

**Premières applications de la magnéto-tellurique
à la prospection pétrolière, géologique ou minière
de diverses régions métropolitaines**

A. DUPIS

Ricevuto il 4 Gennaio 1971

RÉSUMÉ — L'auteur a commencé ses recherches en Géophysique Appliquée en 1961 dans le cadre d'une thèse de 3ème Cycle. Ce fut un travail de collaboration qui s'est poursuivi et qui continue encore avec notamment Y. Benderitter. Le but fixé était de développer un appareillage et une technique pour appliquer la prospection magnétotellurique dont seuls les principes théoriques avaient été énoncés par le Professeur Cagniard.

Cette nouvelle méthode de prospection repose sur le fait qu'entre les variations harmoniques d'une période bien définie du champ électrique et du champ magnétique naturels il existe une relation qui fait intervenir la conductibilité électrique du sol. Il en résulte que si inversement l'on mesure ces variations électromagnétiques et qu'on isole dans le spectre continu de ces variations une période bien déterminée on connaît ainsi la résistivité du sol. La résistivité calculée, dite résistivité apparente, est une moyenne des résistivités dans le volume pratiquement intéressé par la distribution des courants telluriques. C'est ainsi que les variations rapides, en raison du *skin effect*, n'ont qu'une faible pénétration et que la résistivité calculée pour les courtes périodes est une résistivité des terrains superficiels. A mesure qu'on isole des périodes de plus en plus grandes la pénétration augmente et apporte des enseignements sur la résistivité des couches les plus profondes avec possibilité d'atteindre facilement le socle des bassins sédimentaires très profonds.

Les appareils qui auraient permis de mesurer avec une précision suffisante les variations en question n'existaient pas, il a fallu les concevoir et les réaliser. De même il a fallu concevoir et réaliser, avant qu'ils soient disponibles sur la marché, les dispositifs d'analyse spectrale permettant de séparer des bandes étroites de n'importe quelle période arbitrairement choisie. Nos premiers appareils ont pu dès 1962 faire l'objet d'un test sur un permis métropolitain de la S.N. Repal. Cette première campagne de 14 sondages avait donné des résultats en accord avec les mesures sismiques d'alors et les forages.

A la suite de ce test la S.N. Repal chargea l'un de ses ingénieurs, M. Musé de poursuivre, avec notre collaboration initiale, cette expérimentation avec de gros moyens financiers, et de l'appliquer en particulier à l'étude des périmètres algériens d'Hassi Messaoud. Et l'on sait les excellents résultats obtenus qui permirent pour la première fois, dans des conditions qui étaient particulièrement favorables, de mettre en évidence la présence d'eau salée de gisement, c'est-à-dire de localiser par là les parties pétrolifères.

De son côté la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine s'inspirant des réalisations de notre équipe développa un appareillage que cette société eut l'occasion d'appliquer avec succès à ses recherches de pétrole, en Australie notamment. Dans le même temps les Russes utilisaient la prospection magnéto-tellurique sur une grande échelle ainsi que plus tardivement les grandes compagnies internationales américaines, pour des essais.

Pour sa part l'équipe du Centre de Recherches Géophysiques poursuivait cette mise au point en élaborant un appareillage véritablement opérationnel ainsi que des méthodes d'interprétations adéquates.

Pour apporter la preuve péremptoire de l'efficacité réelle de la méthode il convenait d'effectuer des prospections plus étendues et plus démonstratives que le premier test cité plus haut. C'est ainsi que furent entreprises des prospections pour l'Entreprise de Recherches et d'Activités Pétrolières, pour la Compagnie Française des pétroles, pour la Société E.S.S.O. Rep et pour le Commissariat à l'Énergie Atomique, sans compter une cartographie du socle dans les environs de la station de Garchy.

D'un commun accord Benderitter et l'auteur ont convenu de présenter deux thèses issues de cette collaboration. Y. Benderitter a déjà traité de l'« Enregistrement des phénomènes magnéto-telluriques pour la prospection géophysique » en 1968. Dans la thèse actuellement soumise au jury l'auteur, dans une courte introduction, rappelle brièvement les principes mêmes de la méthode magnéto-tellurique et la description très sommaire des appareils. Il aborde ensuite la question des mesures sur le terrain, du dépouillement des enregistrements et de l'interprétation par abaques pour deux ou pour trois terrains et par abaque auxiliaire et de lieux de crois. Il étudie à l'aide d'exemples le pouvoir de résolution de la méthode comparativement à celui de la technique du sondage électrique.

Il expose ensuite les résultats des différentes prospections effectuées, prospections qui présentent un très grand caractère de diversité tant par la nature même du problème posé que par l'étendue de la zone explorée, par l'espacement des stations les unes par rapport aux autres, que par la profondeur d'investigation nécessaire dans chaque cas. Chacune de ces pros-

pections donne lieu à une interprétation géologique que l'auteur discute soigneusement. La discussion met en lumière la contribution que peut et doit apporter la magnéto-tellurique tant au stade de la pré-reconnaissance qu'à celui des études de détail. Elle fait apparaître en conclusion quels sont les problèmes que la méthode peut prétendre à aborder avec succès, seule ou en complément des méthodes géophysiques classiques.

SUMMARY. — The author started his geophysical researches in 1961. This work has been carried out with several scientists and especially up to now with Dr. Y. Benderitter. The main purpose was to develop a technique and an equipment in order to apply the theory of Professor Cagniard of the magneto-telluric method.

This new survey tool is based upon the relationship for a given period between the harmonic variations of the electrical (telluric) field and the magnetic field. This relationship is a function of the ground conductivity. Conversely, by measuring the variation of the electromagnetic field, the ground conductivity can be estimated. Owing to the skin effect, the short period variation have a shallow penetration and the calculated resistivity is the resistivity of the superficial layers. By considering longer and longer periods the depth of penetration is increased and one gets informations on deeper layers and it is possible to reach easily the basement of very deep sedimentary basins.

The first equipment has been tested in 1962 on an oil concession of S. N. REPAL in the South West of France. This test survey of 14 MT soundings gave results which fit quite well with the results of seismic surveys and drillings.

To prove the efficiency of the method it was advisable to carry out much more measurements with an improved equipment relatively to the first test. Then, several surveys have been realised for *Entreprise de Recherches et d'Activités Pétrolières (E.R.A.P.)*, *Compagnie Française des Pétroles (C.F.P.)*, *ESSO-REP* and *Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A)* plus a basement mapping around the geophysical Research Center (C.R.G) in Garchy (France).

The author in the first part recalls briefly the theory of the magneto-telluric method, with a very short description of the equipment. Then he deals with the field measurements, and the compilation of the records. The second part deals with the interpretation of the results using the "two and three layers" master curves (partly computed and drawn by the author). A comparison of the resolving power between MT soundings and electrical sounding has been done.

Results of several surveys are presented in the third part. Of course they are all different mainly due to the size of the survey area, to the geological problem, to the spacing between MT soundings, to the depth of investigation required etc... In each survey the author tried to do a careful correlation between the geophysical results and the known geology. The discussion gives light on the contribution which shall bring the MT method either for a reconnaissance survey or for a detail survey.

In conclusion, it shows the problems which can be studied successfully by itself or in complement of other geophysical methods.

RIASSUNTO. — L'autore iniziò le sue ricerche geofisiche nel 1961. Il lavoro è stato svolto insieme a diversi scienziati, soprattutto col Dr. Y. Benderitter. Lo scopo principale è stato quello di mettere a punto una tecnica ed una attrezzatura che consentisse di applicare la teoria del metodo magneto-tellurico del Prof. Cagniard.

Questo nuovo strumento di rilevamento è basato sul rapporto, esistente per un dato periodo, tra le variazioni armoniche del campo elettrico (tellurico) e di quelle del campo magnetico. Tale rapporto è una funzione della conduttività del terreno. Viceversa, misurando la variazione del campo elettromagnetico si può stimare la conduttività del terreno. A causa dell'*effetto pelle* (skin effect), le variazioni di breve durata hanno una penetrazione poco profonda e la resistività calcolata è quella degli strati in superficie. Considerando dei periodi sempre più lunghi, aumenta la profondità di penetrazione e si ottengono informazioni sugli strati più profondi. Si può raggiungere facilmente la base di profondissimi bacini sedimentari.

La prima attrezzatura è stata provata nel 1962 su una concessione di petrolio della S.N. REPAL nella Francia Sud-occidentale. Il rilevamento di prova, condotto con 14 sondaggi MT, diede dei risultati che collimavano abbastanza bene con quelli ottenuti da perforazioni e rilevamenti sismici.

Per mettere alla prova l'efficienza del metodo era consigliabile effettuare molte più misurazioni con una attrezzatura migliorata rispetto alla prima. Sono stati così realizzati diversi rilevamenti per la Entreprise de Recherches et d'Activités Pétrolières (ERAP), la Compagnie Française des Pétroles (CFP), la ESSO-REP et il Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), nonché un rilievo di base intorno al Centro di Ricerche Geofisiche (CRG) di Garchy in Francia.

Nella prima parte l'autore ricapitola brevemente la teoria del metodo magneto-tellurico e dà una descrizione sommaria dell'attrezzatura. Tratta poi delle misurazioni di campo e della compilazione dei registri. Nella seconda parte passa all'interpretazione dei risultati adoperando le curve maestre di « due e tre strati », in parte da lui stesso calcolate e disegnate. È stato fatto un confronto tra il potere risolvete tra i sondaggi MT e quelli elettrici.

Nella terza parte si presentano i risultati di alcuni rilevamenti. Ovviamente sono tutti diversi, soprattutto a causa di alcune importanti differenze fra le quali l'estensione della zona da misurare, il problema geologico, le distanze tra i sondaggi MT, la profondità occorrente alla ricerca ecc. Per ogni rilevamento l'autore cerca di giungere ad una accurata correlazione tra i risultati geofisici e la geologia nota. La discussione mette in luce il contributo che darà il metodo MT sia per un rilevamento esplorativo, sia per un rilevamento dettagliato. In conclusione l'Autore dimostra quali siano i problemi che si possono studiare con buon esito solo con questo metodo o usando quest'ultimo a completamento di altri metodi geofisici.

S O M M A I R E

	Pages
RÉSUMÉ	145
INTRODUCTION	151

PREMIERE PARTIE

RAPPELS SUR LA THÉORIE ET SUR LA PRATIQUE DE LA METHODE MAGNÉTO-TELLURIQUE

CHAPITRE I: Rappel théorique	155
A) Théorie électromagnétique	155
B) Hypothèses de départ	157
C) Conséquences pratiques	158
CHAPITRE II: Aspect expérimental	160
A) Première esquisse d'un appareillage	160
B) Les phénomènes électro-magnétiques naturels	162
C) Les capteurs	162
D) Les chaînes de mesure	164
E) Etalonnages	166
F) Les mesures sur le terrain	167
G) Le déponillement des enregistrements	170
<i>a)</i> mesures d'amplitude sur le papier	170
<i>b)</i> mesures électroniques analogiques	172
<i>c)</i> importance de la durée d'enregistrement	174

DEUXIEME PARTIE

L'INTERPRETATION DES SONDAGES MAGNÉTO-TELLURIQUES

CHAPITRE I: Construction et utilisation des abaques	179
A) Abaques « Deux terrains »	179
B) Abaques « Trois Terrains »	181
C) Abaques de Croix	183
D) Abaque auxiliaire	192
CHAPITRE II: Autres aspects de l'interprétation	194
A) Calcul théorique des courbes de σ_a	194
B) Pouvoir de résolution	197
C) Les cas limites	200
D) Les sondages croisés	202
E) Les courbes de déphasage	203

TROISIEME PARTIE

RÉSULTATS DE PROSPECTIONS PÉTROLIÈRES GÉOLOGIQUES OU MINIÈRES

	Pages
CHAPITRE I: Prospections pétrolières	207
A) Une prospection de grande reconnaissance	207
1) introduction	207
2) situation géologique	207
3) données géophysiques et géologiques	208
4) les mesures	209
5) résultats de l'interprétation	211
a) cartes de ρ_a	211
b) discussions des résultats de quelques stations	214
c) les profils	215
6) erreurs possibles sur les résultats	217
7) conclusion	219
B) Prospection dans la région d'Istres	219
1) introduction	219
2) situation géologique	221
3) les mesures	224
4) résultats de l'interprétation	225
C) Prospection dans les Landes et dans les Basses-Pyrénées	232
1) permis de la S.N. Repal	232
2) région de Mimizan	236
3) région de Thèse	241
CHAPITRE II: Prospections géologiques	245
A) Prospection dans la région de Nice	245
B) Prospections dans les départements du Cher et de la Nièvre	250
1) introduction	250
2) situation géologique	252
3) les mesures	254
4) résultats de l'interprétation	256
5) un sondage M.T. sur le socle	258
6) anisotropie et sondages croisés	260
CHAPITRE III: Prospections minières	261
A) Introduction	261
B) Les bassins prospectés	261
C) Adaptation des méthodes d'interprétation	264
D) Le bassin de Rodez	268
E) Le bassin de Blanzy	271
F) Le bassin de Lodève	277
G) Conclusion	282
CONCLUSION	283
BIBLIOGRAPHIE	284

INTRODUCTION.

Le développement des applications de la méthode Magnéto-tellurique s'est considérablement accru depuis 1963 date à laquelle trois thèses de Troisième Cycle étaient présentées par Y. Benderitter, A. Dupis et B. Tiger du Centre de Recherches Géophysiques. A l'époque ce travail faisait le point des premières tentatives de prospection effectuées en France par cette nouvelle méthode. Depuis lors les travaux se sont multipliés dans le monde, on assiste en particulier à la création d'équipes s'intéressant à la méthode M.T. non plus comme à une curiosité mais comme à un moyen sérieux d'investigation du sous-sol. Il s'est ainsi développé un appareillage propre à la méthode bien que les solutions adoptées présentent de notables différences suivant les équipes, que ce soit au stade de l'acquisition des données ou au stade de leur traitement.

Le capteur magnétique à induction, dont l'emploi se généralise depuis qu'on a partout pris conscience de la nécessité d'étudier les variations rapides du champ électromagnétique naturel, est doté suivant les cas d'un petit nombre (30000) ou d'un grand nombre (plus de 500000) de spires bobinées autour d'un noyau perméable allongé. Dans le premier cas la sensibilité est faible mais on dispose d'une électronique à très faible bruit, dans le second cas qui est le nôtre (Benderitter 1968), la sensibilité du capteur et le bruit de l'appareillage sont tous deux plus élevés (20 fois) si bien que le rapport signal sur bruit ne change pas. Il semble cependant qu'il sera plus facile d'améliorer l'électronique dans le second cas grâce aux progrès rapides dont bénéficie la fabrication des transistors à effet de champ.

La résolution des problèmes posés par l'appareillage a permis dans un deuxième temps de multiplier les mesures avant de tenter de les exploiter complètement. L'aisance avec laquelle les travaux de terrain sont maintenant effectués a contribué à favoriser un développement rapide des travaux théoriques tendant à résoudre les problèmes posés par les structures complexes. Mais cette aisance qui est un gros avantage de la méthode M.T., s'est parfois retournée contre elle dans

l'esprit de certains. Les applications de la méthode leur paraissent en effet si délicates qu'ils ont pensé les réserver à de simples reconnaissances générales ou à la seule étude des structures profondes de la Terre. La bibliographie internationale mentionne en effet davantage d'études de structures complexes conduisant souvent à des résultats partiels, que d'exploitations intensives de la méthode pour la résolution de cas simples.

En fait si on apprécie mal le volume des études M.T. effectuées sur le terrain aux U.S.A. et au Canada, on sait l'importance qu'attribuent au profilage et au sondage M.T. les géophysiciens soviétiques (Alexeyev et al 1967). En France quelques prospections pétrolières ou minières ont été entreprises par l'équipe du Centre de Recherches Géophysiques, tandis que la S.N.P.A. et la S.N. Repal (Algérie) ont chacune de leur côté réalisé un appareillage en s'inspirant des réalisations présentées en 1963 par le C.R.G.

C'est maintenant le traitement de l'information qui fait l'objet d'études approfondies et ce n'est qu'en digitalisant les données que l'on peut espérer en exprimer les renseignements très complets qu'elles renferment implicitement. Ce stade très élaboré de l'exploitation de la méthode n'est pas encore atteint au C.R.G. C'est cependant le but des travaux qui sont actuellement poursuivis au laboratoire du Professeur Cagniard qui a préparé un nouveau mode de traitement des informations M.T.

PREMIÈRE PARTIE

RAPPELS SUR LA THÉORIE ET SUR LA PRATIQUE
DE LA METHODE MAGNÉTO-TELLURIQUE

CHAPITRE I. — RAPPEL THÉORIQUE.

A. *Théorie électro-magnétique.*

Il n'est certes pas utile de revenir en détail sur les principes de la méthode magnéto-tellurique (M.T.), et l'on se contentera d'un très bref rappel. Les études théoriques concernant les variations naturelles du champ électrique et du champ magnétique sont fort anciennes et remontent certainement dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle quand s'élabora la théorie électromagnétique de Hertz et de Maxwell, ce n'est cependant que vers les années 1950 que les idées se précisent.

Certains auteurs: Kato et Kikucki, Tikhonov établissent à cette date des relations susceptibles de résoudre les cas simples constitués par des modèles à deux terrains concernant des couches très puissantes (bassins sédimentaires très épais) ou très profondes (manteau). C'est le Professeur Cagniard (*) qui, à la même époque a proposé un nouveau procédé de prospection géophysique dans une étude plus élaborée que les précédentes, dont la parution n'aura lieu qu'en 1953. La méthode magnéto-tellurique (M.T.) dont il expose le principe permet en effet l'étude électrique du sous-sol pratiquement sans limitation de la profondeur d'investigation et quelqu'en soit le nombre de couches. Les équations de Maxwell ne conduisent pas d'emblée toutefois, aux formules de L. Cagniard. Il a fallu imposer certaines hypothèses simplificatrices en prenant pour la perméabilité μ une valeur égale à l'unité, en négligeant les courants de déplacement, en admettant l'uniformité des champs électrique et magnétique (sources lointaines) et la tabularité du sous-sol. Les équations de Maxwell pour un milieu homogène et isotrope s'écrivent, dans le système u.e.m. C. G. S.:

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = \text{rot } \vec{E} \quad [1]$$

(*) CAGNIARD L., *Procédé de prospection Géophysique*, Brevet d'invention française n° 1025683, demandé le 6 Octobre 1950, délivré le 28 Janvier 1953.

$$4 \pi \sigma \vec{E} + \frac{1}{\mu \Omega^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \text{rot } \vec{H} \quad [2]$$

$$\text{div } \vec{E} = 0 \quad \text{div } \vec{H} = 0. \quad [a]$$

Le milieu a une conductibilité σ , ainsi qu'une perméabilité μ que le géophysicien admet à juste titre comme égale à 1 dans le système C. G. S., et une constante diélectrique ϵ par rapport au vide.

Ω est la vitesse de phase des ondes électromagnétiques. Les équations [a] n'étant vraies que si l'on choisit des phénomènes harmoniques ce qui sera le cas.

Si on néglige les courants de déplacement l'équation [2] devient:

$$4 \pi \sigma \vec{E} = \text{rot } \vec{H}. \quad [3]$$

Si à la surface du sol on écrit que

$$E_x = \cos 2 \pi \frac{t}{T} \quad [4]$$

L'intégration des équations précédentes conduit à exprimer le rapport des amplitudes du champ tellurique et du champ magnétique par la relation suivante:

$$\frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{1}{2 \sigma T}} \quad [5]$$

et dans le sol on aura:

$$E_x = e^{-\frac{\pi}{p}} \left(\cos 2 \pi \frac{t}{T} - \frac{z}{p} \right) \quad p = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\rho T}. \quad [6]$$

Cette formule montre que le champ électrique et le champ magnétique subissent un amortissement exponentiel et un retard de phase lorsque la profondeur Z augmente. Ce phénomène connu sous le nom de *skin-effect*, traduit la concentration du courant tellurique dans les couches superficielles du sous-sol, concentration d'autant plus intense que la période T est plus courte et que la résistivité ρ est plus faible. P , la profondeur de pénétration, se définit comme la profondeur pour laquelle:

$$(E_x)_p = \frac{(E_x)_0}{e}.$$

C'est en partant des formules [5] et [6] que L. Cagniard a fondé sa nouvelle méthode de prospection. La première égalité permet le calcul de la résistivité $\rho = \frac{1}{\sigma}$ du sol à partir de l'enregistrement des valeurs du champ magnétique et du champ tellurique. La seconde, qui traduit le *skin-effect*, montre que la résistivité que l'on calcule intéresse des couches de terrain de plus en plus épaisses, quand on fait croître la période des variations M.T. étudiées, d'où la notion de sondage M.T.

B. Hypothèses de départ.

Avant d'envisager d'un peu plus près les conséquences pratiques de la théorie M.T. qui vient d'être résumée il est bon de revenir un peu sur les hypothèses émises au départ.

Les courants de déplacement semblent pouvoir être négligés pour autant que l'on ne s'adresse pas à des fréquences supérieures à 10⁷ Hz pour des valeurs courantes en géophysique de la conductivité et de la constante diélectrique (Chauveau 1965). Effectivement les mesures effectuées à 1000 Hz se raccordent parfaitement avec les valeurs obtenues à des fréquences plus basses. On a cependant pu douter de cette hypothèse lorsque certains résultats (Rocafort 1969) ne concordaient pas avec ceux qui étaient fournis par le sondage électrique (S-E). Les écarts observés pouvaient être justifiés si l'on accordait crédit à l'affirmation de Evjen (1948) par exemple, selon qui ϵ pouvait dépasser la valeur de 80 généralement admise comme maximale et atteindre 10⁷ à 10⁸. En fait cette divergence des mesures était due à un problème d'appareillage et sa modification a entraîné l'obtention de résultats concordants par la méthode M.T. et par celle du S.E.

L'uniformité du champ électromagnétique créé par des sources mal connues a été, par contre, beaucoup plus discutée. Dès 1954 Wait, puis plus tard Price (1962), présentaient des études fondées sur d'autres hypothèses concernant l'origine et les dimensions des sources ainsi que la distribution de la conductivité électrique dans le sous-sol. Si les conclusions de ces travaux avaient été vérifiées cela aurait conduit à limiter considérablement l'utilité de la méthode. Il ne semble pas heureusement, qu'il en soit ainsi et les études récentes prouvent plutôt l'intérêt grandissant que l'on porte à la méthode, même si son exploitation ne se révèle pas toujours aussi simple que prévu. Au surplus ces critiques visaient les applications de la méthode M.T. à la physique

du globe plutôt qu'à la prospection géologique principalement envisagée par L. Cagniard.

Enfin il est évident pour tous que la tabularité des couches géologiques n'existe guère que dans les hypothèses des méthodes géophysiques. La prospection des quelques zones tabulaires existantes offre d'ailleurs un intérêt limité. Les structures géologiques sont normalement plus ou moins complexes et c'est cette complexité qui a pu dérouter les premiers expérimentateurs de la méthode. En face de résultats inattendus beaucoup ont succombé à la tentation d'incriminer les hypothèses de départ; les courants de déplacement n'étaient pas négligeables, les sources étaient trop proches pour engendrer un champ uniforme ... on accusait rarement l'insuffisance de l'appareillage ou la structure du terrain. Or O.Brien et Morrisson (1967) ont justifié, par le calcul tensoriel, la divergence des courbes tracées en une même station pour des directions différentes et Musé (1969) obtient, sur une structure tabulaire, des valeurs de résistivité très précises (sans écarts, dans le temps, pour une période donnée).

C. Conséquences pratiques.

Examinons maintenant la méthode M.T. sous son aspect expérimental. La résistivité du sous-sol, tirée de la formule [5] s'écrira:

$$\rho = 2 T \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2 \quad \text{u.e.m c.g.s.} \quad [7]$$

soit dans le système pratique des géophysiciens dans lequel on exprime ρ en ohms-mètres (Ωm), T en secondes, E_x en millivolts par km (mV/km), H_y en gammas (γ)

$$\rho = 0,2 T \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2 \quad (\Omega\text{m} , s , \gamma , \text{mv/km}) . \quad [8]$$

Cette résistivité est celle d'un terrain homogène illimité vers le bas. Dans la réalité le sous-sol est composé de couches successives ayant chacune leur résistivité propre si elles sont homogènes et isotropes. On parle alors de résistivité apparente (ρ_a) et on substitue dans la formule [8] ρ_a à ρ . La résistivité apparente peut être considérée comme une moyenne des résistivités des couches qui se trouvent, par suite du *skin effect*, véritablement intéressées par la circulation des courants telluriques.

Dans le système d'unités retenu la profondeur de pénétration s'écrit:

$$P = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10 \varrho T} \quad (\text{km}, \Omega\text{m}, \text{s}). \quad [9]$$

Ainsi la résistivité apparente est-elle une fonction de T qui renseigne sur les résistivités moyennes des tranches superficielles de sol dont l'épaisseur est d'autant plus grande que la période est elle-même plus grande. A condition d'utiliser une gamme de périodes suffisamment large, on peut donc explorer électriquement les terrains sédimentaires sur toute leur épaisseur, si grande soit-elle.

L'opération qui consiste à évaluer ϱ_a en fonction de T est absolument semblable à celle qu'on fait en prospection électrique courante quand on mesure une résistivité apparente en fonction de la longueur de la ligne d'injection de courant, c'est-à-dire quand on fait un sondage électrique. D'où le nom de sondage magnéto-tellurique qu'on lui donne. Un sondage M.T. aboutit à la construction d'un diagramme bilogarithmique où les abscisses sont les logs \sqrt{T} et les ordonnées les logs ϱ_a .

On a supposé, dans l'exposé de la théorie, qu'on avait affaire à des variations rigoureusement sinusoïdales du champ magnétique et du champ tellurique. A vrai dire, les enregistrements font apparaître, de temps en temps, de véritables trains d'oscillations d'amplitude et de périodes assez régulières pour être assimilables à des sinusoides. Mais d'ordinaire, le caractère ondulatoire de l'enregistrement est fort irrégulier. Le spectre des variations M.T. est un spectre continu, d'où ressortent parfois quelques bandes spectrales relativement étroites et d'amplitude particulièrement marquée.

Le principe de la méthode reste sauf, cependant, à condition d'isoler dans les deux spectres continus, à l'aide de deux filtres identiques, une bande passante étroite, axée sur une période choisie. Dans ces conditions les oscillations enregistrées après filtration présenteraient l'aspect de deux sinusoides de période T dont il ne resterait qu'à évaluer les rapports d'amplitudes, si la bande passante était infiniment étroite. Mais alors, l'amplitude des oscillations filtrées serait elle-même infiniment petite. On choisira donc, en réalité, une bande passante assez large pour que l'amplitude des phénomènes filtrés ne devienne pas évanescence, assez étroite cependant pour que la proportionnalité des pseudo-sinusoides magnéto-telluriques ainsi obtenues demeure pratiquement rigoureuse.

CHAPITRE II. - ASPECT EXPERIMENTAL.

A. Première esquisse d'un appareillage.

Lorsque ce travail a été entrepris, en 1961, il n'existait pas d'appareillage apte à l'enregistrement et à l'analyse des très faibles signaux électromagnétiques naturels. La première tâche a donc consisté en l'adaptation à ces fins d'un équipement déjà partiellement constitué (Fournier 1960).

Pour les périodes T inférieures à 25s, le magnétomètre utilisé était du type à induction. Il était constitué d'un barreau de Mu-métal, de 2 m de long et de 3 cm de diamètre, sur lequel on enfilait des bobines, en nombre variable, faites d'un fil de cuivre émaillé de diamètre 0,13 ou 0,15 mm, comportant suivant le but à atteindre 150000, 360000 ou 675000 tours.

La ligne tellurique reliait simplement deux prises de terre faites d'un ou de plusieurs pieux de laiton.

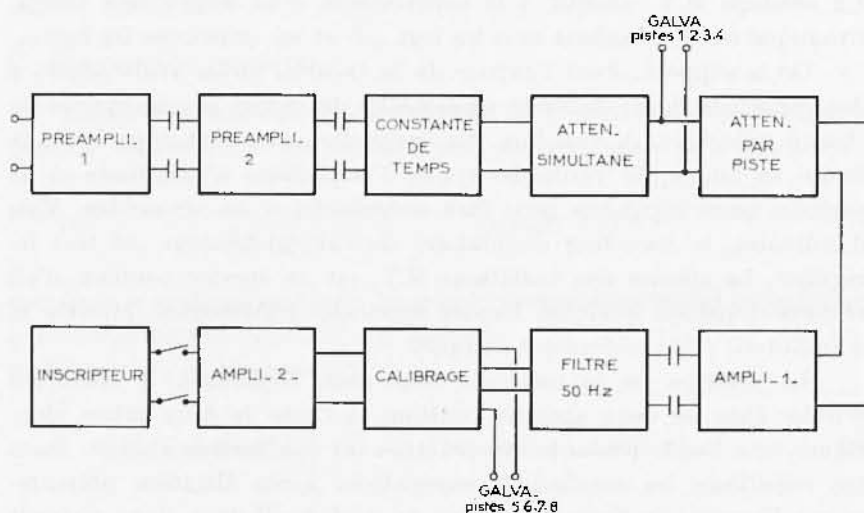


Fig. 1 - Schéma d'une chaîne de l'électroencéphalographe Reega VIII portable.

Pour amplifier les variations M.T. on se servait d'un électroencéphalographe ALVAR, du type REEGA VIII portable (Fig. 1). La bande passante la plus large allait de 0,014 à 0,9s. Les filtres, les constantes de temps ajustables autorisaient différentes bandes pas-

santes plus étroites. L'amplification permettait, vu le faible bruit de fond, d'enregistrer correctement des variations de potentiel de l'ordre du microvolt. Cependant l'impédance d'entrée devait être inférieure à 10 K Ω . D'où la nécessité d'adapter les impédances du capteur tellurique et du capteur magnétique.

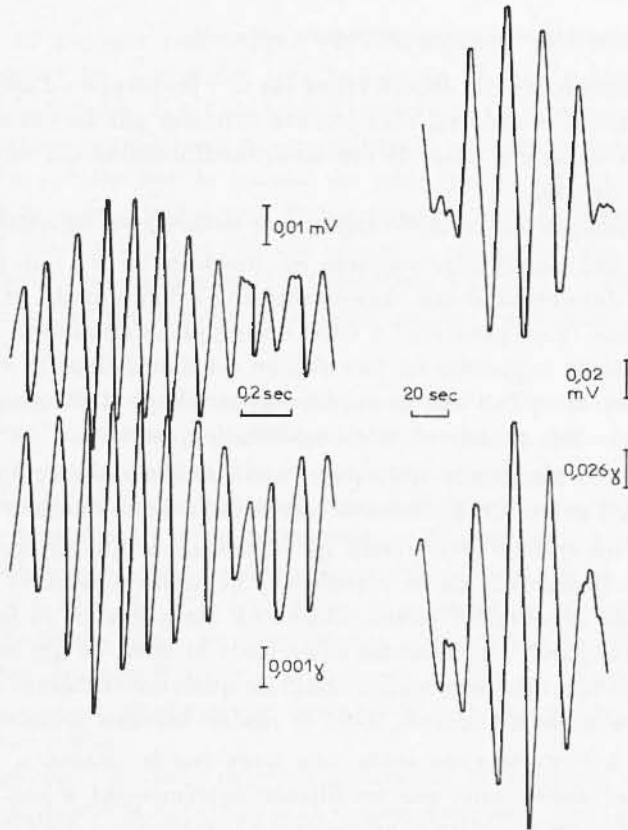


Fig. 2 - Exemples d'enregistrements filtrés obtenus à partir du Reega VIII.

L'enregistrement obtenu directement avec l'appareil ne servait qu'au contrôle des opérations, pour obtenir un bon document de travail (Figure 2) on préférait l'enregistrement photographique sur TELEEC ou sur suiveur de spot SEFRAM.

Un filtrage plus sélectif était obtenu au moyen de galvanomètres et de filtres interchangeables introduits entre l'amplificateur et l'enregistreur.

Pour les périodes supérieures à dix secondes on a parfois utilisé une balance magnétique H , de construction ASKANIA, munie d'une cellule photo-électrique différentielle. Pour ces périodes, les courants de sortie des capteurs attaquaient directement les galvanomètres du SEFRAM.

B. Les phénomènes électromagnétiques naturels.

Les conclusions des études faites sur ce « prototype » d'appareillage sont présentées ci-dessous, elles ont été exposées par Benderitter dans sa thèse. On parlera aussi de certaines modifications qui ont pu être apportées depuis.

Les phénomènes magnéto-telluriques naturels se caractérisent par:

— une amplitude, variable en fonction de T , qui peut être très faible dans certains cas: une dizaine de $\mu\text{V}/\text{km}$ pour E_x et quelques milligammes ($\text{m}\gamma$) pour H_y . A titre d'exemple, l'amplitude moyenne des oscillations exploitées en une station est donné dans la Figure 40, en fonction de \sqrt{T} . C'est pourquoi l'appareillage doit posséder une dynamique assez grande et une amplification poussée.

— une amplitude qui, pour une période donnée, varie d'un moment à l'autre. Ce phénomène est typiquement fluctuant.

— un spectre très étendu de périodes, en fait un spectre continu, dont il convient de ne retenir que la partie répondant aux profondeurs de pénétration souhaitables. En conséquence, la bande passante de l'appareil est délimitée entre 0,01s et 900s, ce qui correspond à une profondeur de pénétration allant de quelques centaines de mètres à une dizaine de kilomètres, dans le cas de terrains sédimentaires.

— à l'intérieur de cette très large bande passante, il faudra sélectionner après coup, par un filtrage extrêmement sélectif, les différentes périodes discrètes T nécessaires à l'établissement du diagramme expérimental.

C. Les capteurs.

— Les capteurs nécessaires à la détection de ces phénomènes sont les suivants:

1) Le capteur tellurique est constitué de deux prises de terre distantes de 200 à 500 mètres. On recueille ainsi quelques μV à quelques mV suivant la période T , le lieu, l'activité solaire du moment. Chaque

prise de terre comprend une ou plusieurs électrodes en laiton de 5 cm de diamètre et de 50 cm de long.

Les variations de tension dues à la polarisation de ces électrodes sont négligeables, d'abord parce qu'elles sont très petites dans la gamme étudiée et ensuite parce qu'on peut les atténuer en arrosant les prises de terre avec une solution saturée de sel.

2) Le capteur magnétique est évidemment plus complexe. Il doit convertir les variations très faibles du champ magnétique en variation de tension. Il est du type à induction. Ce système, favorable pour les faibles périodes, est encore utilisable pour les périodes les plus élevées du spectre car le niveau du phénomène naturel augmente fortement en même temps que T et compense ainsi la diminution de sensibilité que présente le capteur quand T augmente. La sensibilité obtenue (sans préamplificateur) est d'environ $3 \mu\text{V/m}\gamma$ à 1 Hz pour un capteur dont les dimensions et le poids restent raisonnables (1,50 m et 35 kg).

Le capteur lui-même comprend un noyau de Mu-métal à haute perméabilité magnétique (barre feuilletée creuse de 150 cm de long et de 3×3 cm de section, garnie de flasques à ses deux extrémités) sur lequel est enfilé un bobinage composé de soixante dix bobines totalisant 560000 tours de fil de 10/100 mm de diamètre. L'impédance de ce capteur peut atteindre des valeurs très élevées car la résistance ohmique est déjà de 270 K Ω . Pour transporter le signal jusqu'au camion-laboratoire sous une impédance convenable, le capteur est équipé d'un préamplificateur à transistors à effet de champ. Le préamplificateur ne consomme que quelques mA et une petite pile suffit à son alimentation.

L'étude des variations magnéto-telluriques de fréquence supérieure à 100 Hz nécessite la définition d'un nouveau capteur. Sur la Figure 3, on peut voir la tension que l'on obtiendrait aux bornes d'un capteur à induction de sensibilité $1 \mu\text{V/m}\gamma$ à 1 Hz pour des oscillations d'amplitude égale au spectre moyen proposé par Bleil en 1964. On voit que le capteur décrit ci-dessus serait assez sensible pour détecter des signaux de fréquence comprise entre 10^{-3} et 10^4 Hz, mais il est en fait limité, vers les variations rapides par sa fréquence propre (34 Hz). On aura donc intérêt à lui substituer un autre capteur. Pour conserver le même rapport signal/bruit (avec une électronique équivalente) ce capteur devrait avoir les caractéristiques suivantes: longueur du noyau 80 cm, section $1,5 \times 1,5$ cm, flasques de diamètre 15 à 20 cm aux deux extré-

mités, 25000 spires, $N_0 = 1000$ Hz. Si l'on ne veut pas étudier des fréquences supérieures à 500 Hz on pourra utiliser avantageusement un capteur plus court et plus léger: longueur 40 cm, section $0,8 \times 0,8$ cm, flasques de 7,5 cm de diamètre, 160000 spires, $N_0 = 350$ Hz. Il faut remarquer que tout progrès quant au niveau de bruit des transistors à effet de champ permet de réduire l'encombrement et le poids des capteurs et, en général d'augmenter leur fréquence propre.

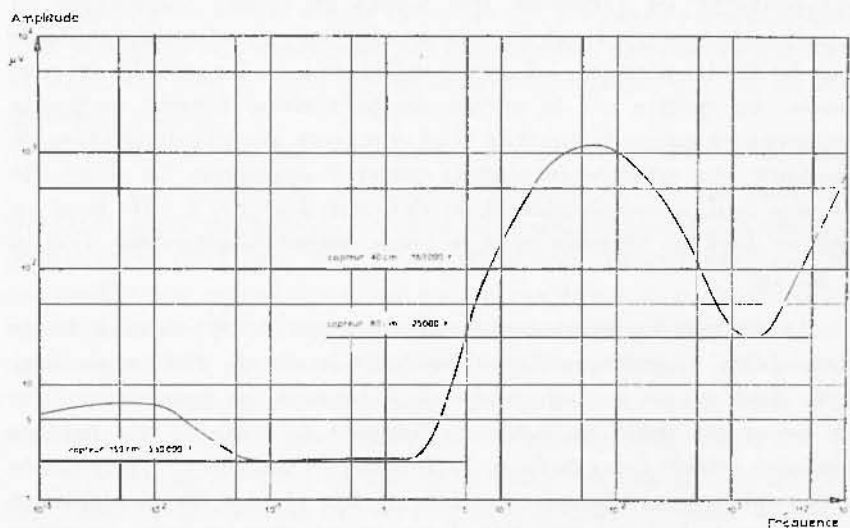


Fig. 3 — Réponse d'un capteur magnétique à induction, de sensibilité $1 \mu\text{V}/\text{m}\gamma$ à 1 Hz, au spectre moyen de l'activité géomagnétique d'après BLEIL 1964.

D. Les chaînes de mesure.

L'ensemble de l'appareillage, placé dans le camion laboratoire comporte deux chaînes de mesure de façon à étudier les deux composantes telluriques (E_x et E_y) et les deux composantes magnétiques horizontales (H_x et H_y).

Chaque chaîne (Figure 4) de mesure est équipée:

— d'un système d'amplification comportant un préamplificateur à gain réglable suivi d'un amplificateur. Le gain maximum total peut atteindre 10^6 environ.

— d'un préfiltrage de façon à remédier au manque de dynamique de certains appareils. En effet l'amplitude des phénomènes

dépend à un tel point de la période, que les périodes à grande amplitude risqueraient de saturer l'enregistreur magnétique tandis que les périodes moins favorisées seraient noyées dans le bruit de fond. C'est pourquoi les périodes caractérisées par des amplitudes comparables sont réparties suivant les gammes ci-après :

0,01s-0,25s; 0,25-4s; 4s-60s; 60s-900s

Un même rack groupe le préfiltrage et l'amplification, ainsi qu'un filtrage spécial pour l'élimination du secteur et une compensation de composante continue.

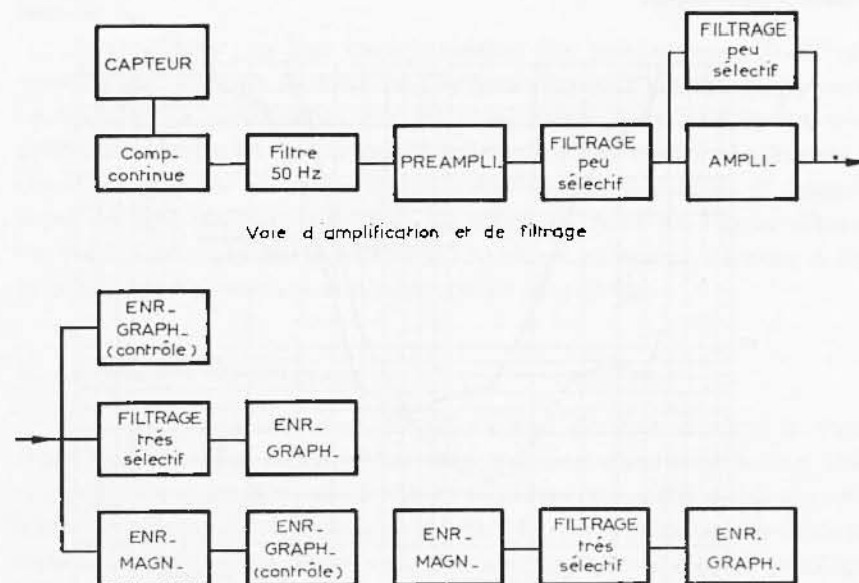


Fig. 4 - Voie d'enregistrement et voie d'analyse actuelles.

— de deux voies d'enregistrements sur bande magnétique. Cet appareil permet un gain de temps considérable. En effet si l'on prétend filtrer successivement chacune des quelques vingt périodes choisies par sondage, au fur et à mesure de l'enregistrement, la durée de l'analyse devient considérable et l'on perd, de plus, toutes les informations concernant les périodes autres que celle analysées. Il est plus avantageux d'enregistrer sur bande magnétique le spectre entier des phénomènes et d'effectuer l'analyse, tout de suite après, sur place, ou ultérieurement au Laboratoire, en rejouant les bandes à des vitesses plus grandes, dix et même cent fois plus vite.

— un enregistreur graphique à plume à deux voies identiques permettant de choisir la sensibilité voulue, entre 200 V/cm et 0,05 V/cm.

E. Etalonnages.

Cette opération consiste à déterminer pour chaque période T combien de mV/km correspondent à chaque millimètre d'élongation de l'enregistrement tellurique et combien de γ correspondent à chaque millimètre d'élongation de l'enregistrement magnétique, après rejeu du ruban magnétique.

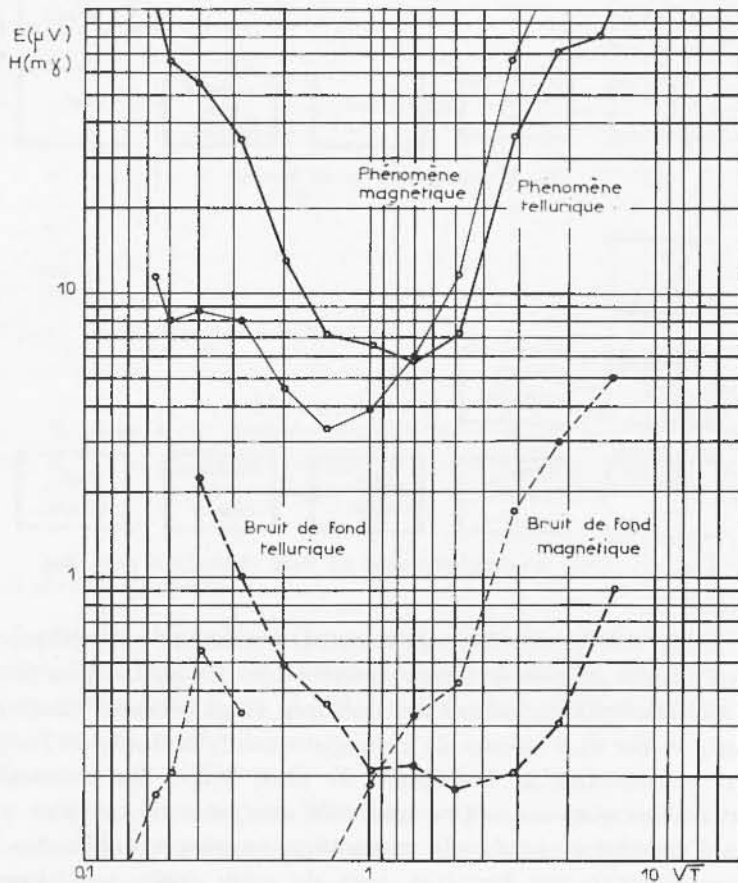


Fig. 5 - Amplitude moyenne du champ tellurique et du champ magnétique comparée au bruit de fond de l'appareillage.

Pour l'étalonnage tellurique, une tension sinusoïdale d'amplitude connue est appliquée à l'entrée de chaque voie tellurique, au lieu et place de la ligne. Pour l'étalonnage magnétique, les capteurs sont placés dans un champ magnétique sinusoïdal d'amplitude connue, créé soit par un aimant tournant, soit par un solénoïde.

Ces étalonnages sont faits dans certaines conditions de gain et de sensibilité. Or les phénomènes ne sont pas enregistrés forcément dans les mêmes conditions et des coefficients de correction (gain du pré-amplificateur, gain de l'enregistreur magnétique et sensibilité de l'enregistreur graphique) doivent être appliqués quand on calcule la valeur de q_a .

Pour obtenir un bon enregistrement des phénomènes, il est nécessaire que le bruit de fond de l'appareillage soit négligeable devant les amplitudes enregistrées. Or les phénomènes sont quelquefois très petits, à la limite de ce qui peut être détecté et enregistré. La Figure 5 donne l'amplitude moyenne mesurée des champs tellurique et magnétique en une station, comparée au bruit de fond de l'appareillage. On peut y voir que le rapport signal/bruit est rarement inférieur à 10, bien que le phénomène soit d'assez faible amplitude.

F. *Les mesures sur le terrain.*

Le spectre actuellement étudié s'étend de 0,01 à 900s, il n'est cependant pas utile de l'analyser complètement dans tous les cas. Une connaissance sommaire de la région à prospector suffit généralement à limiter la gamme des périodes à retenir. Il existe même une technique reposant sur l'analyse d'une seule période par station, c'est le profilage M.T., cher à nos collègues soviétiques, mais il ne doit être employé qu'en certains cas bien précis, avec de grandes précautions.

La conception d'une mission de terrain va dépendre en partie de la nature des problèmes posés. On peut prospector un bassin sédimentaire, ou des terrains cristallins, pour une large reconnaissance ou pour une étude détaillée on doit aussi prendre en considération la profondeur des structures recherchées.

Des quatre gammes définies dans une publication précédente (Benderitter, 1968), à savoir: 0,01s-0,25s; 0,25s-4s; 4s-60s; 60s-900s, on n'étudie le plus souvent que les trois premières. La quatrième n'est qu'exceptionnellement retenue si le bassin prospecté est comblé, sur de grandes épaisseurs, par des sédiments très conducteurs (argiles-marines); dans ce cas, la durée des enregistrements dépasse vingt quatre

heures. On a toutefois la possibilité de ne l'utiliser que partiellement, jusqu'à 200s par exemple de façon à ne pas allonger inutilement la durée de stationnement.

On effectue habituellement un sondage par jour; c'est la véritable vocation de l'équipement actuel. Néanmoins, dans le cas de structures peu profondes, on a pu faire trois mesures quotidiennes. Cette cadence pourra encore être doublée grâce à quelques modifications en cours (alimentation des appareils par batteries, élimination des parasites, analyse).

À la station, le travail reste à peu de choses près le même dans tous les cas, c'est le temps d'enregistrement qui diffère le plus selon le type de la prospection. Le plus souvent il est pratiqué un sondage croisé (avec l'étude de E_z/H_y et de H_y/H_z) dont on verra l'utilité par la suite. La Figure 6 présente la disposition des appareils sur le terrain.

L'entrée différentielle et symétrique de la chaîne d'amplification exige la pose de cinq électrodes pour les deux lignes telluriques. Il faut en effet une prise de terre de référence qui sert d'ailleurs en même temps de mise à la terre du groupe électrogène d'alimentation des appareils. Les capteurs magnétiques sont disposés à une centaine de mètres du camion-laboratoire et du groupe pour éviter les perturbations magnétiques qu'ils engendrent.

Le travail de topographie (alignement des capteurs, écartement des électrodes, nivellement de l'emplacement des magnétomètres) est effectué à l'avance par deux opérateurs. Habituellement les enregistrements débutent par la gamme la plus lente. C'est le temps (environ quatre heures) qu'on met utilement à profit pour préparer la station suivante. Les signaux sont inscrits sur bande magnétique et leur lecture immédiate sur inscripteur graphique permet le contrôle du bon fonctionnement de tout le système d'acquisition de données. On évite ainsi le risque de constater trop tard, lors du play-back, un défaut qui pourrait exiger le retour sur le terrain. Pour la gamme 0,25s-0,01s, on procède également à leur enregistrement magnétique de façon à conserver aussi les phénomènes de cette gamme.

Les opérations ci-dessus décrites durent environ six heures; il reste à relire les bandes magnétiques à travers les filtres pour analyser les périodes supérieures à 0,25s. Ce play-back peut avoir lieu sur le terrain aussitôt après les opérations d'enregistrement ou plus tard au laboratoire; il exige une heure et demie à deux heures de travail, de sorte que le temps passé sur le terrain est approximativement de huit heures à l'exclusion des déplacements.

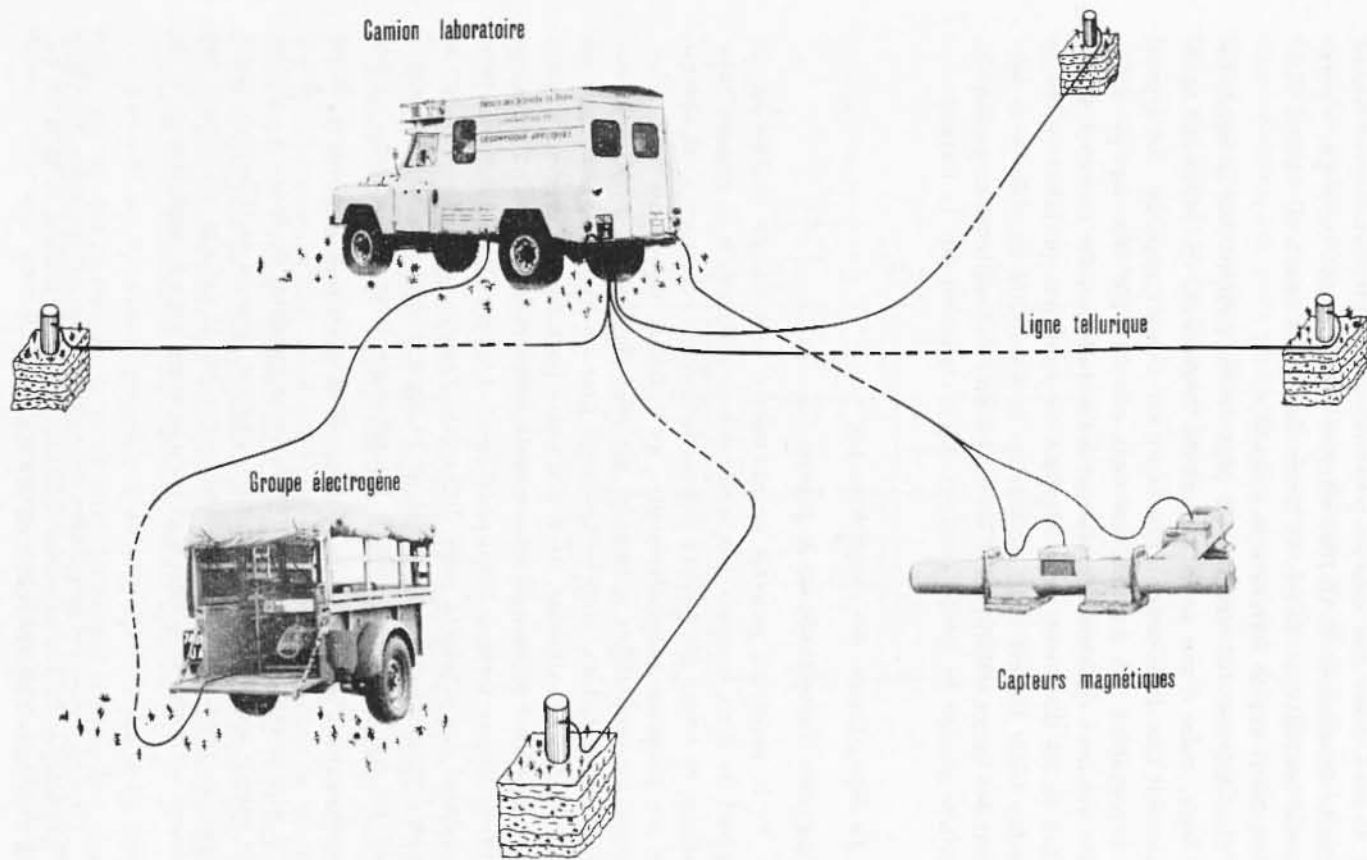


Fig. 6 - Disposition de l'appareillage sur le terrain.

Il est à noter que sans les possibilités de multiplication de vitesse donc de fréquences (1-10-100) offertes lors du play-back par l'enregistreur magnétique utilisé, la durée des opérations s'effectuant obligatoirement sur le terrain serait doublée.

La cadence des mesures est plus élevée lorsque l'on se contente de deux, voire d'une seule gamme de fréquences. On stationne alors seulement une demi-heure à une heure sur chaque sondage. Le travail de topographie est avantageusement effectué par une équipe différente qui peut également participer à l'installation des capteurs et des câbles si les distances entre stations ne sont pas prohibitives. Si la gamme 4-100 Hz est seule nécessaire, la possibilité de réduire la longueur des lignes telluriques et les dimensions des capteurs magnétiques, diminue encore le temps consacré à l'installation sur le terrain.

G. Le dépouillement des enregistrements.

a) mesures d'amplitude sur le papier.

Si le problème pouvait se ramener à une simple évaluation du rapport de deux tensions à la sortie des amplificateurs la mesure automatique se serait généralisée depuis longtemps. Mais on s'est aperçu, dès les premiers enregistrements, qu'il fallait rigoureusement sélectionner les oscillations à retenir. En effet lorsque les amplitudes naturelles sont faibles, elles se trouvent plus ou moins noyées dans un bruit de fond incohérent. Il y a d'autre part de nombreuses sources de « parasites » telles que les courants industriels ou des phénomènes naturels locaux (orages atmosphériques). L'appareillage lui-même peut introduire des artefacts pour différentes raisons: effet du vent sur le capteur magnétique, sur les fils de la ligne tellurique, de l'humidité dans les amplificateurs, d'une température trop élevée etc ... C'est pourquoi il est nécessaire de procéder à de multiples mesures de $\frac{e}{h}$ (*) pour une même période (une trentaine si possible) de façon à calculer une valeur moyenne. La Figure 7 montre bien la distribution gaussienne des mesures en l'absence de parasites. Il est aisé d'éliminer des mesures un parasite n'affectant qu'une seule voie à condition qu'il ne

(*) e et h sont les amplitudes mesurées en mm sur les voies tellurique et magnétique de l'enregistreur graphique, par opposition à E et H qui sont exprimées respectivement en mV/km et en γ .

soit pas permanent, c'est le cas par exemple, des perturbations engendrées par les clôtures électriques (Figure 8). Mais il devient délicat de distinguer le parasite du signal naturel lorsque les deux voies en sont affectées. On peut encore l'éviter en repérant une certaine périodicité dans son apparition (Figure 8) ou en effectuant une étude statistique des résultats du dépouillement.

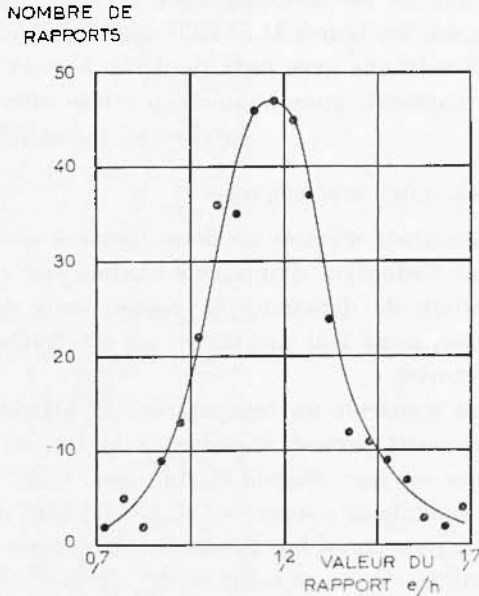


Fig. 7 - Distribution gaussienne du rapport e/h .

C'est souvent la bande des fréquences comprises entre $\frac{1}{4}$ Hz et 4 Hz qui est perturbée par des signaux ayant même apparence que le phénomène naturel. Cependant ces signaux ne présentent pas la même amplitude à toutes les fréquences. L'étude statistique de e/h révèle l'existence d'une seule population de points lorsque le phénomène naturel domine nettement le parasite, et de deux populations si les amplitudes sont comparables. Il est alors possible d'éliminer les valeurs qui donneraient des résultats qu'on ne pourrait raccorder avec ceux qui proviennent des fréquences moins perturbées.

Lorsque les structures présentent de trop forts écarts à la tabularité ou lorsque certaines couches sont fortement anisotropes dans leurs propriétés électriques les vecteurs E et H ne sont plus perpendiculaires ce qui peut devenir une cause supplémentaire de dispersion

des mesures. Cependant si l'on connaît suffisamment la géologie régionale on peut placer les lignes telluriques selon les directions structurales principales (il est également possible de retrouver ces directions en effectuant, à partir des enregistrements, une rotation théorique des axes de mesures). Dans ce cas on mesure surtout les oscillations correspondant à des courants telluriques qui circulent au plus près de ces deux directions et les résultats sont encore valables. On peut constater en effet, sur les figures 61 et 62 l'excellent accord des résultats obtenus par cette méthode avec ceux de J. L. Bureau (1968) qui fait appel au calcul matriciel, pour le sondage croisé effectué au C.R.G. de Garchy.

b) mesures électroniques analogiques.

On a toutefois tenté d'éviter un dépouillement quelque peu fastidieux et long par l'adoption d'appareils analogiques adéquats. Il ne saurait être question de demander à ces appareils de distinguer le signal des parasites, aussi leur utilisation est-elle limitée aux enregistrements non perturbés.

On a d'abord construit un comparateur de signaux à très basse fréquence. Cet appareil permet d'évaluer à la fois le rapport e/h et le déphasage θ des signaux magnéto-telluriques. Ceux-ci sont en effet rendus égaux en module et opposés en phase à l'aide de deux potentiomètres gradués, puis on en fait la somme algébrique qui doit tendre vers zéro à l'équilibre. A ce moment on lit e/h et θ sur les potentiomètres. L'équilibre n'est pas toujours atteint très rapidement c'est pourquoi il est préférable de disposer d'une bande magnétique bouclée pour étudier l'enregistrement sans discontinuités.

Un dispositif plus simple consiste à redresser puis à intégrer simultanément les phénomènes magnétiques et telluriques (Benderitter, Dupis, Morat 1968). Il n'est plus possible de connaître θ , mais on utilise en fait très peu cette donnée. Par contre l'obtention du rapport e/h est particulièrement simple si l'on stoppe l'intégration lorsqu'à la sortie de l'intégrateur de la voie magnétique apparaît une tension V' , que l'on prend pour unité, il suffit alors de lire sur un voltmètre convenablement étalonné et gradué la tension V obtenue sur la voie tellurique. Cette tension V représente alors e/h car $\frac{V}{V'} = V$ si $V' = 1$.

On peut régler la constante de temps d'intégration de façon à couvrir tout un enregistrement par une seule, ou au contraire par une centaine de mesures si l'on veut. Il faut prendre garde qu'avec cette méthode

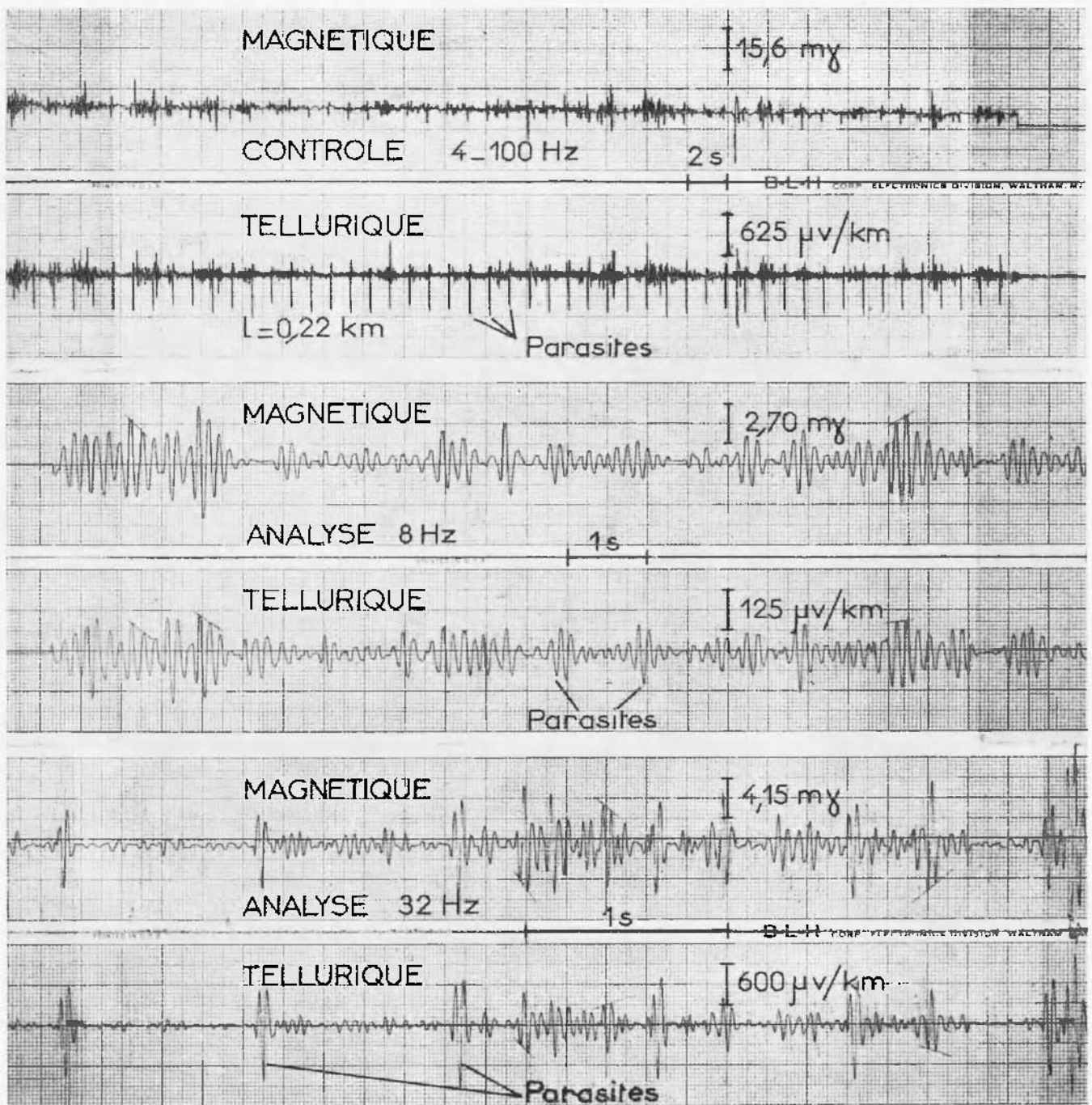


Fig. 8 - Perturbations engendrées par une clôture électrique.

les résultats sont très vite faussés par l'existence d'un bruit de fond excessif ou de parasites. L'identité des résultats de plusieurs mesures successives n'est pas obligatoirement une preuve de bonne qualité des évaluations de e/h car le bruit ou les parasites présentent souvent un niveau moyen assez stable.

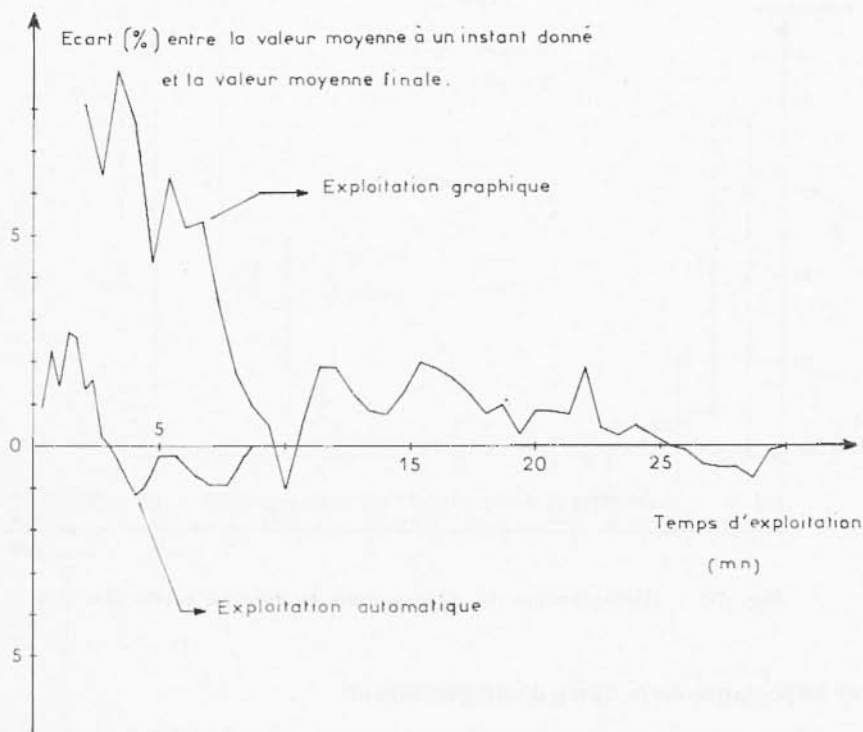


Fig. 9 - Comparaison des temps d'exploitation entre dépouillement graphique et dépouillement automatique.

Il est intéressant de remarquer que l'utilisation de l'intégrateur fournit $\sum e_i / \sum h_i$ alors que par le dépouillement on calcule plutôt :

$$\frac{1}{n} \sum \frac{e_i}{h_i}$$

La seconde méthode attribue en effet le même « poids » à chaque couple d'oscillations alors qu'avec la première on attache plus d'importance aux oscillations de grande amplitude. En fait les deux méthodes se valent et ne donnent des résultats sensiblement différents qu'avec des enregistrements médiocres (forte dispersion des rapports). Le calcul

de tous les rapports présente d'autres avantages: il permet une étude statistique et le calcul d'un écart moyen qui donne une idée de la précision des mesures. La Figure 9 montre qu'avec un enregistrement non perturbé on gagne cependant beaucoup de temps grâce à l'intégrateur.

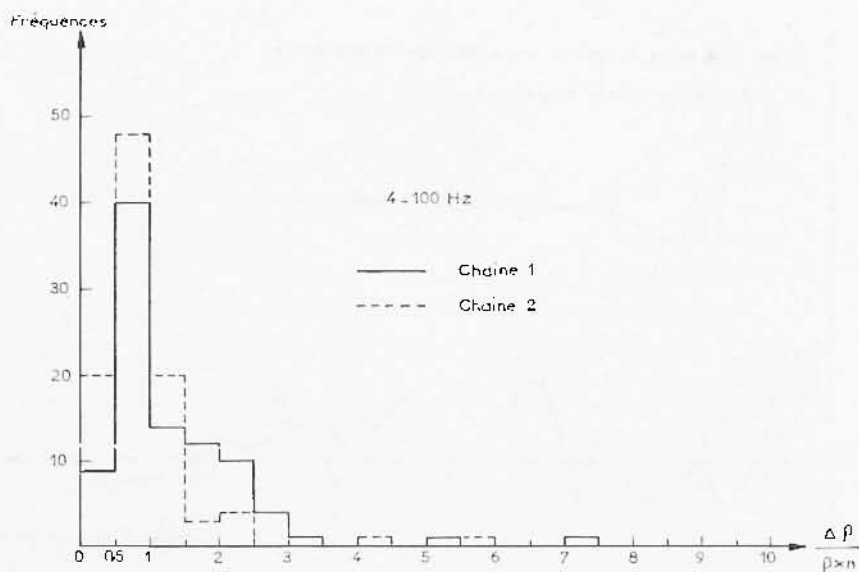


Fig. 10 - Histogramme de $\Delta \rho / q \cdot n$ dans la gamme 4-100 Hz.

e) importance de la durée d'enregistrement.

On constate souvent que l'écart moyen est plus faible pour les fréquences de la gamme 4-100 Hz que pour celles de la gamme $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{60}$ Hz. On a pensé que cela pouvait être lié au fait que l'on enregistrait beaucoup plus d'oscillations rapides que d'oscillations lentes. En effet le dépouillement fait souvent apparaître moins d'une dizaine de valeurs pour la fréquence de $\frac{1}{60}$ Hz (1 mn). On a alors pensé à corriger en quelque sorte l'écart moyen sur q_n , exprimé en pourcentage, en le divisant par le nombre de mesures. Les Figures 10, 11 et 12 présentent les histogrammes de $\Delta \rho / q \cdot n$ (n étant le nombre de mesures) pour chaque bande passante. Cette étude porte sur le dépouillement

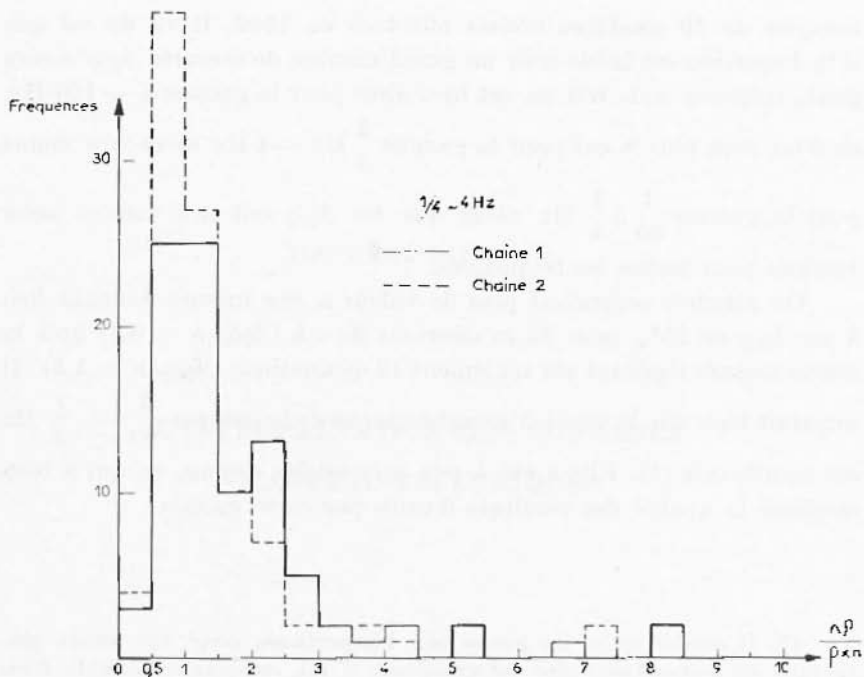


Fig. 11 - Histogramme de $\Delta\rho/\rho \cdot n$ dans la gamme $1/4 - 4$ Hz.

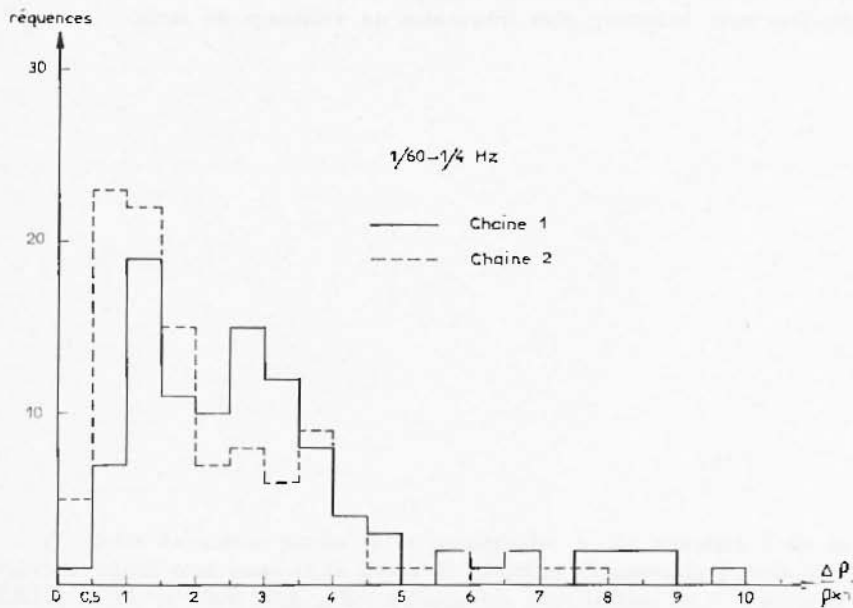


Fig. 12 - Histogramme de $\Delta\rho/\rho \cdot n$ dans la gamme $1/60 - 1/4$ Hz.

complet de 20 sondages croisés effectués en 1966. Il va de soi que si la dispersion est faible pour un grand nombre de mesures $\Delta g/g \cdot n$ sera petit, inférieur à 1. S'il en est bien ainsi pour la gamme 4 — 100 Hz, ce n'est déjà plus le cas pour la gamme $\frac{1}{4}$ Hz — 4 Hz et encore moins pour la gamme $\frac{1}{60}$ à $\frac{1}{4}$ Hz alors que les $\Delta g/g$ ont des valeurs assez voisines pour toutes les fréquences.

On attribue cependant plus de valeur à une mesure donnant lieu à un $\Delta g/g$ de 15% pour 30 évaluations de c/h ($\Delta g/g \cdot n = 0,5$) qu'à la même mesure reposant sur seulement 10 évaluations ($\Delta g/g \cdot n = 1,5$). Il apparaît bien que la durée d'enregistrement de la gamme $\frac{1}{60}$ — $\frac{1}{4}$ Hz est insuffisante (*). Elle a été à peu près triplée depuis, ce qui a bien amélioré la qualité des résultats fournis par cette gamme.

(*) Il semble qu'on ne puisse nier l'importance pour une étude statistique de l'abondance des informations; il est cependant possible d'invoquer d'autres causes à cette qualité inférieure des résultats de la gamme $1/60$ — $1/4$ Hz. L'uniformité des champs est moins évidente, et les hétérogénéités sont beaucoup plus fréquentes au voisinage du socle.

DEUXIÈME PARTIE (*)

L'INTERPRÉTATION DES SONDAGES MAGNÉTO-TELLURIQUES

(*) Cette deuxième partie et le paragraphe A. du chapitre I de la troisième partie sont issus de la *Revue de l'Institut Français du Pétrole* Vol. XXIV, n° 11, p. 1309-1338, grâce à l'aimable autorisation de J. FUNCK et des Editions TECHNIP.

CHAPITRE I. — CONSTRUCTION ET UTILISATION DES ABAQUES.

L'analogie déjà évoquée entre le sondage M.T. et le sondage E se poursuit au moment de l'interprétation. L'utilisation d'abaques se révèle, dans les deux cas, la solution de choix pour obtenir rapidement des résultats quantitatifs. On retrouvera des abaques « deux terrains », des abaques « trois terrains » et des lieux de croix pour l'interprétation des sondages M.T. Mais de plus, le calcul théorique des courbes de sondage M.T. étant relativement facile, la méthode M.T. se prête très bien à une interprétation par approximations successives. Les deux méthodes présentent certaines dissemblances quant à leur pouvoir de résolution et si l'on peut obtenir des courbes équivalentes pour des structures légèrement différentes en M.T. comme en S.E., ce n'est pas toujours dans les mêmes conditions.

De plus, on verra que l'étude des cas limites d'un substratum infiniment conducteur ou infiniment résistant simplifie beaucoup l'interprétation. On montrera également l'intérêt de la pratique, maintenant courante, des sondages croisés et on terminera par un aperçu de ce que l'on peut tirer de l'interprétation des diagrammes de phases encore peu exploités.

A. *Abaques « deux terrains ».*

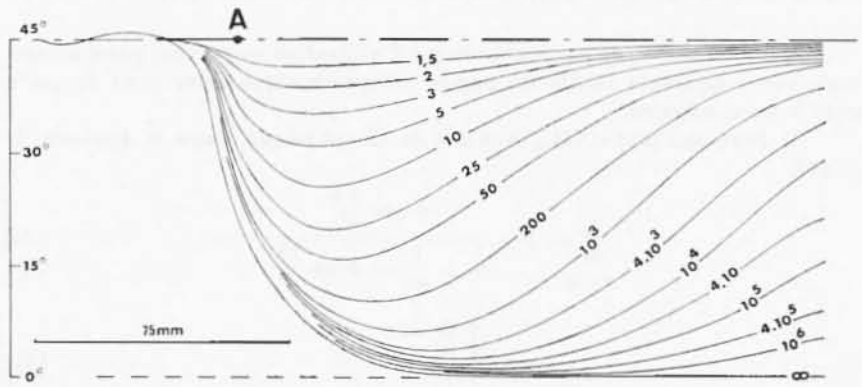
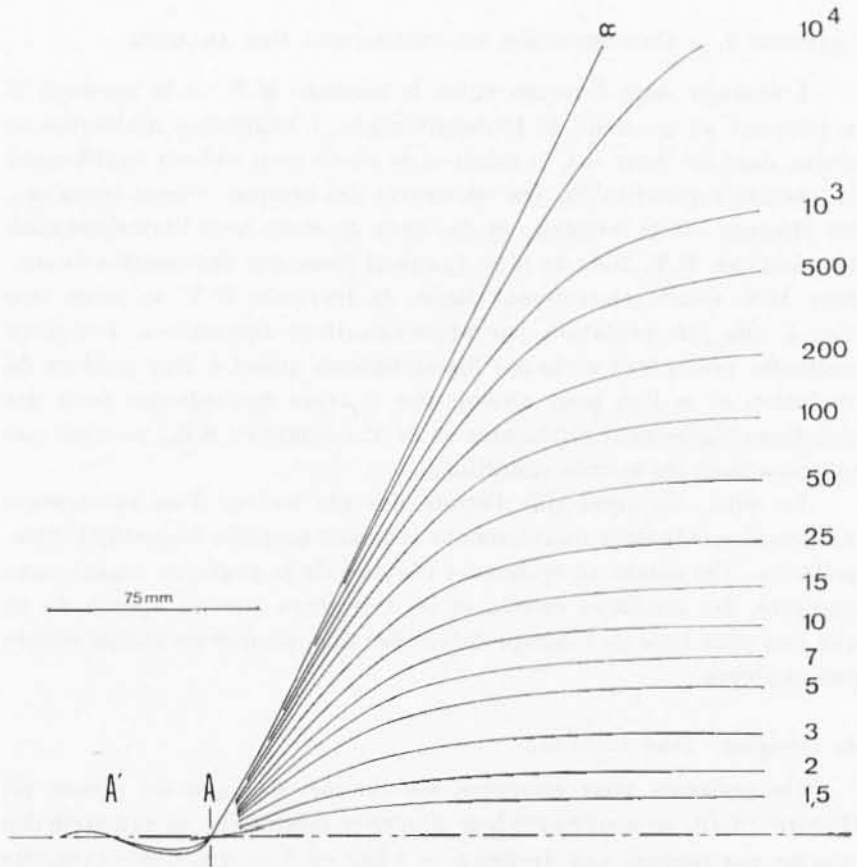
On présente, pour mémoire, les abaques de q_a et de phases (θ) (Figure 13)⁽¹⁾, en soulignant leur propriété essentielle: la symétrie des courbes par rapport aux droites $q = 1 \Omega m$ ou $\theta = \pi/4$. Cette symétrie évidente sur le dessin complet des abaques se vérifie aisément pour les résistivités lorsqu'au regard des formules⁽²⁾ donnant q_a/q_1 pour deux

(1) Les abaques, de par leur principe d'utilisation ne portent pas d'unités. Seule est indiquée la maille du papier bilogarithmique (sauf pour θ) qui a servi à les construire.

(2) Formules [40] et [41], Annales de Géophysique, tome 9, fascicule 2, p. 110.

$$\frac{2h}{P_1} \quad [40]$$

[41]



terrains, on constate que l'inversion de ρ_2 change le signe de la seconde partie du résultat. Cela permet de représenter seulement la moitié des courbes théoriques sur l'abaque en se limitant, par exemple au cas où ρ_2 est supérieur à ρ_1 .

On sait que c'est aux lois de similitude que l'on doit une simplification importante de la technique d'interprétation par abaques. En magnéto-tellurique, L. Cagniard a montré que ces lois s'exprimaient par la relation:

$$\frac{K_L^2}{K_\rho} = K_T.$$

Si entre deux structures semblables, les rapports de similitude sont K_L pour les dimensions, K_ρ pour les résistivités, avec une similitude dans le rapport K_T pour les périodes.

B. *Abaques « trois terrains ».*

L'adjonction d'un terrain supplémentaire introduit deux nouveaux paramètres, il y aura donc, grâce aux lois de similitude trois infinités de courbes théoriques au lieu de cinq pour représenter toutes les structures possibles.

Les valeurs retenues pour les trois paramètres sont les suivantes, compte-tenu des seuls cas véritablement intéressants en prospection:

ρ_2	:	0,5	1	2	3	4	7	10	15	20	30	40
		50	100	200	500	km						
ρ_3	:	2	5	10	20	50	100	200	500	et		
		1/2	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100	1/200	1/500	Ωm		
ρ_1	:	0	1/25	1	25	∞	Ωm					

On obtient ainsi un ensemble de quatre vingt abaques qu'il est commode de présenter sous forme de catalogue (*).

L'axe de symétrie défini précédemment est conservé pour le cas de trois ou de n terrains, mais les conditions que doivent remplir deux

(*) Ce catalogue est disponible à la S.A.P.A., 102, avenue Jean Jaurès - 94 - Saint-Maur.

structures pour donner lieu à deux courbes symétriques sont un peu plus complexes. Ces conditions sont résumées ci-après :

Structure donnée		Structure symétrique	
q	e	q	e
1	1	1	1
q_2	e_2	$1/q_2$	e_2/q_2
q_3	∞	$1/q_3$	∞

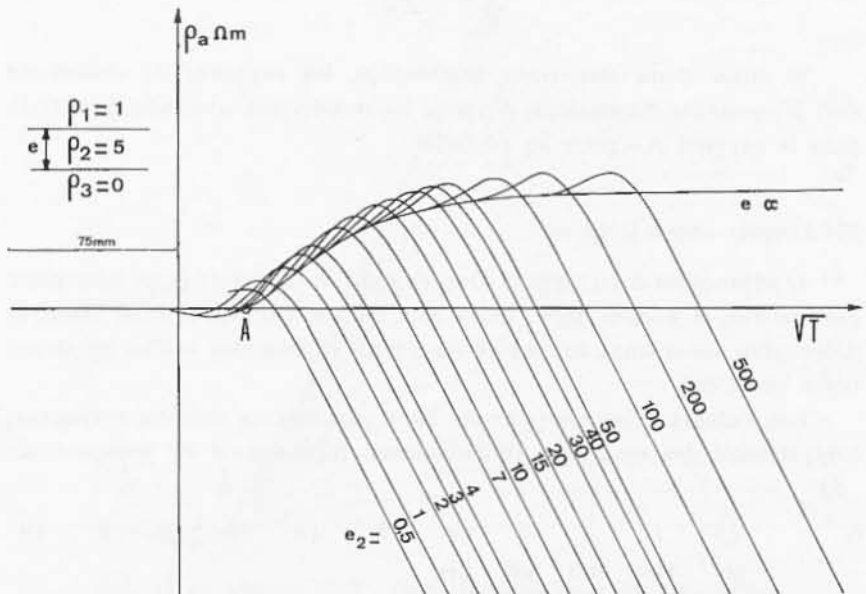


Fig. 14 - Exemple d'abaque M.T. « trois terrains » pour les résistivités.

On voit que si les résistivité de la structure « symétrique » sont bien les inverses de celles de la structure donnée, l'épaisseur de son second terrain doit être par contre divisée par la résistivité de ce même terrain dans la structure donnée.

L'axe de symétrie est conservé aussi dans le cas « n terrains ». Si les paramètres du $(n-1)$ ème terrain d'une structure sont q_{n-1} et e_{n-1} on en déduit par récurrence ceux de la structure « symétrique » qui seront :

$$\frac{1}{q_{n-1}} \text{ et } \frac{e_{n-1}}{q_{n-1}} .$$

Une fois calculés les abaques correspondent à $\rho_2 > \rho_1$ les conditions de symétrie permettent d'en déduire les abaques correspondant à $\rho_2 < \rho_1$ dont les paramètres se déterminent d'après les schémas précédents. On constate ainsi que pour le groupe des abaques où ρ_2 est inférieur à ρ_1 les coefficients e_2 sont très différents de ceux que l'on a cités précédemment, qui concernent seulement le cas où ρ_2 est supérieur à ρ_1 (Figures 14 et 15).

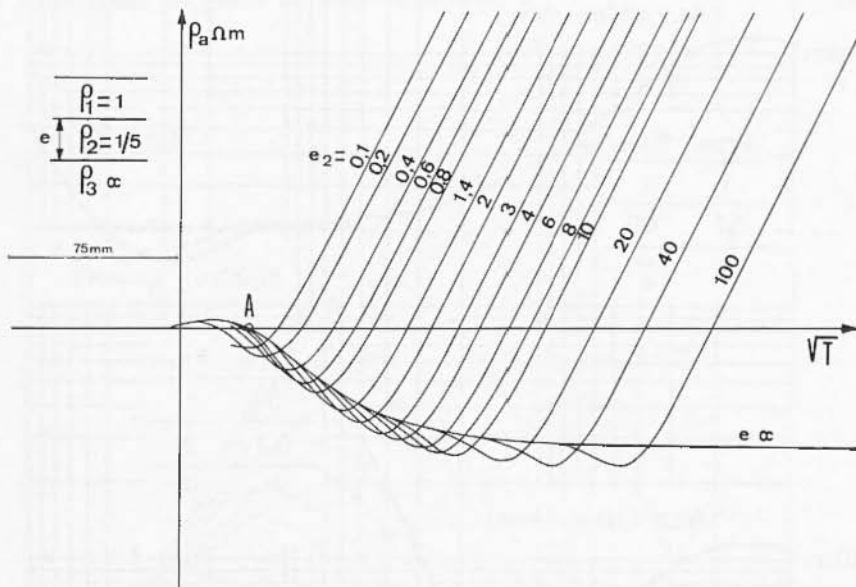


Fig. 15 - Abaque « trois terrains » symétrique du précédent.

C) *Abaques de croix.*

La solution du catalogue pour l'interprétation des courbes « trois terrains » n'est cependant pas très élégante. On sait qu'on lui substitue volontiers, dans le cas du sondage électrique, l'utilisation d'abaques dits de « croix à droite » (*). Il s'agit tout simplement, considérant une

(*) Lors de l'interprétation d'une courbe « deux terrains » en sondage E c'est en lisant les coordonnées de la croix de l'abaque sur le diagramme expérimental transparent convenablement placé, que l'on détermine les paramètres du premier terrain. Pour la méthode M.T. c'est le point A qui joue le rôle de cette croix. On parlera donc par la suite indifféremment de point A à droite ou de croix à droite.

courbe « trois terrains » comme résultant approximativement de la juxtaposition de deux éléments de courbes « deux terrains », de déterminer la croix (à gauche) correspondant aux deux premiers terrains, puis la croix (à droite) caractéristique des deuxième et troisième terrains. Il n'y a aucun obstacle à priori, à la construction de ce type d'abaques en M.T.

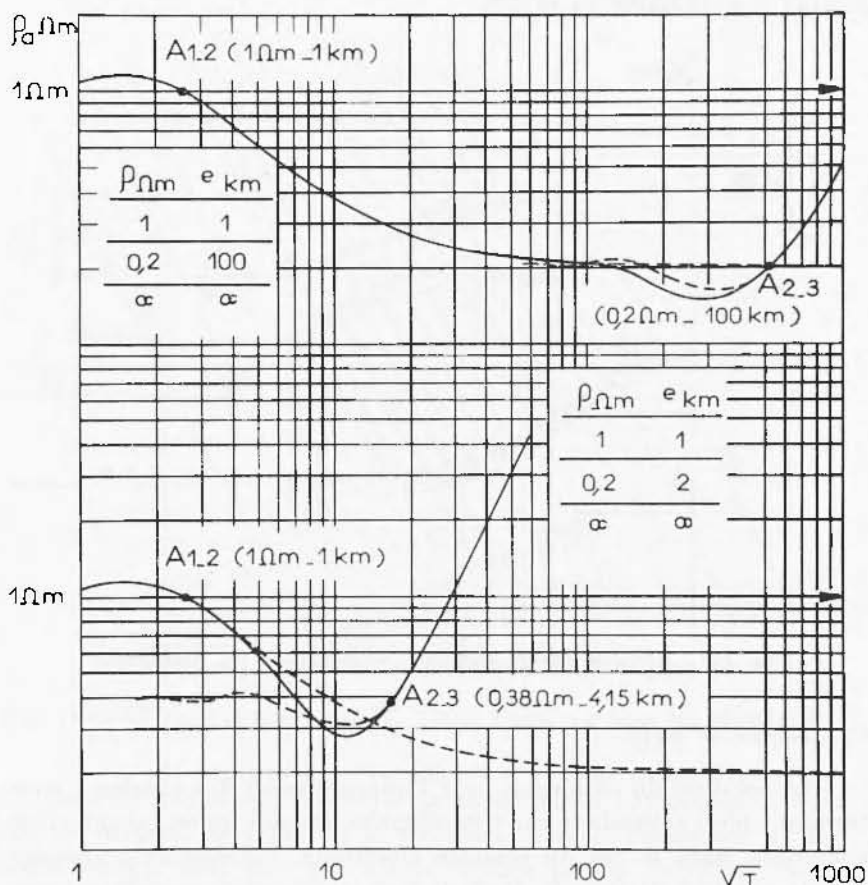


Fig. 16 - Décomposition de courbes « trois terrains » pour la construction de lieux de croix.

Lorsque l'influence du second terrain est suffisamment importante du fait soit de son épaisseur, soit de son contraste de résistivité avec le premier terrain, la courbe de ρ_a présente un palier dès qu'elle atteint la valeur de ρ_2 . Dans ce cas précis, le recours à l'abaque de croix

est inutile car on peut interpréter individuellement les deux courbes « deux terrains » situées de part et d'autre de ce palier. Cependant, on constate ainsi que le lieu de crois rejoindra la courbe « trois terrains » sur son asymptote (Figure 16). Si, au contraire, le deuxième terrain est peu épais et sa résistivité peu différente de ρ_1 la courbe expérimentale en sera peu affectée; à la limite, $e_2 = 0$, on obtiendra une courbe « deux terrains », le point A de l'abaque « deux terrains » est donc aussi un point du lieu recherché.

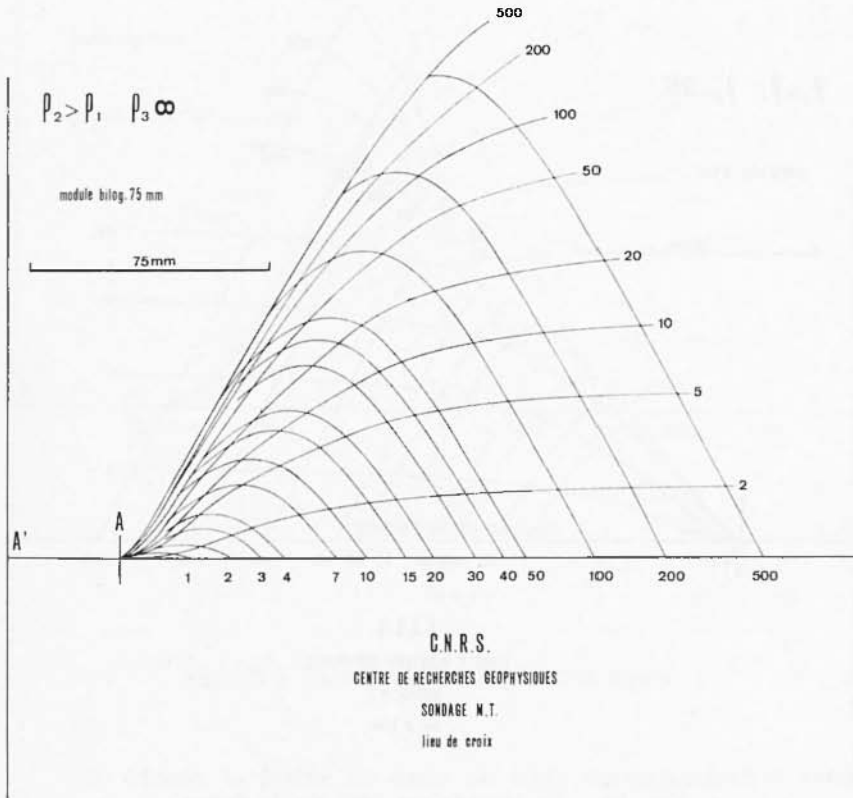


Fig. 17 - La légende est déjà sur la figure.

Dans le cas général la courbe montre bien l'existence du deuxième terrain sans présenter cependant un palier d'ordonnée ρ_2 . La décomposition de cette courbe en deux courbes « deux terrains » est alors un peu arbitraire (Figure 16) et le point A_{2-3} à droite ainsi déterminé ne permet pas de connaître directement les valeurs exactes de e_2 et de ρ_2 (Figure 16).

Comme les points A à droite sont fixés d'après l'étude de la partie droite de la courbe (concernant les deuxième et troisième terrain), il est clair qu'il y aura autant de feuilles de lieux de crois qu'on aura choisi de valeurs pour le paramètre ρ_3 . Chaque lieu de crois remplace une famille de courbes « trois terrains », soit une feuille du catalogue « trois terrains ». Les points de chaque lieu correspondant à une même valeur de e_2 sont reliés entre eux (Figures 17 à 26) (*).

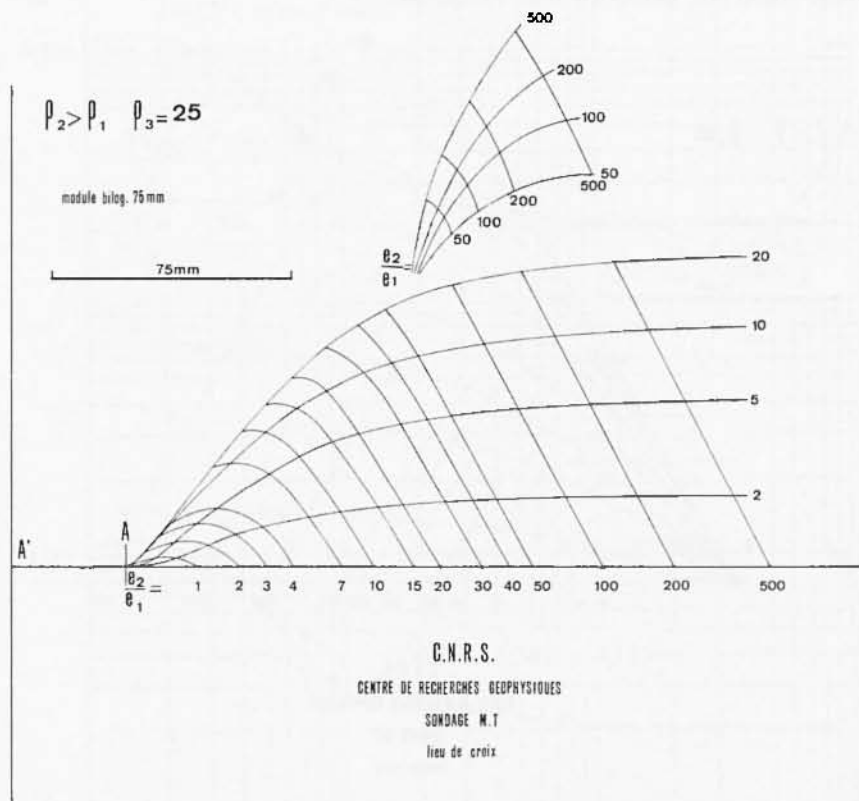


Fig. 18 - La légende est déjà sur la figure.

L'interprétation des courbes « trois terrains » avec ces abaques de crois consistera donc à :

(*) Par suite de la réduction de leur format les abaques présentés ici ne sont pas directement utilisables pour le module bilogarithmique de 75 mm.

1) déterminer avec l'abaque « deux terrains » les coordonnées de A pour les deux premiers terrains (on connaîtra ainsi ρ_1 et ϵ_1), noter le rapport ρ_2/ρ_1 et choisir la valeur du paramètre ρ_3 en ne considérant que la seconde partie de la courbe.

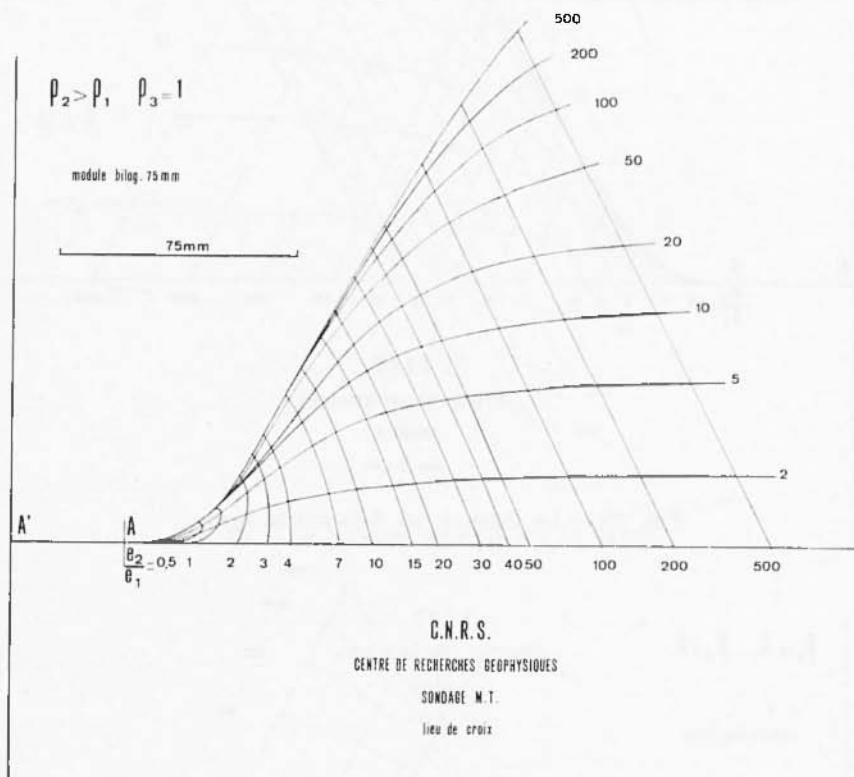


Fig. 19 - La légende est déjà sur la figure.

2) Choisir la feuille de lieux de croix correspondant à cette valeur de ρ_3 .

3) Caler le point A (déterminé en 1) du diagramme expérimental sur celui de l'abaque de croix, relever l'indice de la courbe des iso-rapports ϵ_2/ϵ_1 qui passe ou qui passerait par l'intersection de la courbe expérimentale avec le lieu de croix correspondant au rapport ρ_2/ρ_1 retenu.

On complète ainsi l'interprétation puisque seul ϵ_2 était inconnu après l'emploi de l'abaque « deux terrains ».

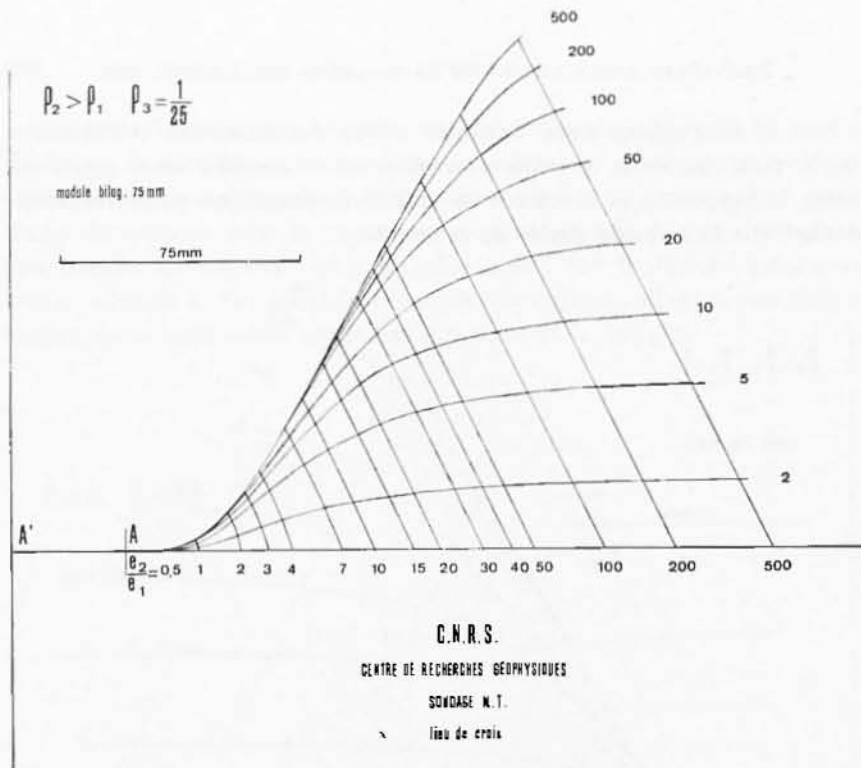


Fig. 20 - La légende est déjà sur la figure.

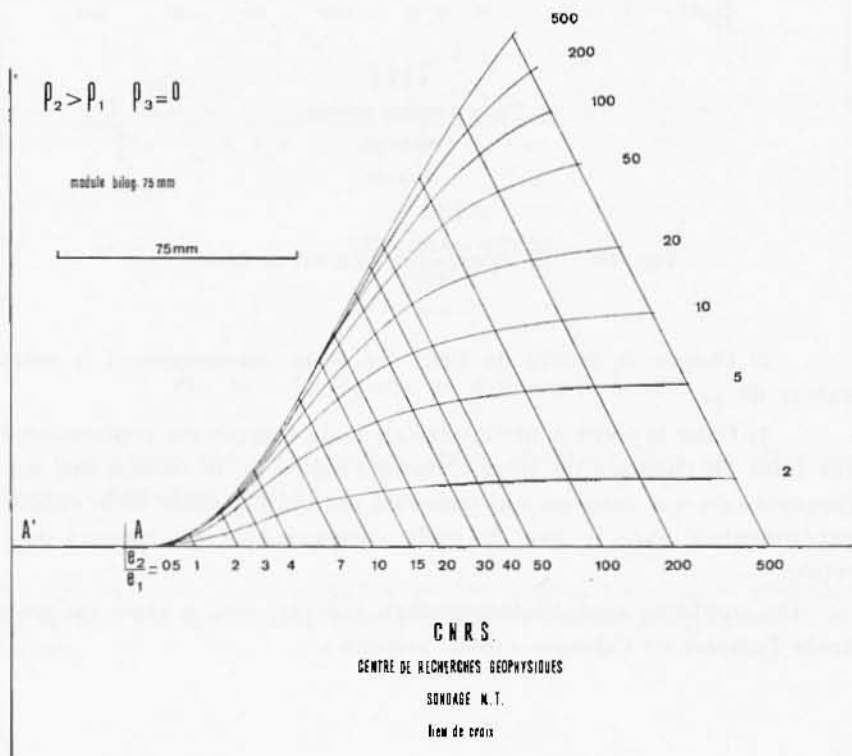
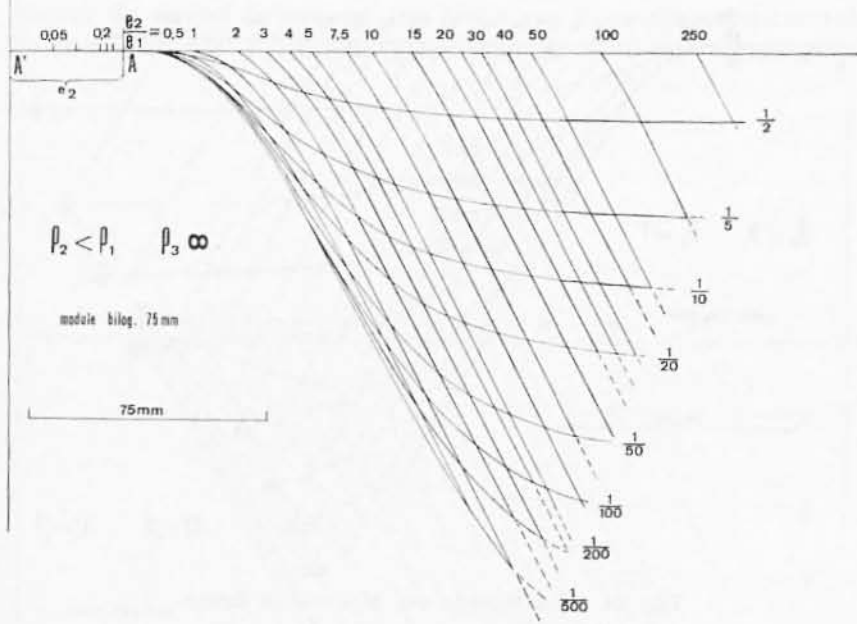
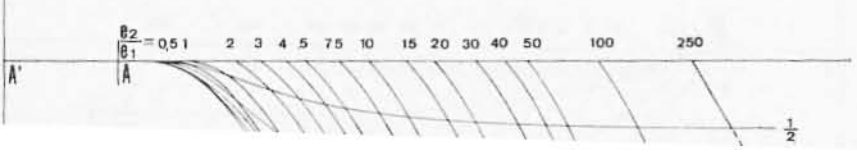


Fig. 21 - La légende est déjà sur la figure.



C.N.R.S.
 CENTRE DE RECHERCHES GEOPHYSIQUES
 SONDAGE M.1
 lieu de crois



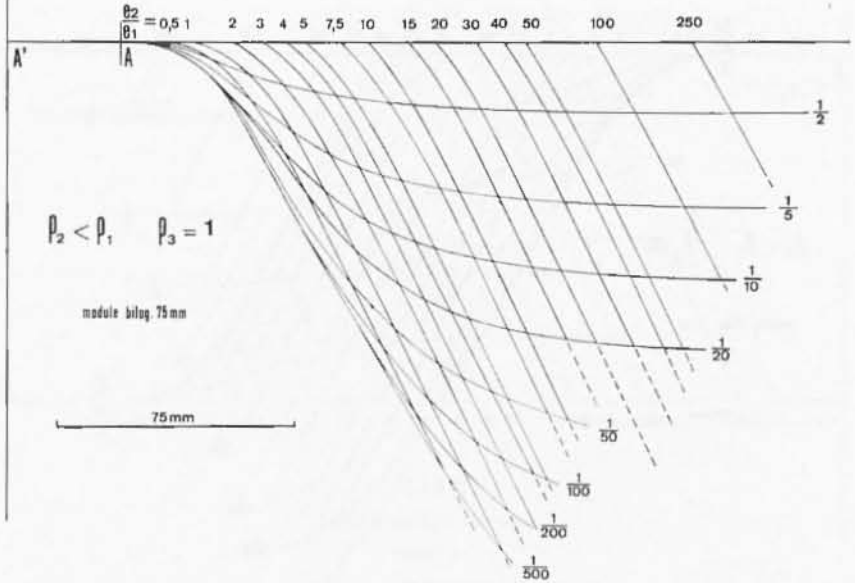


Fig. 24 - La légende est déjà sur la figure.

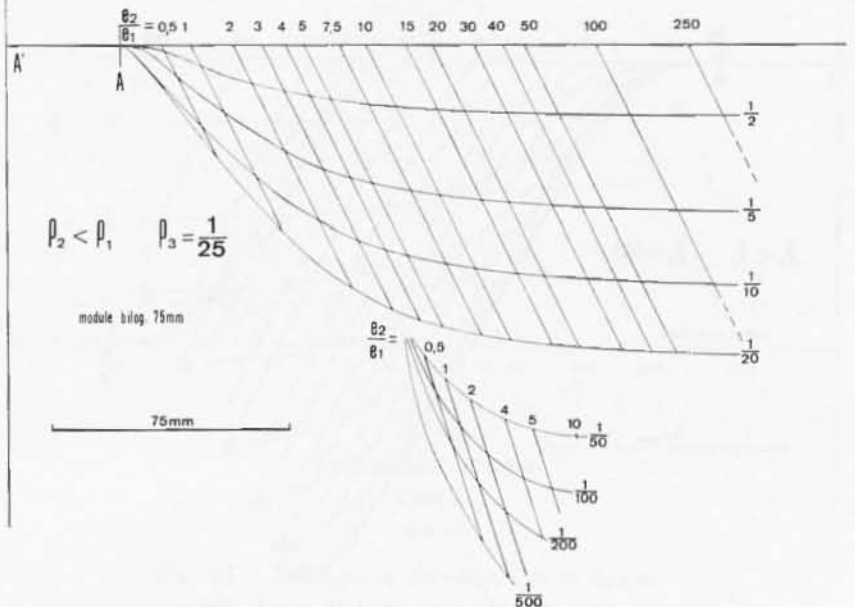


Fig. 25 - La légende est déjà sur la figure.

Il faut ajouter que les choses se compliquent un peu lorsque l'influence du second terrain est très faible car la courbe expérimentale ne passe plus par A mais elle passe toujours en A' (*) (Figure 22) et

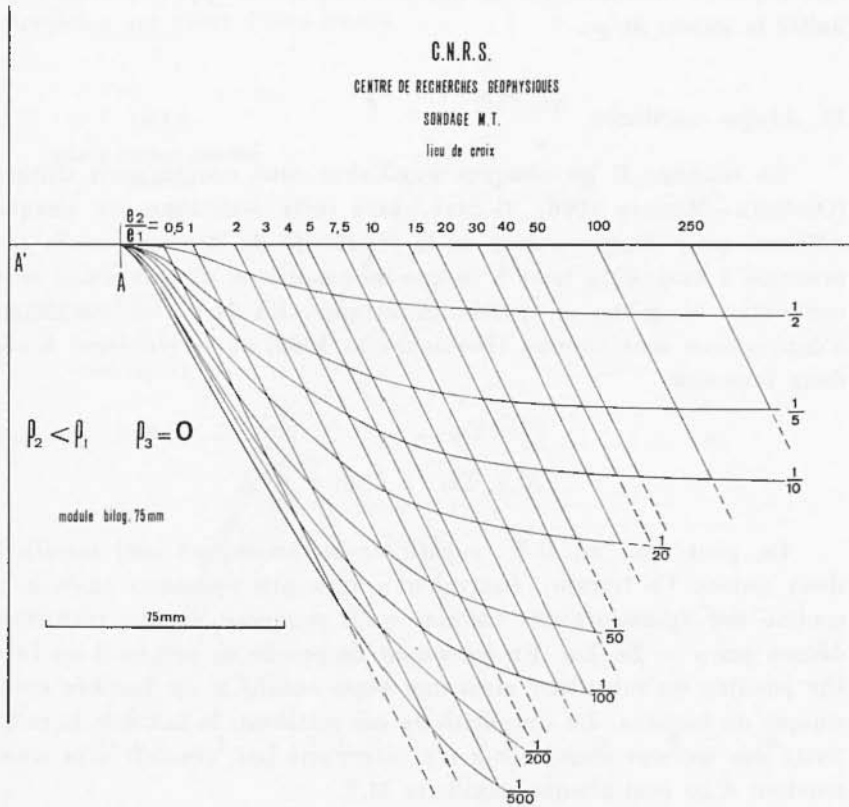


Fig. 20 - La légende est déjà sur la figure.

recoupe l'axe des abscisses entre A' et A d'autant plus près de A' que e_2 est plus faible. Il est possible de graduer l'écart entre A' et A en valeurs croissantes du rapport e_2/e_1 mais cette graduation n'est valable que pour une valeur donnée du paramètre α_2 , car par suite de l'« équivalence » (**) des courbes, les graduations repèrent en fait

(*) A' second point d'intersection des courbes « deux terrains » avec l'axe des abscisses.

(**) Voir chapitre II B: Pouvoir de résolution.

les valeurs du rapport e_2/ρ_2 . C'est pourquoi sur la Figure 22, on a indiqué la valeur de ρ_2 choisie ($\rho_2 = \frac{1}{10} \rho_1$). L'interprétation ne pourra être menée à bien dans ce cas que si l'on parvient par ailleurs à connaître la valeur de ρ_2 .

D. *Abaque auxiliaire.*

En sondage E les abaques auxiliaires sont couramment utilisés (Orellana - Mooney 1966). Il faut, dans cette technique, un abaque différent pour chaque valeur de la résistivité du dernier terrain (en pratique 4 cas). Cela tient à ce que les conditions d'équivalence sont complexes et même en partie empiriques. En M.T. les conditions d'équivalence sont simples (Berdichevski 1960) et se réduisent à ces deux formules:

$$e' = \sum e_i$$

$$S' = \sum s_i \quad S_i = \frac{e_i}{\rho_i}$$

On peut donc en M.T., substituer facilement un seul terrain à deux autres. Ce terrain « équivalent » aura une épaisseur égale à la somme des épaisseurs des terrains qu'il remplace et une résistivité définie par $\rho' = \sum e_i / \sum s_i$. En procédant de proche en proche il est bien sûr possible de substituer ainsi une seule couche à un nombre quelconque de terrains. La simplicité de ces relations, le fait que la résistivité des terrains sous-jacents n'y intervient pas, conduit à la construction d'un seul abaque auxiliaire M.T.

Les Figures 27 et 28 présentent cet abaque en deux moitiés selon que ρ_2 est supérieure ou inférieure à ρ_1 .

L'utilisation de cet abaque pour l'interprétation des courbes est strictement semblable à celle qui est décrite par Orellana - Mooney:

1) A l'aide de l'abaque deux terrains marquer sur le diagramme expérimental (sur calque), le point A qui correspond aux deux premiers terrains, on en déduit ρ_1 , e_1 , ρ_2/ρ_1 .

2) Superposer le calque sur l'abaque auxiliaire en plaçant le point A du calque sur celui de l'abaque.

3) Tracer sur le calque la courbe correspondant au rapport ρ_2/ρ_1 déterminé en 1.

4) Replacer le calque sur l'abaque deux terrains et le déplacer en gardant les axes des deux feuilles bien parallèles, jusqu'à ce que la partie droite du diagramme se superpose à une courbe de l'abaque. Pendant cette opération le point A de l'abaque doit décrire la courbe auxiliaire qui vient d'être tracée.

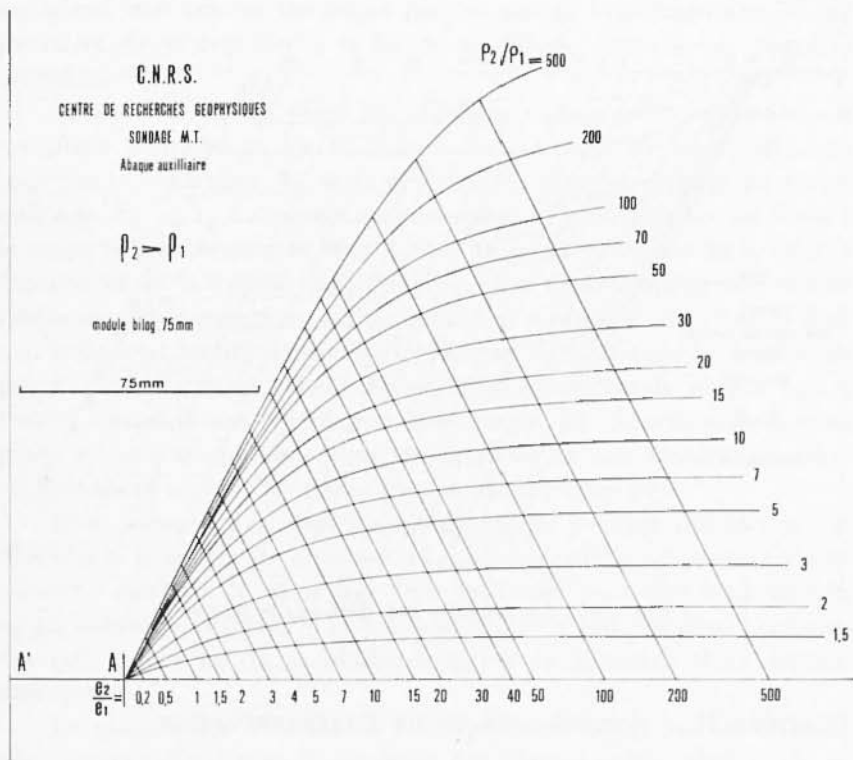


Fig. 27 - La légende est déjà sur la figure.

5) Sur le calque placer une croix correspondant au point A de l'abaque lorsque la coïncidence recherchée en 4 est obtenue, lire la valeur de ρ_3 .

6) Placer à nouveau le calque sur l'abaque auxiliaire en mettant en coïncidence le point A à gauche du calque avec celui de l'abaque, la croix se trouve alors sur (ou très proche d')une droite de pente 2. Cette droite est affectée d'un coefficient e_2/e_1 , on détermine alors e_2 .

Pour plus de trois terrains, on procède de proche en proche, mais la précision des déterminations diminuant assez rapidement il est

préférable de vérifier les modèles obtenus par un calcul. Le rôle des abaques de croix ou de l'abaque auxiliaire est d'ailleurs avant tout de permettre une sélection des modèles à proposer au calcul. L'interprétation des courbes M.T. est alors rapide et sûre.

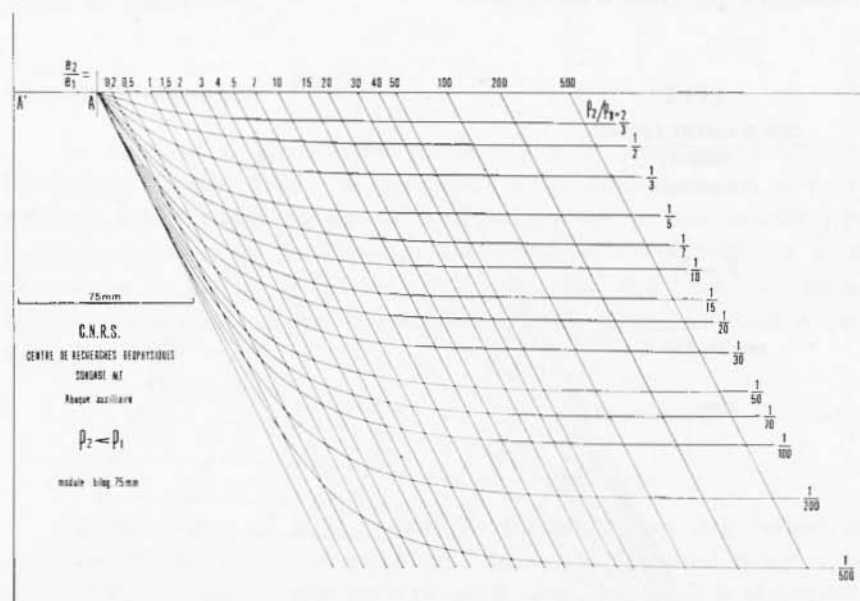


Fig. 28 - La légende est déjà sur la figure.

CHAPITRE II. - AUTRES ASPECTS DE L'INTERPRETATION.

A. Calcul théorique des courbes de q_a .

Lorsque la courbe expérimentale indique la présence de plus de trois terrains il est encore possible, dans les cas simples, d'utiliser les abaques construits en confondant plusieurs terrains en un seul équivalent et en procédant de proche en proche. Cette méthode est cependant d'une application délicate et il est plus élégant, surtout dans les cas difficiles de lui substituer le calcul direct du sondage. Ce calcul dont les formules sont établies depuis longtemps (Cagniard, 1953) a été effectué dans notre Laboratoire depuis 1962 (Benderitter, Dupis, Tiger) au moyen d'un abaque des tangentes complexes, puis à partir de 1964 (Bureau, Tiger, etc. . .) à l'aide d'un programme pour machine IBM valable pour des modèles comportant jusqu'à dix terrains.

Les expressions algébriques qui composent ce calcul étant bien plus simples que pour le sondage B , le calcul de modèles théoriques est beaucoup plus largement utilisé dans l'interprétation magnéto-tellurique.

Quand il advient qu'une simple translation permet de faire passer au mieux une courbe théorique par les points expérimentaux, il est judicieux de se reporter à la loi de similitude énoncée au chapitre précédent (*).

Si une translation selon les abscisses s'avère seule nécessaire on modifiera uniquement les épaisseurs des terrains en les multipliant tous par le coefficient K_L alors égal à $\sqrt{K_T}$ puisque dans la loi de similitude $K_Q = 1$. La valeur de ce coefficient sera obtenue en faisant le rapport des abscisses de deux points de même ordonnée de la courbe calculée et de la courbe expérimentale. Par contre, opérer une translation selon les ordonnées est un peu plus complexe. En effet, il faut non seulement multiplier les résistivités par K_Q mais aussi les épaisseurs par $K_L = \sqrt{K_Q}$, le coefficient K_T de la loi de similitude restant égal à l'unité. Quant à une translation quelconque, elle pourra être décomposée en une translation selon les abscisses et une translation selon les ordonnées suivant les règles précédentes (Figure 29).

Nous verrons que c'est l'intercalation de couches résistantes qui se révèle la plus délicate à traiter. Ces couches sont en effet une « transparence » relative de sorte que leur épaisseur peut-être sous-estimée ou au contraire surestimée si le Géophysicien n'agit pas avec prudence dès que la courbe de ρ_a semble indiquer la présence d'un terrain résistant.

La plupart des résultats de l'interprétation n'ont pas été obtenus par l'étude individuelle de chacune des deux courbes d'un sondage, mais à partir d'un document qui fait la synthèse des renseignements fournis par les deux directions de mesure. C'est la courbe obtenue en prenant la moyenne géométrique des ρ_a lus sur chacune des deux courbes (**) pour chaque période qui joue ce rôle de courbe caractéristique d'une station. Cette moyenne géométrique possède en effet une propriété intéressante: c'est un invariant, elle est donc pratiquement indépendante de l'orientation du système d'axes des mesures. On peut

$$(*) - K_T = \frac{K^2_L}{K_Q}$$

(**) Lorsqu'elles sont peu différentes.

démontrer cette propriété à partir des deux relations bilinéaires (*) qui existent entre les composantes harmoniques, magnétiques et telluriques orthogonales.

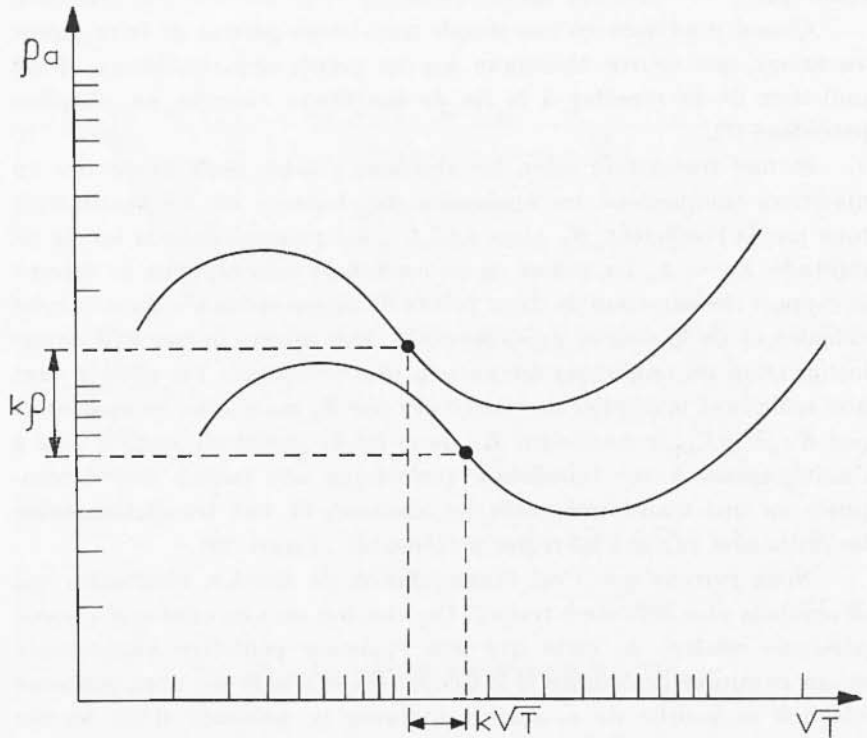


Fig. 29 - Translation des courbes magnéto-telluriques.

Lorsque les deux courbes du sondage sont par trop différentes, on ne peut plus admettre la simplification précédente, il est alors préférable de ne retenir que la courbe obtenue suivant la direction qui serait longitudinale en assimilant la structure pressentie à une structure cylindrique.

$$(*) \quad \begin{aligned} H_x &= a E_x + b E_y \\ H_y &= c E_x + d E_y \end{aligned}$$

Les coefficients a et d , nuls pour une structure tabulaire sont encore petits devant b et c quand il n'en n'est plus ainsi. La valeur $a \cdot d - b \cdot c$ du déterminant se réduit donc à $b \cdot c$. Le déterminant s'exprime alors par $\sqrt{\frac{1}{\rho_x}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_y}}$ et $\sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$ apparaît bien comme un invariant.

Précisons enfin que nous ne tentons pas, lors des calculs théoriques d'obtenir un modèle qui procurerait une courbe exactement superposable à une courbe expérimentale primitivement tracée. Nous cherchons de façon un peu différente à produire une courbe théorique qui se glisse au mieux entre les limites $(\rho_n + A\rho_n)$ et $(\rho_n - A\rho_n)$ correspondant à la dispersion des mesures. En procédant ainsi on évite, dans une certaine mesure d'attribuer trop d'importance à des valeurs de ρ_n peu significatives qui risquent d'entraîner une multiplication erronée du nombre des terrains dans la coupe géoélectrique proposée.

Si les techniques actuelles d'interprétation des sondages M.T. se rapprochent beaucoup des méthodes classiques qui consistent à traiter du point de vue du mathématicien le problème « direct » (partir de structures données et des courbes théoriques correspondantes et conduire l'interprétation par comparaisons et approximations successives), on envisage, avec l'appoint des courbes de phases, de traiter le problème « inverse » qui permettrait, en fournissant à la machine les données recueillies sur le terrain de se voir révéler la structure qui les a produites. Notons que cette solution est très séduisante, mais on ne doit pas oublier que s'il est vrai d'un point de vue strictement théorique qu'une structure donne lieu à une seule courbe, il n'en est pas moins vrai du point de vue expérimental que vu l'imprécision inexorable des mesures, une courbe peut représenter plusieurs structures légèrement différentes. C'est ce que l'on va développer dans le paragraphe suivant, en tenant compte, alors, des possibilités d'équivalence.

B. Pouvoir de résolution.

On ne se propose pas ici de traiter ce sujet de façon exhaustive, mais simplement de l'illustrer par quelques exemples précis.

Les paramètres de Darr-Zarrouk (R. Maillet, 1947) seront d'une grande utilité; on en rappelle la définition:

S est la conductance longitudinale du terrain; c'est la conductance d'un prisme de section unité d'axe normal aux couches et parcouru par un courant perpendiculaire à cet axe. $S = h/\rho$ (h : hauteur du prisme, ρ résistivité du terrain).

T est la résistance transversale du terrain; c'est la résistance du même prisme parcouru par un courant parallèle à son axe $T = h \cdot \rho$.

Dans le cas du sondage E, des courbes trois terrains correspondant à une couche conductrice mince entre deux couches résistantes peuvent

être équivalentes, c'est-à-dire entièrement confondues — au moins sur le diagramme — lorsque les couches minces ont même coefficient S (Orellana - Mooney, 1966). Il en est de même dans le cas d'une couche résistante située entre deux couches conductrices si le coefficient T est le même pour les couches minces (Figure 30).

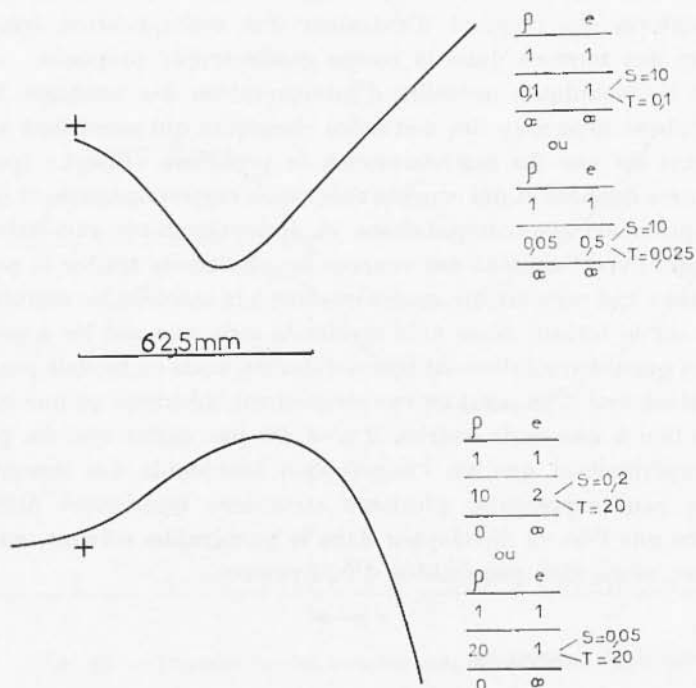


Fig. 30 - Equivalence en sondage électrique.

En magnéto-tellurique, il n'en va pas de même dans tous les cas. En effet, si les conditions d'équivalence sont identiques à celles du sondage E lorsqu'une couche conductrice est intercalée entre deux couches résistantes (coefficients S identiques), dans l'autre cas, les courbes peuvent être confondues à égalité d'épaisseur de la couche résistante quelle que soit sa résistivité (Figure 31).

Cette seconde condition d'équivalence est moins gênante que dans le cas du sondage E car il est préférable de connaître l'épaisseur d'un terrain en ignorant sa résistivité que de déterminer un produit $k \cdot \rho$ dont on ignore les deux termes.

Pour comparer le pouvoir de résolution du sondage M.T. et celui du sondage E on va considérer deux propriétés; la première sera l'épaisseur maximale à laquelle peut se produire une équivalence, la seconde sera l'épaisseur que doit atteindre le second terrain pour que ρ_a se confonde avec ρ_2 (*):

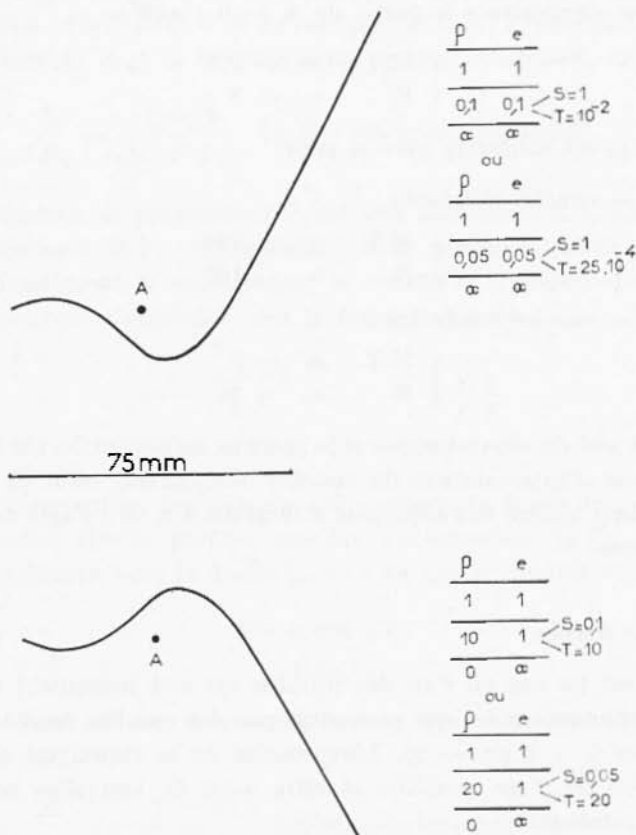


Fig. 31 - Equivalence en magnéto-tellurique.

(*) Ces deux comparaisons sont effectuées pour les coupes géoélectriques suivantes:

ρ	e		ρ	e
1	1		1	1
n	m		$1/n$	m
0	∞		∞	∞

1) Intercalation d'une couche résistante entre deux couches conductrices, équivalence à partir de $e_2 = 0$ jusqu'à:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{M.T.} \quad e_2 = 5 \\ \text{E} \quad \quad e_2 = 5 \end{array} \right.$$

2) Intercalation d'une couche conductrice entre deux couches résistantes, équivalence à partir de $e_2 = 0$ jusqu'à:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{M.T.} \quad e_2 = 0,8 \\ \text{E} \quad \quad e_2 = 3 \end{array} \right.$$

3) ϱ_a est confondu avec ϱ_2 pour:

— couche résistante

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{M.T.} \quad e_2 = 100 \\ \text{E} \quad \quad e_2 = 100 \end{array} \right.$$

— couche conductrice

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{M.T.} \quad e_2 = 5 \\ \text{E} \quad \quad e_2 = 20 \end{array} \right.$$

Il est aisé de constater que si le pouvoir de résolution est identique dans le cas d'intercalation de couches résistantes, celui de la M.T. est d'environ quatre fois supérieur à celui du S.E. s'il s'agit de couches conductrices.

C. Les cas limites.

Ce sont les cas où l'un des terrains est soit infiniment résistant, soit très conducteur (ce qui se traduit par des courbes dont les pentes sont égales à $\div 2$ ou $- 2$). L'expression de la résistivité apparente en fonction de T se simplifie et offre ainsi de nouvelles possibilités à l'interpréteur.

La présence d'un terrain très conducteur provoque l'apparition de la pente limite égale à $- 2$ sur la courbe de ϱ_a , or quel que soit l'emplacement du point sur cette droite, l'épaisseur calculée d'après ses coordonnées est toujours la même. Ainsi, d'une courbe expérimentale

avec $n = 10$ et $n = 20$.

Avec la M.T. une équivalence parfaite pour les couches conductrices minces est pratiquement impossible pour une structure à trois terrains, elle ne devient effective qu'en présence de plus de trois couches.

comportant une portion de droite de pente -2 on est assuré de tirer au moins l'épaisseur des terrains surmontant la couche conductrice. Il n'y a indétermination sur le nombre et la nature des terrains sus-jacents que dans la mesure où l'on n'aurait obtenu que des points expérimentaux alignés sur cette droite de pente -2 .

a) — Dans le cas d'un substratum conducteur surmonté d'une seule couche (d'épaisseur h et de conductibilité σ_1) l'expression de l'impédance indique déjà la simplification permise (Cagniard, 1953):

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1 T}} \frac{h}{P_1} \quad (\text{unités électromagnétiques}).$$

Si la profondeur de pénétration P_1 est très supérieure à h , c'est-à-dire si les variations M.T. correspondant à la période étudiée pénètrent déjà profondément le substratum, la résistivité apparente et la profondeur peuvent s'exprimer sous la forme suivante:

$$\rho_a = \frac{4 \pi^2 h^2}{5 T} ; \quad h = \sqrt{\frac{y}{8}}$$

(Ωm, s, km) (km)

où y est l'intersection de la droite $\sqrt{T} = 1$ avec la droite de pente -2 . Porstendorfer (1965) préfère prendre l'intersection ($\sqrt{T_0}, 1$) de la droite précédente avec la droite $\rho_a = 1$ ce qui le conduit à:

$$h = 0,356 \sqrt{T_0}$$

(km, s)

b) — dans le cas d'un substratum très résistant l'impédance s'exprime par:

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{1}{2 \sqrt{\sigma_1 T}} \frac{P_1}{h} \quad (\text{unités électromagnétiques})$$

ce qui conduit à

$$h = \frac{\rho_1}{\sqrt{8 y}} \quad \text{ou } h = 0,356 \rho_1 \sqrt{T_0}$$

si une seule couche repose sur le substratum on a la possibilité de connaître très facilement ρ_1 par d'autres méthodes (sondage E, électromagnétisme, carottage électrique, etc...), mais si le sous-sol est plus complexe il faut tenir compte des paramètres σ_i et h_i de chaque couche

et la conductance de l'ensemble des terrains de recouvrement est $\Sigma \sigma_i h_i$. On n'a pas accès directement à cette conductance mais on peut la déduire de l'étude de logs électriques de forages par exemple, ou bien la calculer en effectuant un sondage à un endroit où seule la côte du socle est connue, en posant:

$$\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{H}{\rho_s} \quad (*)$$

(km, Ωm , s).

L'analyse d'une seule période peut conduire à une interprétation quantitative à condition que le point correspondant soit bien sur la droite de pente limite $\div 2$. Dans ce cas seulement, on obtient:

$$H = \frac{\rho_s}{2\pi} \sqrt{\frac{5T}{\rho_a}} \quad (\text{km}, \Omega\text{m}, \text{s}).$$

Cette technique n'est autre que le profilage M.T. imaginé par Berdichevski dès 1959, procédé largement utilisé en U.R.S.S. depuis cette date. Son utilisation présente certains dangers car ρ_s peut varier sur l'étendue d'un bassin important (par passages latéraux, biseautages, plis, etc...). Il est donc conseillé de s'assurer de la constance de ρ avant de proposer des interprétations trop catégoriques.

D. Les sondages croisés.

Nous avons pris l'habitude d'effectuer deux courbes par station en enregistrant simultanément les quatre composantes horizontales du phénomène naturel: E_x , H_y et E_y , H_x . Sur un terrain répondant parfaitement aux hypothèses de la théorie établie par Cagniard (1953) les deux courbes seraient rigoureusement identiques. Mais en fait, il est bien rare que la plus calme des sédimentations ne présente pas la moindre trace d'anisotropie. Les deux courbes diffèrent donc presque toujours mais à des degrés divers. Si l'on a une idée des directions tectoniques de la région, il sera judicieux d'orienter les lignes telluriques suivant la direction structurale dominante et la perpendiculaire à celle-ci. Les divergences peuvent se manifester sur l'ensemble de la courbe ou au contraire dans un intervalle quelconque de périodes correspondant à un seul terrain.

(*) H et ρ_s étant l'épaisseur et la résistivité apparente de l'ensemble des terrains sus-jacents.

Malgré ces dissemblances il est fréquent que l'interprétation des deux courbes considérées intrinsèquement conduise à deux coupes géo-électriques différentes par les résistivités, mais semblables quant aux épaisseurs, paramètres les plus appréciés des prospecteurs. Il peut arriver aussi qu'anisotropie et rapports de résistivité s'agencent de telle façon que le socle électrique ne corresponde pas au même étage géologique sur les deux coupes et nous insisterons pour que l'on définisse avec soin ce terme de socle dont l'acception peut varier d'un interlocuteur à l'autre.

L'interprétation des sondages croisés les plus complexes est délicate à partir des documents analogiques que nous recueillons actuellement car ils n'offrent pas la souplesse d'une information sous forme digitale qu'il est possible de traiter par différents programmes sans alourdir le travail de déponillement, ni sans allonger par trop les délais. Il serait bénéfique de pouvoir suivre les changements de polarisation au cours du temps et leurs effets sur une structure complexe pour mieux comprendre certaines anomalies (*).

E. Les courbes de déphasage.

S'il était prévu (Cagniard, 1953), et plusieurs auteurs l'ont confirmé par des études ultérieures, que les courbes du déphasage θ en fonction de \sqrt{T} n'apportent qu'une confirmation des informations contenues dans le diagramme des ρ_a , il n'est cependant pas inutile d'insister un peu sur les particularités de cette source complémentaire de renseignements.

L'abaque des θ (Figure 13b) pour « deux terrains » montre d'une part des oscillations de faible amplitude autour de la droite $\theta = \pi/4$ et d'autre part des pentes plus importantes que son équivalent en ρ_a ce qui peut se révéler plus favorable dans l'étude des cas complexes où l'on peut manquer de précision quand on se borne à interpréter la courbes des ρ_a .

Mais l'apport principal des phases provient du décalage des informations en fonction de T entre cette courbe et celle des résistivités. En effet si l'on considère le point commun le plus à droite dans les deux réseaux de courbes théoriques, ce point a pour abscisse $\sqrt{T} = 8$

(*) Fortes dispersions des rapports E/H à certaines fréquences - Pentas anormalement élevées — Divergences anormales entre ρ_x et ρ_y .

dans l'abaque des ϱ_a et $\sqrt{T} = 4$ dans l'abaque des θ . Ceci est une conséquence des relations donnant l'intersection des courbes du réseau ϱ_a avec la droite $\varrho = 1$ et des courbes du réseau θ avec la droite $\theta = \pi/4$ (Cagniard, 1953).

Dans le premier cas:

$$\cos \frac{\varrho}{P_1} = 0. \quad \text{D'où, avec } P_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\varrho T}$$

$$\sqrt{T} = \frac{8}{2n+1} \quad (\text{unités électromagnétiques}).$$

Dans le second cas:

$$\sin \frac{\varrho}{P_1} = 0 \text{ et, pour la même raison}$$

$$\sqrt{T} = \frac{4}{n}.$$

En conséquence lorsque $\sqrt{T} = 8$, la courbe de ϱ_a coupe l'axe des abscisses alors que la courbe de θ l'a déjà fait bien avant (pour $\sqrt{T} = 4$) le décalage s'accroît d'ailleurs quand T s'accroît (*), si bien qu'en cas de difficultés (parasites) ou d'imprécisions sur les ϱ_a à certaines fréquences on peut envisager de compléter les informations par des résultats obtenus avec les décalages de phases correspondant à des fréquences plus favorisées.

(*) Dans le cas de « deux terrains ».

TROISIÈME PARTIE

RÉSULTATS DE PROSPECTIONS PÉTROLIÈRES
GÉOLOGIQUES OU MINIÈRES

CHAPITRE I. — PROSPECTIONS PÉTROLIÈRES.

A. *Une prospection de grande reconnaissance.*

1. Introduction.

Cette étude a été réalisée pour l'Entreprise de Recherches et d'Activités Pétrolières qui a permis la publication de certains résultats. Il n'est pas possible, bien sûr, d'exposer tous les enseignements de cette mission, cela ne nous privera pas cependant d'apprécier et de discuter les résultats obtenus en fonction des connaissances déjà acquises et des hypothèses les plus sérieuses qu'elles purent susciter.

Le territoire à étudier s'étend environ sur 10000 km² et la densité des sondages est faible (un pour 500 km²). En pareil cas il se présente essentiellement deux façons d'opérer: ou bien concentrer l'étude sur un ou deux points particuliers afin d'obtenir d'emblée des renseignements précis, ou bien disperser les points de mesure de façon à vérifier les grandes lignes structurales en évitant de se confiner dans des zones trop perturbées par leur géologie ou par leur activité industrielle.

On a opté pour une solution qui procède à la fois des deux techniques envisagées ci-dessus en plaçant des sondages dans chaque région naturelle du pays et en concentrant quelques mesures sur un profil particulièrement intéressant.

La région prospectée n'est rien moins que favorable. D'abord elle est fortement montagneuse, creusée de profondes vallées. D'autre part, on sait que la tectonique, en surface comme en profondeur, n'est pas moins compliquée que la topographie. Un certain nombre de forages ont démontré l'existence de multiples chevauchements.

2. Situation géologique.

De façon un peu plus précise le domaine prospecté se décompose naturellement en trois zones structurales.

— A l'Est on note une zone haute du socle qui affleure pratiquement en maints endroits. Dans l'ensemble, la couverture sédimentaire est relativement peu épaisse, le socle s'enfonçant brutalement à la faveur d'un grand accident vers l'Ouest et plus lentement vers l'Est.

— La zone centrale au contraire est caractérisée par une épaisse sédimentation à dominante marneuse couronnée de quelques reliefs

calcaires. C'est cependant la couverture souple qui a imposé ses réactions aux efforts tectoniques. Deux phases paraissent essentielles, la première provoquant des structures E-W tandis que la seconde jouait perpendiculairement à celle-ci; vers le Nord, cette dernière phase fut largement dominante.

— La troisième zone, au Sud-Ouest, est surtout faite de reliefs calcaires orientés E-W. Ce matériau très résistant a réagi par des cassures aux poussées tectoniques, les directions principales étant N-S et NW-SE, bien distinctes des axes de plis E-W.

Le socle est peu connu. Il convient d'ailleurs de remarquer la diversité des définitions attribuées à ce terme. En ce qui nous concerne, c'est habituellement le dernier terrain résistant rencontré. Il arrive parfois que le contraste des résistivités entre socle et terrain sédimentaire, trop faible, provoque une certaine indétermination lors de l'interprétation. Cet inconvénient se présente aussi lorsque la résistivité s'accroît progressivement avec la profondeur. A cet égard, les problèmes du Géophysicien sont du même ordre que ceux du Géologue en face des terrains métamorphiques par exemple.

3. Données géophysiques et géologiques.

Elles consistent essentiellement en de précieux documents fournis par les forages expérimentaux effectués non loin de nos points de mesure. Une douzaine de logs électriques provenant de ces forages ont ainsi permis l'établissement de coupes géoélectriques typiques de la région. Il faut cependant prendre garde de n'attribuer à ces documents qu'une valeur très locale dans une région de structure si complexe. On constate d'ailleurs très vite que des forages voisins peuvent révéler des coupes stratigraphiques très différentes par suite de variations de faciès, biseautages, failles, plis, chevauchement, etc. . . .

D'autre part, peu de forages ont atteint le socle et c'est d'ailleurs le but de notre travail que de tenter de préciser sa cote.

Il est un document essentiel que l'on peut tirer de toutes ces informations, c'est la courbe théorique du sondage M.T. qui serait effectué à l'emplacement du forage. On obtient ainsi une bonne image de ce que devraient donner les mesures réalisées au voisinage immédiat de ce forage. Il va sans dire que la courbe théorique sera d'autant plus précieuse que le trépan aura atteint des couches plus profondes. Les indications concernant les couches superficielles, que seule l'étude

de fréquences plus élevées pourrait fournir, présentent aussi un certain intérêt dans la mesure où elles diffèrent des indications relatives aux couches plus profondes. On peut alors, en quelque sorte, compléter la courbe expérimentale et procéder à une interprétation plus précise.

Nous avons eu d'autre part connaissance des résultats d'une prospection aéromagnétique et des conclusions de nombreux travaux géologiques effectués sur le terrain.

L'ensemble de ces données préliminaires se traduit par la constitution d'un véritable dossier comprenant à la fois des indications générales sur la région concernée par cette prospection, et une étude détaillée sur chaque point de mesure exposant les résultats acquis et les hypothèses à préciser ou à infirmer.

4. Les mesures.

Elles se sont déroulées dans de bonnes conditions climatiques qui firent oublier l'inconvénient d'avoir une cinquantaine de kilomètres à parcourir en moyenne pour atteindre chaque station. La répartition des stations interdisait l'installation d'une véritable base, c'est pourquoi nous avons changé deux fois de point de départ afin de maintenir la cadence du sondage quotidien.

L'équipe étant assez nombreuse (quatre géophysiciens dont un électronicien, un agent technique et deux ou trois stagiaires), il était possible de confier le choix de l'emplacement exact des stations et les travaux de topographie à deux personnes qui travaillaient ainsi indépendamment des autres. En dehors de la mise en station et du départ, le sondage n'exige qu'une ou deux personnes pour la surveillance des enregistrements, l'analyse en direct, ou pour le play-back. Une autre partie de l'équipe pouvait ainsi se consacrer au dépouillement des premiers enregistrements. Les premières courbes furent obtenues de cette façon pendant le déroulement de la mission et les enseignements qui en furent tirés ont permis de proposer l'étude d'un profil particulier.

Chaque station a donné lieu à un sondage croisé, méthode préférable dans une région aussi complexe. Un seul défaut d'un capteur magnétique nous a privé d'une courbe à la station 19.

Nous présentons quelques courbes typiques des trois familles dans lesquelles nous avons pu classer les trente neuf diagrammes résultant de cette prospection (Fig. 32).

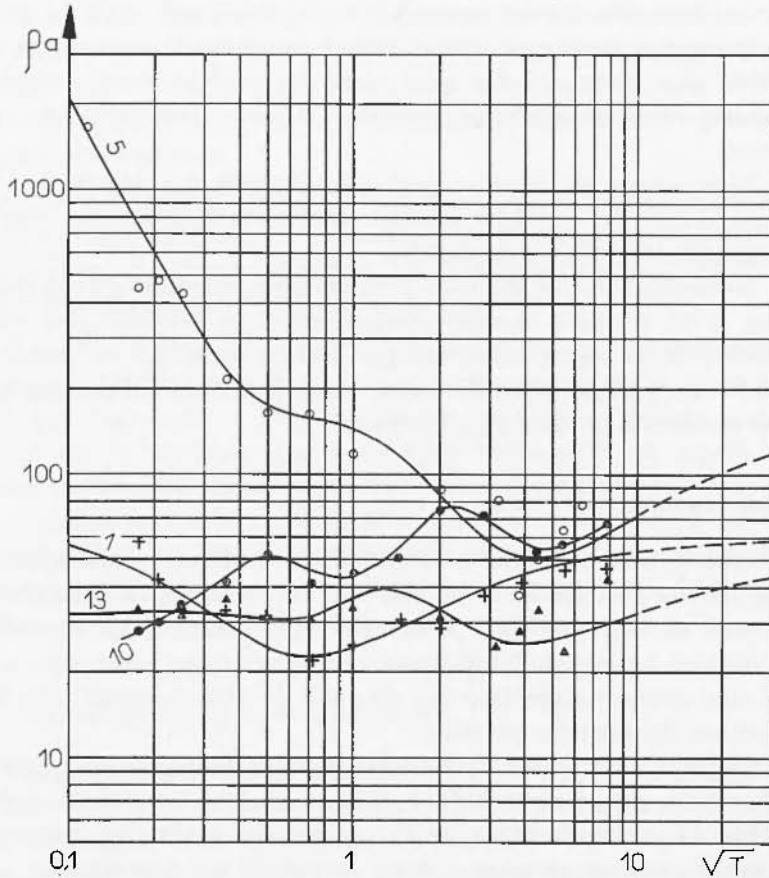


Fig. 32 - Quelques courbes expérimentales de la campagne de grande reconnaissance.

L'étude statistique réalisée sur l'ensemble des mesures apporte des conclusions intéressantes; les chiffres obtenus sont consignés dans le tableau suivant:

	Ligne tellu- rique N-S	Ligne tellu- rique E-W	Moy. géomé- trique des β_a
Classe modale	20-25	15-20	20-25
Fréquence relative de la classe modale	19%	23%	25%
Médiane	26,4	21,1	23,7
Moyenne arithmétique	28,5	23,0	24,6

Ils traduisent en pourcentage les caractéristiques de l'écart moyen calculé lors du déponillement des enregistrements, quant aux rapports e/h lus sur le papier. Les histogrammes font apparaître une distribution unimodale de la dispersion, la fréquence de la classe modale étant bien supérieure à celle des autres classes. Les mesures suivant la direction E-W sont légèrement meilleures que selon la direction N-S quant à leur précision.

La distribution de la dispersion n'est pas exactement gaussienne pour les deux directions de mesure, elle s'en approche davantage pour la moyenne géométrique dont nous verrons l'utilité plus loin. On peut retenir une valeur moyenne de 20% pour la dispersion des mesures effectuées lors de cette mission; nous obtenons d'ordinaire des valeurs comprises entre 10 et 15% et on peut dire qu'ici la part provenant de la complexité structurale est assez grande.

5. Résultats de l'interprétation.

a) Cartes de la résistivité apparente.

A la différence des cartes de résistivité établies avec les méthodes électriques classiques, celles-ci ne traduisent pas un « écorché géologique » dans lequel l'épaisseur des terrains intéressés reste sensiblement constante (*). La profondeur de pénétration est en effet proportionnelle à ρ de sorte que les courbes d'isoresistivités pour une période donnée ne reproduisent aucunement l'image des isobathes d'un terrain, quelconque ou d'une partie de terrain. Leur signification, pour qualitative qu'elle soit, n'en demeure pas moins réelle, l'examen des deux cartes présentées en attestera. On est frappé au premier coup d'oeil par leur concordance avec les grands traits de la géologie dont il a été fait mention ci-dessus.

Des deux cartes, celle qui est établie pour $T = 0,04$ s (Fig. 33) a évidemment une signification plutôt superficielle (**), on y distingue très bien les zones Est — Centre — Sud-Ouest et l'esquisse d'une zone Nord-Ouest, la zone centrale présentant un « golfe » vers le Nord-Est. La

(*) Il est cependant possible de produire un tel document en M.T. en traçant non pas la courbe $\rho_a = f(\sqrt{T})$ mais $\rho_a = f(P)$ avec P profondeur de pénétration = $\frac{1}{2\pi} \sqrt{10 \rho_a T}$ (Cagniard, 1953).

(**) P est d'environ 500 m pour $\rho_a = 20 \Omega\text{m}$ et de 3 km pour $\rho_a = 1.000 \Omega\text{m}$.

corrélation avec les faciès géologiques de surface est excellente: très fortes valeurs de ρ_a à l'Est où le socle est très proche, valeurs moins élevées au Sud-Ouest et au Nord-Est correspondant aux reliefs calcaires, et faibles valeurs sur une vaste zone limitée par ces trois pôles résistants, vaste zone s'identifiant très bien à l'extension du faciès marneux déjà décrit.

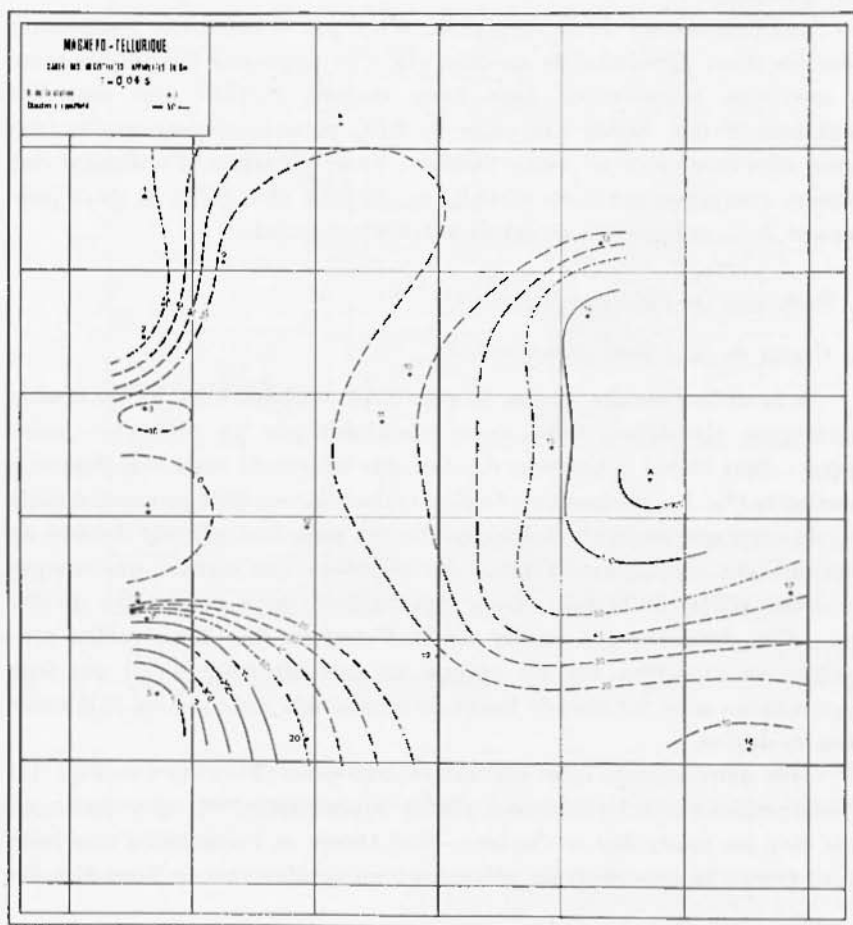


Fig. 33 - La légende est déjà sur la figure.

La seconde carte ($T = 49$ s) intéresse des profondeurs plus importantes (*) (Fig. 34), et les indications qu'elle fournit sont dégagées

(*) P va de 11 à 160 km lorsque ρ_a passe de 10 à 2000 Ωm .

en bonne partie de l'influence des structures superficielles. C'est ainsi que les zones Sud-Ouest et Nord-Est qui pouvaient apparaître comme peu profondes au seul examen de la première carte à cause de la forte

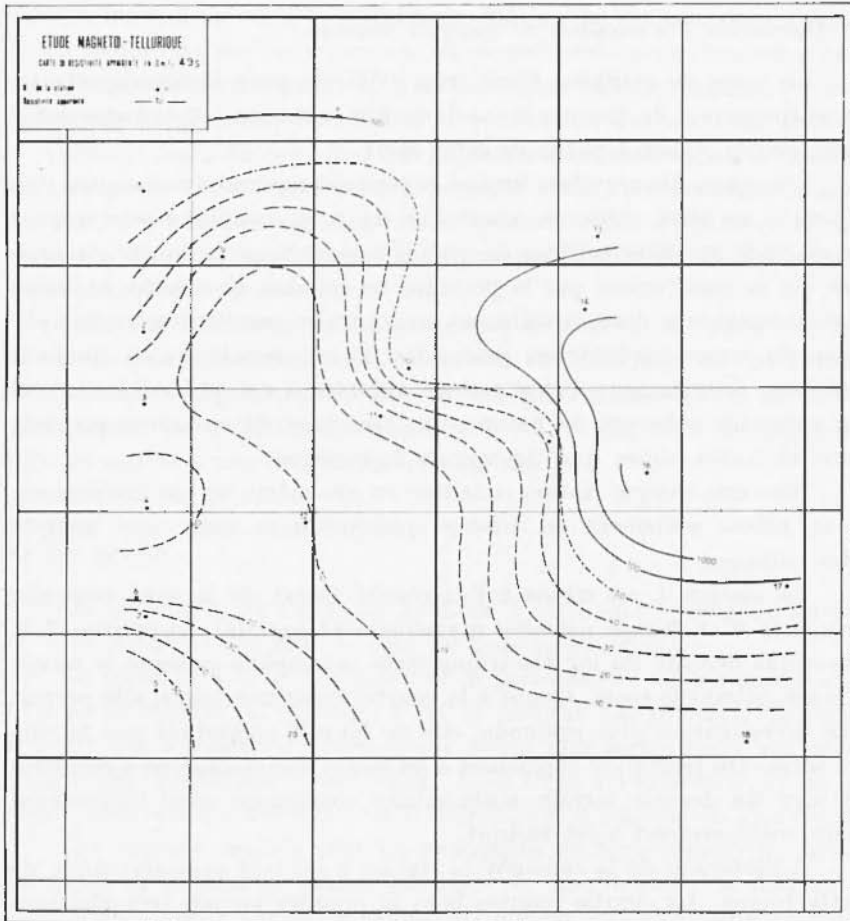


Fig. 34 - La légende est déjà sur la figure.

résistivité des premières couches, manifestent ici l'épaisseur de leur couverture sédimentaire par une diminution des ρ_a vers les grandes périodes. La zone conductrice centrale est marquée par un axe NW-SE, présentant un léger étranglement à hauteur de la station 10.

À cette différence près, dont les conséquences structurales restent à établir, la similitude des contours des deux cartes est frappante. On

peut en conclure que, dans les grandes lignes, les régions naturelles présentées au début de ce chapitre traduisent bien la géologie structurale de la région.

b) *Discussion des résultats de quelques stations.*

La carte de synthèse étant trop explicite pour être présentée ici on se contentera de discuter le cas de certaines stations et de commenter deux profils établis à partir de cette carte.

L'examen des résultats impose cependant quelques remarques. On constate en effet certaines anomalies dans les coupes géoélectriques de stations par trop voisines de grands accidents géologiques. Anomalies qui se manifestent par la présence de couches résistantes anormalement épaisses et dans certains cas, au contraire, par l'existence inexplicquée de zones conductrices profondes. Il est certain qu'on ne peut proposer actuellement d'explications valables à ces phénomènes, seul un ensemble cohérent de mesures au voisinage de ces zones pourrait susciter autre chose que de vagues hypothèses.

Bien que chaque station constitue en elle-même un cas intéressant, nous allons seulement en retenir quelques-unes pour une analyse plus poussée.

La station 1 est située à l'extrémité Ouest de la zone centrale, très près d'un forage pétrolier moyennement profond. La courbe M.T. théorique déduite du log électrique reste incomplète puisque le forage n'a pas atteint le socle. Quant à la courbe expérimentale si elle permet une investigation plus profonde, elle ne fournit cependant pas la côte du socle. On peut fixer cependant à au moins une dizaine de kilomètres le mur du dernier terrain sédimentaire confirmant ainsi l'hypothèse d'un socle profond à cet endroit.

A l'intérieur de la zone SW la station 5 est très caractéristique de cette région. La courbe montre bien le premier terrain très résistant (près de 3000 Ω m) suivi d'épaisses couches plus conductrices reportant le toit du socle à dix kilomètres. La courbe obtenue d'après un forage voisin révèle une similitude frappante avec la courbe moyenne expérimentale.

Au Nord de la zone centrale, la station 10 présente un de ces cas complexes d'intercalation de couches résistantes anormalement épaisses. Sa situation au Nord d'une ligne d'affleurement de Trias peut justifier l'hypothèse d'une zone particulièrement « chahutée » susceptible de produire de telles anomalies. Et tout état de cause les documents recueil-

lis ici nous incitent plutôt à penser qu'il s'agit d'une zone profonde du socle contrairement à ce qui était attendu (*).

Dans la zone haute du socle à l'Est, la station 14 révèle bien l'existence d'un terrain sédimentaire de puissance voisine de cinq cents mètres, suivi d'un socle très résistant. La courbe est très simple puisqu'en dehors de ces deux terrains on perçoit seulement l'amorce d'une zone conductrice profonde. L'hypothèse d'un redoublement de série, émise par les géologues de l'ERAP, ne trouve ici aucune confirmation.

Vers le Nord-Est on attendait la preuve de l'ensellement, au niveau de la station 13, entre la zone précédente et le socle en affleurement. De fait, les données expérimentales montrent bien l'existence d'une série sédimentaire assez importante puisque le toit du socle s'enfoncerait à quelques quatre kilomètres.

Quant à la station 16, la proximité du socle y est telle que les résistivités ne descendent pas en-dessous de 1000 Ωm , les inflexions de la courbe correspondent alors à des différenciations du socle en profondeur. La pellicule sédimentaire s'est révélée trop mince pour être accessible à nos fréquences les plus rapides.

c) Les profils.

On présentera ici l'analyse de deux d'entre eux seulement (profil n° 1 et profil n° 3), mais ce sont les plus significatifs.

Le profil n° 1 (Fig. 35) présente la particularité de comporter une plus forte densité de stations. C'est le résultat des premiers dépouillements qui a montré l'intérêt d'une étude plus serrée dans une zone posant des problèmes structuraux. Il se situe à l'extrémité W de la région prospectée et s'étend de la station 5 au Sud à la station 1 au Nord.

Les niveaux repérés sont les formations de forte résistivité, généralement de puissantes assises calcaires ou bien le socle. On distingue ainsi trois niveaux sur cette coupe: H_1 qui est un calcaire du Crétacé inférieur, H_2 du Jurassique supérieur et H_3 assimilant le plus souvent Lias inférieur et socle.

L'horizon H_1 n'est visible qu'au Sud (stations 5, 6 et 7) et sa puissance décroît rapidement vers le Nord. L'horizon H_2 voisin du précédent, réapparaît quant à lui au Nord à la station 2, soulignant

(*) La profondeur proposée de treize kilomètres peut, néanmoins être exagérée par l'épaisseur de la couche résistante.

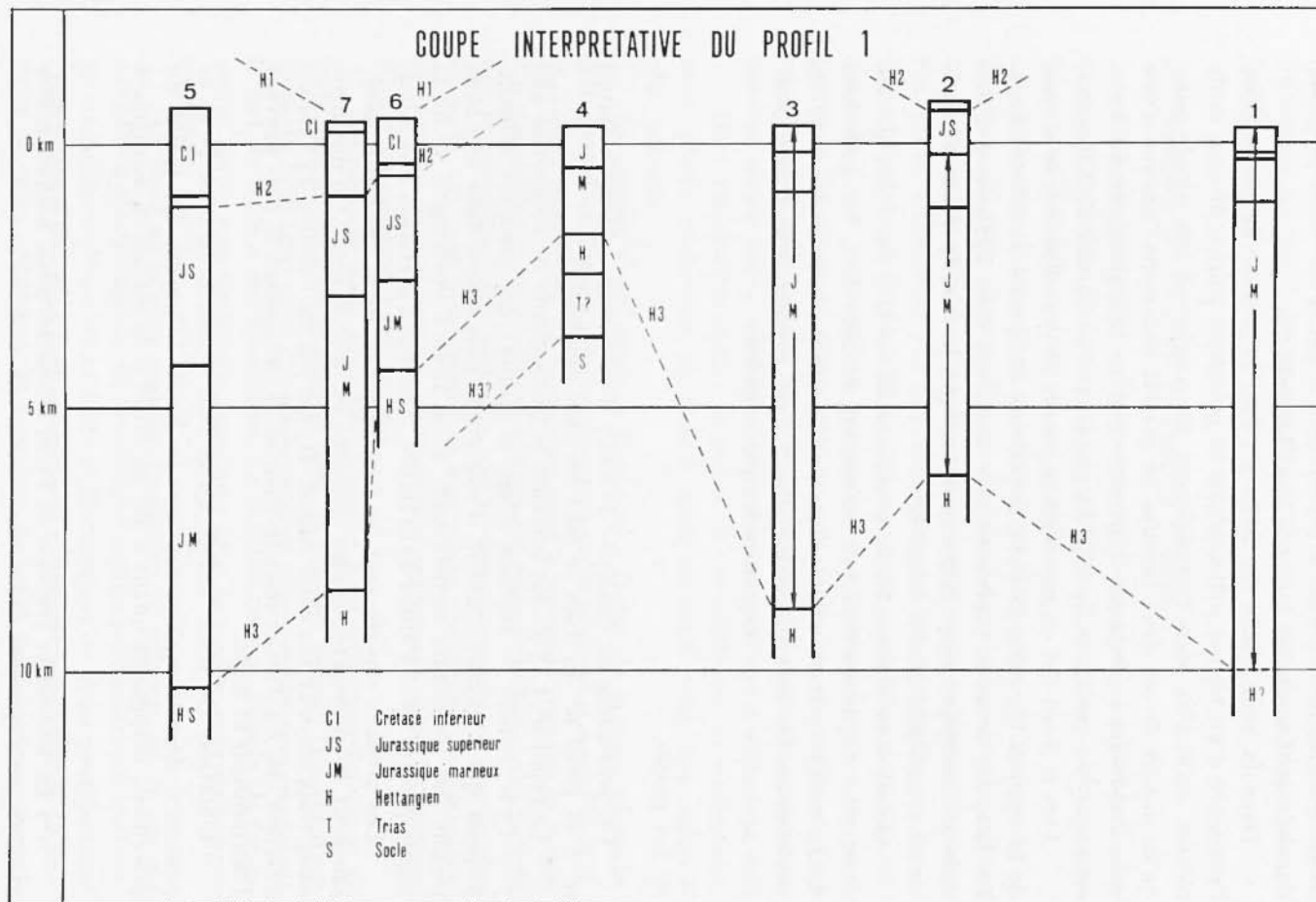


Fig. 35 - La légende est déjà sur la figure.

ainsi le mouvement anticlinal dont l'axe passerait approximativement par la station 4. On note un étirement très net des couches marneuses vers le sommet de l'anticlinal, conséquence d'une remontée brutale du socle électrique qui se différencie du Lias uniquement à la station 4, ce qui impliquerait la présence d'un trias conducteur en cette station. Vers le Nord, les couches marneuses retrouvent une puissance considérable, si bien qu'à la station 1 leur mur ne se manifeste pas sur la courbe.

Le profil n° 3 (Fig. 36) de direction approximative E-W n'est pas rectiligne car on a tenu à le faire passer par un forage pétrolier voisin. La faible densité des stations en dehors du profil précédent explique leur petit nombre sur ce profil. Cette coupe va surtout mettre en évidence la remontée du socle, puis sa chute en pente douce vers l'Est. L'horizon H_1 n'est plus visible. Il y a bien des formations du Crétacé, mais, par passage latéral, elles sont devenues plus proches des marnes. Par contre le niveau H_2 se suit aisément sauf à la station 17; il n'apparaît pas en 12 alors qu'en 4 subsiste la même particularité que précédemment, savoir qu'ici on peut dissocier l'Heltingien du socle.

6. Erreurs possibles sur les résultats.

Il est difficile d'apprécier rigoureusement la marge d'erreur qui doit être affectée aux résultats de l'interprétation. Une étude fondée sur l'imprécision des courbes de sondage due aux écarts moyens sur q_a risque de conduire à une surestimation des erreurs. Car il n'est en général pas possible de tracer successivement une courbe passant par toutes les valeurs minimales de q_a et une autre passant par les valeurs maximales. La solution qui est retenue ne laisse parfois que peu de latitude pour d'autres tracés, cela n'est cependant pas une preuve de précision.

On doit distinguer dans cette étude le cas des couches résistantes et des couches conductrices. Dans la deuxième partie on a déjà montré une différence très nette du pouvoir de résolution de la méthode quand on fait cette distinction. Il faut de plus, introduire l'indétermination provoquée par les possibilités d'équivalence.

Avec les couches résistantes c'est l'erreur expérimentale qui est responsable de l'imprécision de l'interprétation. Si l'écart moyen est de $\pm 10\%$, l'épaisseur du second terrain pourra par exemple être de 15 ou de 20 fois celle du premier terrain. Par contre les équivalences n'apporteront de doute que sur la résistivité du terrain résistant à l'exclusion de son épaisseur.

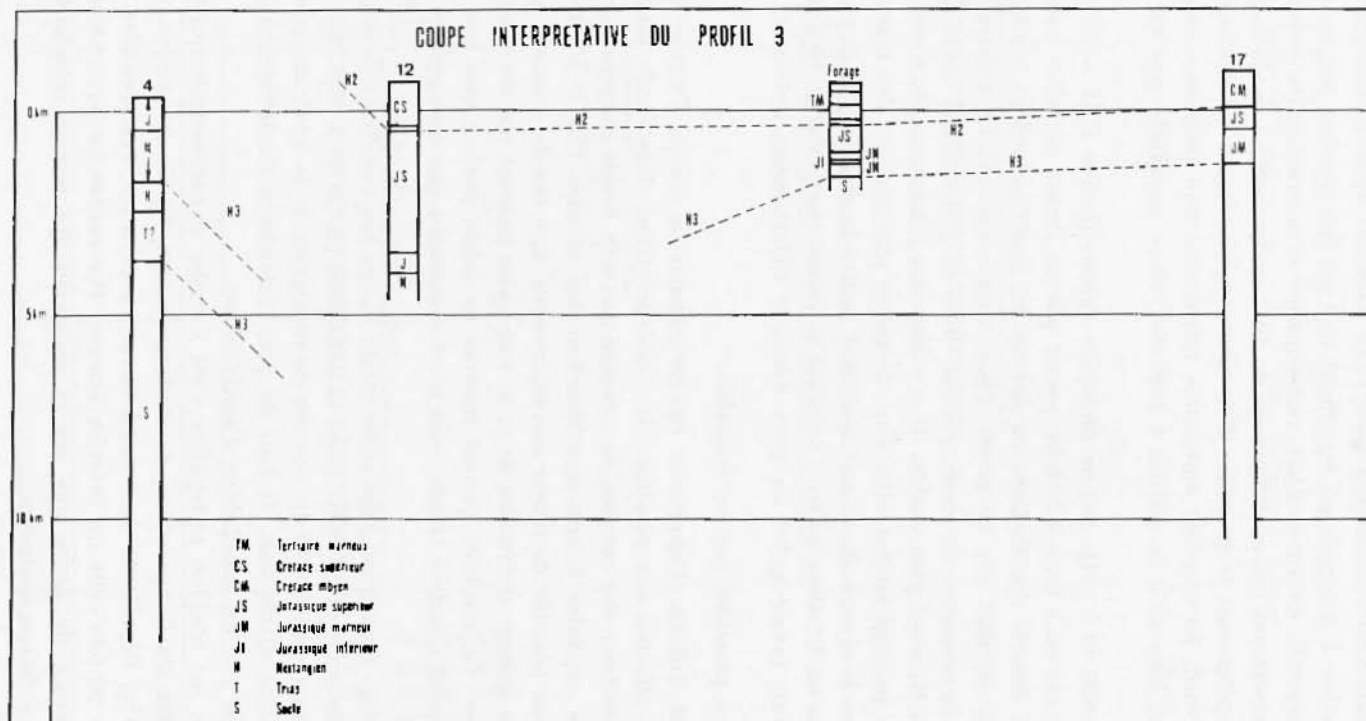


Fig. 36 - La légende est déjà sur la figure.

Si la couche intermédiaire est conductrice, dans une situation analogue à la précédente, on n'hésite plus qu'entre 15 et 16,5 pour les valeurs de e_2/e_1 . Mais alors les équivalences ont de plus graves conséquences car elles jouent sur l'identité des rapports e_2/ρ_2 . Même en restant dans des limites raisonnables pour le choix de ρ_2 , il n'est pas rare que e_2 puisse ainsi varier dans de larges limites (1 à 2 par exemple). Les plus graves indéterminations n'interviennent d'ailleurs pas pour les coupes à trois terrains, mais pour celles qui en comprennent davantage.

Cette étude, très sommaire, montre que finalement la détermination de l'épaisseur des terrains est entachée d'une imprécision du même ordre de grandeur dans tous les cas bien que les causes de cette imprécision n'agissent pas de façon identique en face des différents types de structures.

7. Conclusion.

Les résultats de cette mission ne répondent certes pas avec précision à toutes les questions qui étaient posées. L'apport de la M.T. n'est cependant pas discutable; il se situe bien au-dessus d'une simple vérification des grandes lignes structurales, vérification au demeurant effectuée par les seules cartes de résistivité. Les coupes géoélectriques répondent dans la plupart des cas aux problèmes posés; même si les côtes ne sont pas toujours fournies, on a pu vérifier ou infirmer les hypothèses quant à la profondeur du socle, et partant, à l'épaisseur de certains terrains. Les coupes interprétatives, pour leur part, prouvent bien l'intérêt de la méthode. Il est à remarquer qu'une prospection équivalente à celle-ci, mais en terrain inconnu, paraîtrait beaucoup plus fructueuse car toutes ses conclusions seraient nouvelles et ne se contenteraient pas, comme ici de confirmer les connaissances acquises parfois de longue date par une multitude d'observations et de mesures.

Les améliorations souhaitables sont multiples. Pour le cas présent, la plus importante, avec possibilité d'application immédiate, serait l'analyse de périodes supérieures à la minute de façon à toujours bien caractériser le socle.

B. *Prospection dans la région d'Istres.*

1. Introduction.

Un autre exemple de prospection de grande reconnaissance est donné avec la dizaine de sondages M.T. effectués sur le permis de la

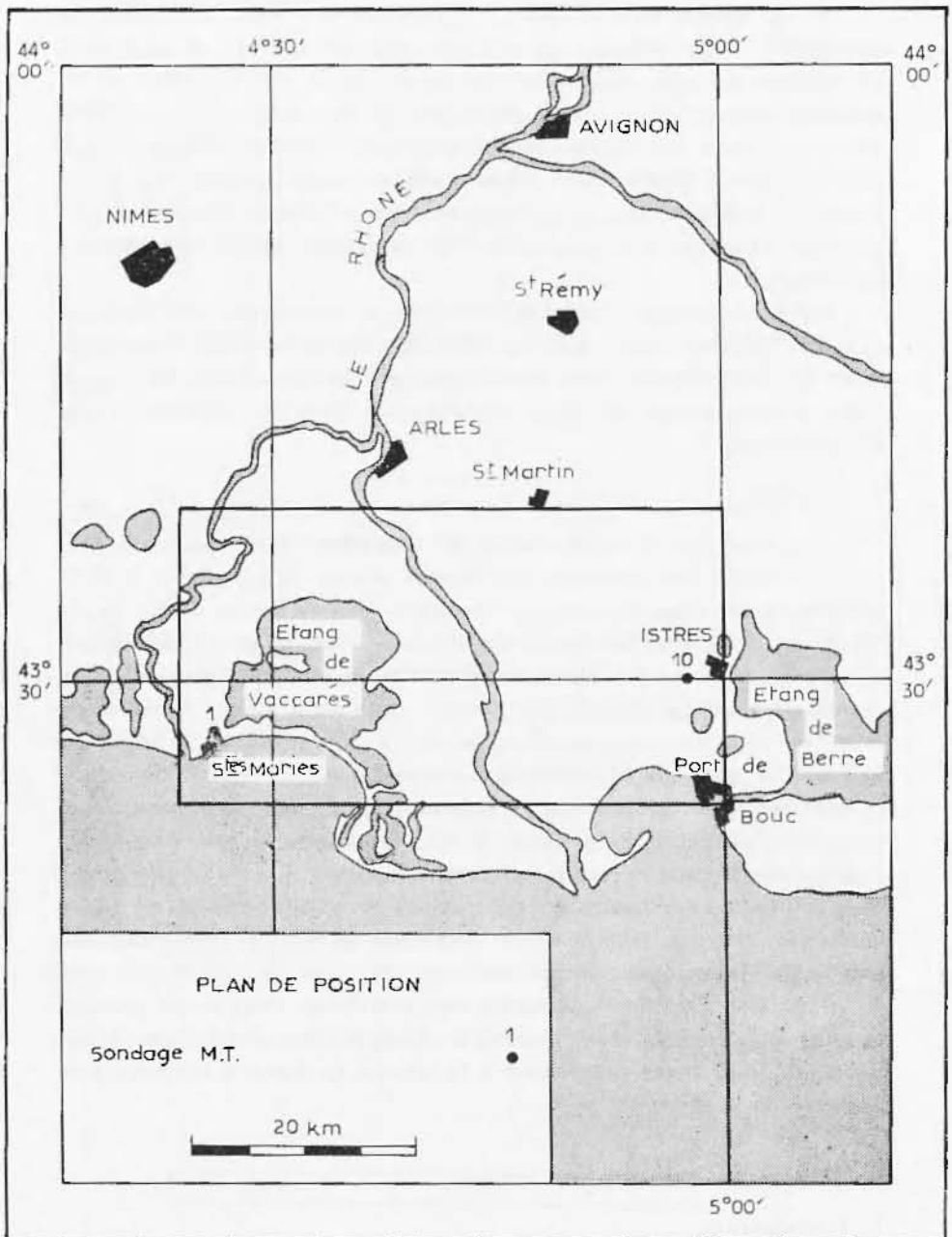


Fig. 37 - Situation géographique de la prospection M.T. dans la région d'Istres