Les phénomènes de polarisation spontanée électrique du sous-sol et leur application à la recherche des gîtes métallifères

Autor(en): **Poldini, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **6 (1938-1941)**

Heft 1

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-287457

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

MEMOIRES DE LA SOCIETE VAUDOISE DES SCIENCES NATURELLES
N° 40 1938 Vol. 6, N° 1

Les phénomènes de polarisation spontanée électrique du sous-sol

et leur application à la recherche des gîtes métallifères

PAR

E. POLDINI

(*Présenté à la séance du 21 avril 1937.*)

INTRODUCTION

Forces électromotrices spontanément engendrées dans le sous-sol.

Lorsqu'à l'aide d'un dispositif approprié on mesure en rase campagne la différence de potentiel électrique entre deux points relativement voisins du sol, on trouve, en général, que celle-ci est faible, de l'ordre de quelques millivolts sur une centaine de mètres de longueur. Cependant, parfois, des chutes de tension anormales assez brusques se constatent. Elles peuvent atteindre l'ordre du volt sur cent mètres. Le sol est donc le siège de forces électromotrices qui se manifestent spontanément et auxquelles correspondent évidemment des écoulements de courant.

Les causes des courants ainsi engendrés sont multiples, ne serait-ce que pour la raison très générale que presque tous les déséquilibres de la croûte terrestre, qu'ils soient magnétiques, chimiques ou mécaniques, produisent des forces électromotrices. Il est établi que certaines de ces causes sont cosmiques (éruptions solaires), alors que d'autres, plus locales, proviennent simplement de phénomènes assez superficiels, tels que l'électrocapillarité, la circulation des eaux, l'évaporation, l'oxydation des minerais, etc....

Courants telluriques et polarisations spontanées locales.

La plupart des courants électriques circulant sur le globe parcourent de très grands espaces, aussi bien sur terre que sur mer. Ils provoquent les variations de potentiel de l'ordre de quelques millivolts sur cent mètres que l'on retrouve partout. Leur observation date de l'installation des premières lignes télégraphiques. On appelle courants telluriques, ces courants souvent irréguliers d'intensité, dont le circuit emprunte de vastes volumes de l'écorce terrestre.

A ces variations très générales et très étendues du potentiel se superposent des phénomènes localisés plus stables et infiniment plus intenses par unité de longueur, atteignant jusqu'à des différences de potentiel de un volt sur cent mètres. Ces derniers s'isolent nettement sur des surfaces de quelques hectares et constituent ce que l'on convient d'appeler plus spécialement la polarisation spontanée locale du sol (en abrégé P. S.).

Il est évident que certains phénomènes de P. S. (dus à l'évaporation par exemple) finissent par donner naissance à des courants telluriques, lorsqu'ils agissent sur une grande surface. Par ailleurs une mesure P. S. comprend généralement une faible part de courant tellurique. Notre définition n'est donc pas très stricte et comporte en quelque sorte une notion d'échelle. Mais elle correspond à une notion de la pratique, en ce sens que la P. S. se localise toujours sur des espaces restreints en provoquant facilement des gradients de potentiels élevés par rapport à ceux que l'on est accoutumé de mesurer dans les conditions usuelles. C'est donc un phénomène anormal qui, même exalté, est confiné à un volume de terrain relativement faible.

Les études de la P. S. du sol ont montré que celle-ci se rattachait à deux origines essentielles :

1° Aux forces électromotrices dues à l'oxydation des masses métalliques enfouies.

2° Aux forces électromotrices provoquées par le frottement des eaux, lors de leur filtration à travers les roches.

Nous allons d'abord examiner aux chapitres I et II les causes de la P. S. tant chimique qu'électrocapillaire. Puis nous dirons au chapitre III quelques mots sur l'exécution des mesures de potentiel sur le terrain, pour passer ensuite au chapitre IV à divers exemples d'études pratiques. Le chapitre V sera consacré à la discussion des possibilités d'application à la prospection des gîtes métallifères.

CHAPITRE PREMIER

Forces électromotrices engendrées par l'oxydation de masses métalliques enfouies dans le sol.

Le sous-sol au point de vue électrique.

Avant de discuter le phénomène P. S., nous désirons insister sur une première notion. Il y a deux sortes de conductibilités électriques du sous-sol : la conductibilité métallique et la conductibilité électrolytique. On sait que le courant électrique traverse les corps métalliques conducteurs sans qu'il y ait aucun transport de matière. Mais le passage du courant dans un électrolyte s'accompagne d'un transport d'ions.

La conductibilité métallique est celle de tous les métaux et de divers minerais tels que la pyrite de fer, la chalcopyrite, la covelline, la chalcosine, la galène, les mispickels, la magnétite, la pyrolusite, le graphite.

La conductibilité électrolytique est celle des électrolytes, donc de l'eau tenant en dissolution plus ou moins de sels minéraux. Les diverses roches qui constituent le sol sont électriquement isolantes par elles-mêmes à sec; mais comme elles sont toutes imbibées d'eau, elles conduisent électrolytiquement le courant. Aussi leur résistivité dépend-elle finalement de la quantité de liquide contenue dans l'unité de volume de la roche et de la résistivité de ce liquide (elle est, par suite, en gros, inversement proportionnelle à la quantité totale de sels dissous par unité de volume d'eau).

En général, la conductibilité électrolytique du sous-sol est beaucoup plus petite que la métallique. Toutefois cette question de grandeur n'est pas le fait important dans le cas qui nous concerne. L'essentiel est que dans les électrolytes l'électricité se propage par mouvements d'ions qui cheminent vers deux électrodes d'amenée et de sortie du courant. Enfin, dès qu'un corps métallique plonge dans un électrolyte et qu'il y a une dissymétrie quelconque, soit dans le métal, soit dans l'électrolyte, il se forme un courant électrique et l'on a une pile. Le sens du courant est tel qu'il tend par électrolyse à atténuer la dissymétrie qui le provoque.

Le phénomène P. S. et les gîtes métallifères.

L'existence de courants électriques débitant spontanément

au voisinage de filons métalliques a été constatée pour la première fois en 1830 par R. M. Fox [1] en Cornouailles.

Conrad SCHLUMBERGER, après avoir étudié ce phénomène, dont il a montré la généralité, en a donné l'explication suivante :

« Considérons une lentille de pyrite enfouie dans le sol, plus ou moins verticalement. Nous avons l'équivalent d'un métal homogène, plongeant dans un électrolyte dissymétrique. En effet, l'eau d'imbibition du sol n'a pas partout la même composition. Vers la surface et au-dessus du niveau hydrostatique, l'eau est aérée et riche en oxygène. Dans la profondeur, elle ne l'est pas, parce qu'elle ne se renouvelle pas. La lentille de pyrite et les roches encaissantes constituent donc une immense pile naturelle du type dit « pile à gaz ». Le courant y évolue en descendant dans le minerai et remonte par le sol, pour converger vers le sommet du gisement. Il y a formation par électrolyse d'hydrogène à la cathode, c'est-à-dire au haut de l'amas où l'eau est aérée. L'oxygène se forme à l'anode, c'est-à-dire au fond où l'eau n'est pas aérée. Les gaz ainsi libérés ne se dégagent pas. L'hydrogène naissant se combine à l'oxygène dissous pour donner de l'eau. Quant à l'oxygène déposé à l'anode, il s'y dissout dans l'eau qui en est privée à cet endroit. On voit que tout ce processus aboutit à uniformiser la composition en oxygène de l'humidité du sol et qu'il constitue au total un mode de diffusion de cet élément à l'intérieur de la croûte terrestre.

Si le corps métallique enfoui est oxydable, comme c'est le cas de la pyrite, l'effet de pile se trouve notablement renforcé grâce à l'énergie chimique libérée par la réaction d'oxydation qui a lieu au sommet. On peut dire aussi, en employant un autre langage, que le minerai oxydable joue le rôle de dépolarisant de la pile naturelle. En effet, l'oxyde du chapeau de fer (hématite ou limonite non conductrices) favorisent l'absorption de l'hydrogène naissant en lui fournissant un élément à réduire, exactement comme le fait le bioxyde de manganèse qui enveloppe le charbon (cathode) d'une pile électrique ordinaire. En profondeur, l'oxygène formé se porte sur la pyrite et l'oxyde au lieu de devoir se diffuser lentement dans l'humidité des terrains encaissants.

De cette façon, la dissymétrie de l'électrolyte subsiste en

[1] Fox : On the electromagnetic properties of metalliferous veins in the mines of Cornwall. *(Philosophical transactions of the Royal Society of London*, année 1830).

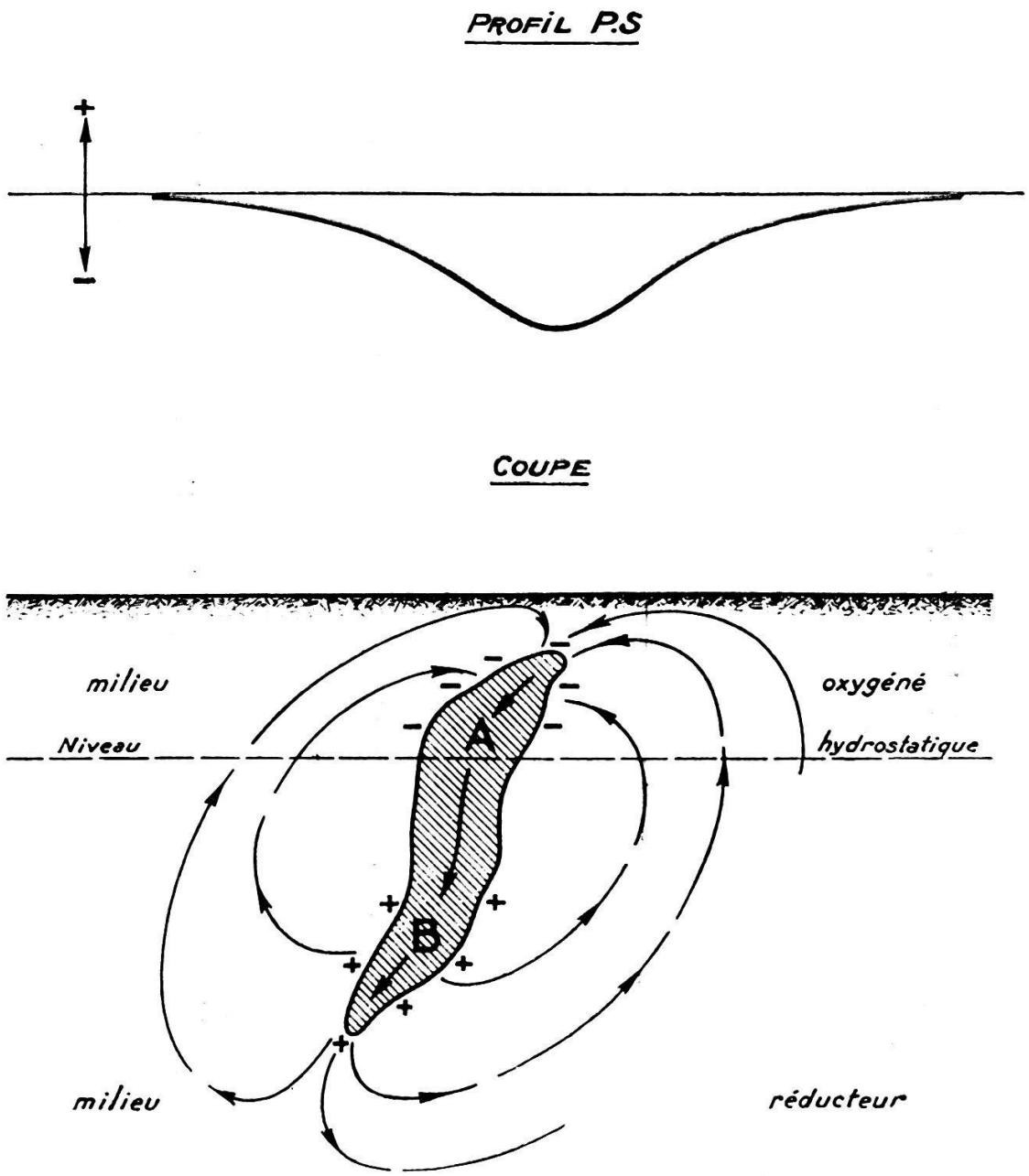

FIG. 1.

permanence, alors qu'elle tendrait à disparaître ou ne se maintiendrait que par une lente diffusion, si le minerai ne s'oxydait pas. En définitive, l'action du courant électrique revient

à enfoncer en profondeur, le long des parois de la masse, l'oxydation due aux agents atmosphériques [1]. »

Gisements naturels présentant de la P. S.

D'une façon générale, l'expérience a montré que les gisements suivants présentent de la P. S. :

a) Tous les amas massifs ou les filons continus de pyrite et de pyrrhotine dont le sommet est voisin du jour. (Les réactions les plus vives se tiennent aux environs de 1 volt.)

b) Les sulfures de cuivre (chalcopyrite, chalcosine, covelline) sont conducteurs, oxydables et dans beaucoup de cas éminemment continus. Ils paraissent, de tous les minéraux, les mieux adaptés à la formation de la P. S. Il semble que leur présence dans les minerais pyriteux favorise la continuité électrique des gisements (réactions maxima: 1 volt).

c) Les anthracites, très pauvres en matières volatiles, sont bons conducteurs, et donnent une P. S. énergique (réactions toujours intenses allant facilement au delà d'un volt).

d) Le graphite, très conducteur, très oxydable, présente des manifestations P. S. intenses. (Les plus fortes valeurs P. S. ont été trouvées sur des schistes graphiteux. Elles dépassent le volt.)

e) La galène ne donne jamais qu'une très faible P. S., même si la continuité minérale est suffisante. Fréquemment le phénomène est absent.

Le mispickel, les arsénio-sulfures et antimonio-sulfures complexes, conducteurs et oxydables, manquent souvent de continuité et ne fournissent qu'irrégulièrement le phénomène P. S.

Essai de reproduction du phénomène P. S. sur gisements artificiels en laboratoire.

Il s'agit de réaliser une masse minérale à conductibilité métallique, plongeant dans un terrain humide dont le sommet est aéré et le bas dépourvu d'oxygène, comme cela peut être le cas pour les gisements naturels. On y parvient en employant un mélange de sable et d'argile grise dans lequel on enfouit un morceau de minerai (fig. 2). Pour faciliter

[1] C. et M. Schlumberger : Phénomènes électriques produits par les gisements métalliques (*C. R, A. S.*, Tome 174, 1922).

l'accès de l'air à la partie supérieure, on dispose, au haut, une couche de sable lavé, non argileux. L'expérience ne s'effectue correctement que si l'on prend soin de faire bouillir le minerai, le sable et l'argile, afin d'en chasser l'air. On laisse ensuite refroidir et le gisement artificiel est constitué. Il suffit de l'arroser de temps en temps pour maintenir l'humidité du terrain.

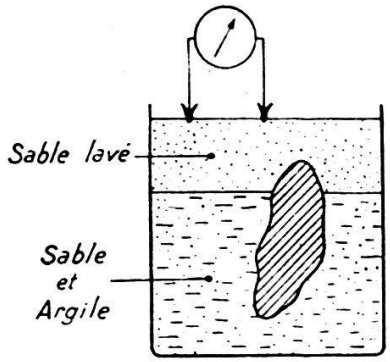

Fig. 2. — Reproduction du phénomène P. S. en laboratoire sur gisement artificiel.

Les mesures de différences de potentiel s'effectuent au moyen de deux électrodes impolarisables réunies aux bornes d'un potentiomètre. Les observations fondamentales sont les suivantes :

a) Au-dessus du sommet du gisement existe un centre négatif.

b) Le phénomène paraît se maintenir en permanence pourvu qu'on prenne soin d'entretenir l'humidité.

c) La nécessité d'une absolue continuité minérale se vérifie. Un morceau de pyrite quartzeuse en grains, faiblement conductrice à sec, ne donne rien malgré une violente oxydation superficielle. Il semble, dans ce cas, n'y avoir que des courants locaux autour de chaque grain, sans action d'ensemble.

d) Les différences de potentiel maxima dépendent de la disposition du recouvrement, de sa dessiccation et de la nature du minerai. (Pour avoir une différence de potentiel importante, il faut, naturellement, un recouvrement aussi mince que possible, enveloppant juste le sommet du gisement.)

Il est probable que la pile constituée par le gisement se polarise beaucoup. Dès qu'elle débite du courant, l'élimination de l'hydrogène et de l'oxygène naissant se fait mal. La force contre-électromotrice due à la mince couche de gaz qui doit se former au sommet du gisement peut se reconnaître au fait suivant: dès que l'on frotte ce sommet avec du sable humide, et que l'on enlève ainsi mécaniquement l'hydrogène, on voit la différence de potentiel croître dans des proportions parfois considérables et doubler fréquemment par ce petit stimulant.

La nature du minerai joue énormément. La pyrite, la chalcopyrite, la phillipsite, donnent couramment quelques centaines de millivolts. Par contre, une galène n'a fourni que

80 millivolts. Un tube de cuivre rouge produisait 20 millivolts.

Résumé et discussion des conditions nécessaires à la formation de la P. S.

D'après les constatations que nous venons d'exposer, trois conditions sont nécessaires pour qu'un gisement présente de la P. S. Il faut :

a) Une continuité de la conductibilité électrique.

b) Une dissymétrie chimique autour du corps conducteur considéré.

c) Un minerai de nature minéralogique convenable.

Examinons plus attentivement ces trois points.

a) *Continuité de la conductibilité électrique.*

L'expérience montre que le phénomène de P. S. exige une rigoureuse continuité minérale. Un gisement constitué par de petits amas noyés dans une gangue isolante ne donne pas de réactions. On peut vérifier dans ce cas que l'oxydation produit bien des centres négatifs à la surface des diverses fractions du gîte, mais que le courant se ferme sur chaque amas conducteur considéré en soi. Il se crée ainsi une série de piles dont l'effet à distance tend vers zéro dès que ces amas sont petits.

b) *Dissymétrie chimique autour des corps conducteurs considérés.*

Cette dissymétrie nécessaire est la cause originelle de la P. S. Elle consiste presque toujours dans le fait que le minerai enfoui vient pointer au-dessus du niveau hydrostatique, dans un milieu plus oxydant que la profondeur.

Le terme de « niveau hydrostatique » est généralement usité pour définir la limite supérieure de la zone dans laquelle les fissures ouvertes des roches sont remplies d'eau. Cette limite supérieure n'est ni plane, ni parallèle à la surface topographique. Elle suit cependant en général l'allure de cette dernière, mais de façon atténuée, en ce sens qu'elle est moins profonde sous les vallées que sous les collines. Le niveau hydrostatique est soumis à des variations saisonnières. Géologiquement parlant, il est instable. En effet, lorsqu'une région est soumise à l'érosion, le niveau hydrostatique s'enfonce à mesure que le relief disparaît. Une autre cause de la descente du niveau hydrostatique peut être due au dessèchement

du climat. Dans ces deux cas, nous disons que le mouvement est négatif. Par contre, dans une région géologiquement en voie d'affaissement, le niveau hydrostatique remonte dans les terrains. Il peut en être de même dans certaines régions anciennement arides, soumises à un régime de pluies de plus en plus intense. Nous disons alors, que le mouvement est positif. Il va de soi que les phénomènes de P. S. dus aux filons métalliques se produisent de façon intense dans les régions à mouvement négatif, car des sulfures métalliques frais et conducteurs sont sans cesse ramenés dans la zone d'oxydation. Par contre, lorsque le mouvement du niveau hydrostatique est positif, l'eau envahit les chapeaux et le phénomène générateur de la P. S. cesse. Il existe donc des pays à facies P. S. et des pays où la P. S. sur gîtes métalliques est une impossibilité. Prenons des exemples :

Dans la chaîne des Alpes, les chapeaux des filons n'ont pas le temps de se former, car l'érosion les liquide au fur et à mesure qu'ils se créent. Dans ce cas, les phénomènes P. S. sont généralement très vifs. En effet, les veines conductrices sont près de la surface et le moindre filonnet marque par gradients de potentiel élevés et très localisés.

Par opposition il existe des pays plats, marécageux, où par définition la P. S. sur gîtes métalliques ne peut se manifester. Les filons sont alors noyés et les eaux oxygénées ne pénètrent plus dans les roches, car un manteau réducteur, formé de matières végétales en décomposition, recouvre celles-ci.

Ces différents types se trouvent réunis dans la région du Vardar (en Yougoslavie), où les terrains métallifères anciens et secondaires ont été mis à nu et oxydés avant d'être partiellement recouverts par un Pliocène tourbeux. Dans ce cas, il n'y a évidemment pas de manifestations de P. S. tant que les gîtes sont noyés et couverts de Pliocène. Cependant, si nous nous éloignons de la large vallée du Vardar, nous voyons des chapeaux affleurer dans les premières collines qui bordent la plaine. Ils correspondent à des filons lardants les schistes primaires ou secondaires. Mais, ce sont d'anciens chapeaux noyés en partie sous le niveau hydrostatique et il n'y a pas encore de P. S. Ce n'est qu'en pénétrant dans la montagne qu'on trouve des gîtes actuellement en voie d'oxydation, où le minerai sulfureux frais pointe au-dessus du niveau hydrostatique. A mesure que l'on s'élève, on voit même que l'érosion récente a fréquemment liquidé les chapeaux anciens et creusé jusqu'au minerai frais. Aussi les phénomènes P. S. ne commencent-ils à se manifester qu'à partir d'une certaine altitude et deviennent-ils, *grosso*

modo, plus intenses à mesure que l'on pénètre en montagne, où l'on retrouve finalement le type alpin des réactions.

c) *Nature minéralogique convenable du minerai.*

L'existence de la P. S. dépend également de la nature du minerai. Ainsi que nous l'avons déjà dit, l'expérience montre que le fer, les sulfures de fer cuivreux ou non et le carbone, sont à ce point de vue les éléments les plus actifs dans la nature. C'est en effet sur la pyrite, la chalcopyrite, la pyrrhotine, les tuyaux de fer, l'anthracite et les schistes graphiteux que l'on retrouve toujours les réactions les plus vives. La galène ne montre les mêmes phénomènes que de façon très atténuée.

Examinons de plus près ce qui se passe. Considérons d'abord le cas simple d'une masse métallique plongée dans un milieu hétérogène. Ces conditions se réalisent aisément par l'expérience de laboratoire suivante (fig. 3) :

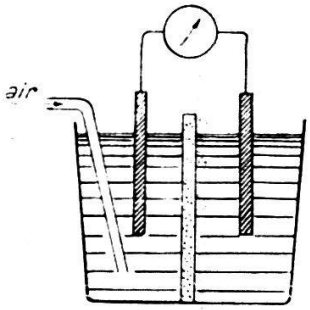

Fig. 3.

On dispose une paroi poreuse dans un vase plein d'eau, de façon à réaliser deux compartiments. Dans chacun d'eux on plonge une électrode métallique et l'on relie ces électrodes par un fil conducteur, en intercalant dans le circuit un appareil de mesure sensible. L'eau de l'un de ces compartiments est aérée par une circulation d'air, tandis que celle de l'autre ne l'est pas. Un courant dû aux forces électromotrices de contact entre électrolytes et métal parcourt alors le fil qui relie les électrodes. Ce courant va, dans le liquide, de l'électrode non aérée vers l'électrode aérée.

La tendance à l'entropie maxima, c'est-à-dire à l'uniformisation des concentrations, entraîne un déplacement d'ions OH^- de l'électrolyte aéré vers l'électrolyte non aéré et d'ions H^+ dans le sens inverse, ce qui est bien conforme au sens du courant que nous avons indiqué.

D'une façon beaucoup plus générale, on pourrait écrire (voir fig. 7) :

$$\text{Métal A} - e^- \rightleftharpoons \text{Milieu oxydant} + e^-$$
$$\text{Métal B} + e^- \rightleftharpoons \text{Milieu réducteur} - e^-$$

où e^- serait un électron.

Et l'échange d'électrons de B vers A uniformise l'électrolyte.

L'électrode A est le pôle positif de la pile, suivant les conventions habituelles. Car il ne faut pas perdre de vue que, lorsque les mesures portent sur l'électrolyte (comme c'est le cas à la surface du sol), la portion de A qui est noyée dans le liquide, et vers laquelle se dirige le courant, apparaît comme une région à potentiels négatifs.

Mais la pile que nous venons de décrire ne fonctionne pas toujours normalement dans la nature, car elle se polarise. Elle ne donne un courant de façon continue que si les produits de polarisation (considérés de la façon la plus générale) sont éliminés de façon satisfaisante. Dans le cas de la pyrite, par exemple, l'oxydation du fer ferreux, du soufre, etc., en profondeur, et la réduction d'hydroxydes ferriques en surface interviennent; ainsi les causes du courant P. S. sont maintenues, Lorsqu'il s'agit d'anthracite ou de schistes graphiteux, le carbone se combine à l'oxygène. La pile atteint fréquemment alors des tensions de l'ordre du volt, car sa polarisation est évitée. Mais, dans le cas des filons de galène, les minéraux d'oxydation communs de ce minéral, tels que l'anglésite et la cérusite, créent facilement des enduits résistants en même temps que l'hydrogène et l'oxygène naissants ont peine à s'éliminer. Aussi la galène ne donne-t-elle généralement que peu ou pas de P. S.

Tout ceci ne représente évidemment le phénomène de polarisation spontanée sur gîtes que de façon très schématique. Quantité de réactions accessoires, souvent importantes peut-être, doivent intervenir. Elles ont été très peu étudiées jusqu'ici. Et la liaison de la P. S. à de certains minerais est encore insuffisamment expliquée au point de vue électrochimique [1].

Le problème de la formation du chapeau.

Nous venons de voir que dans le phénomène P. S. sur gîtes métalliques, on constate toujours un centre de potentiels négatifs au sommet du gisement qui représente ainsi à la fois un point d'entrée du courant et une zone d'oxydation. Cette contradiction mérite d'attirer notre attention. Nous l'appellerons le « problème du chapeau ».

[1] Voir à ce sujet : Roger C. Wells, Electric Activity in Ore Deposits, *United States Geological Survey*, 1914, *Bulletin* 548.

Reprenons à ce sujet l'expérience de la fig. 6 en la modifiant quelque peu. Plongeons des électrodes de fer dans deux verres séparés que nous relions à l'aide d'une résistance variable R constituée par des tubes de sections diverses, remplis de liquide (fig. 4).

Laissons d'abord R petit. Si nous faisons barboter de l'air dans le verre *a*, nous voyons qu'un courant électrique parcourt le fil reliant les électrodes et que ce courant circule suivant a G b R , c'est-à-dire qu'il va, à l'extérieur, de l'électrode aérée à celle qui ne l'est pas. Et c'est l'électrode *non aérée* b qui s'oxyde, comme on peut l'espérer logiquement, puisque c'est vers elle que s'effectue le transport des ions oxygène.

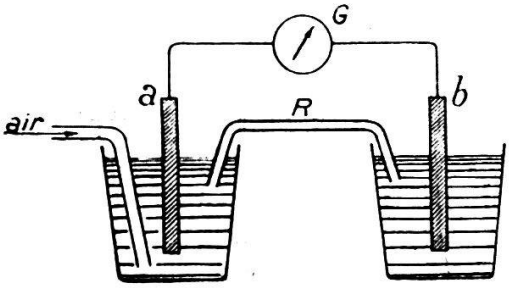

FIG. 4.

Toutefois, si nous faisons croître la résistance R, il arrive un moment où, lorsque celle-ci est suffisamment importante, l'électrode aérée *a* commence à s'oxyder alors même que le courant circule encore en direction a G b .

Il est donc permis, sur la foi de cette expérience, de penser que les gîtes sont parfois des piles à grande résistance débitant peu, et ne pouvant par suite empêcher l'action de l'air sur le sommet du gisement. Autrement dit, de façon simpliste, l'apport en ions hydrogène sur le sommet du gisement peut être insuffisant pour empêcher l'oxydation.

Cependant, il n'en reste pas moins que, dans les cas des filons homogènes bons conducteurs, la tactique de l'oxydation P. S. doit consister en une attaque des sulfures métalliques au voisinage du niveau hydrostatique. Car, vu l'énormité des volumes en jeu, il est peu probable que la pile génératrice de P. S. ait une grande résistance. Mais, à ce propos, nous devons insister sur un autre point, qui est l'oxydation due aux hétérogénéités mineures d'un gîte:

L'oxydation des galènes, par exemple, dans les minerais mixtes pyrites galènes, est un fait bien connu. Nous pouvons l'illustrer encore par une expérience. Un morceau de galène et un morceau de pyrite sont reliés par un fil conducteur et le circuit est fermé en immergeant partiellement les deux fragments de minerai dans un verre rempli d'eau. Un courant électrique s'établit alors. Il va, dans le liquide, de la galène vers la pyrite. Aussi cette galène s'oxyde-t-elle en se couvrant d'un enduit de $PbSO^4$, tandis que la pyrite reste intacte.

L'oxydation de divers constituants de minerais mixtes se produit et s'active ainsi fréquemment par la formation d'une série de petites piles P. S. dont l'action protège certains cristaux et détruit les autres. Ces piles accessoires se forment d'ailleurs aussi bien sur le minerai hétérogène, baignant en milieu homogène, que sur le minerai homogène plongeant dans un milieu hétérogène. Aussi finalement, lorsqu'un gîte vient pointer au-dessus du niveau hydrostatique, le phénomène P. S. général (qui est celui qui se voit en surface) est-il dû aux dissymétries existant de part et d'autre du niveau hydrostatique. Pourtant à ce phénomène majeur se superposent quantité de phénomènes P. S. accessoires, dus à des hétérogénéités mineures. Ceci est notamment vrai dans la zone d'oxydation. Aussi les corps de minerai émergeant du niveau hydrostatique sont-ils bien portés, en moyenne à un potentiel positif. Cependant ce dernier prend en réalité des valeurs très variables suivant le chimisme des eaux qui touchent le gîte. Il en résulte qu'à l'effet général P. S. du corps conducteur enfoui, se superposent quantité de petits circuits dont le débit total en coulombs n'est pas négligeable. Ces circuits parasites existent surtout dans la zone d'oxydation et attaquent le minerai.

Revenons à ce propos à l'expérience de la figure 8. Nous voyons l'électrode *b* s'oxyder tant que la résistance R est petite. Mais lorsque cette dernière croît, le débit de courant continue en direction ab, cependant que les piles parasites, dues aux hétérogénéités, se ferment de plus en plus sur elles-mêmes. L'électrode *a* s'oxyde alors en même temps que *b*. Il est probable qu'une tête de filon en voie d'oxydation est ainsi attaquée à sa surface au-dessus du niveau hydrostatique, d'une façon d'autant plus intense qu'elle se trouve dans un milieu plus hétérogène et que la pile P. S. qu'elle constitue est plus résistante.

Consommation de minerai nécessaire au maintien du courant P. S.

Prenons un amas de pyrite et cherchons à calculer la consommation de minerai nécessaire au maintien du phénomène P. S. Envisageons de suite des chiffres maxima. La tension est au plus de 1 volt. La résistance intérieure de la pile et celle du circuit extérieur peuvent être très faibles et sont très variables suivant la nature du minerai et des terrains encaissants. Pour avoir un ordre de grandeur, supposons-la égale à un ohm. Le courant sera donc d'un ampère au plus, soit un débit de 86 400 coulombs par jour.

Le détail des réactions chimiques correspondant à la formation de ce courant est mal connu. A prendre les choses schématiquement, on peut cependant envisager comme terme extrême l'oxydation de la pyrite ($Fe\,S^2$) en limonite ($2\,Fe^2\,O^3\,.\,3\,H^2O$) et SO^3, ce dernier s'éliminant sous forme de $H^2\,SO^4$. Si nous considérons seulement l'oxydation du fer, celle-ci demanderait 300 000 coulombs par atome-gramme. Dans ces conditions, la consommation correspondrait à environ 40 grammes de pyrite par jour ou 15 kg. de minerai par an pour entretenir un phénomène de P. S. intense. Et ceci serait donc un maximum.

Intensité et forme des réactions P. S.

Un corps conducteur donnant de la P. S. se présente schématiquement comme suit (fig. 1) :

a) Une partie superficielle A baignant dans les eaux aérées est polarisée négativement.

b) Une partie profonde B, généralement beaucoup plus importante comme dimensions que la première, se trouve au-dessous du niveau hydrostatique et se polarise positivement.

c) On peut admettre entre ces deux zones l'existence d'une zone neutre qui doit être en général assez peu importante. La zone neutre est située légèrement au-dessous du niveau hydrostatique, car il arrive fréquemment qu'au voisinage de celui-ci les eaux sont encore chargées en oxygène.

D'une façon générale, le phénomène P. S. peut donc être représenté comme correspondant à un écoulement de courant dans le sol entre une surface positive $\sigma 1$, enveloppant un gîte conducteur au-dessous du niveau hydrostatique et une surface négative $\sigma 2$, enveloppant le même gîte au-dessus du niveau hydrostatique.

La différence de potentiel entre $\sigma 1$ et $\sigma 2$ n'est en général pas supérieure à 1 volt.

La résistance du circuit de cette pile, et par conséquent son débit, dépend évidemment de la grandeur des surfaces $\sigma 1$ et $\sigma 2$ de la résistivité des roches et de la résistance intérieure de la pile même.

L'étude complète, par le calcul d'une masse conductrice polarisée de forme quelconque, est difficilement abordable. On peut cependant essayer de préciser quelques notions moyennant des conventions simplificatrices.

Cas du filon couche.

L'étude du filon couche illimité en direction horizontale se laisse ramener à l'étude de ce qui se passe dans un plan vertical perpendiculaire aux horizontales du gisement (qui n'est pas nécessairement vertical). En effet, par raison de symétrie, les filets de courant issus du filon se maintiennent constamment dans un tel plan, que l'on peut par suite isoler de l'ensemble sans modifier leur distribution ni celle des potentiels.

Supposons encore, pour simplifier, que les parties positives et négatives du plan filonien sont réduites à deux lignes horizontales, constituées par les lieux des centres de gravité C^+ et C^- des sections de ces zones positives et négatives par un plan vertical.

Considérons divers cas (fig. 5) :

a) *C^- enfoui à une profondeur h et C^+ infiniment loin.*

Dans cette hypothèse, le potentiel va en croissant quand on part de l'aplomb de C^- pour s'en éloigner perpendiculairement à la trace du filon.

Le calcul montre que la *courbe en chapeau de gendarme obtenue présente un point d'inflexion dont la distance x au point de la surface du sol situé à l'aplomb de C^- est égale à la profondeur h de la réaction linéaire schématique.*

En effet,

ρ étant la résistivité du terrain encaissant le filon couche,

ΔI l'élément de courant émis dans le plan vertical considéré par la zone négative,

le gradient du potentiel en un point A quelconque de la surface est donné par la formule

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\rho \Delta I}{\pi} \frac{(x^2 + h^2)}{x}$$

car :

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dv}{dr}\frac{dr}{dx} \text{ et } r = \sqrt{(x^2 + h^2)}$$

d'où

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{\rho \Delta I}{\pi} \frac{x^2 - h^2}{(x^2 + h^2)^2}$$

qui s'annule pour $x = h$.

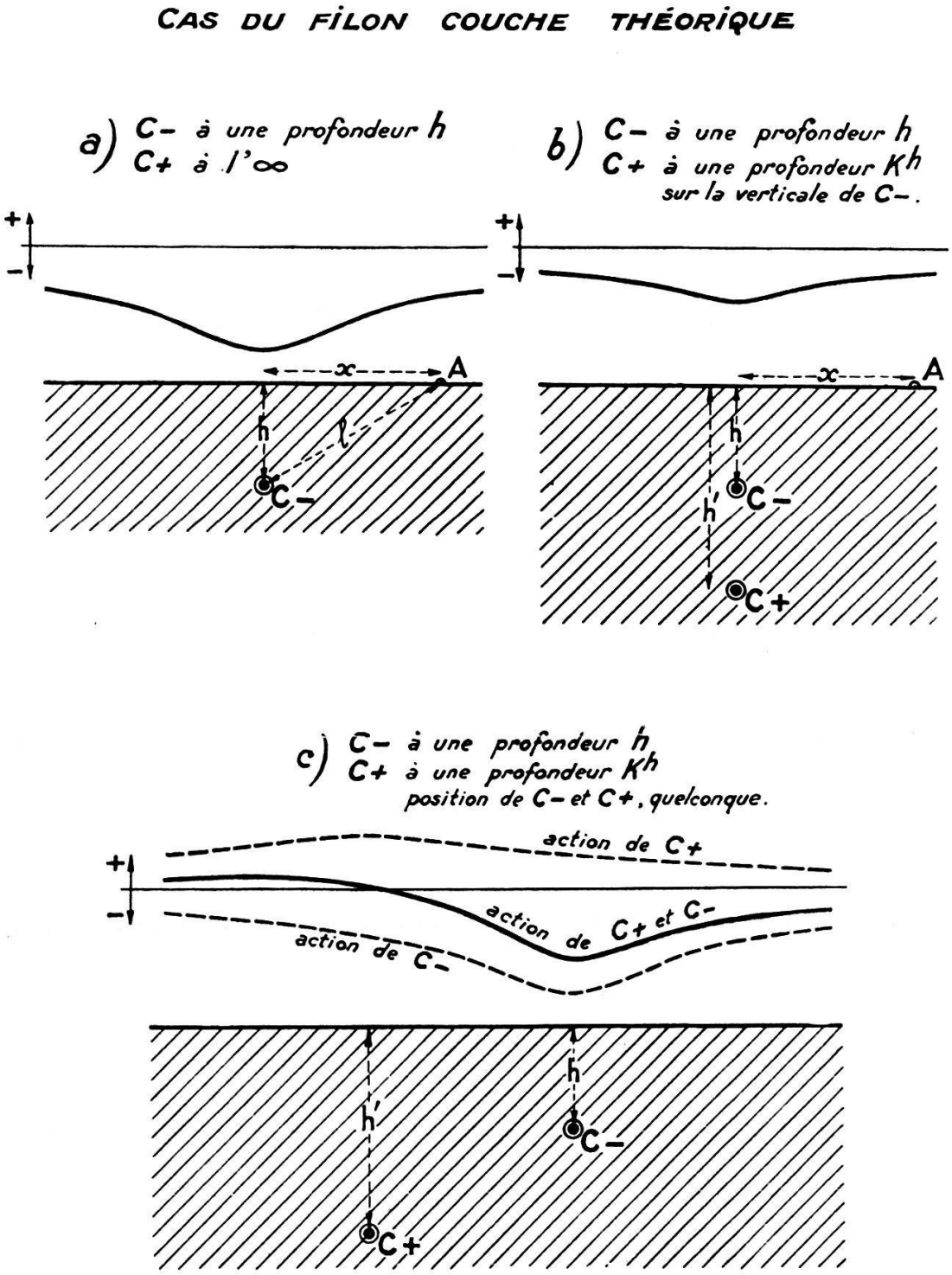
CAS DU FILON COUCHE THÉORIQUE
a) C− à une profondeur h
C+ à l'∞
b) C− à une profondeur h
C+ à une profondeur Kh
sur la verticale de C−.
c) C− à une profondeur h
C+ à une profondeur Kh
position de C− et C+, quelconque.
+
−
x
A
h
l
C−
h'
C+
action de C+
action de C+ et C−
action de C−

FIG. 5.

b) *C^- enfoui à une profondeur h et*
C^+ à une profondeur h' sur la verticale de C^-

C'est le cas du filon vertical.

Le calcul montre qu'il y a encore un point d'inflexion, mais que celui-ci est d'autant plus rapproché du gisement que l'axe positif est plus voisin de l'axe négatif.

Envisageons par exemple le cas particulier ou $h' = 2h$.
On voit alors que la dérivée seconde s'annulera pour

$$\frac{x^2 - h^2}{(x^2 + h^2)^2} - \frac{x^2 - h'^2}{(x^2 + h'^2)^2} = 0$$

ce qui, pour $h' = 2h$ conduit à l'équation

$$9\,x^4 + 15\,h^2\,x^2 + 2\,h^4 = 0$$

D'où

$$x = 0{,}768\,\mathrm{h}$$

Au total, l'action de la partie positive du gite amenuise donc l'intensité totale de la réaction :

1° *en réduisant la valeur maximum de celle-ci,*
2° *en rapprochant les deux points d'inflexion.*

Et la réaction totale s'efface d'autant plus que C^- s'approche de C^+.

Or, le niveau hydrostatique est toujours à une profondeur donnée au-dessous de laquelle le filon devient positif. Aussi, toutes choses égales d'ailleurs, une charge négative d'une tête de filon ne donnera-t-elle pas en surface des réactions qui seront fonction de 1/h, mais plutôt de $1/h^2$. Ceci à cause de la présence de charges positives à une profondeur constante.

c) *C^- enfoui à une profondeur h*
et C^+ à une profondeur h' ($h' > h$)
la position de C^- et C^+ étant quelconque.

C'est le cas du filon incliné.

Nous aurons alors en surface la somme de deux réactions:

1° Une réaction négative d'intensité maximum proportionnelle à 1/h se plaçant à l'aplomb de C^-.
2° Une réaction positive avec intensité maximum proportionnelle à 1/h'.

La somme de ces deux réactions donne un chapeau dissymétrique sur C^- (voir fig. 5). Deux faits importants sont à retenir :

Primo. — *La chute de potentiel est plus rapide en aval pendage qu'en amont pendage. Un centre positif moins marqué que le centre négatif apparait.*

La connaissance de cet aspect dissymétrique des réactions est utile pour déterminer le sens de l'inclinaison des filons.

Secundo. — *Le centre positif, en surface, n'est pas à l'aplomb de* C^+.

Cas d'une sphère enfouie polarisée suivant son axe vertical.

Soit une sphère infiniment conductrice de rayon R placée dans un milieu indéfini de résistivité ρ (fig. 6).

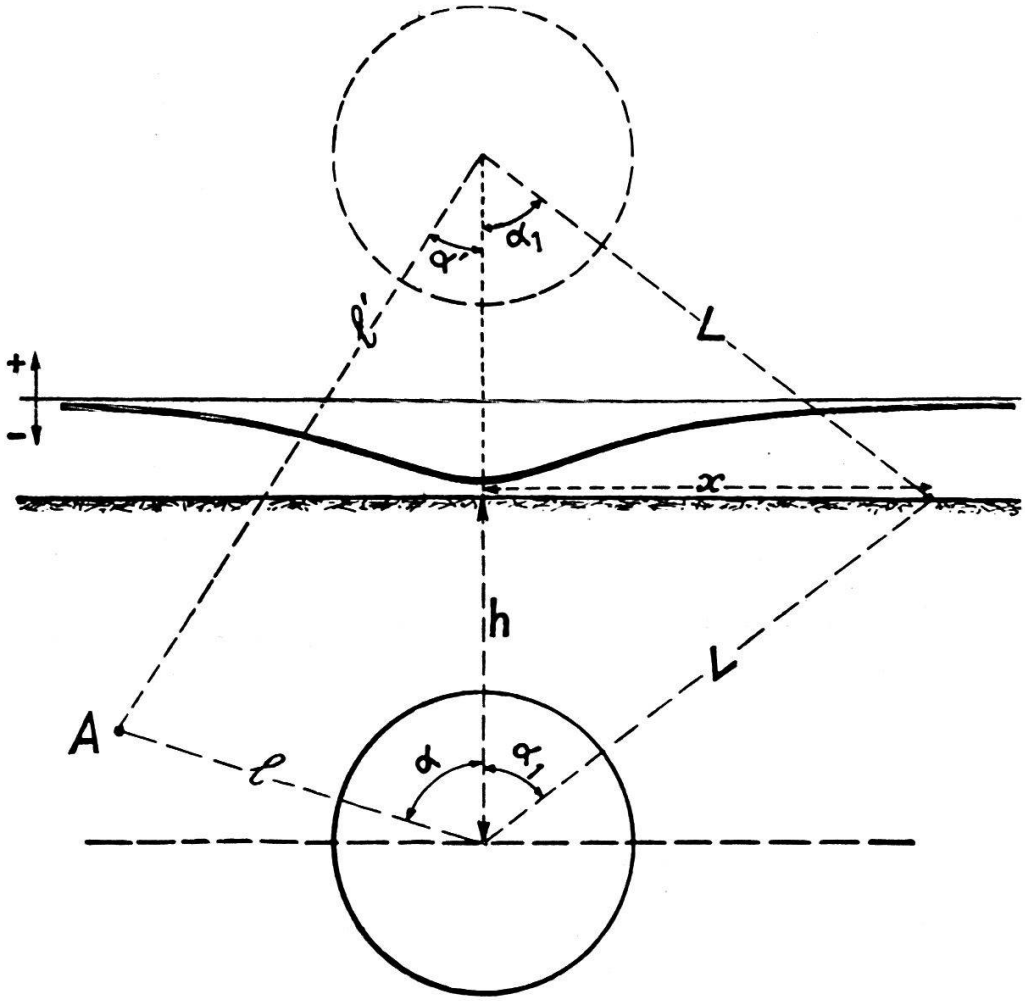

Fig. 6. — Cas de la sphère polarisée suivant son axe vertical.

Supposons cette sphère polarisée suivant un axe vertical. Ceci revient à dire que chaque point de la sphère est à un certain potentiel. Ce potentiel en valeur absolue est maximum aux extrémités du diamètre vertical. Soit E cette valeur.

On démontre que le potentiel en un point A pris hors de cette sphère est exprimé par la formule [1] :

$$V = \frac{ER^2}{2l^2} \cos \alpha$$

ou l et α expriment la position du point 2 en coordonnées polaires par rapport au centre de la sphère.

Si, au lieu d'un milieu indéfini, nous envisageons une portion de matière limitée par un plan, la théorie des images Thompson nous oblige à faire intervenir une seconde sphère symétrique par rapport à ce plan. La formule devient alors :

$$V = \frac{ER^2}{2} \left[\frac{\cos \alpha}{l^2} + \frac{\cos \alpha'}{l'^2} \right]$$

ou α, α', l et l' sont les coordonnées du point A par rapport à la sphère et par rapport à son image.

Enfin, si nous cherchons simplement à connaître les potentiels à la limite du milieu ρ, cette expression se simplifie et par raison de symétrie devient

$$V = ER^2 \frac{\cos \alpha'}{L^2}$$

ou encore si h' est la distance du centre de la sphère au plan de séparation et x la distance du point A à la projection C' du centre de cette sphère.

$$V = ER^2 \, h \, (h^2 + x^2)^{-\frac{3}{2}}$$

La réaction maximum d'une sphère polarisée enfouie de rayon R donné, diminue donc suivant le carré de la distance du centre de cette sphère à la surface.

Ce cas rappelle celui du filon vertical, avec centres positifs et négatifs rapprochés, que nous venons de traiter dans le paragraphe précédent.

CHAPITRE II.

Forces électromotrices engendrées par le frottement des eaux se mouvant à travers le sous-sol.

Quelques mots de théorie au sujet de l'électrofiltration.

On sait que lorsqu'un électrolyte filtre à travers une paroi poreuse, il s'établit de part et d'autre de celle-ci une force électromotrice. En désignant par E cette différence de potentiel, par σ la

[1] A. Petrovsky. — The Problem of a Hidden Polarized Sphere, *Philosophical Magazine*, vol. V, Février et Mai 1928.

conductibilité spécifique du liquide, μ son coefficient de viscosité, D sa constante diélectrique, ΔP étant la chute de pression à travers la paroi, on a

$$E = K \frac{D \cdot \Delta P}{4\pi\mu\sigma}$$

où K est un coefficient caractéristique de l'électrolyte et de la nature chimique de la paroi.

Des phénomènes de filtration de ce genre sont assez fréquents dans la nature et donnent lieu à des phénomènes de polarisation spontanée. Bien que les pressions, qui interviennent par unité de longueur, soient généralement faibles, les réactions de filtration peuvent être très marquées et atteindre jusqu'à 1 ou 2 volts, car la conductibilité des ions de filtration peut être minime dans certains cas et la filtration se fait parfois sur une grande hauteur.

Il faut distinguer à ce sujet :

1° L'électrocapillarité due à une infiltration des eaux par gravité (c'est-à-dire par descente des eaux).

2° L'électrocapillarité due à une ascension des eaux (ascension capillaire et évaporation).

Dans la grande majorité des cas, l'électrocapillarité *per descensum* donne des réactions négatives en surface et l'électrofiltration *per ascensum* des réactions positives.

Examinons ces phénomènes de plus près: Un corps poreux peut être considéré comme une association de petits tubes capillaires. On admet que la paroi de ces tubes a le pouvoir de fixer à sa surface, par absorption, les ions du liquide et que cette absorption est plus grande pour les ions d'un certain signe que pour ceux de l'autre ; il en résulte l'apparition d'une sorte de couche électrique attachée à la paroi. Par suite de l'attraction due aux ions absorbés se forme une couche de signe contraire attachée au liquide. Cette dernière couche ne doit d'ailleurs plus être considérée comme infiniment mince, mais plutôt comme une « atmosphère ionique » dont la densité décroît lorsqu'on s'éloigne de la paroi. On admet de plus en plus que les ions négatifs sont liés au solide et les ions positifs au liquide (fig. 7). Lorsque ce dernier est en mouvement, il entraîne avec lui la couche électrique qui lui est attachée, d'où apparition d'une différence de potentiel entre les deux faces de la paroi.

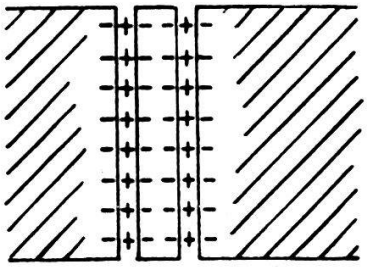

FIG. 7.

On constate enfin que les différences de potentiel mesurées sont plus faibles que celles prévues par la formule que nous avons donnée plus haut. En effet, dans la double couche la concentration en ions étant plus grande, la conductibilité du liquide est accrue. Il faudrait donc prendre dans la formule, une conductibilité σ', plus grande que σ. De plus, le potentiel de filtration développe une réaction active d'électroosmose qui tend à chasser le liquide en sens inverse de son mouvement primitif. La vitesse de filtration est donc diminuée et a une valeur plus faible que celle qui résulterait de la chute de pression ΔP.

A. — Electrocapillarité due à la filtration des eaux « per descensum ».

Exemple théorique d'un banc de sable vertical compris entre deux masses d'argile (fig. 8).

Envisageons l'existence d'un banc vertical de sable compris entre deux masses d'argile imperméables.

Le mouvement descendant de l'eau dans le sable, avec entraînement de charges positives, produit un courant dirigé

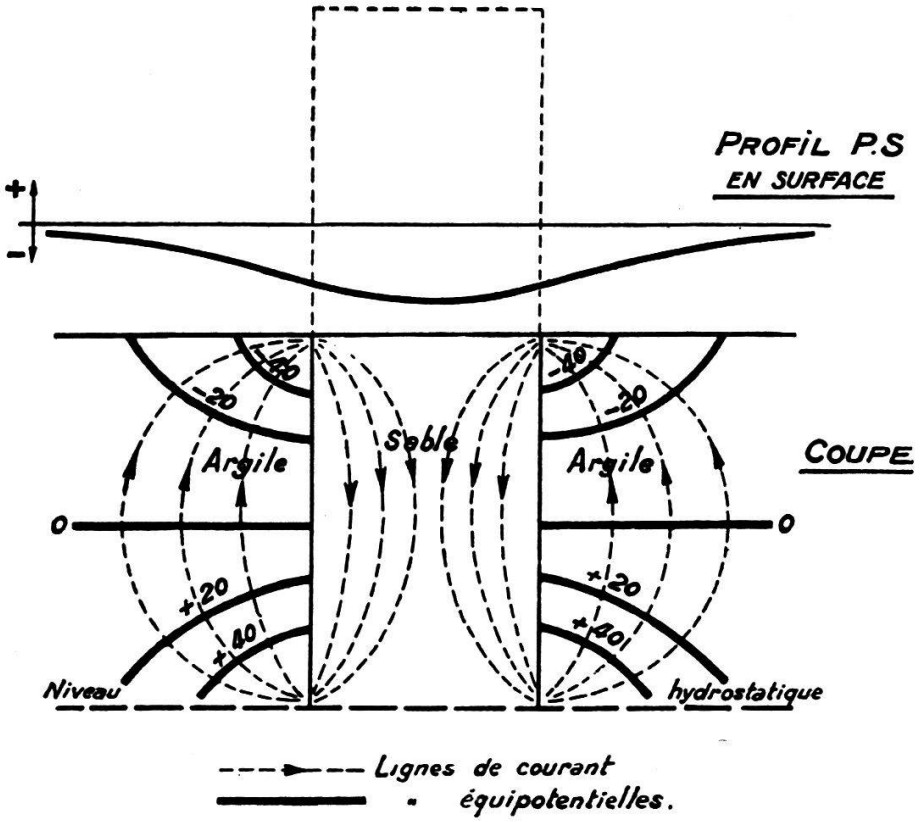

FIG. 8. — Cas théorique de la distribution d'une P. S. électrocapillaire provoquée par un banc de sable vertical à travers lequel filtre l'eau.

de haut en bas. Si nous admettons que la densité du courant à l'intérieur du banc est uniforme, il en sera de même de la chute de tension produite par ce courant. Par conséquent, le banc de sable se présente comme un générateur ayant une force électromotrice répartie sur toute sa hauteur.

Il est commode, pour se rendre compte qualitativement, de l'allure des phénomènes que va provoquer un tel générateur, de faire la comparaison suivante: Considérons, dans un milieu possédant une certaine perméabilité, un empilement de doublets magnétiques ayant pour surface la section du banc de sable. On sait qu'en milieu défini, les ligne de force du champ magnétique ainsi produit sont identiques à celles que l'on pourrait construire en supposant l'existence de masses magnétiques de signes contraires, réparties sur les faces terminales de l'empilement. Dans un demi-espace limité par un plan, on devra ajouter l'action d'un ensemble magnétique, image du premier par rapport au plan limite. Le tracé des lignes de force du champ magnétique résultant donne alors le tracé des filets de courant dus au phénomène d'électrofiltration. La forme des surfaces équipotentielles s'en déduit immédiatement.

Supposons maintenant qu'une galerie pénètre dans le sol jusqu'au contact du banc de sable. Quelles seront les valeurs du potentiel aux différents points de cette galerie ? Il est facile de se rendre compte que si la galerie est à une profondeur voisine de celle de la partie médiane de la colonne filtrante, elle rencontrera des potentiels sensiblement constants. A une profondeur inférieure, elle rencontrerait des potentiels décroissants, et à une profondeur supérieure des potentiels croissants.

(Ceci, bien entendu, seulement si le percement de la galerie n'a pas troublé le régime hydrodynamique préexistant. En réalité, des filets d'eau sortent du banc de sable pour s'écouler par la galerie. Ce qui correspond, en reprenant notre comparaison magnétique, à l'apparition de charges positives qui vont modifier plus ou moins, suivant leur importance, la force du champ primitif.)

En résumé, un banc de sable vertical, compris entre deux masses d'argile et à travers lequel filtrent des eaux, sera le siège d'un champ électrique dont les potentiels vont en croissant vers le bas. Il en résulte l'existence d'un centre négatif en surface.

On trouve là le caractère distinctif essentiel de ce phénomène d'avec celui de la P. S. sur gîtes métalliques : même apparence quant aux mesures faites à la surface du sol, mais

dans un puits, exécuté sur le centre de la réaction, les potentiels sont croissants avec la profondeur dans les cas d'électrocapillarité et décroissants sur les filons métalliques.

Polarisation spontanée due au frottement de l'eau ruisselant en surface.

L'eau ruisselant en surface produit de façon assez fréquente de légers centres négatifs sur les sommets, surtout lorsque ceux-ci sont dénudés, taillés dans des roches électriquement résistantes et, par surcroît, peu solubles. C'est ainsi qu'on peut observer que des collines, négatives de 30 millivolts lors de la fonte de la neige, ne le sont pas à la belle saison. D'une façon générale, les réactions dues au frottement des eaux en surface sont faibles dans nos régions tempérées, et n'atteignent en général que 10 à 20 millivolts. Elles arrivent cependant à devenir importantes dans certains cas particulièrement favorables.

Exemple de sommet négatif.

Dans le Nord-Est de l'Ancienne Serbie abondent des venues andésitiques. Ces dernières sont recoupées par des frac-

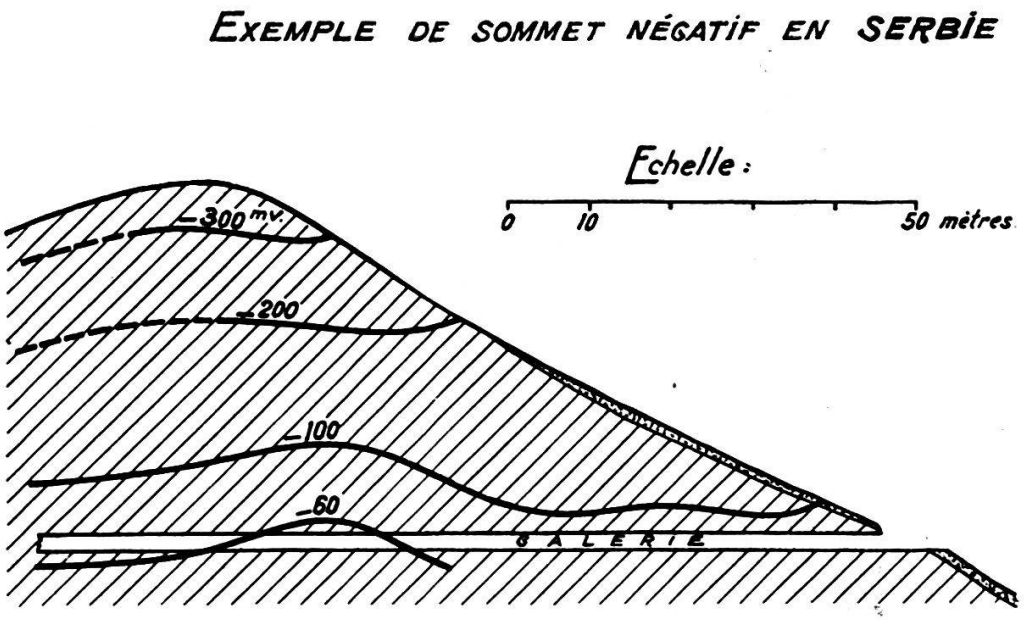

Fig. 9.

tures sur l'axe desquelles on constate fréquemment une silicification complète des roches (l'andésite se transforme d'abord en propylite et ne laisse finalement qu'un résidu de quartz fréquemment spongieux).

L'érosion a laissé en saillie nombre de ces axes silicifiés qui apparaissent sous forme de collines dont les sommets se coiffent souvent de réactions P. S. négatives de quelques centaines de millivolts.

Il s'agit là d'un phénomène manifestement dû au cheminement des eaux de pluie, très résistantes au point de vue électrique, frottant contre un quartz parfois spongieux dans les canaux duquel elles se déplacent.

La fig. 9 montre la répartition des potentiels sur une de ces collines percée d'une galerie qui a permis de réaliser des mesures à l'intérieur du sol. Elle est à comparer avec la fig. 8 de l'exemple théorique d'un banc de sable vertical compris entre deux masses d'argile imperméable.

B. — **Electrocapillarité due à un mouvement des eaux « per ascensum ».**

Polarisation spontanée accompagnant les phénomènes d'évaporation.

On constate fréquemment qu'un champ labouré fraîchement est positif de quelques dizaines de millivolts par rapport au sol ordinaire (d'une forêt voisine par exemple). Ce fait est attribuable à l'évaporation plus intense de la terre remuée et à l'ascension électrocapillaire de l'humidité à travers le sol. L'expérience suivante, qui rend compte du phénomène, peut être réalisée aisément (fig. 10).

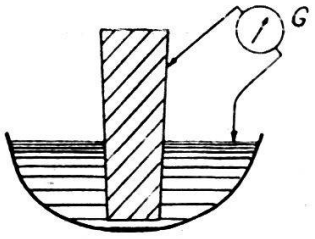

Fig. 10. — Reproduction en laboratoire du phénomène P. S. électrocapillaire à l'aide d'un fragment de terre réfractaire.

Dans une coupelle contenant une solution saturée de sulfate de cuivre, on fait plonger partiellement un tube de terre réfractaire, primitivement sec, qu'on laisse s'imbiber progressivement. Au moment où, dans son ascension, le liquide a humecté les parois sur toute leur hauteur, on mesure la différence de potentiel entre la surface du liquide dans la coupelle et différents points de la paroi. On constate alors l'existence de potentiels positifs allant en croissant à mesure que l'on s'éloigne du liquide.

L'ascension du liquide peut être maintenue en soumettant le tube à l'évaporation. Les arêtes (où l'évaporation doit être la plus intense) sont alors aux potentiels les plus élevés.

Cette expérience peut être reprise avec une colonne d'argile

desséchée. Dans tous les cas, les différences de potentiel que l'on obtiendra en laboratoire atteindront aisément quelques dizaines de millivolts.

CHAPITRE III.

Exécution des mesures P. S. Représentation graphique des résultats obtenus.

Représentation graphique.

Au point de vue graphique, la répartition de la P. S. à la surface du sol se représente commodément :

a) par des profils P. S.;

b) par des courbes équipotentielles P. S.

La représentation par profils P. S., le long desquels on porte en abscisses les déplacements et en ordonnées les potentiels, est l'analogue d'une coupe topographique. On a recours à de tels graphiques lorsque le nombre des points cotés est insuffisant pour tracer des courbes avec précision. Mais il y a généralement avantage à exprimer les résultats finaux par une carte de courbes équipotentielles qui est alors l'équivalent d'une carte topographique avec courbes de niveau. Ce document est plus lisible qu'une série de profils.

Exécution de la mesure P. S.

Pour réaliser une carte P. S., il est nécessaire d'exécuter une série de mesures de potentiels en différents points du sol.

L'exécution d'une mesure P. S. comprend les trois points suivants :

1° Observation d'une différence de potentiel entre deux électrodes *m* et *n* qui forment le contact du sol.

2° Détermination de son signe.

3° Détermination de sa valeur en millivolts.

L'appareillage utilisé pour les mesures consiste en une ligne L en câble conducteur isolé, un potentiomètre et deux électrodes impolarisables (dont l'une solidaire du potentiomètre est appelée l'électrode fixe, et l'autre reliée au potentiomètre par un câble est l'électrode mobile). Elles sont placées aux points entre lesquels on veut mesurer la différence de potentiel (fig. 11).

Il est indispensable d'employer des électrodes impolarisables, car le contact de la terre humide avec des piquets mé-

talliques introduirait des erreurs souvent supérieures au phénomène à mesurer et variables d'un point à un autre.

L'électrode impolarisable type comporte un récipient poreux qui renferme une solution d'un sel de même nature que

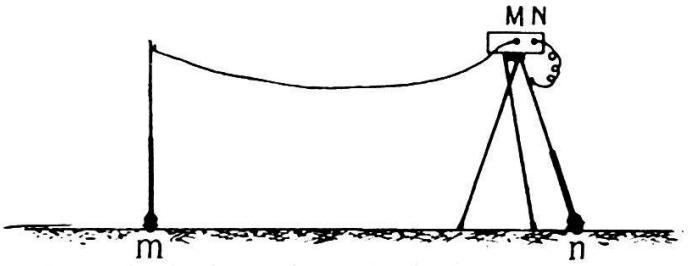

Fig. 11. — Dispositif utilisé pour une mesure P. S.
m n = contact des électrodes impolarisables avec le sol.
MN = bornes d'un potentiomètre.

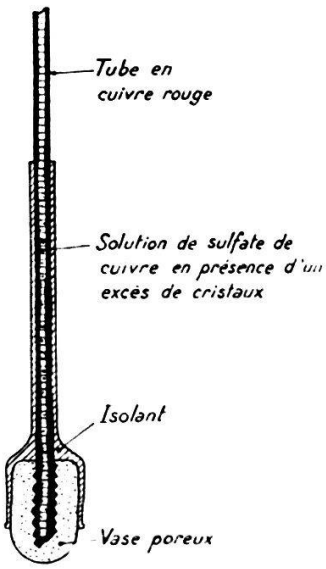

Fig. 12. — Electrode impolarisable type Schlumberger.

l'électrode. Le contact du sol se fait alors par l'intermédiaire de la solution qui imbibe le vase poreux et les forces électromotrices parasites introduites sont minimes.

L'électrode impolarisable créée par Schlumberger (fig. 12) est formée d'un tube de cuivre rouge, serti dans un vase de magnésie, qui contient une solution de sulfate de cuivre en présence d'un excès de cristaux de ce sel.

La chaîne galvanique :

Cuivre de l'électrode *m*	Solution $Cu\ SO^4$ du vase poreux	Electrolyte hétérogène contenu dans le sol	Solution $Cu\ SO^4$ du vase poreux	Cuivre de l'électrode *n*

est extrêmement faible, de l'ordre de 1 à 2 millivolts si le sol est comparable en *m* et en *n*.

Equilibrage des électrodes.

Avant de commencer les mesures, il est nécessaire de s'assurer que les électrodes impolarisables sont bien équilibrées, c'est-à-dire qu'elles ne présentent pas entre elles, et indépendamment des contacts, une différence de potentiel supérieure à 1 ou 2 millivolts. A cette fin, il suffit de les placer en un même point, sur un sol homogène et de mesurer la différence de potentiel entre elles.

Pour que des électrodes soient bien équilibrées, il faut qu'elles soient complètement remplies de liqueur et que les contacts liqueur-tube ne varient pas quand on les incline. En effet, la présence d'air à l'intérieur du tube de cuivre rouge provoque des oxydations instables qui modifient la force électromotrice du contact cuivre-eau sulfatée. La saturation de la liqueur (excès de cristaux) est également désirable, bien que la force électromotrice ne dépende que peu du degré de concentration.

Les deux électrodes doivent être sensiblement à la même température (pour les électrodes Schlumberger, un écart de 10° centigrades donne lieu à un déséquilibre de 5 millivolts). Il est nécessaire, à cet effet, d'éviter qu'une électrode reste au soleil, l'autre étant à l'ombre, ou que l'aide, tenant avec sa main l'électrode mobile par le tube de cuivre, en dehors de sa gaîne de caoutchouc, n'échauffe l'électrode sensiblement.

Il faut, en outre, s'assurer que les vases de grès constituant les bases des électrodes soient au même degré d'humidité.

Il est bon d'avoir présent à l'esprit que les électrodes dites impolarisables sont toujours polarisées et que des valeurs de potentiel parasites s'introduisent ainsi dans les mesures. On devra s'efforcer de réduire celles-ci au minimum. Lorsqu'on touche, par exemple, avec une électrode un point sec et avec l'autre un point humide, l'électrode sèche devient négative. Ceci s'explique par la diffusion du liquide à travers la magnésie des électrodes, qui rend celles-ci négatives par rapport au sol.

Définition des zéros.

La reconnaissance d'une aire par P. S. aboutit à une carte qui définit la valeur des potentiels mesurés par rapport à un point quelconque. Il est commode de choisir pour potentiel zéro le potentiel moyen des zones à faibles variations qui est généralement le potentiel normal de la région. Si l'on reste éloigné de toute manifestation notable de P. S. du sous-sol, les différences de potentiel entre deux points du profil restent très faibles (inférieures, par exemple, à 10 mv.). Elles proviennent alors uniquement de petites variations locales dues à l'électrocapillarité (voir chapitre II) ou au déséquilibrage des électrodes. Dans l'ensemble, elles sont de signe quelconque et le profil reste compris entre +10 et —10, par exemple. On dit alors que l'on se trouve « sur le zéro du profil » par opposition aux zones où se manifestent les phénomènes P. S. pro-

prement dits. Et l'on a un « bon zéro » lorsque le profil est plat.

En région montagneuse et surtout en pays secs, on a rarement de bons zéros. Ceux-ci sont, par contre, excellents sur sol argileux, en plaine.

CHAPITRE IV.

Quelques exemples d'études de gîtes par P. S.

Délaissant la théorie, nous allons donner maintenant quelques exemples d'application de la P. S. à la prospection de gîtes métallifères. Nous prendrons des cas aussi variés que possible et chercherons surtout à illustrer ce que nous avons exposé dans les chapitres précédents.

I. Découverte d'un gîte de pyrrhotine nickelifère.

(*Exemple d'une réaction négative flanquée d'un centre positif.*) (Voir fig. 13.)

Nous empruntons cet exemple à un travail exécuté près de New Hope, en Colombie Britannique, pour le compte de la British Colombia Nickel Mines. Cette prospection amena la découverte d'un grand amas de pyrrhotine nickelifère.

La présence de réactions positives et négatives a permis de reconnaître le pendage du gîte. Les sondages Nos 1 et 2 placés sur l'indication de l'étude électrique ont recoupé un corps de minerai de 20 à 30 mètres, qu'aucune indication de surface ne permettait de soupçonner [1].

II. Etude sur filons complexes B. P. G.

(*Exemple d'une réaction vive sur un filonnet et d'un centre mou couvrant un gîte plus important.*) (Fig. 14.)

La région de Veliki Majdan (en ancienne Serbie) est géologiquement formée d'une série de calcaires et de schistes assez vivement plissés, qui a été minéralisée en B. P. G. lors d'intrusions andésitiques et dacitiques.

Une campagne de prospection électrique avait décelé les centres P. S. numérotés C_1 C_2 C_3 sur la carte de la fig. 14.

[1] J.-J. Breusse. — Electrical Prospecting in Canada, *Engineering and Mining Journal*, vol. 133, N° 6, Juin 1932.

CARTE DE POLARISATION SPONTANÉE COUVRANT LE GITE DE PYRRHOTINE NICKELIFÈRE DE NEW HOPE (Colombie Britannique)

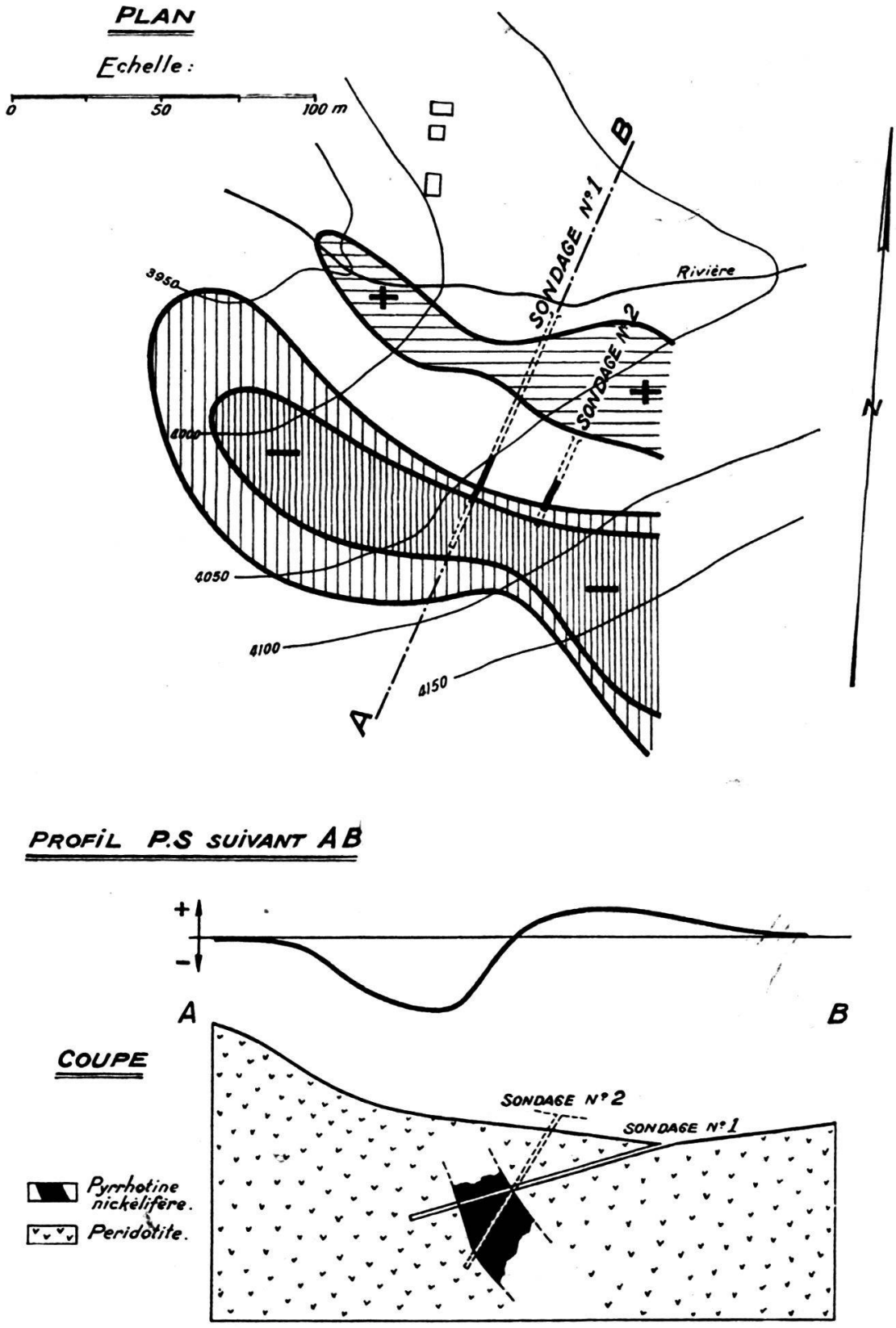

FIG. 13.

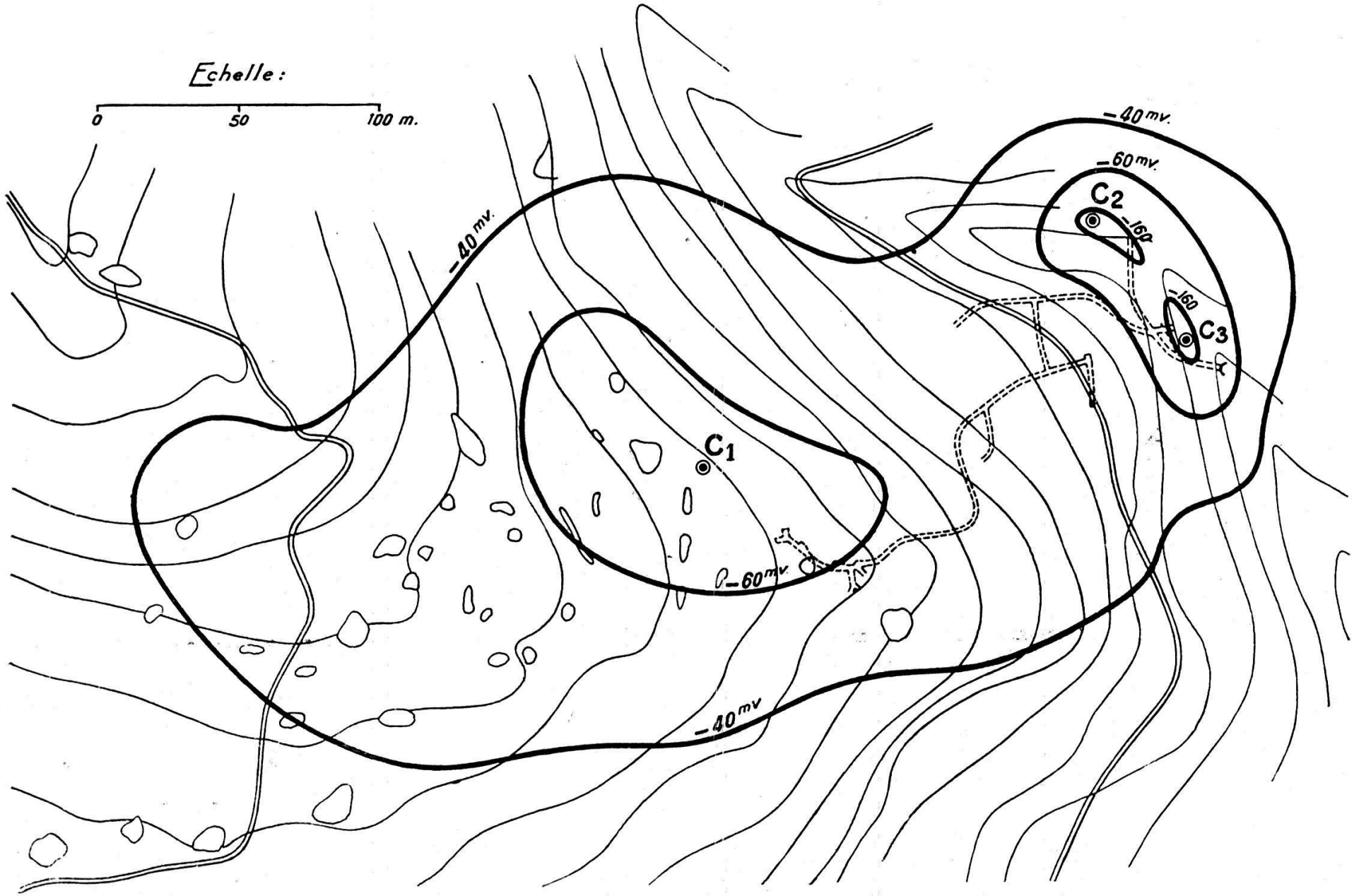
ETUDE DE FILONS B.P.G
Echelle :
0
50
100 m.
-40 mv.
-60 mv.
C2
-160
-160
C3
C1
-60 mv.
-40 mv
-40 mv.

FIG. 14.

Les réactions C_2 et C_3, relativement intenses et très localisées, avaient immédiatement été attribuées à des filons venant pointer près de la surface. Et une galerie de recherches recoupa en effet, à quelques mètres sous le centre C_3, une brèche à ciment pyriteux et minerais sulfurés complexes.

L'indication C_1, contrairement aux réactions aiguës de C_2 et C_3, couvrait une large superficie à l'intérieur de laquelle les gradients de potentiel étaient faibles. Elle fut donc attribuée à une minéralisation plus profonde. Dans ce cas, l'application de la règle du point d'inflexion indiquait (en imaginant une charge ponctuelle) que la tête du filon se trouvait à environ 80 mètres. Comme il était cependant vraisemblable d'imaginer que ce dernier devait se ramifier (et amener de ce chef un étalement de la réaction P. S.), le chiffre de 80 mètres pouvait être considéré comme un maximum. Le diagnostic fut vérifié par la suite, lors de l'exploration d'anciens travaux romains ou saxons. Deux colonnes de minerai B. P. G. (dont l'une de 1 m. 50 de puissance) furent mises en évidence sous l'aire dessinée par la courbe — 60 mv. et ce à quelques dizaines de mètres de profondeur.

Cet exemple illustre ce que nous avons dit au sujet de la profondeur et de la répartition des masses minéralisées, qui jouent un rôle essentiel dans l'intensité et la forme des indications électriques observées en surface. Les réactions P. S. violentes se concentrent toujours autour des points hauts des gisements et il y a, par conséquent, une forte exagération des indications de tout ce qui est superficiel au détriment des parties profondes du gîte. Le fait s'observe clairement à Veliki Majdan où la brèche minéralisée venant près du jour provoque des indications de 180 à 200 millivolts, n'intéressant qu'une aire peu étendue. Par contre, la réaction C_1 couvrant un gîte plus important, mais plus profond, est faible (—75 millivolts au maximum). Elle s'étend en revanche sur une large surface.

Etude des mines de Bor (Yougoslavie).

(Fig. 15.)

De gros amas formés de pyrite, chalcopyrite, covelline et chalcosine existent dans une zone d'andésite propylitisée de la région de Bor. Ils viennent pointer au-dessus du niveau hydrostatique à Tchoka Dulkan et Tilva Roch, tandis que le minerai se noie entièrement sous celui-ci dans le gîte de Tilva Mika.

La prospection par P. S. fut réalisée alors que le gîte de

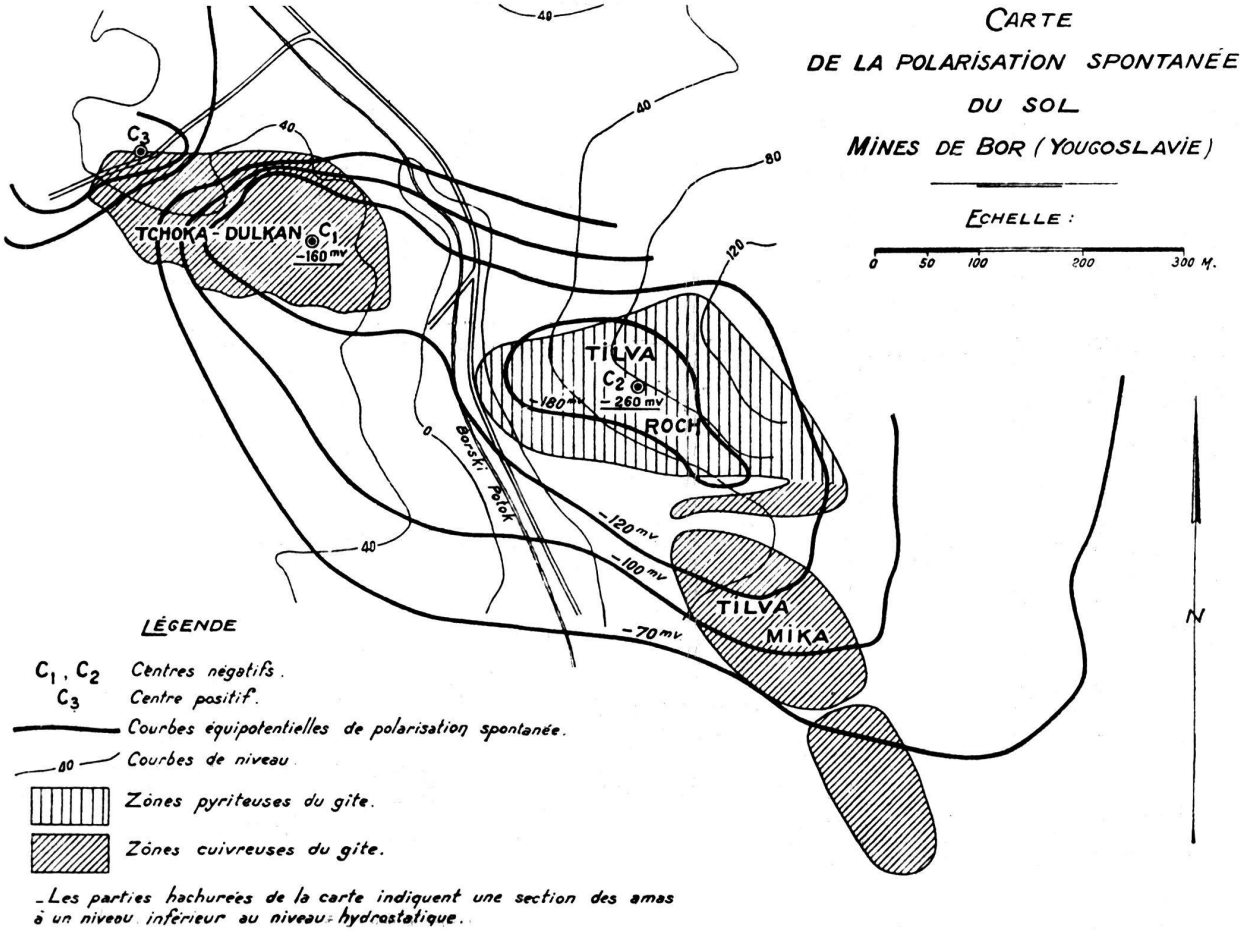
CARTE
DE LA POLARISATION SPONTANÉE
DU SOL
MINES DE BOR (YOUGOSLAVIE)
ÉCHELLE :
0 50 100 200 300 M.
N
TCHOKA - DULKAN
C1
-160 mv
C3
TILVA
C2
-260 mv
-180 mv
ROCH
TILVA
MIKA
Borski Potok
-120 mv
-100 mv
-70 mv
40
80
120
0
LÉGENDE
C1, C2 Centres négatifs.
C3 Centre positif.
Courbes équipotentielles de polarisation spontanée.
80 Courbes de niveau.
Zônes pyriteuses du gite.
Zônes cuivreuses du gite.
Les parties hachurées de la carte indiquent une section des amas à un niveau inférieur au niveau hydrostatique.

FIG. 15.

Tchoka Dulkan seul était connu et les résultats montrèrent le prolongement de la minéralisation vers le Sud-Est. Le fait a été confirmé ensuite par les travaux miniers.

Aucun centre positif n'apparaît ici sur Tilva Mika vers le Sud-Est.

Prospection sur minerai B. P. G. complexe dans le département du Gard (France).

(*Exemple d'une étude générale de la minéralisation.*)
(Fig. 16.)

L'emploi de la P. S. en prospection n'est pas limité à la recherche directe de corps de minerai bien définis. Il peut être étendu à des fins plus générales, telles que la détermination des voies qu'ont empruntées certaines solutions minéralisatrices. Dans beaucoup de cas, celles-ci se suivent grâce aux quelques réactions dues aux filons pyriteux restés en jalons sur leur cours. La connaissance des chemins par lesquels a circulé le minerai est précieuse, surtout lorsque les indices en surface sont insuffisants. En s'aidant de considérations géologiques générales, elle permet de choisir des lieux d'élection parmi un ensemble de réactions P. S. et de situer des travaux de recherches qu'il serait parfois très difficile de déterminer autrement.

Des études que nous avons effectuées en 1936 à Pallières, dans le département du Gard, fournissent un exemple de l'étude générale d'une minéralisation. Voici d'abord quelques mots sur les formations de la région qui sont :

l'Hettangien, composé de calcaires dolomitiques et de calcaires gris bleu (200 à 300 mètres d'épaisseur);
le Rhétien, formé de marnes, avec intercalations de petits bancs calcaires dolomitiques ou gréseux (0 à 30 mètres d'épaisseur);
le Trias: grès et surtout arkoses (2 à 100 mètres);
le Paléozoïque: granite à grandes orthoses.

L'ensemble de ces terrains dessine une large voûte dont la charnière court en direction SSW-NNE à travers toute la région étudiée. Sur le flanc ouest de cette voûte, les calcaires hettangiens viennent buter en discordance mécanique contre les marnes. Il s'agit vraisemblablement d'une grande faille. La coupe géologique schématique de la fig. 16 montre, par ailleurs, l'allure tectonique des environs de La Croix de Pallières.

La genèse des gîtes de Pallières s'explique par l'apport de solutions minéralisatrices venues de la profondeur en emprun-

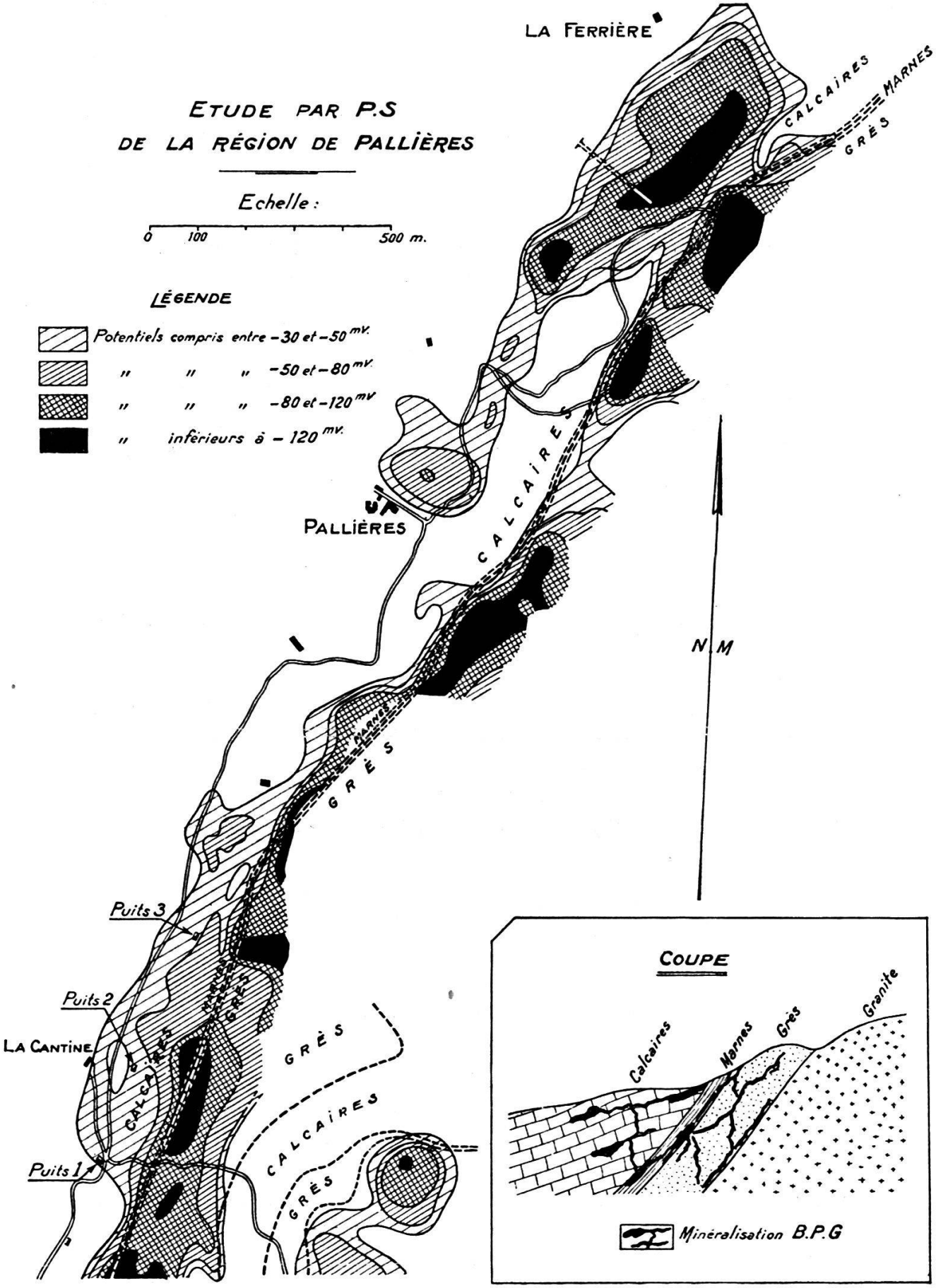
ETUDE PAR P.S
DE LA RÉGION DE PALLIÈRES
Echelle :
0 100 500 m.
LÉGENDE
Potentiels compris entre -30 et -50 mv.
" " " -50 et -80 mv.
" " " -80 et -120 mv.
" inférieurs à - 120 mv.
LA FERRIÈRE
CALCAIRES
MARNES
GRÈS
PALLIÈRES
CALCAIRES
N M
MARNES
GRÈS
Puits 3
Puits 2
LA CANTINE
CALCAIRES
MARNES
GRÈS
GRÈS
CALCAIRES
GRÈS
Puits 1
COUPE
Calcaires
Marnes
Grès
Granite
Minéralisation B.P.G

FIG. 16.

tant la voie de la faille. Elles se sont largement répandues et éparpillées dans les grès et arkoses poreux, qu'elles ont lardés de filons de pyrite. Mais elles ont eu de la peine à franchir les marnes rhétiennes imperméables dans lesquelles le minerai s'est localement déposé sous forme d'amas ou de masses plus considérables, en se substituant de préférence à de petits bancs dolomitiques intercalaires. Ce n'est que parfois que ces solutions ont réussi à se frayer un chemin à travers les marnes pour envahir les calcaires et progresser dans ceux-ci, soit en suivant les joints de stratification, soit en empruntant des cassures généralement voisines de la verticale (voir coupe).

Les phénomènes de polarisation spontanée décelés étaient essentiellement provoqués par la pyrite. C'est donc cette dernière qui a servi de fil conducteur pour une étude générale de la distribution des minerais dans la région.

Les grès minéralisés de Pallières sont peu attrayants au point de vue économique car les B. P. G. y sont très pyriteux et la blende et la galène très disséminés. En revanche, la minéralisation des marnes est beaucoup plus intéressante, les mêmes B. P. G. s'y rassemblant parfois en amas dont les teneurs en blende et galène ont permis des exploitations. Enfin, le minerai des calcaires a également été extrait avec profit en quelques endroits, le plus souvent à l'état de calamine.

En résumé le minerai des marnes et calcaires est seul à retenir pour l'exploitation, tandis que les nombreux filons s'insinuant dans les grès peuvent être considérés comme étant sans valeur jusqu'à plus ample informé. Or, l'examen de la carte P. S. montre que ce n'est qu'en deux endroits que la minéralisation s'est épanchée dans les marnes, qu'elle a crevées pour se répandre dans les calcaires. Ces deux points de fuite sont :

1° l'épanchement de « La Cantine » où du minerai a été exploité entre les « puits 1, 2 et 3 », soit dans les marnes, soit dans les calcaires, tantôt à l'état de sulfures, tantôt à l'état de minerais oxydés ;

2° l'épanchement de « La Ferrière » que la P. S. détermine nettement, en montrant que les solutions minéralisatrices ont percé les marnes au S. E. de La Ferrière pour s'insinuer dans les calcaires en une longue bande qui va jusqu'à Pallières.

Les recherches seront évidemment à grouper autour de ces épanchements dont l'existence est en partie confirmée par les travaux existants.

Prospection par P. S. réalisée au Katanga (fig. 17).

(*Exemple d'étude tectonique sur schistes graphiteux.*)

Les gisements de minerais de cuivre oxydés ou carbonatés du Katanga se trouvent dans un complexe de dolomies et schistes dolomitiques appelés la série des mines. Au-dessus de cette série se place celle de N'Goya, dont la partie supérieure est constituée par une épaisse rame de schistes rubannés. Puis vient le « grand conglomérat » surmonté à son tour du Kundelungu.

On connaît les difficultés du levé géologique en Afrique Centrale, où de vastes régions sont couvertes par un sol d'altération. La nécessité de creuser des tranchées et des puits de prospection s'impose à tout instant. Or, au Katanga, le battage systématique par P. S. a permis d'entreprendre une étude tectonique rapide et d'éviter ces inconvénients, grâce à la présence de deux horizons graphiteux repères qui donnent des réactions de polarisation spontanée très nettes. Le plus élevé de ceux-ci se trouve dans la série de Muaslira, un peu au-dessous du grand conglomérat, dans des schistes rubannés. L'inférieur appartient à la série des mines même et s'intercale généralement dans les schistes dolomitiques. Ce dernier est d'ailleurs lié de si près au minerai que l'opinion a été émise que les horizons graphiteux de la série des mines ont joué un rôle dans la réduction et la précipitation des solutions minéralisantes.

Un des problèmes fondamentaux qui se pose au Katanga est de déterminer les anticlinaux, au centre desquels on peut espérer trouver la série inférieure minéralisée (dite série des Mines) à une profondeur raisonnable. La méthode par P. S. a fréquemment permis de tracer d'une façon précise les divers plis, en jalonnant l'horizon graphiteux inférieur du grand conglomérat.

Un second problème, d'importance pratique plus considérable, a pu être également résolu en suivant les schistes graphiteux de la série des mines et en étudiant le détail de celle-ci, même masquée sous des recouvrements importants.

La carte fig. 17 montre les réactions des deux horizons repères dont nous venons de parler, figurées sous forme de profils P. S. On remarquera que les schistes graphiteux inférieurs au grand conglomérat permettent de dessiner les lignes d'affleurement de ce dernier, qui pend vers le Sud. Les niveaux graphiteux de la série des mines laissent par contre voir les détails et l'allure de cette dernière [1].

[1] P. Charrin. — Application nouvelle des méthodes de la polarisation spontanée à des études tectoniques. (Communication faite au congrès géologique international de Pretoria, 1929).

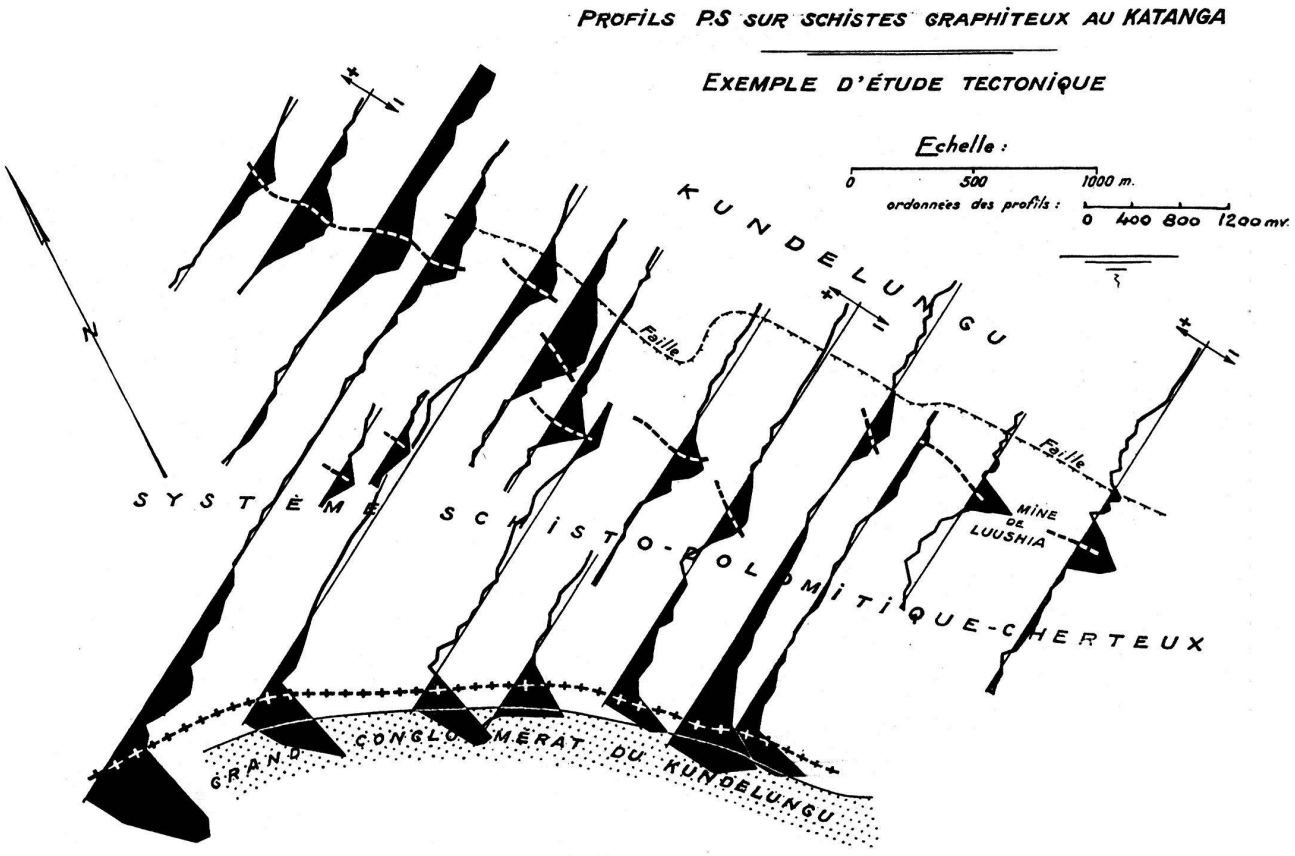
PROFILS PS SUR SCHISTES GRAPHITEUX AU KATANGA
EXEMPLE D'ÉTUDE TECTONIQUE
Echelle :
0
500
1000 m.
ordonnées des profils :
0 400 800 1200 mv.
N
KUNDELUNGU
Faille
Faille
MINE DE LUUSHIA
SYSTÈME SCHISTO-DOLOMITIQUE-CHERTEUX
GRAND CONGLOMERAT DU KUNDELUNGU

FIG. 17.

CHAPITRE V.

CONCLUSIONS

Possibilités d'application pratique de la P. S à la prospection des gîtes métallifères.

La production de phénomènes de polarisation spontanée de divers gîtes métallifères, a permis la mise au point d'une méthode de prospection électrique basée sur la recherche d'aires du sol présentant des potentiels négatifs anormaux. C'est. de toutes les méthodes géophysiques, celle qui est la plus rapide et la plus expéditive. Son utilisation conduit à d'excellents résultats dans la pratique et son champ d'application mériterait d'être étendu largement, à condition qu'on en use à bon escient et avec tact.

Avant de recommander ou d'entreprendre une prospection par P. S., il est nécessaire de se rendre compte des possibilités d'existence de cette dernière. Pour cela il faut se livrer à un examen géologique préalable et se faire une idée des conditions locales. Cinq points essentiels sont toujours à envisager :

1° la nature du minerai ;
2° la conductibilité et la continuité électrique du type de gîtes que l'on désire chercher ;
3° la profondeur à laquelle l'oxydation récente ou ancienne a pénétré ;
4° la profondeur du niveau hydrostatique ;
5° l'intensité des phénomènes électrocapillaires P. S. parasites.

Reprenons ces cinq points :

1. *Nature du minerai.*

Nous avons observé jusqu'ici des phénomènes nets de P. S. sur les minerais suivants :

pyrite	mispickel
pyrrhotine	arsenio et antimonio sulfures
chalcopyrite	graphite
covelline	anthracite
chalcosine	

La galène ne nous a jamais fourni de réactions P. S. nettes.

2. *Conductibilité et continuité électrique du gîte.*

Ces conditions sont indispensables à la formation d'un phénomène P. S. d'une certaine envergure.

Pour se rendre compte de la continuité électrique d'un gisement, le plus simple est d'expérimenter sur place, ce qui se réalise aisément à l'aide d'un galvanoscope sensible, d'une pile sèche, de quelques mètres de fil et de deux contacteurs à pointes d'acier. On ferme le circuit pile-galvanoscope par le minerai, que l'on touche avec les contacteurs, et l'on regarde si l'aiguille du galvanoscope dévie.

Tous les sulfures métalliques, sauf la blende, sont bons conducteurs de l'électricité. Il s'en faut cependant que tous les gîtes constitués de minerais ayant une bonne conductibilité soient conducteurs lorsqu'on les prend dans leur masse. Un filon d'apparence bien régulière, fissuré par de petites cassures remplies de quartz, de baryte ou de calcite n'est souvent pas un conducteur continu. Il en est de même lorsque les cristaux sont séparés par une pellicule de gangue isolante.

L'expérimentation sur de petits échantillons conduit fréquemment à des conclusions erronées, car des gisements non conducteurs en grand peuvent parfaitement présenter des filonnets continus sur quelques mètres de longueur. Inversement des ramifications de stockwerks dont les digitations ne se touchent pas, si on les prend sur des blocs de quelques décimètres cubes, arrivent au contraire à se rejoindre au loin si on les suit à travers de plus grands volumes de roche.

Après de nombreuses constatations sur des gîtes variés, nous avons retiré l'impression que la continuité électrique due à un réseau de filonnets se rejoignant les uns les autres est, de préférence, l'apanage de certains minerais. C'est ainsi que nous avons fréquemment trouvé ce caractère chez la pyrite. La présence de cuivre, même à de faibles teneurs (1 à 2%) semble accroître encore cette propriété. La galène, par contre, se ramasse facilement en masses distinctes ne communiquant pas les unes avec les autres.

3-4. *Profondeur du niveau hydrostatique et profondeur de la zone d'oxydation.*

La présence de minerai frais dans la zone d'oxydation est une nécessité pour que la P. S. puisse se manifester. Il y aura donc toujours lieu de vérifier ce fait qui se réalise effectivement dans tous les pays montagneux à mouvement négatif du

niveau hydrostatique. Car, ainsi que nous l'avons vu, l'érosion mord alors les terrains plus rapidement que ne s'enfonce l'oxydation et les réactions P. S. sont intenses. Par contre, en plaine, les gîtes sont fréquemment oxydés sur une certaine hauteur. Les réactions en surface deviennent alors plus faibles puisque les têtes négatives des filons ou amas sont situées bas, à une plus grande distance de nos observations, et dans un milieu fréquemment moins oxydant. Enfin, lorsque le mouvement du niveau hydrostatique est positif, le minerai frais est généralement noyé, ce qui implique l'absence de P. S. Dans ce dernier cas, les recherches par cette méthode doivent être abandonnées.

5. *Réactions électrocapillaires parasites.*

Les réactions électrocapillaires parasites peuvent atteindre et dépasser en intensité celles dues à l'oxydation de masses minérales. Lorsque les unes et les autres sont nettes, bien caractérisées et pas trop nombreuses, il est généralement possible de les départager. Il suffit fréquemment pour cela de s'aider du raisonnement et d'examiner leur position géologique. D'autres fois encore, un ou deux petits puits trancheront aisément les cas douteux en permettant la détermination d'un gradient de potentiel positif ou négatif en profondeur.

D'une façon générale, dans les régions tempérées, les réactions électrocapillaires atteignent rarement l'ampleur des réactions dues à l'oxydation. Mais dans certains pays secs, à régime évaporatoire accentué, la fréquence des phénomènes P. S. parasites peut devenir une gène lorsqu'on interprète des centres négatifs faibles. Il faut, dans ces cas, choisir la saison de travail la plus favorable, c'est-à-dire autant que possible celle qui sera la plus humide tout en présentant le moins de chances d'insolation. A ces époques, les réactions parasites sont réduites au minimum.

Table des matières.

INTRODUCTION : Forces électromotrices spontanément engendrées dans le sous-sol 3

CHAPITRE PREMIER : Forces électromotrices engendrées par des masses métalliques enfouies dans le sol 5

CHAPITRE II : Forces électromotrices engendrées par le frottement des eaux se mouvant à travers le sous-sol . . . 21

CHAPITRE III : Exécution des mesures P. S. — Représentation graphique des résultats obtenus 27

CHAPITRE IV : Quelques exemples d'études de gîtes par P. S.

CHAPITRE V : Conclusions. — Possibilités d'application pratique de la P. S. à la prospection des gîtes métallifères 30