'émission par circulation d'un courant électrique alternatif dans cette dernière ;
- dès son émission, le champ primaire engendre dans le sol, par effet d'induction, des courants électriques pouvant être modifiés par les hétérogénéités du sous-sol ;
- ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique « secondaire », de fréquence identique au champ primaire.

La somme des champs est ensuite mesurée par la bobine réceptrice. Le champ primaire étant connu, il est possible de déduire la conductivité électrique apparente du sous-sol.

La méthode électromagnétique multifréquence permet l'émission de plusieurs champs primaires de fréquences différentes. Pour un dispositif donné (écartement, orientation), il est proposé un éventail plus ou moins large de fréquences, chacune de ces fréquences ayant une profondeur de pénétration propre. Cela signifie que pour un dispositif, il y aura autant de profondeurs d'investigation que de fréquences sélectionnées. Plusieurs espacements inter bobines sont disponibles entre 20 et 400 m.

Ces appareils sont libres de tout contact avec le sol et permettent la réalisation de profils de manière très rapide, de l'ordre de 2 minutes pour 10 fréquences avec le dispositif 200 m. Le matériel est cependant très encombrant et lourd à mettre en œuvre. Le plus long et le plus contraignant reste le déplacement de tout le système en contexte de bocage (haies, clôtures, lignes électriques, etc.).

Les résultats se présentent sous la forme de courbes de conductivité ou de résistivité suivant les différentes fréquences disponibles. Il n'existe pas de logiciel spécifique d'inversion des données, nécessaire à l'obtention d'un modèle de terrain. L'inversion peut être réalisable en utilisant les logiciels d'interprétation de sondages électriques, mais reste délicate à mettre en œuvre et n'est pas satisfaisante.



III. 5 Audio-magnétotellurique (AMT)

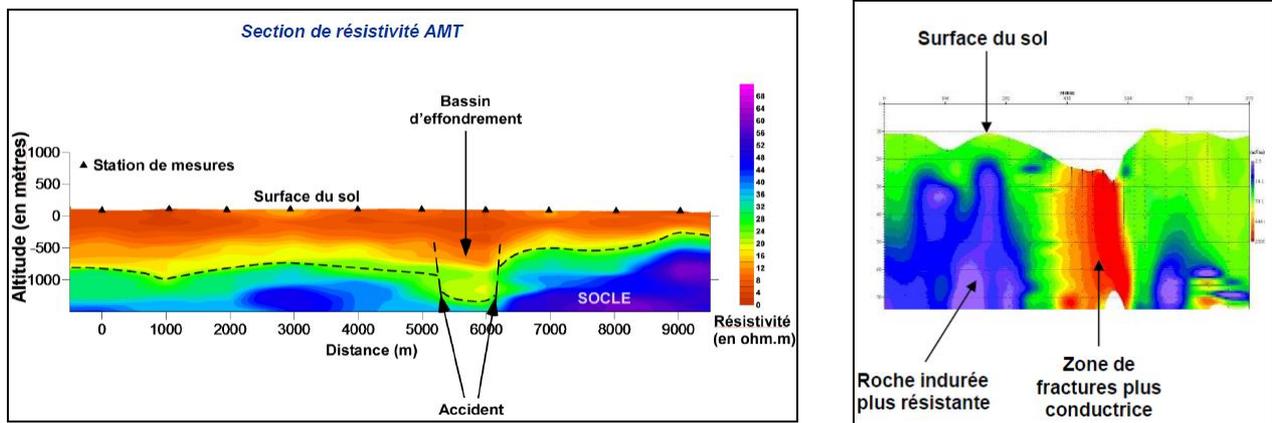
La méthode AMT est une méthode passive de sondage électromagnétique, elle est fondée sur la mesure des composantes électrique et magnétique des champs EM naturels. Les sources principales de ces champs sont les fluctuations naturelles du champ magnétique terrestre, qui s'étalent sur un large spectre de fréquence. Le champ magnétique naturel pénètre le sol de la Terre et sa variation temporelle va induire un courant électrique dans les roches terrestres naturellement conductrices, appelé courant tellurique. Ce dernier va à son tour engendrer un autre champ magnétique, appelé champ magnétique secondaire. Il s'agit du même principe que pour les mesures électromagnétiques superficielles.

Les variations du champ géomagnétique utilisées dans les mesures magnétotelluriques sont celles de la tranche de fréquences comprises entre 10^{-4} et 10^3 Hz. Ces variations sont dues à plusieurs phénomènes différents :

- les fréquences supérieures à 1 Hz sont principalement générées par les orages tropicaux. Leur distribution géographique est telle qu'à n'importe quelle heure du jour il y a probablement un orage.
- pour les fréquences inférieures à 1 Hz, les fluctuations naturelles du champ électromagnétique sont dues aux interactions compliquées entre la radiation solaire et le champ magnétique terrestre.

En mesurant simultanément à la surface du sol le champ électrique et le champ magnétique associé, il est possible d'en déduire une coupe verticale de résistivité du sous-sol à l'aplomb de la station de mesure. Le dispositif de mesure est constitué de quatre électrodes pour mesurer les champs électriques E_x and E_y (longueur des dipôles de mesure entre 50 à 100m) et de trois bobines magnétiques pour mesurer les composantes H_x - H_y - H_z du champ magnétique. Les mesures se font suivant des stations régulièrement espacées. L'acquisition peut être assez longue environ 2 heures.

Les résultats montrent que la méthode semble bien adaptée pour mettre en évidence des structures faillées à grande profondeur. De plus, elle intègre moins de terrain que les méthodes précédentes.



Profil 7 - Exemple de rendu d'AMT - Document CGG

Références bibliographiques :

- Grissemann Ch., Reitmayr G. (1978) - VLF magnetotellurics in ore exploration and structural geology. *48th. SEG meeting in San Francisco*
- Geonics Limited (1979) - Operating manual for EM16R VLF resistivity meter. *Technical note. Canada, 34 p*
- Fraser D. C. (1969) - Contouring of VLF-EM data. *Geophysics, vol. 34, n°6, pp. 958-967*
- Geonics Limited (1983) - Operating manual for EM16 VLF-EM. *Technical note. Canada, 78 p*
- Karous M., Hjelt S. E. (1983) - Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical prospecting, n°31, pp 782-794.*
- Martiré O. (1991) - Apports du VLF en mode magnétique à la prospection hydrogéologique. *Mémoire de DESS, Université Pierre et Marie Curie - Calligée*