

DETECTION DE FRACTURES ET DE BASSINS D'EFFONDREMENT PAR METHODE ELECTROMAGNETIQUE

par

Viviane BORNE et Michel CHEVALIER

(9 figures, 1 tableau)

RESUME.- L'appareil de prospection VLF mesure la résistivité apparente du sous-sol à partir des composantes électrique et magnétique d'une onde de très basse fréquence. Les mesures se font ponctuellement, suivant un maillage défini. Pour faire apparaître l'ensemble des anomalies présentes dans les massifs cristallins et pour pallier les variations de résistivités liées à la schistosité, on a été amené à travailler avec deux émetteurs perpendiculaires. Les résultats obtenus se présentent sous forme de cartes de résistivités qui peuvent s'analyser directement. Une interprétation en modèle bicouche, à partir de la résistivité apparente et du déphasage, permet d'éliminer les anomalies liées à des phénomènes de surface et de suivre l'orientation des fractures en profondeur.

Le résistivimètre RMT (Radio-Magnéto-Tellurique) présente deux avantages majeurs par rapport aux autres matériels électromagnétiques: les mesures s'effectuent en continu, et les trois gammes d'ondes (VLF, MW et LW) autorisent une investigation à différentes profondeurs. Ces particularités en font un matériel de reconnaissance très précis des trente premiers mètres dans lesquels il est possible de différencier les faciès. Il est utilisé pour mettre en évidence les fractures du socle mais aussi pour délimiter les bassins d'effondrement et d'en reconnaître le remplissage.

ABSTRACT.- The VLF exploring receiver calculates the apparent resistivity of the soil by measuring the electric and magnetic components coming from very low frequencies waves. The measures are punctual according to an accurate crossing section. To appear all the anomalies inside the crystalline rocks and to avoid the variations of the resistivity dependent of the schistosity, we work with two perpendicular VLF-transmitting stations. The result of the measures drawing in a map gives a direct interpretation. A double level model realized with the apparent resistivity and the phase allows to erase the anomalies belonging to the soil-surface, and to follow the orientation of the fracture.

The resistivity meter RMT (Radio-Magneto-Telluric) offers greater advantages in regard to the others electromagnetic receivers. The continuous measures and the three kinds of waves (VLF, MW and LW) permit a different deep of investigation. The RMT-measures are well adapted for the first thirty meters investigation in which we are able to distinguish the rocks. We use also this instrument to give prominence to the fracture and to delimit the grabens and recognise the deposits.

1.- INTRODUCTION

Actuellement, les projets de reconnaissance du sous-sol à faible profondeur peuvent bénéficier d'un apport efficace de la géophysique. Les matériels, naguère réservés aux prospections profondes, ont été adaptés à la subsurface. Parmi toutes les méthodes géophysiques, la méthode électromagnétique, utilisant un émetteur propre ou des ondes lointaines, semble avoir été la plus développée pour ce type d'application.

Au cours de nos prospections, nous avons pu tester différents matériels et adapter leurs spécificités aux résultats escomptés. Parmi les nombreuses applications, nous avons choisi de présenter ici deux exemples liés à la structure du substratum :

- reconnaissance de zones fracturées dans le socle cristallophyllien, application à l'hydrogéologie avec le VLF,
- détection de bassins d'effondrement le long de fractures, application à la cartographie et à la tectonique, avec le RMT.

2.- PRINCIPE DE LA METHODE ELECTROMAGNETIQUE (CAGNIARD, 1953)

Une onde électromagnétique est constituée de deux champs, magnétique et électrique, tous deux perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation de cette onde. Le champ magnétique (H_y) est tangentiel, le champ électrique (E_x) est radial (fig.1).

Dans les corps conducteurs, les ondes électromagnétiques induisent des courants électriques qui engendrent eux-même des champs secondaires, en quadrature avec les champs primaires. Les champs résultants sont polarisés elliptiquement et modifiés au voisinage des conducteurs. Ce sont donc ces variations de champs qui nous renseignent sur la structure du sous-sol.

Les ondes peuvent être émises par le matériel de prospection lui-même, mais les deux appareils présentés ici sont des récepteurs qui utilisent les ondes produites par des émetteurs radio. Pour une mesure correcte, il convient de travailler avec des stations suffisamment éloignées du point de mesure pour que les surfaces d'ondes soient assimilées à leur plan tangent et que les effets de source soient négligeables (Lagabrielle, 1986).

Le champ magnétique (H_y) est capté par une antenne de cuivre, le champ électrique (E_x) est mesuré par différence de potentiel entre deux électrodes capacitives. La résistivité apparente des terrains est une fonction de ces deux valeurs, elle est directement donnée par les deux appareils.

$$\rho_a = \frac{1}{2 \pi f \mu_0} \frac{E_x^2}{H_y}$$

ρ_a = résistivité apparente (ohms.m)

E_x = champ électrique (A/m)

H_y = champ magnétique (V/m)

f = fréquence de l'onde (Hz)

μ_0 = perméabilité magnétique du vide (H/m)

Lorsqu'une onde électromagnétique pénètre dans le sol, son amplitude décroît exponentiellement avec la profondeur. Pour connaître l'épaisseur de terrains concernés par la mesure, on a recours à la profondeur de pénétration P à laquelle l'amplitude est divisée par e (2,718) qui

est donnée par la formule:

$$P = \frac{2 \rho_a}{\mu_0 \omega}$$

ρ_a = résistivité apparente (ohms.m)

μ_0 = perméabilité magnétique du vide (H/m)

$\omega = 2 \pi f$

f = fréquence de l'onde (Hz)

Pratiquement, on utilise la profondeur d'investigation qui équivaut à environ la moitié de la profondeur de pénétration. Ces valeurs varient suivant la fréquence de l'onde mais aussi suivant la résistivité des terrains. La profondeur d'investigation sera d'autant plus élevée que la fréquence sera faible et la résistivité forte.

Cette méthode est directionnelle, les mesures se font dans l'axe de l'émetteur. Chaque mesure de résistivité concerne un parallépipède 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 (fig.2). Les structures mises en évidence seront donc perpendiculaires à l'émetteur. De même, pour les terrains anisotropes, les mesures de résistivités apparentes seront différentes suivant que l'on utilise un émetteur dans le sens de la schistosité ou perpendiculaire à celle-ci. Pour pallier ces effets d'anisotropie et pour révéler toutes les anomalies existantes sur un terrain, nous travaillons avec deux émetteurs de directions perpendiculaires.

3.- LE RESISTIVIMETRE VLF ET LA PROSPECTION DE MASSIFS CRISTALLOPHYLLIENS

3.1.- Description du résistivimètre VLF et exploitation des mesures.

Le matériel utilisé est un résistivimètre de type IGS-2/VLF-4 construit par Scintrex (Canada), il a été mis au point pour la prospection minière (Scintrex, 1986). C'est un matériel portable et facile à mettre en oeuvre; l'antenne, protégée par un boîtier de plastique se porte sur le dos, la console de mesure, sur le ventre. Les électrodes, constituées de deux petits cylindres reliés par un câble de 5 m, sont simplement posées sur le sol en direction de l'émetteur. La prospection se fait le long de profils d'orientation quelconque puisque l'on se positionne en direction de l'émetteur à chaque point de mesure.

Les ondes exploitées par ce matériel proviennent d'émetteurs VLF (Very Low Frequency) très puissants. Ces émetteurs construits à des fins militaires, pour communiquer avec des sous-

marins en plongée, opèrent sur de grandes longueurs d'ondes (10 à 20 km) de façon à pénétrer l'eau de mer très conductrice. La fréquence est très faible: de 15 à 25 KHz. La profondeur d'investigation peut varier d'une dizaine à une centaine de mètres suivant la résistivité du terrain.

Cet appareil peut s'utiliser en mode magnétique; la composante horizontale et les compo-

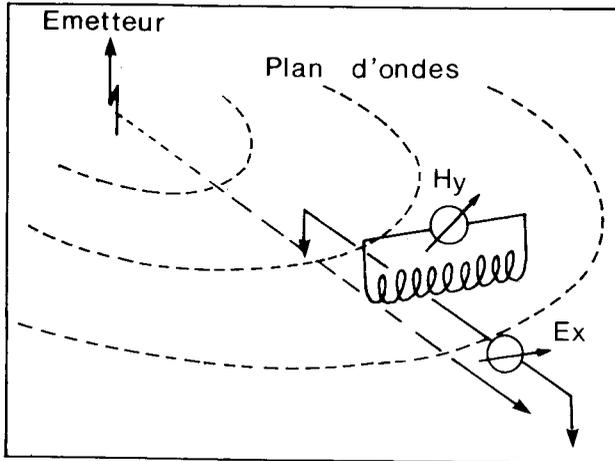


Fig. 1.- Propagation des ondes électromagnétiques et caractérisation des champs électrique (E_x) et magnétique (H_y). (Grissmann et Reitmayr, 1978).

santes verticales, en phase et en quadrature, du champ magnétique sont mesurées par l'antenne. Mais ici, seule l'exploitation des mesures en mode résistivité sera traitée.

En plus de la valeur de la résistivité apparente et du champ magnétique horizontal, cet appareil donne 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:

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

A partir des valeurs de résistivités apparentes et de déphasage on peut calculer, en faisant une hypothèse de résistivité sur le premier terrain ρ_1 , son épaisseur et la résistivité du deuxième. Des abaques à double entrée, avec différentes hypothèses de ρ_1 , donnaient directement ces dernières valeurs (GEONICS LIMITED, 1979); mais un algorithme d'inversion des données pour la résolution d'un modèle bicouche, développé par

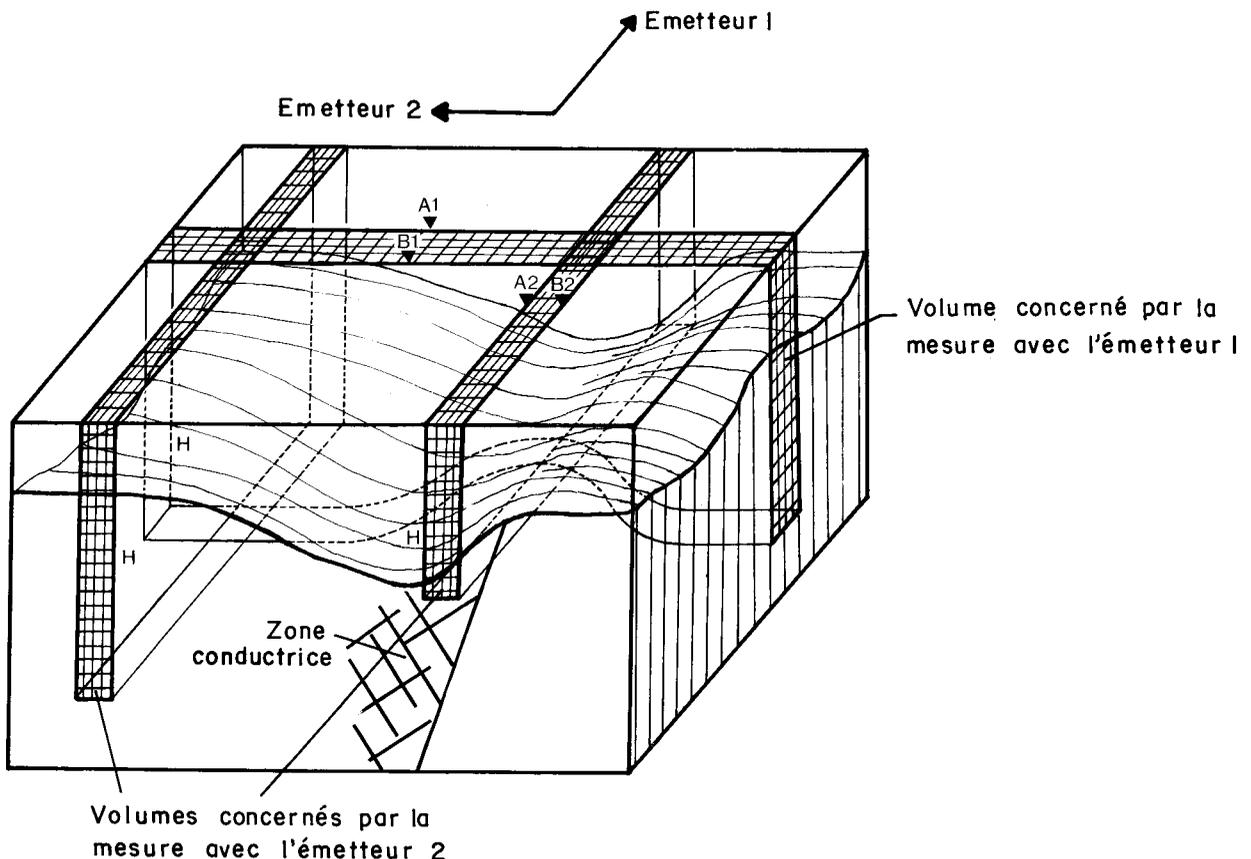


Fig. 2.- Effet directionnel de la mesure de la résistivité apparente par la méthode électromagnétique.

- A1-B1 : position des électrodes pour la mesure avec l'émetteur 1
- A2-B2 : position des électrodes pour la mesure avec l'émetteur 2
- H : profondeur d'investigation.

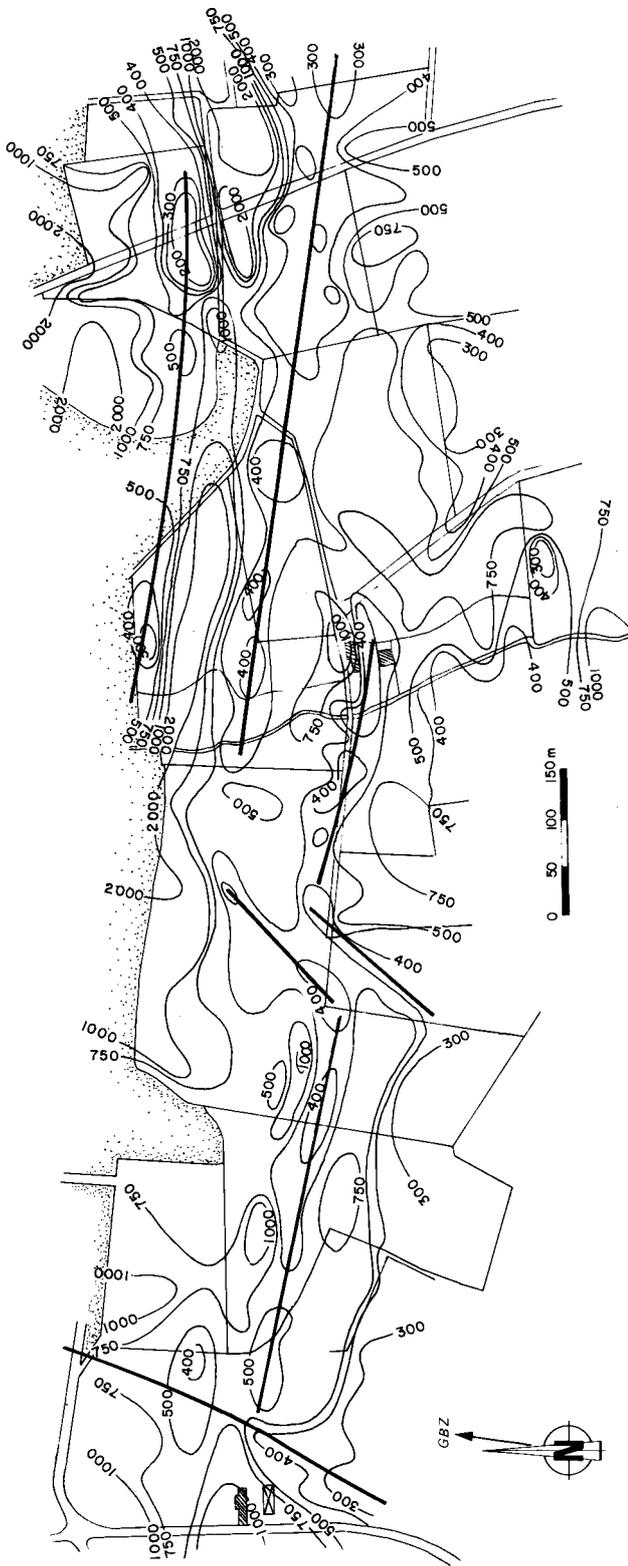


Fig. 3.- Carte de résistivités apparentes suivant l'émetteur GBZ (19.6 KHz). Les traits noirs représentent les axes conducteurs. Commune de Grand-Champ (Morbihan).

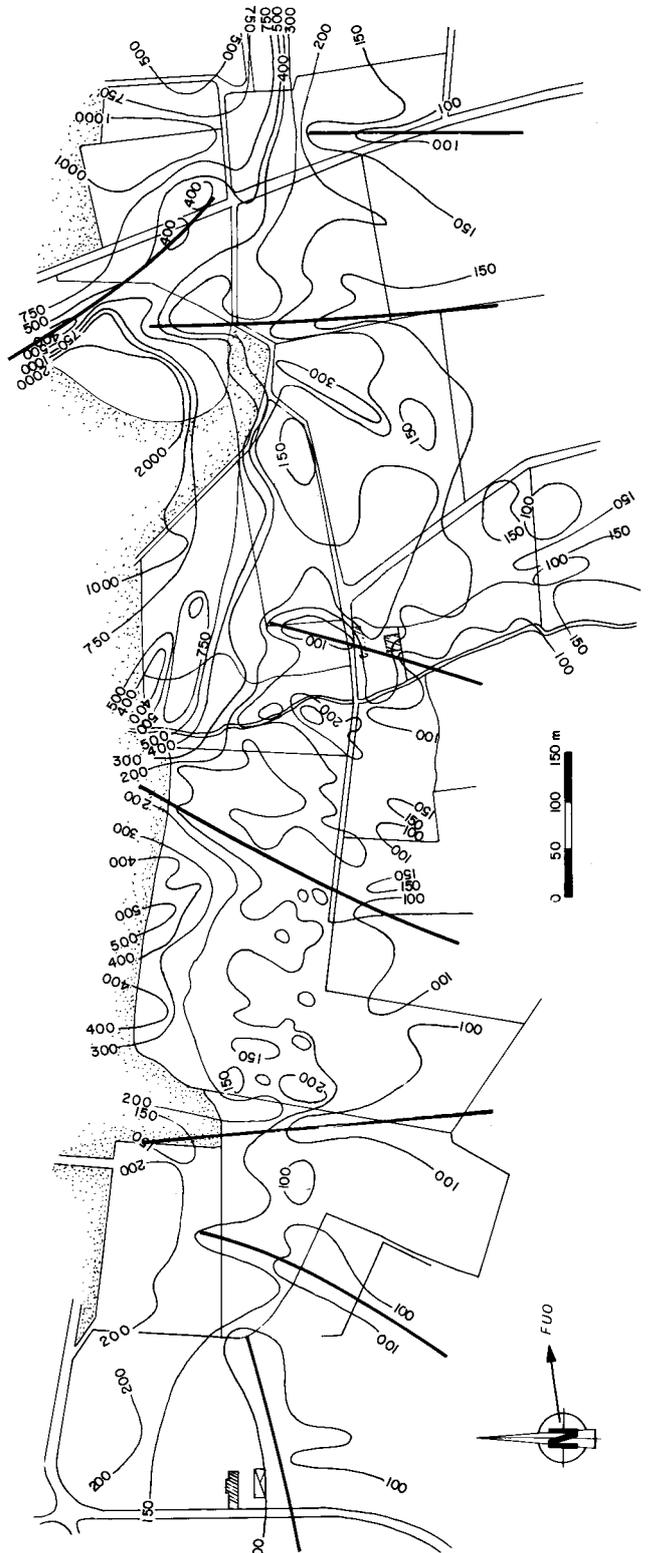


Fig. 4.- Carte de résistivités apparentes suivant l'émetteur FUO (15.1 KHz). Les traits noirs représentent les axes conducteurs. Commune de Grand-Champ (Morbihan).

Grissmann et Reitmayr (1978) permet maintenant de les calculer automatiquement.

Les résultats des mesures sont présentés sous forme de cartes de résistivités apparentes et de cartes de résistivités du substratum.

3.2.- Application à la recherche de fractures dans un massif cristallophyllien.

Les résultats présentés ici proviennent de la synthèse de deux études commandées par Madame Rambert, hydrogéologue départemental et financées par la Mairie de Grand-Champ et par le Conseil Général du Morbihan (Borne et Chevalier, 1988 - Borne et Chevalier, 1989). Ces prospections avaient pour but de rechercher des fracturations susceptibles de fournir des eaux de qualité dans des terrains cristallophylliens réputés peu productifs.

Le domaine d'étude s'étend sur 1.5 km environ, en bordure du granite de Lanvaux, dans les formations des schistes et arkoses de Bain. Au total, 630 points de mesure à la maille 20 m x 40 m à l'est et à l'ouest et à la maille 15 m x 30 m dans la partie centrale ont été nécessaires pour couvrir l'ensemble du site. Les deux émetteurs choisis sont GBZ (19.6 KHz) en direction du nord et FUO (15.1 KHz) en direction de l'est.

En première analyse, les cartes de résistivités apparentes (fig. 3 et 4) apportent des informations sur la lithologie. La partie nord-est qui montre des valeurs équivalentes avec les deux émetteurs (supérieures à 750 ohms.m) correspond aux granites. Au sud, les différences de résistivités sont dues à l'anisotropie de la roche. Les schistes métamorphiques peuvent être séparés des schistes en plaquettes par la courbe de résistivités 150 ohms.m (émetteur FUO). Les courbes d'isoresistivités sont sensiblement parallèles aux limites des formations géologiques.

Une observation plus fine de la répartition de ces valeurs fait apparaître des anomalies liées à la structure du socle. Les axes conducteurs, révélés sur ces cartes, présentent des résistivités inférieures à 400 ohms.m et des directions est-ouest avec l'émetteur GBZ, des résistivités inférieures à 100 ohms.m et des directions nord-sud avec l'émetteur FUO. Les axes nord-est sud-ouest apparaissent également sur les deux émetteurs.

L'interprétation en modèle bicouche a été effectuée en prenant pour hypothèse de premier terrain des valeurs de 100 ohms.m et de 500 à 700 ohms.m suivant les déphasages. La puissance de l'altération pourrait atteindre une trentaine de mètres dans certaines zones conductrices.

Les cartes présentées fig.5 et 6 révèlent la qualité du substratum sous les horizons superficiels. On retrouve globalement les mêmes

gammes de résistivités avec toutefois des répartitions différentes. Les fortes valeurs occupent des surfaces plus étendues au nord du site témoignant de l'existence des granites en profondeur.

Par rapport aux cartes précédentes, la distribution des axes conducteurs se trouvent modifiée. Certains n'apparaissent pas en profondeur (ouest du site), d'autres sont interrompus par des alignements transverses comme dans la partie est, d'autres encore présentent des orientations différentes. Seules ces anomalies, qui affectent encore le socle peuvent être considérées comme des fractures.

A partir de l'analyse des cartes de résistivités du substratum, il est possible de retrouver les différents épisodes de fracturation. La structuration initiale du terrain semble s'être effectuée suivant une direction est-ouest. Une fracturation plus tardive a affecté l'ensemble du site, décalant ou interrompant ces premiers accidents.

4.- LE RESISTIVIMETRE R.M.T. ET LA RECONNAISSANCE DE BASSINS D'EFFONDREMENT.

4.1.- Description du matériel RMT

La Radio-Magnéto-Tellurique (RMT), méthode de prospection inventée par Guineau et Dupis (1973), a été développée par le CNRS (Dupis et Carnez, 1976) et par les Ponts et Chaussées pour les prospections en génie civil (Lagabrielle, 1986) et en archéologie (Lagabrielle et Hollier-Larousse, 1985).

L'appareil RMT a été conçu pour réaliser des mesures en continu grâce à l'utilisation de capteurs capacitifs pour la mesure du champ électrique. Il est constitué d'une antenne portée par un chariot traînant deux capteurs capacitifs, d'un boîtier de mesures des champs E et H, d'enregistreurs graphique et numérique. Une roue codeuse asservit le défilement du papier à la vitesse d'avancement qui peut atteindre plusieurs kilomètres par heure sur une surface homogène. Plusieurs types de capteurs sont disponibles :

- grand tapis (1m par 2.40m) et petit tapis (1.20m par 0.40m)
 - patins métalliques sphériques ou rectangulaires.
- Le choix des électrodes dépend de la qualité des surfaces et de la dimension de l'objet à repérer.

L'autre avantage du RMT réside dans sa large bande passante qui autorise des mesures à partir de trois gammes d'ondes :

- ondes basses fréquences de types VLF de 8 à 25 KHz,

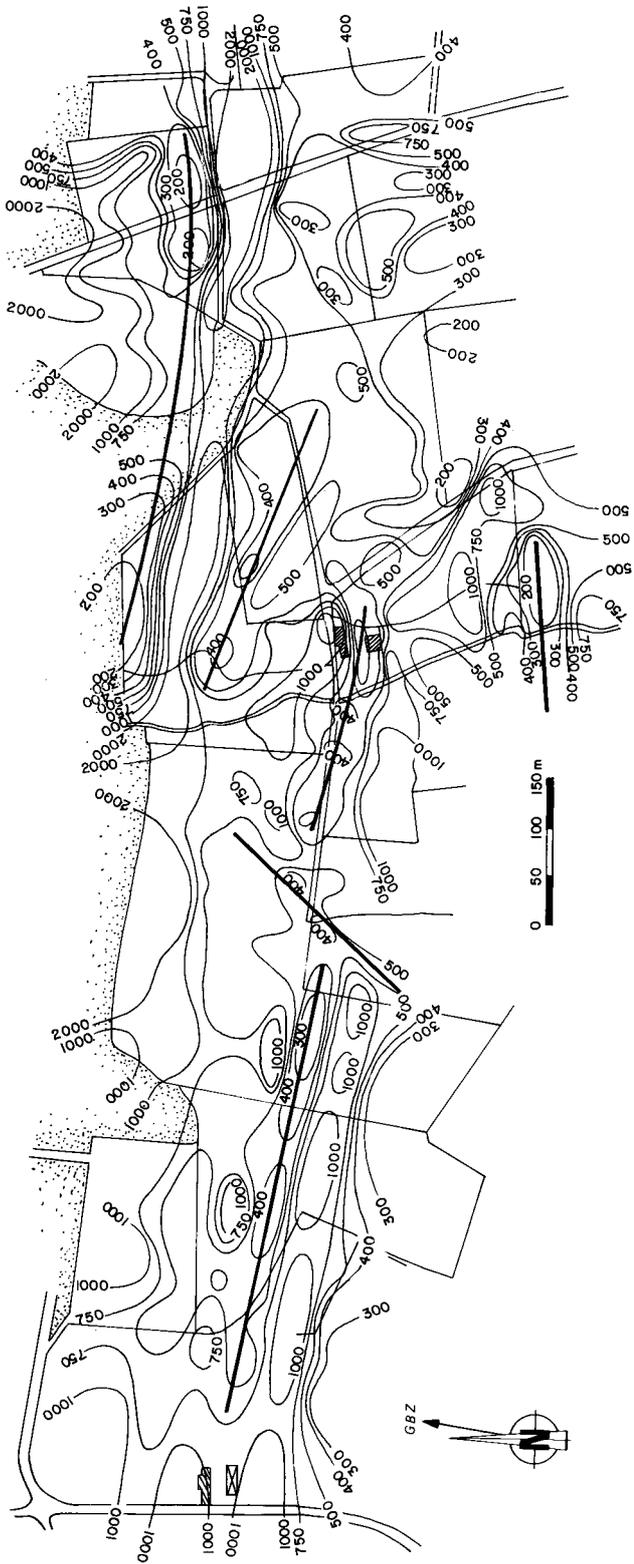


Fig. 5.- Carte de résistivités du deuxième terrain suivant l'émetteur GBZ (19.6 KHz). Les traits noirs représentent les axes conducteurs. Commune de Grand-Champ (Morbihan).

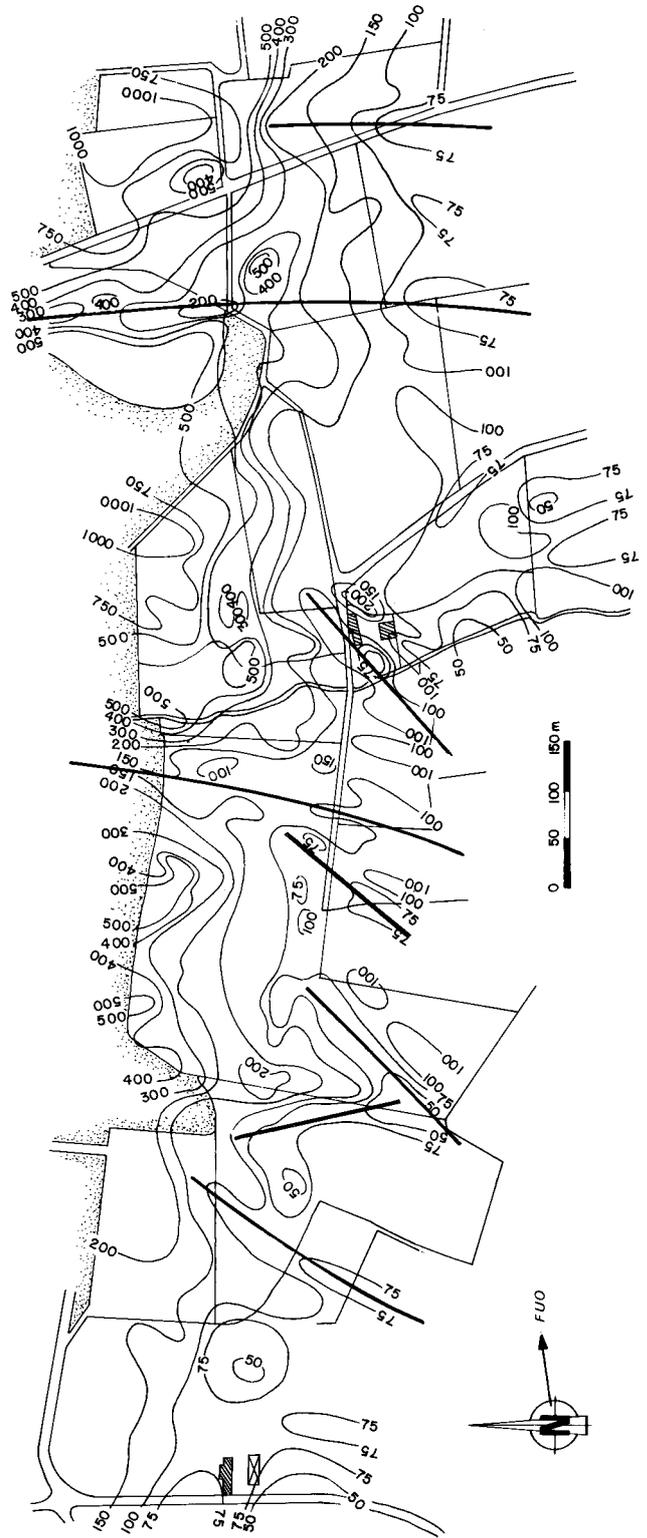


Fig. 6.- Carte de résistivités du deuxième terrain suivant l'émetteur FUO (15.1 KHz). Les traits noirs représentent les axes conducteurs. Commune de Grand-Champ (Morbihan).

Tab. 1.- Profondeurs d'investigation possible avec le RMT.

	15.1 KHz Very Low Frequency	162 KHz Grandes Ondes	1 206 KHz Ondes Moyennes
50 ohms.m argile	14.4 m	4.4 m	1.6 m
200 ohms.m calcaire	28.8 m	8.8 m	3.2 m
1 000 ohms.m granite	64.3 m	19.6 m	7.2 m

- grandes ondes ou LW de 150 à 350 KHz,
- ondes moyennes ou MW de 500 à 1600 KHz.

La permutation d'une gamme d'onde à une autre se faisant directement, il est aisé d'avoir plusieurs types de mesures à partir du même appareil. La profondeur de pénétration est fonction de la nature du sous-sol et de la fréquence des ondes utilisées (tableau 1).

4.2.- Application à la reconnaissance d'un bassin d'effondrement.

Situé au sud de Nantes, près du lac de Grand-Lieu, le bassin d'effondrement du Maupas se présente comme un couloir long de 6 km et de largeur variable. Il est encadré par le massif éclogitique de Sainte-Pazanne - Les Essarts au nord-est et des micaschistes au sud-ouest, allongés en direction sud-armoricaine 110°. Seule la limite nord-est de ce bassin est cartographiable (Godard, 1981), et les dépôts étaient classiquement attribués au pliocène (Ters, 1982). Aussi, pour comprendre la structuration il a semblé intéressant d'y effectuer des reconnaissances géophysiques et des sondages (Chevalier, 1987).

Diverses techniques géophysiques ont été mises en oeuvre (sondages électriques, profils électromagnétiques EM 34-3 et magnéto-telluriques RMT). La prospection RMT qui a fourni le

plus d'informations grâce à des mesures en continu, a été effectuée avec le concours du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Hollier-Larousse) suivant le plus grand axe du bassin et perpendiculairement à celui-ci.

Une première série de mesures au centre du couloir avec l'émetteur Rennes (711 KHz) a permis la distinction des argiles attribuées par la suite au Pliocène et des sables grossiers rapportés à l'Eocène. Au contact de ces deux ensembles, on observe de brusques variations de résistivité liées vraisemblablement à une zone fracturée en profondeur (fig.7).

Les différents profils perpendiculaires donnent des résultats assez similaires, l'émetteur grandes ondes choisi (RTL, 236 KHz) étant localisé dans la direction des profils. L'exemple retenu montre deux niveaux de résistivités élevés (fig.8) encadrant une large zone à faibles résistivités :

Dans le compartiment A, les fortes résistivités atteignent fréquemment ou dépassent 500 ohms.m, témoignant de la présence d'orthogneiss proche de la surface. Ces gneiss se présentent sous forme de larges bandes indurées séparées par des zones profondément argilisées. Plus à l'ouest, le pic de résistivité qui se retrouve sur d'autres profils, pourrait correspondre à une étroite bande d'amphibolites effondrés en contact faillé avec les orthogneiss.

Dans le compartiment B, les résistivités les plus faibles (10 à 30 ohms.m) révèlent l'existence d'un approfondissement maximum. Au centre, la bosse de résistivité semble indiquer une variation de faciès ou une remontée du socle. Les contacts francs entre cette zone sédimentaire et les roches avoisinantes sont de nature faillée.

Le troisième compartiment C montre des valeurs de résistivités oscillant de 40 à 180

résistivité en ohms.m

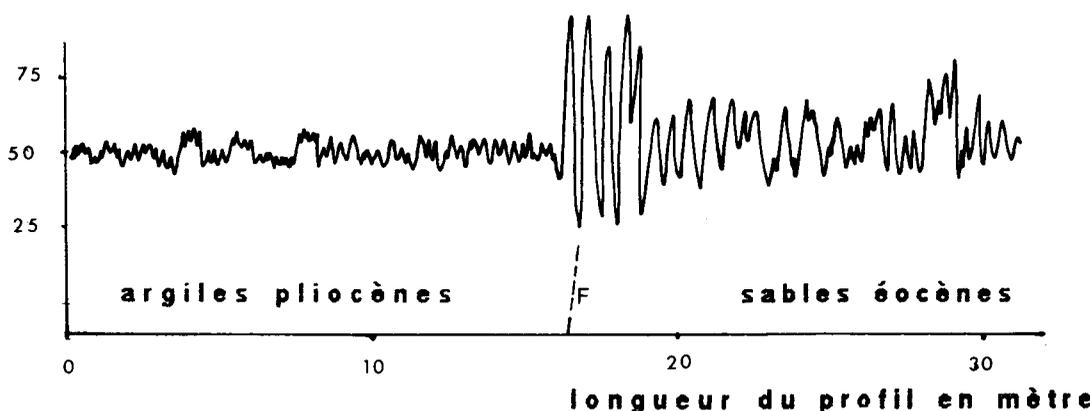


Fig. 7.- Exemple de profil RMT dans le couloir du Maupas. (Émetteur Rennes 711 KHz. Utilisation des patins métalliques comme capteur du champ électrique).

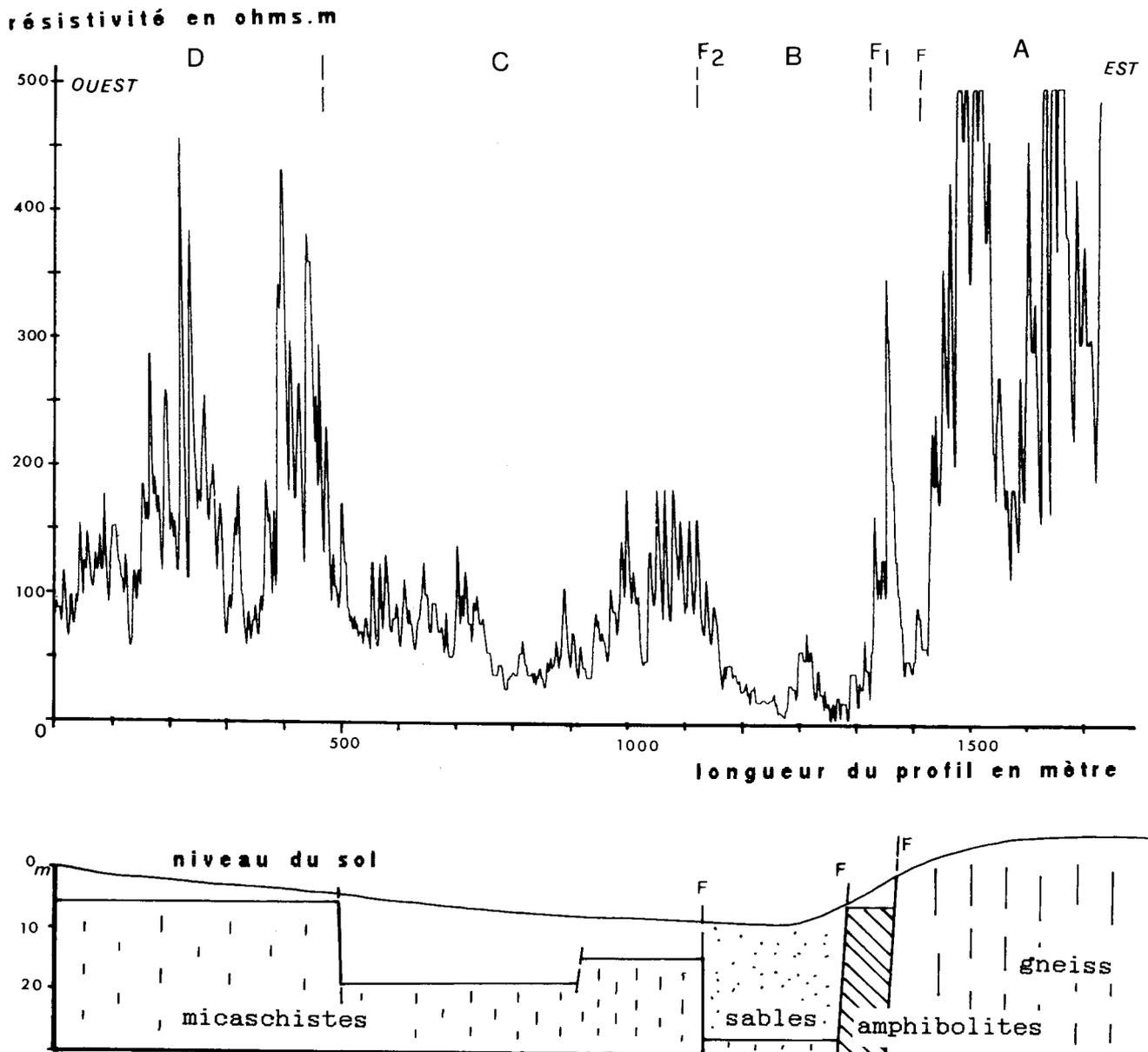


Fig. 8.- Profil RMT réalisé près du village de Roche Blanche, perpendiculairement au couloir (Emetteur RTL 236 KHz. Utilisation du grand tapis). Coupe interprétative.

ohms.m. L'allure de la courbe en dents de scie suggère la présence de roches à altération différentielle surmontées d'une faible couche de dépôts.

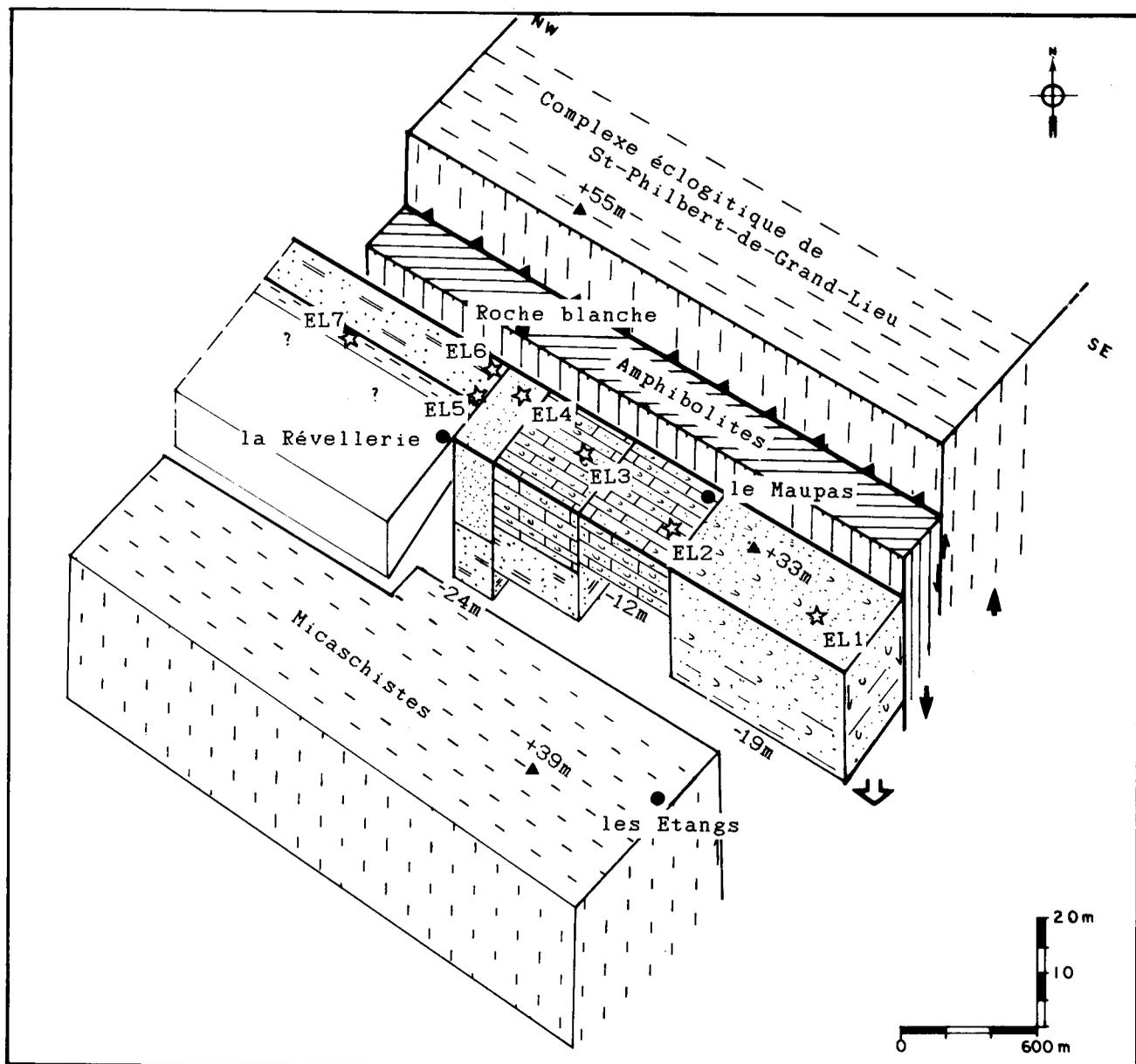
Enfin à l'ouest (D), les résistivités en moyenne élevées varient rapidement de 80 à 470 ohms.m. On retrouve l'allure très dentelée de la courbe précédente. Le sous-sol semble donc composé du même type de roche; il s'agit en fait de micaschistes. Dans ces roches, il semble difficile de distinguer une zone faillée d'une zone argilisée.

Les nombreux profils réalisés perpendiculairement au bassin ont confirmé les résultats précités. Cependant les quatre compartiments ne se retrouvent pas toujours, le troisième est souvent manquant. La largeur de la zone sédimentaire varie ainsi de 200 m à plus d'un kilomètre.

Suite à cette prospection géophysique, neuf sondages bien implantés ont mis en évidence des faciès différents (Chevalier, 1988). Le couloir du Maupas se présente comme un petit graben à effondrements différentiels (quelques mètres à 24m), et à compartimentage intense: sédiments pliocènes juxtaposant des dépôts lutétiens (fig. 9).

5.- CONCLUSIONS

Le développement actuel de la méthode électromagnétique conduit à des reconnaissances précises du proche sous-sol. Les deux appareils utilisés ici (VLF et RMT), souples d'emploi et rapides en prospection, présentent des spécifications qui répondent bien aux différentes applications recherchées.



EL1 à 7 : sondages tarières (BRGM 1985)

	sables, argiles fossilifères "Redonien"	}	PLIOCENE (-3 Ma)
	sables lessivés (Bartonien)	}	EOCENE (-52 Ma)
	grès calcaires (Lutétien)		
	sables et argiles noires (Yprésien)		

Fig. 9.- Effondrements différentiels et compartimentage dans le couloir du Maupas (La Limouzinière, Loire Atlantique).

L'étude des cartes de résistivités apparentes établies par la méthode VLF apporte des informations précises sur la lithologie et la répartition des axes conducteurs du substratum; mais l'interprétation en modèle bicouche permet de différencier les zones d'altérations superficielles des zones réellement fracturées.

Les contacts faillés entre le socle et le remplissage sédimentaire peuvent être précisés avec le RMT. La continuité des mesures et la large gamme d'ondes permettent de différencier les faciès, que ce soit dans le socle lui-même, distinction des schistes et des gneiss, ou dans les formations sédimentaires (argile, sable, calcaire).

Il existe également d'autres matériels de prospection de subsurface ayant des domaines d'application différents (Borne, à paraître). Ainsi, quelque soit le terrain ou le problème à résoudre, il est possible de définir le type de matériel et la mise en oeuvre la plus appropriée.

BIBLIOGRAPHIE

BORNE, V. & CHEVALIER, M., 1988. Etude de la fracturation d'un massif par méthode géophysique pour l'implantation de forages hydrogéologiques - Commune de Grand-Champ (Morbihan). Rapport T.R.D.B., 26 p.

BORNE, V. & CHEVALIER, M., 1989. Etude de la fracturation d'un massif cristallophyllien par la méthode électromagnétique VLF - Commune de Grand-Champ (Morbihan) - Application pour l'hydrogéologie. Rapport Calligée, 27 p.

BORNE, V., (à paraître). La méthode électromagnétique EM 34-3 pour la prospection de subsurface. *Géologie de l'ingénieur*.

CAGNIARD, L., 1953. Principe de la méthode magnétotellurique, nouvelle méthode de prospection géophysique. *Ann. de Géophysique*, 9, 95-125.

CHEVALIER, M., 1987. Tectonique récente, effondrements et remplissages cénozoïques dans le domaine du lac de Grand-Lieu. Thèse de Doctorat, Nantes, 157 p.

CHEVALIER, M., 1988. Conservatoire de sédiments cénozoïques le long de l'accident sud-armoricain Sainte-Pazanne - Les Essarts (domaines du lac de Grand-Lieu, Loire-Atlantique). *Géologie de la France*, 1, 71-77.

DUPIS, A. & CARNEZ, J.-L., 1976. Application d'une méthode magnétotellurique à la reconnaissance des sites. *Bull. Liaison P. et Ch.*, 84, 61-68.

GEONICS LIMITED, 1979. EM 16R operating manual. Technical note. Canada, 34 p.

GRISSEMANN, Ch. & REITMAYR, G., 1978. VLF magnetotellurics in ore exploration and structural geology. 48th. SEG meeting in San Francisco.

GUINEAU, B. & DUPIS, R., 1973. Dispositif pour la prospection magnétotellurique de subsurface. Agence Nationale pour la Valorisation de la Recherche, Paris, brevet n° 73-11-573.

LAGABRIELLE, R., 1986. Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil. Rapport L.C.P.C., sér. Géotechnique - Mécanique des sols - Sciences de la Terre, n° GT-17, 291 p.

LAGABRIELLE, R. & HOLLIER-LAROUSSE, A., 1985. Les deux types d'informations contenus dans les profils de la magnétotellurique artificielle. Exemple d'application à la prospection archéologique. *Bull. Liaison LPC*, n° 137, 37-42.

SCINTREX, 1986. VLF-3/4 - VLF Electromagnetic systems - Operation manual. Technical note n° 783 700, 53 p.