

**Résultats d'études théoriques et expérimentales
concernant les phénomènes de polarisation
provoquée dans le cadre d'applications géophysiques (*)**

D. TOURNIER

Received on February 9th, 1972

SUMMARY. — The present treatise can be subdivided into four sections. The first is concerned with I. P. phenomena in general, the diverse ways in which one may study such a phenomenon, the different parameters governing it or permitting us to define it. A parallel is also drawn between the induced polarization and resistivity methods.

The second section is essentially theoretical. An effort is made to schematize as much as possible a certain number of idealized typical cases for which the polarization produced by the passage of a continuous current may be calculated with precision, for two- or three-dimensional structures. In these calculations we assume that the duration of passage of the current is sufficiently long for maximum polarization to be attained. These hypotheses, necessarily and voluntarily oversimplified, have no other purpose than to orient the person who is to interpret the phenomenon in question, to help him to comprehend the mechanisms brought into play therein — hence to guide him when he is confronted with the much more complex results yielded by actual field surveys. One is thus obliged to recognize that despite a certain parallel between the techniques of classical electrical sounding and I. P. sounding, the analogy must by no means be drawn too closely. The overall aspect of the two types of sounding is not at all the same.

Although such calculations are highly useful, there is, none the less, a world of difference between highly simplified examples and actual problems. This gives rise to the necessity for an intermediate stage for which only an experimental study by analogy, carried out on models, can be taken under consideration.

The third section is consequently experimental and deals precisely with models.

(*) Thèse soutenue devant la Commission: L. Cagniard, Président; J. Delloue, J. Goguel, Examineurs.

Attention is first given to the very simple case of a linear cell, that is, to a one-dimensional structure. A study is made of the interface potential and of its dependence upon the principal variables such as current density, time, etc. Thence we move on to the general problem of the analogical representation of the I.P. field by means of the "electric tank". A description is given of such a tank — its disposition, the materials as well as the measuring devices used.

Secondly, different models corresponding as nearly as possible to the theoretical cases, previously calculated were thus able to be put to the test in the electric tank: horizontal plane, vertical half-plane, parallelepiped, sphere, etc. Hence it was possible to compare the experimental results with the theoretical calculations and to note a very satisfactory agreement between them. Having recourse to models is therefore found to be justified whenever the actual structures become far too complex to become the object of calculations.

The fourth part describes the results of the various tests associated with the actual application of the process in the field.

Accordingly, independently of the results already published under the name of Roussel, one will find a rather spectacular study of the Soulier semi-conducting sulphides in the Gard (France). The bauxite deposits of the Var (France) have posed a more difficult problem. Another difficult problem which may be classified as a structural study was the search by indirect means of possible uranium-bearing deposits near the basement. A study was likewise conducted in the Charité-sur-Loire (Nièvre, France) area.

As concerns deep probes, one may find it to his advantage to substitute the "dipole" electrode array for the classical symmetrical "Schlumberger" or "Wenner" array. A description of the particular study carried out by means of this former array appears in an appendix.

RIASSUNTO. — Il presente studio può essere suddiviso in quattro sezioni:

La prima riguarda i fenomeni di polarizzazione indotta in generale, i vari modi in cui si possono studiare i fenomeni ed i vari parametri che li determinano o ci consentono di definirli. Viene tirata anche una parallela tra la polarizzazione indotta ed i metodi di resistenza.

La seconda sezione è essenzialmente teorica. In essa si cerca di schematizzare il più possibile un certo numero di casi tipici idealizzati nei quali la polarizzazione ottenuta dal passaggio di una corrente continua può essere calcolata con precisione per strutture bi- o tridimensionali. Si presume in questi calcoli che il passaggio della corrente duri sufficientemente a lungo per raggiungere polarizzazioni massime. Queste ipotesi sono necessariamente e volutamente semplificate fino all'estremo. Il loro unico scopo è di orientare chi deve interpretare il fenomeno, di aiutarlo a capire il meccanismo applicato, cioè di guidarlo quando si trova di fronte ai risultati molto più complessi ottenuti da veri rilevamenti. Si è così costretti a riconoscere che, malgrado una certa parallela tra le tecniche del classico sondaggio elettrico e del sondaggio a P. I., l'analogia non dev'essere con-

siderata nel vero senso della parola. L'aspetto complessivo dei due tipi di sondaggio è tutt'altro che uguale.

Benché tali calcoli siano utilissimi, esiste cionondimeno una infinità di differenze tra gli esempi fortemente semplificati ed i veri problemi, per cui occorre creare una fase intermedia nella quale potrà essere preso in considerazione soltanto uno studio sperimentale per analogia, condotto su dei modelli.

La terza sezione, di conseguenza, è sperimentale e tratta precisamente di modelli. Viene esaminato prima il caso semplicissimo di una cellula lineare, cioè di una struttura unidimensionale. Dallo studio del potenziale interfacciale ed il modo in cui dipende dalle principali variabili quali densità di corrente, tempo ecc., si è passati al problema generale della rappresentazione analogica della polarizzazione indotta a mezzo del « serbatoio elettrico ». Segue una descrizione di tale serbatoio, della sua disposizione, dei materiali usati e dei suoi sistemi di misura.

Successivamente si è così riusciti a provare, nel serbatoio elettrico, modelli vari corrispondenti il più strettamente possibile ai casi teorici precedentemente calcolati, ossia il piano orizzontale, il semipiano verticale, il parallelepipedo, la sfera ecc. È stato quindi possibile confrontare i risultati sperimentali con i calcoli teorici il che fece notare una molto soddisfacente concordanza. Il ricorrere a modelli è, quindi, giustificato ogni volta che le strutture reali diventano troppo complesse per prestarsi a calcoli.

La quarta parte descrive i risultati delle varie prove in relazione alla vera applicazione del processo alla pratica. Di conseguenza, si troverà uno studio piuttosto nutrito sui solfuri semiconduttori di Soulier nel Gard (Francia), indipendentemente dai risultati già pubblicati sotto il nome di Rousset. I giacimenti di bauxite del Var (Francia) rappresentarono un problema più arduo. Altro problema difficile — che può essere classificato uno studio di struttura — era costituito dalla ricerca, con mezzi indiretti, di eventuali giacimenti di minerali di uranio vicino alla base. Un altro studio è stato condotto a Charité sur Loire nel Dipartimento di Nièvre in Francia.

Per quanto riguarda i sondaggi in profondità, può essere vantaggioso sostituire la disposizione « dipolare » degli elettrodi alla classica disposizione simmetrica del tipo « Schlumberger » o « Wenner ». Segue in una appendice una descrizione dello studio particolare condotto secondo tale nuova disposizione.

S O M M A I R E

	Pages
AVANT-PROPOS	133
INTRODUCTION	135
NOTATIONS: PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISÉS	139

PREMIERE PARTIE

CARACTERES PHYSIQUES GENERAUX DU PHENOMENE DE POLARISATION PROVOQUEE

CHAPITRE I: Phénomènes de Polarisation provoquée du sous-sol . .	145
1) Linéarité des phénomènes de polarisation dans le temps et en fonction du courant d'excitation	146
2) Paramètres mesurés	147
3) Régulation de la source en technique transitoire	149
4) Différents modes d'études transitoires	150
CHAPITRE II: Comparaison entre les méthodes des Résistivité et de Polarisation provoquée	151
1) Potentiel de polarisation d'un élément de volume dv dans un champ électrique radial	152
2) Dispositif mono-électrode (A, M)	155
3) Théorème de superposition et de réciprocité	156
4) Lois de similitudes.	157
5) Profondeur d'investigation	160

DEUXIEME PARTIE

DISTRIBUTION GEOMETRIQUE DU CHAMP THEORIQUE DE POLARISATION PROVOQUEE DE STRUCTURES SIMPLES

CHAPITRE I: La Polarisation provoquée dans le cadre des phénomènes indépendants du temps	165
1) Potentiel et champ à l'intérieur d'un volume polarisé	165
2) Potentiel et champ produit en un point extérieur par un volume polarisé	167
3) Influence du demi-espace isolant sur le potentiel de P.P. . .	168

	Pages
CHAPITRE II: Modèles mathématiques en champ uniforme.	170
1) Cylindre circulaire droit	170
1.1 Potentiel d'un cylindre droit polarisé parallèlement à son axe	170
1.2 Calcul de la composante horizontale du champ électrique	171
1.3 Cas particulier du dispositif gradient moyen.	172
1.4 Construction des abaques	173
1.5 Utilisation des abaques	178
2) Sphère polarisée	179
CHAPITRE III: Modèles mathématiques en champ radial	182
1) Potentiel de polarisation du filon mince vertical	182
2) Différence de potentiel de Polarisation provoquée d'un filon mince vertical indéfini de hauteur variable	187
3) Potentiel de polarisation d'un ruban horizontal indéfini de largeur L	192
4) Potentiel de polarisation d'une couche mince horizontale indéfinie	194
5) Calcul de la polarisabilité d'une couche épaisse indéfinie	200
6) Potentiel de polarisation du filon mince vertical infiniment résistant.	205
7) Potentiel de polarisation d'un filon mince vertical infiniment conducteur.	209
CHAPITRE IV: Réfraction des lignes de courant.	212
1) Polarisation volumique: filon résistant	213
2) Réfraction dans le cas d'un filon conducteur	214

TROISIEME PARTIE

DISTRIBUTION DU CHAMP EXPERIMENTAL DE POLARISATION PROVOQUEE

CHAPITRE I: Etude expérimentale d'un potentiel d'interface	219
1) Potentiel d'interface et surtension	221
2) Type de cellule de mesure utilisée	222
3) Résultats expérimentaux	224
3.1 Variation de V_{Δ} en fonction de x	224
3.2 Mesure de $\Delta v(A)$ (f.c.e.m. de polarisation)	225
3.3 Variation de la f.c.e.m. de polarisation en fonction du temps	226
3.4 Variation de la f.c.e.m. de polarisation en fonction de $ i $	228
3.5 Dépendance de la f.c.e.m. de polarisation vis à vis d'autres facteurs	228

	Pages
CHAPITRE II: Cuve électrique - Etude sur modèles réduits	231
1) Similitudes en Polarisation provoquée	231
1.1 Considérations générales	231
1.1.1 Problèmes de similitude en Polarisation provoquée	232
1.1.2 Conditions aux limites	233
1.1.3 Conditions particulières	233
1.2 Appareillage de mesure	233
1.2.1 Alimentation en courant continu	234
1.2.2 Mesure de la d.d.p. et du champ électrique de polarisation	235
1.2.3 Programmeur	236
1.2.4 Mesure de la d.d.p. d'excitation	236
1.3 Cuves électriques et matériaux utilisés	239
2) Quelques résultats expérimentaux	241
2.1 Couche mince indéfinie polarisée radialement	243
2.1.1 Dispositif mono-électrode	243
2.1.2 Dispositif Wenner	246
2.2 Volume parallélépipédique polarisé dans un champ uniforme	248
2.2.1 Observations préliminaires	248
2.2.2 Etude du modèle polarisable	251
2.3 Filons minces indéfinis polarisés dans un champ uniforme	257
2.4 Sphère polarisée dans un champ uniforme	258

QUATRIEME PARTIE

QUELQUES EXEMPLES DE PROSPECTION DE TERRAIN PAR LA METHODE DE POLARISATION PROVOQUEE

CHAPITRE I: Appareillage de prospection "Polarisation provoquée"	263
1) Caractéristiques du générateur de courant continu	263
2) La voiture-laboratoire	264
CHAPITRE II: Etude d'un gisement de sulfures conducteurs: le gisement pyriteux du Soulier	266
1) Sondages SW_1 et SW_2	266
2) Profils P_1A et P_2W	267
3) Interprétation quantitative des sondages P.P.	269
CHAPITRE III: Application à l'étude d'un gisement sédimentaire: les bauxites	270
1) Résultats des mesures de terrain et leur interprétation	271
1.1 Structure du Nicollet	271
1.1.1 Coupe géologique	271
1.1.2 Sondage Wenner n° 1	271
1.1.3 Profil n° 1	274

	Pages
1.1.4 Profil n° 2	274
1.1.5 Profil n° 3	274
1.1.6 Sondage Wenner n° 2	275
1.2 Structure de la Baume Sud	275
1.2.1 Plan de position	275
1.2.2 Coupe géologique n° 1	276
1.2.3 Sondage « deux électrodes »	277
1.2.4 Sondage « deux électrodes » S_1b	278
1.2.5 Coupe géologique n° 2	279
1.2.6 Sondage Wenner .1 centré en S_2	279
2) Interprétation quantitative de l'anomalie de Lunca Sprie	280
3) Conclusion	281
 CHAPITRE IV: Recherches de minerais uranifères: problèmes structu- raux	282
1) Mesures de Polarisation provoquée sur des échantillons de minerais d'uranium	282
2) Etude du bassin de Blanzky-Bert	284
2.1 Sondage sur le socle cristallin	285
2.2 Sondages sur le sédimentaire	285
2.3 Profils P.P. et résistivité	289
2.4 Sondage profond de détermination du socle	290
3) Conclusion	291
 CHAPITRE V: Etude électrique d'une structure localisée par une ano- malie magnétique	292
1) Mesures effectuées	292
1.1 Sondage électrique Wenner	292
1.2 Sondage deux électrodes	294
1.3 Autres dispositifs	295
2) Conclusion	297
 ANNEXE 	
SONDAGE ELECTRIQUE PROFOND: DISPOSITIF DIPOLE	297
1) Remarques sur le dispositif dipôle	298
2) Sondage électrique équatorial bilatéral	301
3) Sondages électriques Wenner et Schlumberger	302
CONCLUSION	303
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITÉES	305
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE DU SUJET	307
LISTE DES FIGURES	322

AVANT-PROPOS

Le travail qui fait l'objet de ce mémoire, s'il a quelque mérite, n'a été possible que grâce à un ensemble de collaborations que je suis heureux de mettre en relief aujourd'hui.

Tout d'abord et en particulier, je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance et mon plus grand respect à Monsieur le Professeur Cagniard, qui m'enseigna la géophysique appliquée et m'accueillit dans son laboratoire. Sa haute direction scientifique en même temps que ses qualités humaines, n'ont cessé de me servir de guide et de m'encourager dans mon travail.

L'ensemble du Laboratoire de Géophysique Appliquée du Centre de Recherches Géophysiques de Garchy, qui servit de cadre à cette réalisation, créa les conditions intellectuelles et matérielles nécessaires à la bonne marche de celle-ci.

Je tiens tout d'abord à remercier particulièrement mon collègue et ami J. Roussel, actuellement Maître de Conférences à Alger avec lequel la collaboration sur un même sujet permit les échanges les plus fructueux. Son mémoire fut écrit en Juin 1967.

C'est avec plaisir que j'exprime également mes plus vifs remerciements à Monsieur J. L. Bureau, Maître-Assistant au Laboratoire de Géophysique Appliquée, toujours prêt à répondre aux plus délicates questions mathématiques.

Le Bureau de Calcul du Laboratoire animé par M. Pham Van Ngoc secondé par Mlle Boyer me rendit les services les plus compétents.

La réalisation de l'ensemble de l'appareillage de terrain fut mené à bien par M. Beaussillon, Ingénieur, que je tiens à remercier ici particulièrement ainsi que toute son équipe, notamment M. Tort.

C'est avec plaisir que je remercie ici M. Duprez, notre Administrateur ainsi que son prédécesseur M. Le Feuvre, qui facilitèrent l'utilisation des divers services du laboratoire.

C'est également l'ensemble du personnel et de l'Atelier de mécanique et plus particulièrement son Chef M. Lacourieux, que je tiens à remercier bien vivement pour toutes les réalisations menées à bien.

Le Bureau de Dessin et de Reproduction, particulièrement M. Banteaux et M. Jalquin se chargèrent de la mise en forme du présent manuscrit et Melles Lurier et Thomas assurèrent le travail dactylographique.

Qu'il me soit permis de leur adresser à tous mes sincères remerciements, ainsi qu'à tous ceux qui à un titre ou à un autre, indirectement peut-être, participèrent à ce travail.

Parmi les organismes extérieurs qui ont permis ou facilité ce travail il y a lieu de faire mention de la D.G.R.S.T. (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique), qui par la convention d'Action Concertée n° 63 FR 080 donna l'impulsion financière nécessaire. Le B.R.G.M. (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) avec lequel nous avons collaboré, lors de cette Action Concertée et particulièrement le Chef du Département Géophysique, M. Bollo, doivent être également remerciés pour leur aide.

Les expériences de terrain ont été rendues possibles grâce à l'accord bienveillant de diverses sociétés ou organismes (Péchiney-Saint-Gobain, Péchiney, C.E.A. ...). Nous leur exprimons ici nos remerciements.

INTRODUCTION

Voilà un peu plus d'un demi-siècle que Conrad Schlumberger, à l'époque Professeur à l'école des Mines de Paris, imagina un principe nouveau de méthode de prospection électrique minière, méthode qu'il baptisa « Polarisation provoquée » (par abréviation P.P.). Une expérimentation assez poussée l'amena en 1920 à s'exprimer comme suit, dans son « Etude sur la prospection électrique du sous-sol » (Gauthier-Villars, Paris).

« Ce chapitre traite un sujet très différent de ceux exposés jusqu'ici. Il s'agit de différence de potentiel existant temporairement dans le sol à la suite du passage d'un courant électrique. La conductibilité plus ou moins grande des roches n'intervient plus dans les phénomènes étudiés qu'à titre accessoire.

« Le but que je me suis proposé en abordant ces expériences était de localiser les gisements à conductibilité métallique, par l'observation des phénomènes d'électrolyse que provoque à leur surface le passage dans le sol d'un courant de sens constant.

« Si l'on débite entre deux prises de terre A et B un courant i de sens constant . . . on provoque ainsi la polarisation du gisement c'est-à-dire que celui-ci se transforme en une véritable pile secondaire. Lorsque l'on coupe le courant électrolyseur i cet accumulateur se décharge à travers le sol . . . L'observation à la surface du sol des d.d.p. dues au courant de décharge doit permettre de localiser l'amas conducteur ».

Schlumberger sut établir une distinction essentielle entre deux phénomènes en cause; d'une part la polarisation des électrodes d'émission, d'autre part la polarisation du volume global de terrain. Malgré les succès obtenus sur divers gisements, à Sain-Bel près de Lyon notamment, ce pionnier qui ne disposait pas à l'époque des moyens technologiques actuels, n'exploita pas plus avant la P.P. et préféra porter son effort sur les méthodes de résistivité, de sondage électrique, de carottage, de P.S. et même de courant tellurique.

Ces recherches anciennes semblent être alors tombées dans un oubli total jusqu'après la deuxième Guerre Mondiale. Désignée désormais

« Polarisation induite » (Induced Polarization, par abréviation I.P.) la P.P. fait l'objet de publications américaines et canadiennes (Bleil 1953, Seigel 1959, Frische et Von Buttlar 1957, Marshall et Madden, 1959). On doit à Wait (1959) une étude exhaustive à la fois théorique et expérimentale. Cette littérature mentionne des résultats spectaculaires obtenus sur des gîtes à minéralisation disséminée, de faibles teneurs et des très gros tonnages.

Dans le même temps, Vacquier (1957) revendique l'application des méthodes P.P. à la recherche des eaux douces souterraines.

Les Russes de leur côté, n'étaient pas inactifs et l'on peut citer pour la seule année 1957, Kudimov et Kotov, Komarov et Semenov, Rokityanski. L'Institut de Recherches et Techniques Géophysiques de Léninegrad (V.I.T.R.) semble avoir participé activement à cette investigation. On peut citer également les Allemands Nosske (1959) et Buchheim (1957), l'Italien Belluigi (1956) et le Yougoslave Sumi (1959).

En France, le Professeur L. Cagniard proposa à J. Roussel, du Centre de Recherches Géophysiques (C.R.G.), d'aborder au laboratoire sur modèles réduits, l'étude physique systématique de ces phénomènes. Un tel renouveau d'intérêt pour la P.P., les premiers résultats de Roussel, enfin la prise de conscience des Mineurs de la nécessité d'exploiter désormais de nouvelles ressources minérales provenant de gîtes à gros tonnages et faibles teneurs difficiles à mettre en évidence par les méthodes classiques, incitèrent en 1963 la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (D.G.R.S.T.) à promouvoir la technique P.P. sur un plan industriel. C'est ainsi qu'une Action Concertée associa le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) et le Centre de Recherches Géophysiques du C.N.R.S. (C.R.G.).

Au C.R.G., les opérations furent conduites par J. Roussel, déjà cité, et par D. Tournier, l'auteur du présent mémoire.

Cette Action Concertée s'engageait cette fois sous les meilleurs auspices, comme suite des travaux préparatoires de Roussel, et en raison du fait que pouvait désormais être construit l'appareillage moderne, puissant et sensible qui permettrait de mener à bien les expériences sur le terrain.

Au B.R.G.M. fut confiée la variante d'application du procédé, fondée sur l'emploi des courants alternatifs de très basse fréquence (méthode dite « fréquentielle »). Pour sa part, l'équipe Roussel-Tournier, du C.R.G., prit en charge les problèmes théoriques, expérimentaux et pratiques soulevés par la mise en œuvre du procédé, appliqué selon les vues initiales de Conrad Schlumberger (méthode dite « transitoire »). Il s'agit

d'injecter un courant continu, plus ou moins prolongé, pour polariser artificiellement le sous-sol. Après coupure du courant de charge, on étudiera le phénomène transitoire de dépolarisation.

Roussel ayant publié en 1967, dans sa thèse, une description complète en détaillée de notre appareillage tel qu'il fut construit, mis au point et utilisé par l'équipe, il suffira ici de ne rappeler que très sommairement ses principes de construction et de mise en œuvre.

* * *

Le présent mémoire se subdivise en quatre parties.

La première traite des phénomènes de P.P. en général, des divers modes d'étude possible de ce phénomène, des différents paramètres dont il dépend ou qui permettent de le caractériser. On établit aussi un parallèle entre la méthode de Polarisation provoquée et de Résistivité.

La deuxième partie est essentiellement théorique. On s'y efforce de schématiser au maximum un certain nombre de cas idéaux typiques pour lesquels la polarisation créée par le passage d'un courant continu puisse être rigoureusement calculée, pour des structures à deux ou à trois dimensions. Dans ce calcul on suppose que le passage du courant est assez prolongé pour qu'on atteigne la polarisation limite. Ces hypothèses nécessairement et volontairement simplistes n'ont d'autre objet que d'orienter l'interpréteur, de l'aider à bien pénétrer les mécanismes qui entrent en jeu dans le phénomène en question, par conséquent de le guider quand il se trouvera confronté avec les résultats beaucoup plus complexes de prospections réelles sur le terrain. On se trouve ainsi amené à constater qu'en dépit d'un certain parallélisme dans les techniques respectives du sondage électrique classique et du sondage P.P., il ne faut absolument pas pousser l'analogie trop loin. L'allure générale des deux types de sondages n'est pas du tout la même.

Malgré l'intérêt de tels calculs, il subsiste néanmoins un abîme entre les schémas simplistes et les problèmes réels. Il en résulte la nécessité d'une étape intermédiaire, pour laquelle il n'est possible d'envisager qu'une étude expérimentale analogique, effectuée sur modèles réduits.

La troisième partie est donc expérimentale et concerne précisément les modèles réduits.

On y aborde en premier lieu le cas particulièrement simple d'une « cellule linéaire », c'est-à-dire d'une structure à une seule dimension. On étudie le « potentiel d'interface », sa dépendance vis-à-vis des principales variables, telles que la densité de courant, le temps, etc. . . . On passe alors au problème général de la représentation analogique du champ de P.P. par le moyen de la « cuve électrique ». On décrit cette cuve, son agencement, les matériaux utilisés ainsi que l'appareillage de mesure.

En deuxième lieu, différents modèles se rapprochant aussi exactement que possible des schémas théoriques précédemment calculés ont pu être ainsi testés dans la cuve électrique: plan horizontal, demi-plan vertical, parallélépipède, sphère, etc. . . . Il a donc été possible de comparer les résultats expérimentaux aux calculs théoriques et de constater leur très satisfaisante concordance. Ainsi se trouve justifié le recours aux modèles réduits, chaque fois que les structures réelles deviennent beaucoup trop complexes pour pouvoir être soumises au calcul.

La quatrième partie expose les résultats des tests variés auxquels a donné lieu l'application concrète du procédé sur le terrain.

C'est ainsi qu'indépendamment des résultats déjà publiés sous le nom de Roussel, on trouvera une étude assez spectaculaire des sulfures semi-conducteurs du Soulier dans le Gard. Les gîtes de bauxite du Var ont posé un problème plus difficile. Un autre problème difficile se situant dans le cadre d'une étude structurale, fut la recherche, par voie indirecte, de gîtes uranifères éventuels au voisinage du socle. Une étude fut faite également dans la région de La Charité-sur-Loire (Nièvre).

Quand il s'agit d'investigations profondes, on peut trouver intérêt à substituer la disposition « dipôle-dipôle » à la disposition classiques symétrique « Schlumberger » ou « Wenner ». L'étude particulière faite au moyen de ce dispositif est reportée en annexe.

NOTATIONS — PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISES

a	rayon de la sphère; distance $AB/3$.
$\pm a - a$	sources ponctuelles de polarisation de l'élément de volume dv .
A	électrode source ponctuelle.
A, B, a, b, K, K_1	constantes.
B	électrode puits ponctuelle.
d.d.p.	différence de potentiel.
dM	moment dipolaire de polarisation de l'élément de volume dv , de l'élément de surface ds .
ds	élément de surface.
$d I'$	intensité du courant traversant $\pm a$ et $-a$.
dv_o, dv_M, dv_A, dv_B	potentiel élémentaire de polarisation de l'élément ds en o, M , etc. . . .
$D = d/h_1$,	D diamètre des faces du cylindre, exprimé en unité de profondeur; déviation des lignes de courant ($\varphi_1 - \varphi_0$).
$\vec{E}, E_\theta, E_y, E_x, E_z, E_t, E_n$	vecteur champ électrique et ses composantes.
\vec{E}_1	champ électrique dû à la face 1 du cylindre; θ_1 angle (E_1, \vec{r}).
\vec{E}_2	champ électrique dû à la face 2 du cylindre; θ_2 angle (E_2, \vec{r}).
$E = e/h_1$	épaisseur de la couche horizontale exprimée en unité de profondeur.
$\left[E(\theta, k) \right]_0^{\pi/2}$	intégrale elliptique complète du second ordre.
f.e.m.	force électromotrice.
$\left[F(\theta, k) \right]_0^{\pi/2}$	intégrale elliptique complète de Legendre du premier ordre.
h_1	profondeur unité des différents modèles théoriques et expérimentaux et de l'élément de volume dv .
$H = h/h_1$	hauteur réduite du filon vertical.
$\vec{i}, i_x, i_r, i_t, i_n$	vecteur densité des courant électrique.
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	vecteurs unitaires des axes, ox, oy, oz .
I	intensité du courant d'excitation, constante, traversant la source A ou B , en ampères généralement.
I, I_1, I_2	valeurs des intégrales diverses.

k, k'	polarisabilité de l'élément de volume dv ou des volumes v et v' .
k_1	rapport de similitude géométrique.
k_2	rapport de similitude des polarisabilités.
$L = AB/2$ et $l = MN/2$	
$L = l/h_1$	largeur du ruban horizontal exprimée en unité de profondeur; hauteur réduite du cylindre droit; largeur du filon.
\bar{M} et \bar{M}'	moments de polarisation des volumes v et v' .
M et N	électrodes ponctuelles de mesure.
\bar{n}	normale unitaire à une surface.
\bar{p}	moment dipolaire électrique.
$P, P.$	Polarisation provoquée.
\vec{P}	vecteur de polarisation électrique.
\vec{r}	vecteur joignant deux points de coordonnées (ξ, η, h) et (x, y, z) .
r, r', r'', r_M, r_N	modules des rayons vecteurs correspondants.
(R, θ, Z)	coordonnées cylindriques.
t	temps variant de 0 à l'infini.
t_0	instant initial d'ouverture du circuit AB pris comme origine des temps.
$v_M, v_N, v_A, v_{A'}, v(A, M) \dots$	potentiel scalaire de polarisation aux points $M, N, A, A', (A, M)$ etc. ...
v_0	tension transitoire à l'instant $t = 0$.
$v_A(t)$	tension transitoire: réponse à un créneau de durée A à l'instant t (en mV).
$v(t)$	tension transitoire: réponse à un échelon ($A = \infty$) à l'instant t en mV généralement.
$V_A, V_{A'}, V_M$	potentiel scalaire d'excitation aux points A, A', M .
V_A	différence de potentiel variable suivant l'établissement du courant d'excitation I (en volts).
V_∞	limite de V_A provoqué par le courant d'excitation constant I , quand A tend vers l'infini (en volts).
v et v'	volumes homologues polarisés.
$v(x, y, z)$	vecteur vitesse des charges électriques.
(x, y, z)	coordonnées cartésiennes rectangulaires.

A	durée du créneau d'excitation en secondes ou minutes.
$\Delta v_{MN}, \Delta v_S, \Delta v_W$	différence de potentiel de polarisation entre M et N , en dispositif Schlumberger, Wenner.

$\vec{\varepsilon}$	vecteur quelconque.
θ	angle orienté entre le moment du dipôle \vec{p} et la direction du rayon vecteur \vec{r} .
(θ, R)	coordonnées polaires à deux variables.
(θ, φ, r)	coordonnées sphériques.
$(\xi, \eta, h) (\xi', \eta', h')$	coordonnées des points M et M' .
ρ, ρ_a	résistivité vraie et apparente en courant continu (en ohm.mètre).
$\rho = R/h_1$	coordonnées réduites.
ρ'	densité volumique de charge électrique fictive.
$\sigma = 1/\rho$	conductivité électrique en courant continu.
σ'	densité superficielle de charge électrique fictive.
φ_1, φ_2	angles faits par les lignes de courant avec la normale à l'interface dans les deux milieux 1 et 2.
$\chi = x/h_1$	abscisses réduites en unité de profondeur.
Ω_1, Ω_2	angles solides.

PARAMETRES MESURES

$m_a(t) = v(t)/V_\infty$	polarisabilité apparente à l'instant t secondes en mV/V en millièmes ($0/100$).
$m(t)$	polarisabilité vraie d'un milieu homogène à l'instant t .
$\alpha = \frac{m_a, t_1}{m_a, t_2} = \frac{v(t_1)}{v(t_2)}$	taux de décroissance de la tension transitoire (sans dimension).
$\frac{1}{V_\infty} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt$	valeur de l'intégrale exprimée en mV/V secondes ou millisecondes.

