

## EXPLORACION MAGNETOTELURICA

HUGO G. FOURNIER

Centre de Researches Geophysiques, París, Francia

Las primeras experiencias magnetotelúricas datan de mediados del siglo pasado. Casi un siglo fue necesario para transformar las ideas originales en un método práctico de exploración geofísica.

Desde 1953 hasta el presente el desarrollo ha sido acelerado, extendiéndose a numerosos dominios de aplicación. Una rápida enumeración nos informa de ello: estudio geoelectrico de la corteza y el manto superior, exploración de cuencas sedimentarias, minería, estudios regionales, geotermia profunda y prospección de yacimientos geotérmicos.

El desarrollo de instrumental ha mantenido un ritmo sostenido en ese lapso, cada vez mas preciso y confiable, otorgando al método una gran flexibilidad.

Equipos livianos capaces de operar largo tiempo a baterías se encuentran en el mercado.

Miles de sondajes magnetotelúricos (M.T.) han sido realizados en los últimos veinticinco años, por cientos de geofísicos en el mundo. Un esfuerzo considerable ha sido dedicado a perfeccionar las técnicas de tratamiento de datos, que han hecho posible el manejo de grandes cantidades de datos en forma digital.

Las técnicas para el problema M.T. inverso han sido objeto también de una activa investigación. Inicialmente por modelos unidimensionales, luego para el caso de estructuras cilíndricas bidimensionales y actualmente en curso de desarrollo los casos de geometría tridimensional. Esto ha permitido incluir en la interpretación situaciones estructurales cada vez mas complejas.

Como un balance actual del método M.T., cuyas limitaciones han sido también bien estudiadas, su utilidad en la exploración geofísica queda mas allá de toda duda, integrando el arsenal de métodos disponibles y en ciertos casos difícilmente reemplazable.

Firsts magnetotelluric experiences were performed around the middle of the last century. Nearly a century was necessary to transform the original ideas into a practical geophysical tool.

Since 1953 up to date a fast development was attained covering many applied fields. A short enumeration shows it: electrical studies of the crust and the upper mantle, oil prospecting, mining, regional structural studies, deep geothermal sources and geothermal reservoirs prospecting.

Equipments for M.T. work have been developed during the last years in a continuous way. This technological research successfully increased accuracy and confiability as well as operational facilities. Low consumption full batteries operation of a light portable M.T. equipment is available at present.

Thousands of M.T. soundings were carried out in the last quart of the century, by hundred of geophysicists around the world. Many efforts have been devoted in order to improve data processing techniques, which allow nowadays the handling of considerable amounts of digitalized data in an inexpensive way.

Techniques for the inverse M.T. problem have also been actively investigated, first for one-dimensional models, then for two-dimensional cylindrical structures; the tri-dimensional case is in the course of development at present.

These progresses allow taking into account each time more and more complex structural features for the interpretation of M.T. soundings.

The present state of the art for the M.T. method, whose limitations have been also studied, is a promising one; its utility in exploration geophysics is beyond any doubt, integrating the arsenal of available geophysical methods, sometimes difficult to replace.

## INTRODUCCION

Las variaciones del campo magnético terrestre engendran por inducción variaciones del campo telúrico (eléctrico) en la dirección ortogonal.

El método magnetotelúrico (M.T.) consiste en la combinación de la medida simultánea de los campos telúrico y magnético para obtener información de la resistividad eléctrica del subsuelo.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de registro magnético y telúrico ortogonal, obtenido en el Observatorio Geomagnético de Pilar, Córdoba. El sensor magnético empleado es del tipo inducción, E. Selzer (1957), M. Six (1972) y J. Febrer, J. Demicheli, M.B. de O'Neil, S. Greco (1975). La línea a telúrica está constituida por electrodos de plomo separados entre sí por una longitud de 200 m.

## SINTESIS HISTORICA

### Los precursores

Hacia 1852 los padres jesuitas de Roma realizan la experiencia de medir los campos eléctricos telúricos que aparecían asociados con los períodos de agitación del campo magnético. Estas observaciones fueron conducidas por el Padre A. Secchi (1863/64 y 67). Las citas mencionadas constituyen las primeras referencias históricas, en este dominio de la ciencia, conocidas por el autor.

En 1862, J. Lamont (1862) obtuvo registros de corrientes telúricas con las cuales calculó la profundidad de basamento por debajo del Observatorio Astronómico de Munich, asimilando el fenómeno a un caso pseudo-continuo. El astrónomo inglés A.G. Airy (1868) efectuó experiencias similares con líneas telúricas de gran longitud-varias decenas de kilómetros- en los alrededores de la ciudad de Rugby, en Inglaterra. En las conclusiones de su trabajo, Airy señala que este género de estudios podría tener mucha importancia en el futuro.

En 1903, Van Bemmelen (1908) obtiene las primeras tablas de valores para el cociente de amplitudes de campos geoelectricos y geomagnéticos en función del período. Para la captación de corrientes telúricas emplea líneas telegráficas de 300 y hasta 500 km. de longitud en la isla de Java. En su trabajo están incluidas por primera vez consideraciones geológicas sobre los resultados.

Entre 1934 y 1946, la escuela japonesa obtiene dos fórmulas expresadas como desarrollos en serie. Las dos fórmulas permanecen independientes, lo que impidió en gran medida obtener una solución práctica del problema. Las referencias son, M. Hirayama (1934); (1936) y T. Rikitake (1946).

### Etapa de la Formulación Básica de la Magnetotelúrica

En 1950, T. Rikitake (1950) y A. Tichonov (1950) publican en forma independiente la solución para el problema de dos capas, las cuales si bien contienen lo esencial, resultan poco cómodas para su puesta en práctica.

En 1950/53, L. Cagniard (1953a) y (1953b) encuentra en forma elemental las dos fórmulas que constituyen el caso límite de la solución ya propuesta por la escuela japonesa.

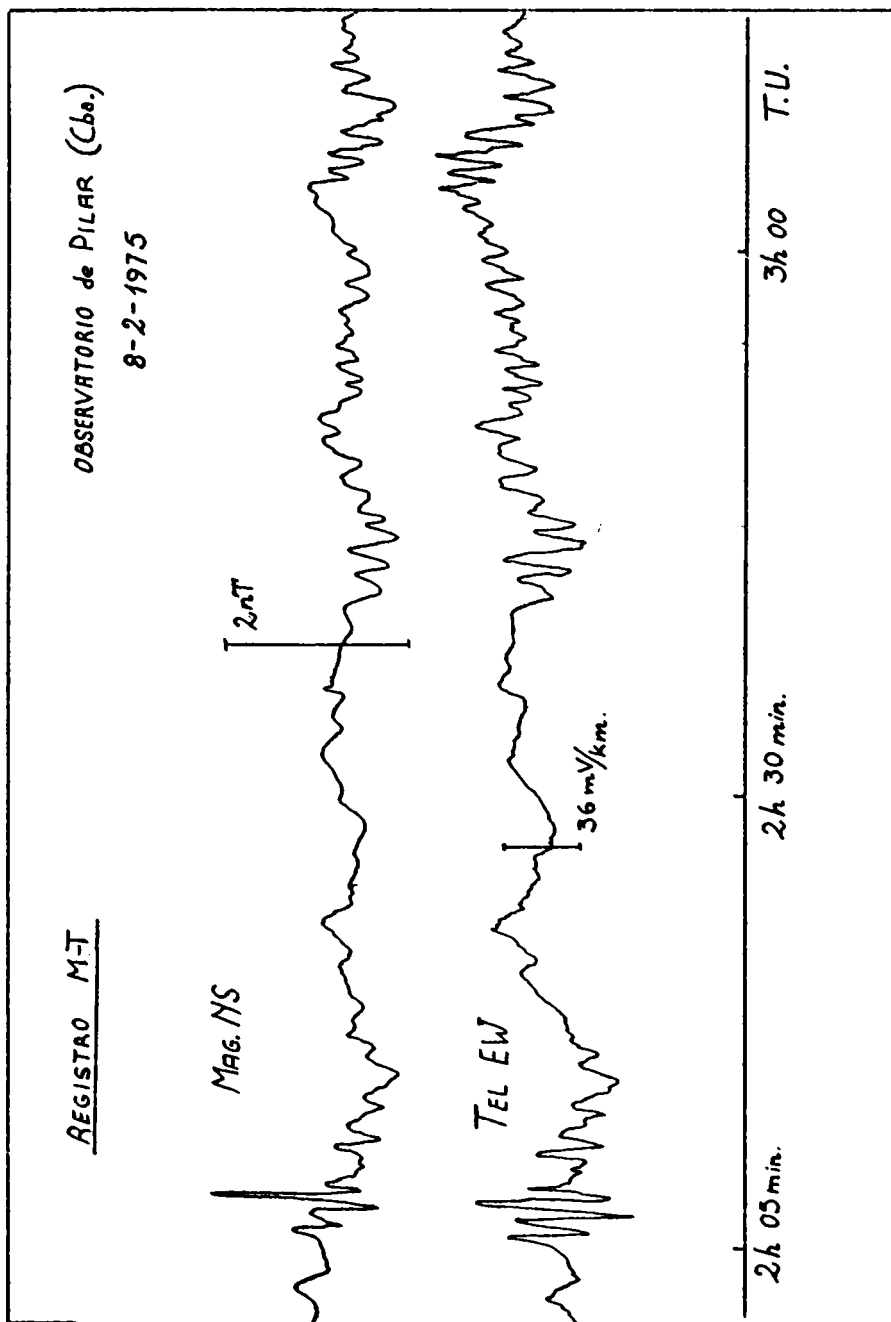


Figura 1: Ejemplo de registro magnetotelúrico. Puede apreciarse la similitud morfológica entre ambas señales, telúrica y magnética.

La originalidad de la presentación está en asociar a un sistema de dos ecuaciones no lineales con cuatro parámetros, lo esencial de la teoría,

$$\rho = 0.2T (E/H)^2 \quad h = \frac{\sqrt{10 \rho_+ T_+}}{8}$$

donde, en la primera expresión,  $\rho$  es la resistividad aparente en Ohm m.,  $T$  es el período de la variación considerada (supuesta armónica) en segundos,  $E$  es la amplitud de la variación del campo eléctrico, según una dirección dada, expresada en milivolts por kilómetro,  $H$  la amplitud de la variación del campo magnético expresada en Gammas, según una dirección perpendicular a la anterior. La segunda expresión se refiere al uso del ábaco para el problema de dos capas, donde  $h$  es la profundidad de la interfase entre las dos capas,  $T_+$  es el período correspondiente a la "cruz del ábaco" y  $\rho_+$  es la resistividad aparente en esta misma posición de la "cruz del ábaco".

El método M.T. fue patentado por L. Cagniard para su utilización en la exploración de cuencas sedimentarias, L. Cagniard (1953).

#### Epoca de Transición

Este período podemos ubicarlo en la aparición de la tesis de T. Cantwell (1960) en el M.I.T., donde la limitación del método de Cagniard, que se aplica a estratos planos, homogéneos e isótropos - caso extremadamente infrecuente en la práctica - es superada por la introducción de una formulación tensorial.

Este tratamiento permite abordar el estudio de estructuras con un eje de simetría cilíndrica.

Existe una publicación de H. Fournier (1969), en castellano, acerca del desarrollo histórico de los conocimientos magnetoteléuricos que contiene 320 páginas con 1750 referencias bibliográficas.

#### Epoca Actual

En su aplicación actual, la teoría habitualmente empleada es la llamada Magnetoteléurica Tensorial, que permite el tratamiento de estructuras con un eje de simetría cilíndrica. Hasta 1975, se conocen han sido publicados 58 modelos bidimensionales resueltos, referentes a los modelos estructurales más comunes (falla, dique, capas buzantes, cilindros enterrados etc.). La recopilación de los mismos puede encontrarse en el excelente texto de G. Poserndorfer (1975). A los fines de dar un panorama, forzosamente incompleto, pueden mencionarse cinco escuelas entre las más importantes:

1) Toronto, Canadá, con el Prof. Garland y el Dr. Niblett, en actividad desde hace 18 años. La primera tesis publicada fue la de T. Webster (1957) y la última la de R. Kurtz (1976).

2) Edmonton, Canadá, con el Prof. Rankin, con diez años de actividad, especializada en la redacción de programas de análisis tensorial.

3) Texas, U.S.A., inicia sus publicaciones en 1960. Las principales referencias son: F.X. Bostick, H.W. Smith (1961); W. Sims, F. Bostick (1969).

4) Sopron, Hungría, iniciada hace diez años, con el Dr. A. Adam. El mayor esfuerzo ha sido dirigido al estudio de la cuenca Pannoniana, combinando todos los métodos geofísicos, lo que constituye un "modelo en su género". Una recopilación de la actividad realizada se encuentra en el volumen editado por A. Adam (1976).

ABAQUE DES SOLUTIONS DU SYSTEME  $\rho = 0.2 T \left( \frac{E}{H} \right)^2, h = \frac{\sqrt{10^9 T}}{g}$   
 (etablies en suivant la méthode L. Cagniard)

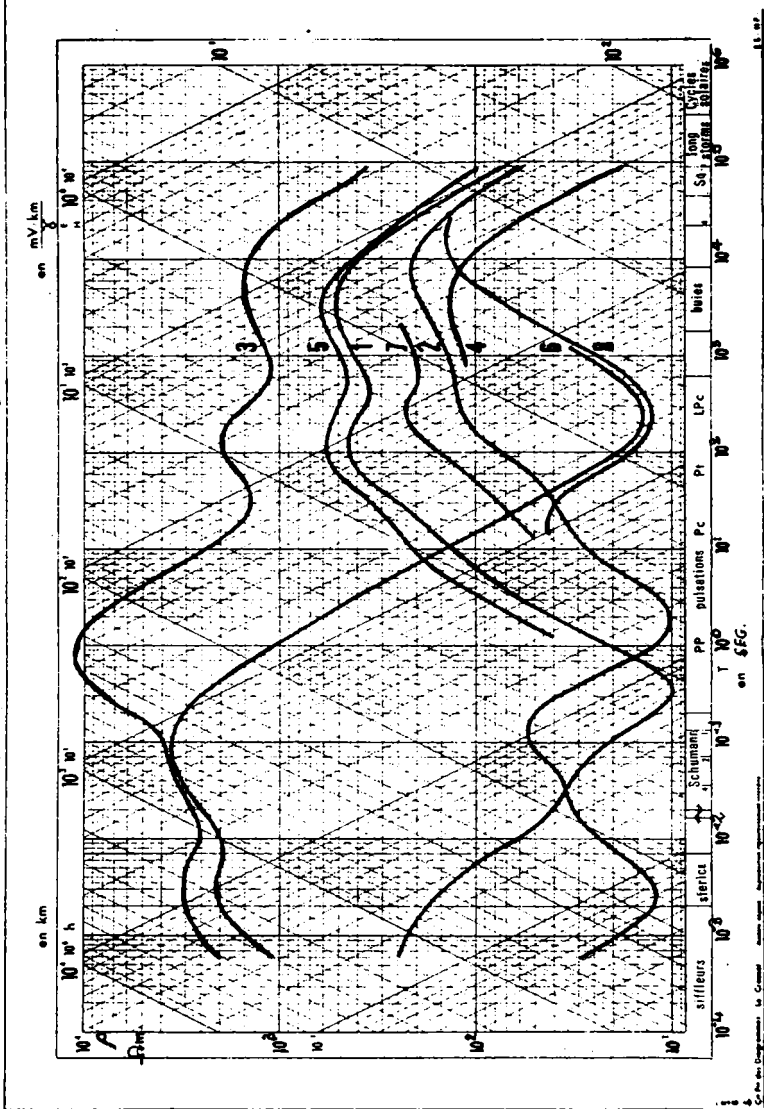


Figura 2: Curvas de sondajes magnetotelúricos realizados en la cuenca de París y sus alrededores. 1 Garchy en Nivernais, sobre un sedimentario poco espeso y basamento inclinado (1962); 2 Chambon l. Forêt, sobre un sedimentario de 3 km. de espesor y sobre la anomalía magnética de la cuenca de París (1966); 3 Planchaz du Morvan, sobre granito en el centro del horst cristali no del Morvan (1967); 4 Parc St. Maur, sobre un sedimentario de por lo menos 2 km. de espesor (1970); 5 Nozay en Dunois, sobre un cubierta sedimentaria delgada, isotrópica y homogénea (1972); 6 St. Aubin des Ormeaux, sobre el macizo granítico de Mortagne, en el borde de desenganche del arco america no sur (1973); 7 La Tuillerie en Berry, sobre un sedimentario poco espeso y la anomalía magnética de la cuenca de París (1974); 8 Gottingen, sobre sedi mentario, en el borde del graben de Leinetal, en Alemania del Norte (1959 y 1975).

5) Moscú, U.R.R.S., con el Prof. Berdichevsky, han dirigido un gran esfuerzo al estudio teórico de estructuras cilíndricas más y más complicada. Este grupo ha realizado un gran número de trabajos de terreno. Una importante referencia reciente es M. Berdichevsky, V. Dimitriev (1976). Un resumen de la actividad de esta escuela se halla en A. Adam (1976).

Todos estos grupos trabajan simultáneamente en aplicación para la prospección de petróleo y en ciencias generales. Esta fecunda dualidad es facilitada por la posibilidad de emplear, en ambos campos, técnicas totalmente similares y aún el mismo instrumental.

En U.S.A., K. Vozoff (1972) trabaja en magnetotelúrica para petróleo.

La Compagnie General de Geophysique de Francia, trabaja en prospección M.T., algunos casos históricos, concernientes a exploración petrolífera, están comentados en una nota técnica de esta empresa.

La Unión Soviética ha empleado el método M.T. en exploración de petróleo, en 1963 declaró una actividad de 20 meses-comisión, en 1968 esta cifra se elevó a 180 meses-comisión.

Una estimación, basada en los autores de trabajos recientes en el área, arroja una cantidad aproximada de 300 científicos trabajando en el tema, sea a tiempo parcial o completo.

#### ALGUNOS PROBLEMAS INTERESANTES EN M.T.

La técnica de exploración M.T. ha dado lugar, en los últimos veinte años a través del mundo, a un flujo creciente de trabajos que conforman un buen paquete de producción científica. Una expresión de ello lo constituye la realización bi-anual del Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, organizado por la International Association of Geomagnetism and Aeronomy (I.A.G.A.) que constituye en evento especializado en el área, juntamente con los métodos geomagnéticos diferenciales. Los que han sido realizados son: New Castle, Inglaterra en 1972, Ottawa, Canadá en 1974, Sopron, Hungría en 1976 y el previsto para 1978 en Göttingen, Alemania.

En la Figura 2 se muestra, H. Fournier, Y. Benderitter y J. Febrer (1976) la síntesis de los resultados obtenidos para la cuenca de París y sus entornos por sondaje M.T. profundo. Del conjunto de resultados se extraen las siguientes conclusiones como valores medios: la primera Capa Conductora Intercalada (C.C.I.) se extiende entre los 35 a 45 km. de profundidad, la segunda C.C.I. entre los 110 a los 180 km. La capa resistiva de la corteza alcanza 25.000 Ohm. m. como mínimo. La primera capa resistiva del manto superior tiene un valor de alrededor de 2.000 Ohm. m. y la segunda resistiva del orden de 1.000 Ohm. m. La capa conductora última (porque hasta el presente el período diurno marca un límite para el método) se ubica con su techo a 640 km. de profundidad.

El cotejo de resultados provenientes de diferentes métodos geofísicos, para la solución de un mismo problema, es el mejor control sobre la validez de las conclusiones. El autor adhiere a esta filosofía, la que ha tratado de llevar a la práctica donde ha sido posible.

#### Comparación de los Resultados M.T. con los de Sondaje Eléctrico Vertical

El sondaje M.T. sobre el macizo granítico de Mortagne sur Sevre, H. Fournier, Y. Benderitter, J. Febrer (1973) y (1975), fue realizado sobre

el mismo emplazamiento donde la Compagnie General de Geophysique llevó a cabo, con motivo del Año Geofísico Internacional, un Sondaje Eléctrico Vertical (S.E.V.) con el dispositivo Schlumberger. En este sondaje se llegó hasta una abertura AB/2 igual a 35 Km., Migaux L., Astier J., Revel P. (1960). En la Figura 3 se reproduce la curva de resistividad aparente publicada para este S.E.V. En la Figura 4, se muestra la curva M.T. obtenida para este lugar y el modelo de interpretación S.E.V., transferida al gráfico M.T. de acuerdo a su corte geoelectrico. En general se observa un buen acuerdo; el fenómeno conductor, que es fuertemente acusado, aparece claramente en ambas si bien hay diferencias en la posición de su techo.

#### Comparación de los Resultados M.T. con los de Sísmica por Explosión en Francia

En 1971, el Instituto de Física del Globo de París, Francia, juntamente con el Instituto de Geofísica de la Universidad de Karlsruhe, R.F.A., iniciaron la realización de una serie de perfiles sísmicas en Francia.

En la Figura 5 se han representado los resultados del perfil de velocidades obtenido a partir de estos estudios, tomado de L. Steinmetz, A. Hirn, G. Perrier (1974), junto con los resultados disponibles M.T., sintetizados por H. Fournier, Y. Benderitter, J. Febrer (1976). Se observa, comparando los cortes sísmico y geoelectrico, un remarkable acuerdo entre la posición de las capas de baja velocidad sísmica (Low velocity Layers, L.V.L.) con las capas conductoras intercaladas (C.C.I.).

Puede observarse también que el contraste en la velocidad sísmica, que define las L.V.L. de su medio circundante es del orden del 5% para el modo lo presentado. Para la resistividad eléctrica, el mismo contraste que permite definir las C.C.I. es de por lo menos dos órdenes de magnitud. Finalmente cabe agregar que una interpretación para la primera L.V.L. en base a los resultados sísmicos ha sido propuesta por Y. Bettinga, A. Hirn, L. Steinmetz (1973).

La segunda L.V.L. es interpretada como asociada al dominio de la Astenosfera, lo que es coincidente con la interpretación que sugiere la segunda C.C.I.

#### Exploración M.T. de cuencas sedimentarias intercaladas por un estrato de basalto

Es bien conocido que la presencia de un horizonte de lavas o basaltos produce una inversión en la ley de velocidades, lo que es fuente de dificultades en la exploración sísmica.

La resistividad de los basaltos es en general elevada con respecto a la de las sedimentitas. La energía electromagnética atraviesa así el estrato resistivo sin sufrir una atenuación considerable, permitiendo tomar información del resto de la columna sedimentaria por debajo del basalto. En otras palabras, un estrato de basalto entercalado en la columna sedimentaria, por su carácter de resistivo, juega el papel de una "barrera transparente" para el método M.T..

La precisión en la determinación del espesor sedimentario, que es esperable obtener es del orden del diez por ciento. Este valor es similar al que se consigue en el caso que no existen intercalaciones de basalto.

Un trabajo, concierne a la factibilidad de la aplicación del método M.T. a esta situación geológica particular, es presentado en esta misma



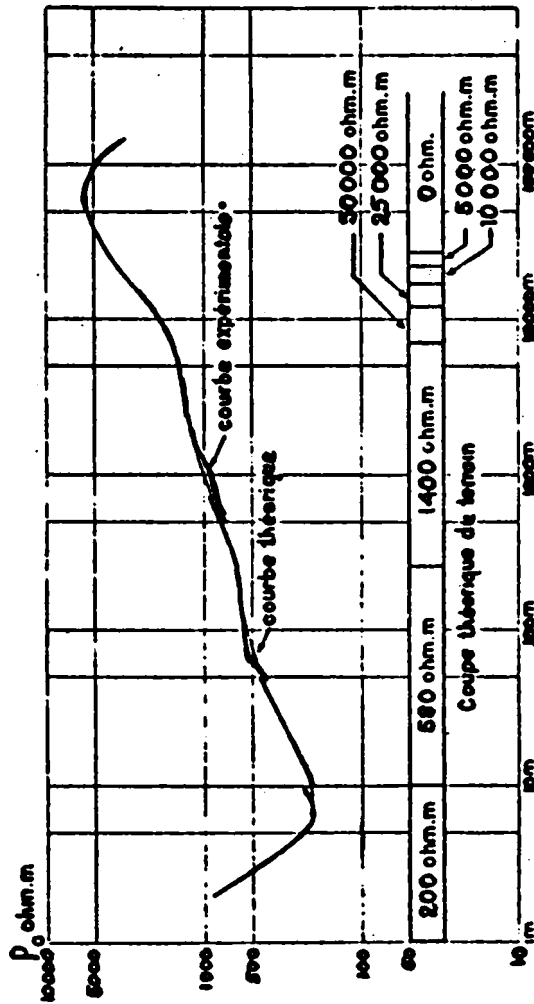


Figura 3: Curva del Sondaje Eléctrico Vertical, con el dispositivo Schlumberger, sobre el macizo granítico de Mortagne. Realizado por la Compagnie General de Geophysique, tomado de L. Migaux et al. (1960). La abertura máxi ma para  $AB/2$  fué de 35 km.

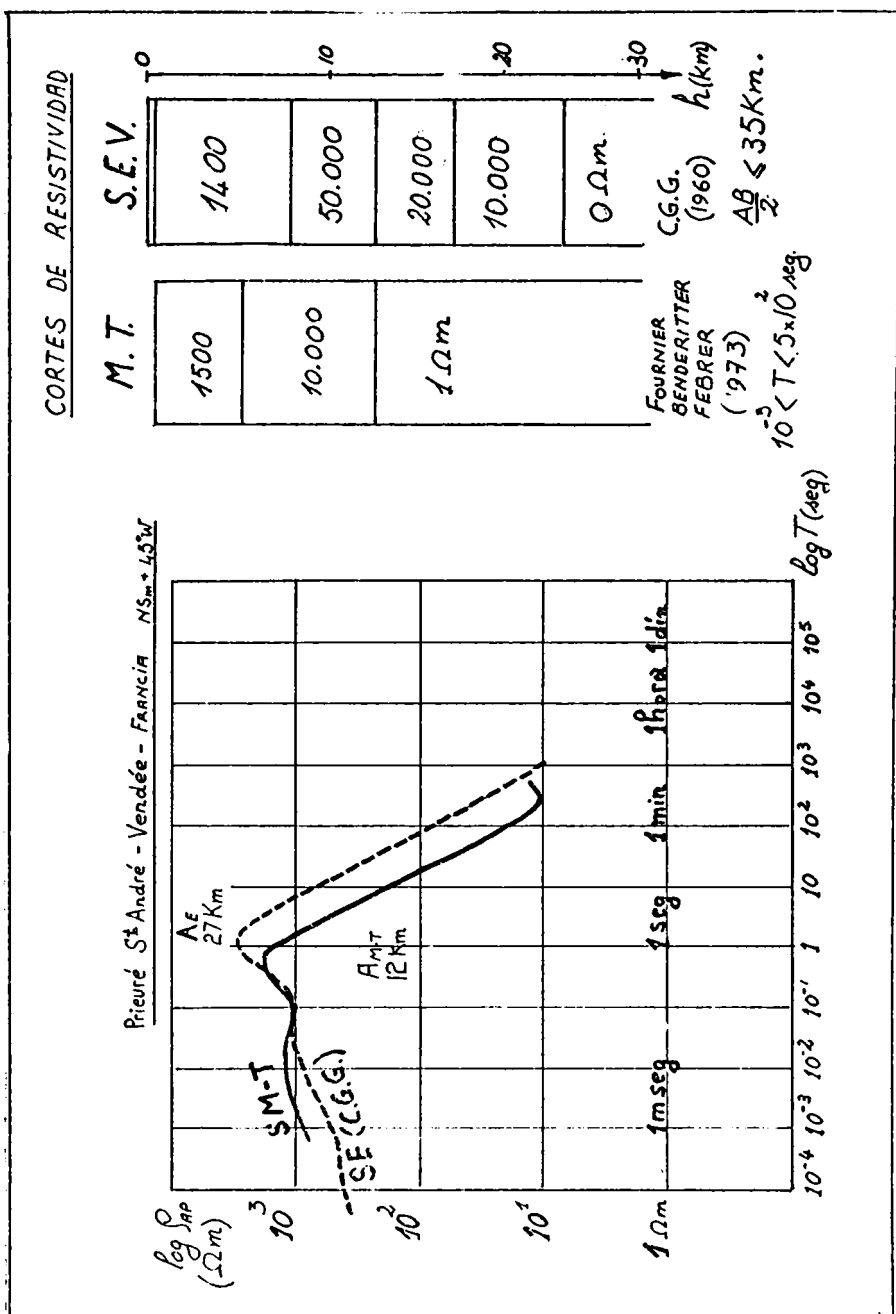


Figura 4: Sondaje magnetotelúrico sobre el macizo granítico de Mortagne, en línea llena. En línea de trazos la transposición del S.E.V. de la C.G.G., ya citado, de acuerdo a su corte geoelectrico, en el gráfico M.T. El corte geoelectrico para el sondaje eléctrico es solo esquemático, ver Figura 3.

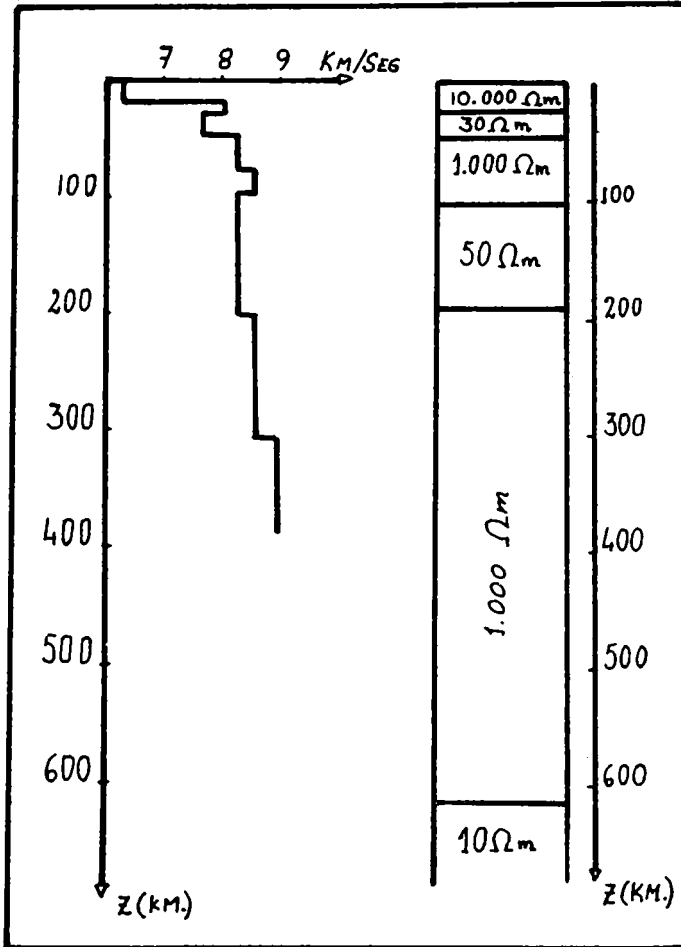


Figura 5: Perfil de velocidades sísmicas, obtenido por estudios de sismica de refracción en Francia, tomado de L. Steinmetz et al (1974). A la derecha se ha representado el corte geoelectrico obtenido por el método M.T., tomando en cuenta los sondajes realizados sobre la cuenca de París y sus alrededores.

Reunión por el grupo del Observatorio Nacional de Física Cósmica, J. Febrer, J. Demicheli, E. García (1976).

### Dispersión de Resultados Magnetotelúricos

La dispersión de valores de resistividad aparente en el método M.T. muestra un comportamiento anómalo, en el sentido que la dispersión resultante es mayor que la prevista de acuerdo a los errores de medición. Esto sugiere que la teoría actual es perfectible.

Sin embargo, dentro de la teoría actualmente practicada, los resultados de la interpretación de los sondeos muestran una buena correlación con los hechos geológicos y estructurales. Esto incluye la experiencia de veinte años de trabajo, durante los cuales cientos de investigadores han realizado miles de sondeos.

Con el fin de obtener la mayor fidelidad a partir de los datos en una experiencia M.T., han sido propuestos varios criterios. Si sobre los datos disponibles se imponen criterios restrictivos para su inclusión efectiva, tales como más o menos elevado nivel de coherencia entre las señales magnética y telúrica, se logrará una mayor fidelidad sobre los datos individuales; pero al disminuir la población de datos - a menos de contar con una enorme cantidad de registros - se debilitará la posibilidad de un tratamiento estadístico. Un término medio, a definir, que permita una selección de calidad a través del nivel de coherencia, permitiendo conservar la posibilidad de un tratamiento estadístico, parece surgir como una solución de compromiso en el momento actual.

En base a los datos de dos sondeos M.T., el realizado en Planchez du Morvan, H. Fournier, Y. Benderitter, J. Febrer (1973) y el de Nozay en Du-nois, H. Fournier, J. Rossignol (1973), donde se disponía de abundancia de datos, se llevó a cabo un examen estadístico de la dispersión. El análisis muestra, H. Fournier, J. Febrer (1976), que la distribución es unimodal en cada una de las bandas de período analizadas, ver Figura 6. Otra conclusión, también perceptible sobre la misma figura, es que la distribución resulta simétrica cuando se utiliza una escala logarítmica para la representación.

La comparación numérica realizada entre dos hipótesis: a) Gaussiana en escala natural y b) Gaussiana en escala logarítmica (distribución log-normal); por medio del test Chi cuadrado es ampliamente favorable a la hipótesis b). La tabla de valores resultante se muestra en la Figura 7.

Mediante una técnica de deslizamiento de los valores medios, realizada en computadora, puede construirse una única curva para la dispersión de un sondeo dado, lo que permite enriquecer la población estadística. El resultado es manifiestamente gaussiano para las variables logarítmicas, Figura 8.

Una de las conclusiones prácticas es que el promedio y la dispersión standard serán estadísticamente más estables si se toman para el cálculo los logaritmos de la resistividad aparente, más bien que los valores naturales.

Con respecto al método las conclusiones son que sus valores medios responden a la teoría, la dispersión si bien excede a la prevista, es tratable y con ciertos recaudos como los mencionados su influencia puede ser reducida.

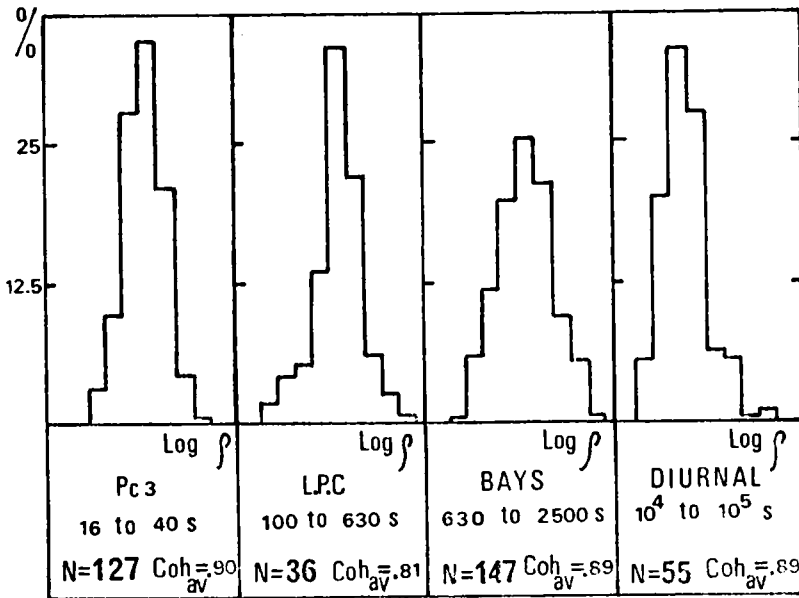


Figura 6: Histogramas de la dispersión de valores de resistividad aparente para el sondaje M.T. de Nozay en Dunois. La escala de abscisas es logarítmica y contiene los valores de resistividad aparente. En ordenadas, se ha representado el porcentaje de ocurrencia de cada valor de resistividad aparente. N representa el total de puntos experimentales tomados en cuenta. Coh<sub>av</sub> representa el valor medio de la coherencia entre las señales telúricas y magnética.

NOZAY				PLANCHEZ			
LOG $\rho$		$\rho$		LOG $\rho$		$\rho$	
ACCEP	REJ	ACCEP	REJ	ACCEP	REJ	ACCEP	REJ
23	2	11	14	17	2	10	9
92%	8%	44%	56%	89%	11%	52%	48%
$\bar{U}=7.7$		$\bar{U}=18.4$		$\bar{U}=6.6$		$\bar{U}=15.5$	

Figura 7: Aplicación del ensayo de Chi Cuadrado para determinar la más probable, entre la distribución Gaussiana de los valores naturales de la resistividad aparente (Hipótesis  $\rho$ ) y la de distribución Gaussiana de los logaritmos de resistividad aparente (Hipótesis log  $\rho$ ). La hipótesis puede ser aceptada dentro del nivel de rechazo del 5% si  $U < 14$ . Se analizan los casos de Nozay y Planchez du Morvan.

Una causa, contribuyente a la dispersión citada es debida a los cambios, que se producen en forma aleatoria, en el ángulo formado por el eje de polarización de la onda electromagnética incidente - vale decir en la fuente - con el eje de la estructura del subsuelo.

#### Aplicación del método M.T. a Estudios sobre Geotermia

Las posibilidades de aplicación de esta técnica geofísica al estudio del estado térmico del interior de la tierra y flujo geotérmico se viene desarrollando desde más de diez años a esta parte. Un gran volumen de trabajo ha sido dirigido a la corteza y manto superior, para tratar de explicar las condiciones térmicas observadas en determinadas áreas y su vinculación con las fases de actividad tectónica.

Más recientemente se ha incorporado otra línea de investigación, dedicada al estudio eléctrico del subsuelo en yacimientos geotérmicos. El interés en este caso está en los primeros cientos de metros de profundidad.

El desarrollo de resistímetros M.T. para frecuencias altas (la resonancia de Schuman y sus armónicas) ha resultado la herramienta apta para estos estudios. Mediante el empleo de filtros electrónicos el análisis M.T. se realiza en tiempo real. Un ejemplo de aplicación de esta técnica al área de Lardarello, Italia, A. Dupis, V. Iliceto (1974), muestra las posibilidades de reconocer en el contraste eléctrico las características estructurales de la zona.

En cuanto a los estudios profundos, las técnicas M.T. han conducido al descubrimiento de capas conductoras intercaladas en la base de la corteza y manto superior. La profundidad de estas C.C.I., ha sido establecido, guardan relación con la posición e influencia de la Astenosfera y el flujo térmico desde el interior.

A través del estudio de numerosos sondajes, en Europa y otros lugares del mundo, H. Fournier (1970) sugiere la existencia de una C.C.I. en el manto superior que podría tener carácter global.

Una recopilación, de más de diez años de investigaciones en esta línea en el Este y Centro de Europa y la U.R.S.S., se halla en el excelente volumen editado por A. Adam (1976).

La dependencia de la resistividad eléctrica de algunas rocas, principales constituyentes del manto, con la temperatura pueden verse en la Figura 9, tomada de Ch. Oelsner (1976). Un incremento brusco, ocurre en la conductividad eléctrica de una roca en estado de fusión parcial, cuando se alcanza el límite de concentración de la fase líquida para la cual el líquido envuelve las partículas sólidas formando una estructura pelicular continua. Esto puede ocurrir para concentraciones del fluido del 2%, L. Feldman (1976). Al alcanzar estas condiciones, la conductividad eléctrica puede incrementarse entre 100 a 1000 veces; asimismo se incrementa la conductividad térmica como resultado de la convección de la fase líquida. Un posterior aumento en la proporción de la fase líquida no causa un efecto apreciable en la conductividad eléctrica, lo que contribuye a definir un límite neto de la zona conductora, A. Agaminov (1976).

La hipótesis de fusión parcial de los constituyentes del manto superior es una teoría basada sobre evidencias geológicas, petrológicas, geofísicas y tectónicas de aceptación generalizada. La conductividad eléctrica

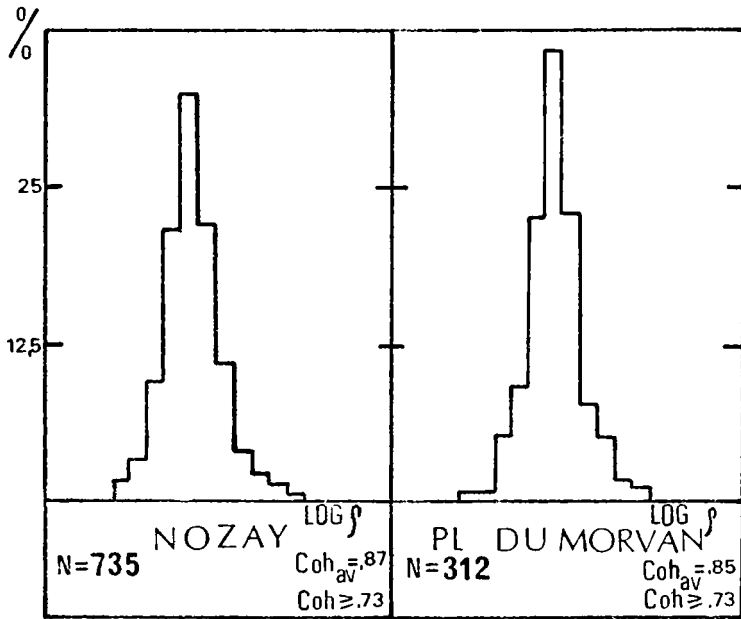


Figura 8: Histograma para la dispersión de los valores de resistividad aparente para todo el conjunto del sondaje. En abcisas el logaritmo de la resistividad aparente, en ordenadas el porcentual de ocurrencia. N es el total de puntos tomados en cuenta. La Coh., es la coherencia entre las señales telúrica y eléctrica.

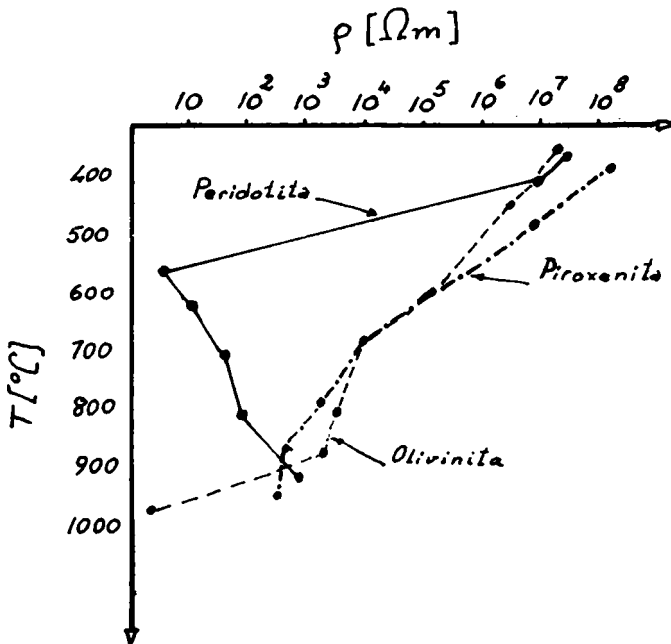


Figura 9: Dependencia con la temperatura de la resistividad eléctrica de olivinita, piroxenita y peridotita. Tomado de Ch. Oellsner (1976).

parece resultar una de las propiedades más sensibles, relativamente sencilla de medir, para detectar estas capas o zonas en estado de fusión parcial en el manto superior.

#### INSTRUMENTAL

Experiencias M.T. pueden llevarse a cabo con un equipamiento básico, muchas veces ya disponible en un Observatorio geomagnético, que permiten obtener resultados de sumo interés.

Si se trata de obtener eficiencia, en trabajos de exploración intensiva, la inversión en equipamiento merece una atención especial. Para cubrir estas necesidades se dispone al presente de equipos altamente confiables, livianos y de bajo consumo, capaces de ser operados por baterías durante largos períodos de tiempo.

Una estación M.T. consta básicamente de los siguientes elementos: a) Magnetómetros variómetros para las dos componentes horizontales, siendo deseable contar con la componente vertical. b) La instalación de líneas telúricas y eventualmente amplificadores para las mismas. c) El equipo de registro. A esto se agregan elementos auxiliares: reloj, filtros de banda y auxiliares de comprobación.

El espectro de amplitudes, eléctrica y magnética, esperado es ilustrado en forma indicativa en la Figura 10. La misma está tomada de R. Serson (1973), referencia a un extenso artículo sobre instrumentación geomagnética.

Podemos definir para fines prácticos dos bandas de registro: 1) La Banda Lenta, incluyendo variaciones desde algunos minutos hasta el período hasta el diurno. 2) La Banda Rápida, desde un segundo de período hasta algunos minutos. Entre los magnetómetros que han sido utilizados en experiencias M.T., podemos citar algunos de uso más difundido.

Para la Banda Lenta:

- \* Magnetómetros variógrafos de imán suspendido. (Tipo La Cour, Askania o similares.)
- \* Magnetómetros de tipo Flux-Gate.
- \* Magnetómetros de imán suspendido, con lazo de realimentación.
- \* Magnetómetros protónicos o de bombeo, con separación de componentes.

Para la Banda Rápida:

- \* Grandes espiras con núcleos de aire.
- \* Barras magnetométricas con núcleos de  $\mu$ -metal, en diversas versiones: fluxométricas, con amplificación electrónica, con amplificación galvanométrica.

La longitud usual de las líneas telúricas es del orden de 200 metros. Los electrodos más simples, de un comportamiento aceptable, están constituidas por una cinta de plomo, enterrados algunos decímetros. Un sistema de oposición cumple el papel de contrarrestar la tensión galvánica continua que pudiera existir.

El potencial entre electrodos se amplifica convenientemente, para adaptar el nivel de señal a la entrada del registrador.

Los equipos de registro que han sido utilizados por el orden de su a-



parición son:

- \* Fotográficos.
- \* Cinta magnética analógica.
- \* Cinta magnética, digital, del tipo usado en las grandes computadoras.
- \* Cinta magnética digital, del tipo "minicassette".

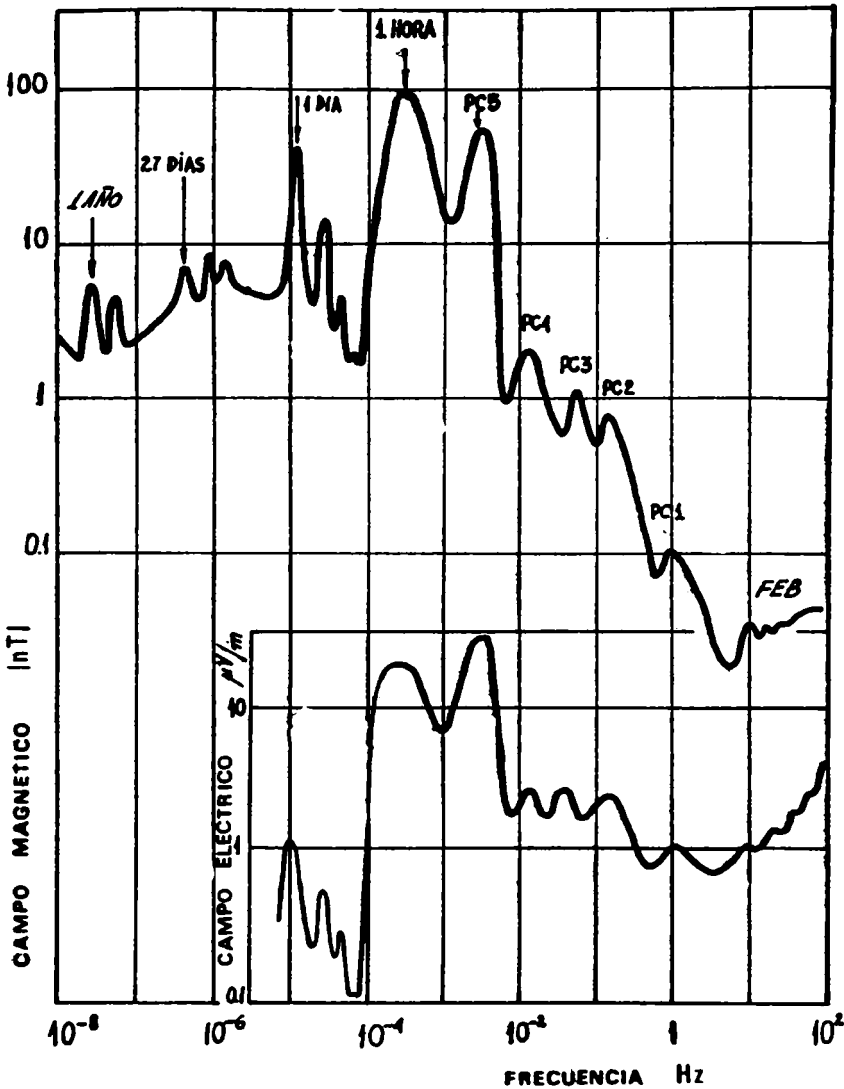


Figura 10: Espectro de amplitudes para variaciones magnéticas. Se trata de promedios, válidos para latitudes medias. El espectro para la amplitud de la variación eléctrica supone la existencia de un subsuelo con resistividad uniforme de 10 Ohm m. Tomado de R. Serson (1973).

## B I B L I O G R A F I A

- AGAMIŃOV, A., ASHIROV, V., DUBROVSKY, G., 1976: Deep magnetotelluric surveys in Turkmenia and Azerbaijan; in *Geoelectric and Geothermal Studies*. K.A.P.G. Geophysical Monographs, Budapest, Hungary, 1976.
- AIRY, G.B., 1968: Comparison of magnetic disturbances recorded by self-registering magnetometers at the Royal Observatory, Greenwich, with magnetic disturbances deduced from the corresponding terrestrial galvanic currents recorded by self-registering galvanometers of the Royal Observatory; *Phil. Trans.* XVII, 466-472, plates XXV-XXX.
- ADAM, A., 1976: *Geoelectric and Geothermal studies (East-Central Europe and Soviet Asia)*; Editor in chief A. Adam, K.A.P.G. Geophysical Monograph, Akademiai Kiado, Budapest, 1976, 752 pag., 93 co-authors.
- BERDICHEVSKI, M.N., 1960: Fundamentals of the theory of magnetotelluric profiling; *Appl. Geophys.* (URSS), 28 pp. 70-91.
- BERDICHEVSKI, M.N., 1962: Perspectives du profilage magnétotellurique. *Prospection et protection du sous-sol*. B.R.G.M., 1962/2, Paris.
- BERDICHEVSKI, M.N., DIMITRIEV V.I., 1976: Distortion of magnetic and electrical fields by near-surface lateral inhomogeneities; Moscow State University, Faculty of Geology and Computing Centre, Moscow, URSS, p. 48.
- BOSTICK, F.X., SMITH, H.W., 1961: An analysis of magnetotelluric method for determining sub-surface resistivities; *Electrical Engineering Research Laboratory, The University of Texas, Austin, USA, Report n. 120*.
- BOSTICK, F.X., SMITH H.W., 1962: Investigation of large scale inhomogeneities in the Earth by magnetotelluric method; E.E.R.L., the University of Texas, Report n.127, Austin USA.
- BOSTICK, F.X., SMITH, H.W. 1962: Investigation of large scale inhomogeneities in the Earth by magnetotelluric method; *Proc. I.R.E.*, 50. n.11, pp. 2339-2346.
- ECTTINGA, Y., HIRN, A., STEINMETZ, L., 1973: Implications de l'existence d'un canal a moindre vitesse sous le Moho. *Bull. Geolog. France*, (7), XV, 1973, n.5-6.
- CAGNIARD, L., 1953: Procédé de prospection géophysique; *Service de la Propriété Industrielle, Ministère de l'Industrie et de la Energie, Gr. 8. cl. 1, n.1. 25.683, 1-6 Avril 1953. (Déposé le 6 Octobre 1950)*.
- CAGNIARD, L., 1953: Principe de la methode magneto-tellurique, nouvelle methode de prospection géophysique; *Ann. Géophys.*, 9, n.2, pp. 95-125.
- CAGNIARD, L., 1953: Basic theory of magnetotelluric method of geophysical prospecting; *Geophysics*, 18, n.3, July, pp. 605-635.
- CANTWELL, T., 1960: Detection and analysis of low frequency electromagnetic signals; *Ph.D. Thesis, Dept. of Geophysics and Geology, M.I.T., Massachusetts, USA*.
- COMPAGNIS GENERAL de GEOPHYSIQUE. *La methode magnetotellurique*, 37 pag.
- DUPIS, A., ILLICETO, V., NORINELLI, A., 1974: First magnetotelluric measurements on Lardarello site; *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. XVI, n.62-63, pp. 137-152, Giugno Settembre.
- DUPIS, A., ILLICETO, V., 1974: An example of rapid magnetotelluric investigation of faulted structures, the Carboli area (Lardarello-Italy); *Bo*

- Lletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. XVI, n.62-63, pp. 125-136, Giugno-Settembre.
- FEBRER, J., DEMICHELI, J., de O'NEIL M.B., GRECO, S., 1975: *Un magnetómetro con realimentación de flujo y amplificación galvanométrica*; Octava Reunión de la A.A.G.G., Salta, Abril 1975.
- FEBRER, J., DEMICHELI, J., GARCIA, E., 1976: *Las colaças de basalto en las cuencas sedimentarias. Posibilidades del método magnetotélúrico*; Nove-na Reunión de la A.A.G.G., Bs.As., Octubre 1976.
- FELDMAN, I., 1976: *On the nature of conductive layers in the crust and the upper mantle*; in *Geoelectric and Geothermal Studies*, K.A.P.G., Geophysical Monographs, Budapest, 1976.
- FOURNIER, H.G., 1969: *Ensayo histórico sobre los conocimientos magnetotélúricos*; Publicaciones del Observatorio del Ebre, Memoria n.13, Roquetas (Tarragona), España. Traducción de Mercedes B. de O'Neill, 1750 referencias, 320 pág.
- FOURNIER, H.G., 1970: *Contribution au developpement de la methode magnetotellurique notamment en vue de la determination des structures profondes*. These Doctorat d'Etat. Faculté des Sciences de l'Université de Paris.
- FOURNIER, H.G., BENDERITTER, Y., FEBRER, J., 1973: *The Vendée Magnetotelluric sounding*; First Meeting of the European Geophys. Soc., Zurich, Suiza, September 1973.
- FOURNIER, H.G., BENDERITTER, Y., FEBRER, J., 1973: *The Morvan Magnetotelluric sounding*; Second Assembly of the I.A.G.A., Kyoto, September 1973.
- FOURNIER, H.G., FEBRER, J., 1974a: *Sur la disperssion de resultats magnetotelluriques*; Deuxieme Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Pont a Mousson, Avril 1974.
- FOURNIER, H.G., FEBRER, J., 1974b: *Sur l'aspect gaussien dans l'espace-log de la dispersion d'un type de resultats magnetotelluriques*; Second Work-shop on Electromagnetic Induction in the Earth, Ottawa, Canadá, Agosto 1974.
- FOURNIER, H.G., FEBRER, J., 1974c: *Homologie probable de résultats sísmiques et magnetotelluriques en Europe Occidentale*; Second Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Ottawa, Canadá, Agosto 1974.
- FOURNIER, H.G., BENDERITTER, Y., FEBRER, J., 1975: *Sondage Magnetotellurique sur le massif granitique de Mortagne-sur Sevre.*, C.R. Acad. Sc. Paris, t. 280, serie B, 141-143.
- FOURNIER, H.G., BENDERITTER, Y., FEBRER, J., 1976: *Synthese geostructurale graphique en espace-log des sondages magnetotelluriques profonds realises dans le Bassin de Paris et son environnement*; 4e Reunion Annuelle des Sciences de la Terre, 13-16 Avril, Paris.
- FOURNIER, H.G., FEBRER, J., 1976: *Compared relative variation of the magnetotelluric standard deviation*; Third European Geophysical Meeting, 7-10 September, Amsterdam.
- FOURNIER, H.G., FEBRER, J., 1976: *Caussian character of the distribution of magnetotelluric results working in log-space*; Physics of the Earth and Planetary Interiors, 12, 359-364.
- FOURNIER, H.G., FEBRER, J., 1976: *Sondaje Magnetotélúrico profundo en el Observatorio Geomagnético de Toledo (España)*; 2a. Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, 13-17 diciembre, Barcelona.

- FOURNIER, H.G., FEBRER, J., 1976: *Le sondage magnetotellurique profond a l'Observatoire Geomagnetique de l'Ebre a Roquetas pres Tortosa en Catalogne*; INAG, *Geodynamique de la Mediterranee Occidentale et de ses Abords*, 14 et 15 octobre, Montpellier.
- HIRAYAMA, M., 1934: *On the relations between the variations of earth potential gradient and terrestrial magnetism*; *Jrn. of the Meteorological Society of Japan*, Sec. Ser. 12, n.1, 16-22, Tokyo, January. (en japonais).
- HIRAYAMA, M., 1935: *On the earth potential gradients induced by the magnetic variations in the anisotropic earth Crust*; *Jrn. of the Meteorological Society of Japan*, Sec. Ser. 13, n.10, 456-465, Tokyo, October, (en japonais).
- KATO, Y., KIKUCHI, T., 1950: *On the phase difference of earth currents induced by the changes of the Earth's magnetic field (Part I)*; *Tohoku Univ. Sc. Rep.*, Ser. 5, Geophysics, 2, n.1, March, 139-141.
- KATO, Y., KIKUCHI, T., 1950: *On the phase difference of earth currents induced by the changes of the earth's magnetic field (Part II)*; *Tohoku Univ. Sc. Rep.*, Ser. 5, Geophysics, 2, 142-145.
- KURTZ, R.D., GARLAND, G.D., 1976: *Magnetotelluric measurements in Eastern Canada*; *Geophys. J.R.Astr. Soc.* 45, 321-347.
- KUTAS, R., GORDIENKO, V., 1972: *The heat field of the Carpathians and some problems of geothermics*; *Protsesov Nauka*, Moscow.
- LAMONT, J., 1862: *Der Erdstrom und der Zusammenhang desselben mit dem Magnetismus der Erde*; Leipzig.
- MADDEN, T., SWIFT, C.M.Jr., 1969: *Magnetotelluric studies of the electrical conductivity structure of the crust and upper mantle*; *AGU Monograph* 13, *The Earth's Crust and Upper Mantle*, p. 469.
- MADDEN, T., NELSON, P., 1964: *A defense of Cagniard's magnetotelluric method*; *Project NR-371-401*, Office of Naval Research Geophysics Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 02139, 1-141.
- MIGAUX, L., ASTIER, J., REVOL, P., 1960: *Un essai de determination experimentale de la resistivite électrique des couches profondes de l'ecorce terrestre*; *Ann. Geophys.* 16, n.4, pp. 555-560.
- NIBLETT, E.R., SAYN-WITTGENSTEIN, C., 1960: *Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method*; *Geophysics*, 25, 998-1008.
- OELSNER, CH., 1976: *Vertical temperature distribution in the North-German-Polish sedimentary basin and its relation to the North-German-Polish conductivity anomaly*; in *Geoelectric and Geothermal studies*, KAPG Geophysical Monographs, Editor in chief A.Adam, Budapest.
- PORSTENDORFER, G., 1975: *Principles of Magneto-telluric Prospecting*; *Gebrüder Borntraeger*, Berlin-West, Stuttgart, 118 pages, 71 figures.
- RIKITAKE, T., 1950: *Electromagnetic induction within the Earth and its relation to the electrical state of the Earth's interior*; Part I (1). *Bull. of the Earthq. Int.*, Univ. of Tokyo, 28, 45-100.
- RIKITAKE, T., 1950: *Electromagnetic induction within the Earth and its relation to the electrical state of the Earth's interior*; Part I (2). *Bull. of the Earthq. Inst.*, Univ. of Tokyo, 28, 219-262.
- RIKITAKE, T., 1946: *notes on the electromagnetic induction within the Ear-*

- th; *Bull. of the Earthq. Res, Inst. Tokyo Imperial Univ. XXIV, parts 1-4, 1-9.*
- SECCHI, A., 1863: *Memorie dell'Osservatorio del Collegio Romano; Nuova Serie, nn. 11, 24 y sigu.*
- SECCHI, A., 1864: *Sur les courants de la terre et leur relation avec les phenomenes électriques et magnétiques; C.R. Acad. Sci., 58, 1181-1186.*
- SECCHI, A., 1877: *L'Astronomia in Roma nel Pontificate di Pio IX; Roma, pp. 11 y 43-50.*
- SELZER, E., 1957: *La methode "barre flux metre" d'enregistrement des variations magnetiques rapides; IGY Annals, part IV, Geomagnetism Instructions Manual, Pergamon Press.*
- SIMS, W.E., BOSTICK, F.X.JR., 1969: *Methods of magnetotelluric analysis; EGRL Tech. Rep. n.58, Univ. of Texas at Austin.*
- SERSON, R., 1973: *Instrumentation for induction studies in land; Physics of the Earth and planetary interiors, Vol. 37, n.1, Septiembre.*
- SIX, M., 1972: *Etude et realisation de stations portables d'enregistrement des variations géomagnétiques U.B.F.; note I.P.G., n.45, Avril 1972, Paris.*
- STEGENA, L., 1976: *Geothermics, magnetotellurics and tectonophysics of the Pamonian Basin; in Geothermal and Geoelectric studies, K.A.P.G. Geophysical Monographs, Budapest.*
- STEINMETZ, L., HIRN, A., PERRIER, G., 1974: *Réflexions sismiques a la base de l'asthenosphère; Annales de Geophysique, tome 30, n.2, 173-180.*
- TICHONOV, A.N., LIPSKAIA, N.V., 1952: *Terrestrial electric field variations, Doklady Akad., Nauk SSSR, Vol. 87, n.4, pp. 547-550.*
- TICHONOV, A.N., 1950: *Determination of electrical characteristics of deep strata of the Earth's crust; Doklady Akad., Nauk SSSR, Vol. 73, n.2, pp. 295-299.*
- VAN BEMMELEN, W., 1908: *Registration of earth currents at Batavia for the investigation of the connection between earth currents and force of earth magnetism. I part; Proceed. of January 25, Vol. 10, n.2, pp. 512-533. (communicated in the meeting of Dec. 28 1907) Kon. Akad. van Wetensch. te Amsterdam.*
- VOZOFF, K., SWIFT, C.M.JR., 1968: *Magnetotelluric measurements in the North German Basin; Geophys. Prosp., Vol. 16, p. 454.*
- VOSOFF, K., 1972: *The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins; Geophysics Vol. 37, n.1, February 1972, p. 98.*
- WAGENITZ, V., 1974: *Magnetotelluric map of the north part of West Germany; Institut für Geophysik, Münster, Westf., G.F.R.*
- WEBSTER, T.F., 1957: *An experimental investigation of telluric and magnetic phenomena; M.S. Thesis, Dept. of Phys., Univ. of Alberta, Edmonton, Canada.*
- WORD, D.R., SMITH, H., BOSTICK, F.X. 1969: *An investigation of the magnetotelluric tensor impedance method; EGRL Tech. Rep. n.82, Univ. of Texas Austin, Texas.*