

## Distinction par les propriétés électriques de deux types de roche-mère sous une épaisse couverture latéritique au Sud Mali

Van Ngoc PHAM, Danièle BOYER, André NOVIKOFF et Yves TARDY

**Résumé** — La cartographie géophysique a été réalisée par la méthode magnéto-tellurique sur le plateau et les glacis cuirassés de Banankoro sur une distance de 14 km environ, dans la région de Kangaba au Sud Mali. Il a été ainsi possible de mettre en évidence l'existence de deux types de roche-mère profondément enfouie sous une épaisse couverture latéritique, d'après les propriétés électriques du substratum. Dans la partie est, la roche-mère est constituée de schistes birrimiens électriquement très anisotropes, comportant à sa base une zone conductrice reposant sur un socle granitique résistant situé à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Dans la partie ouest, la couverture latéritique dérive directement d'un substratum granitique très résistant et pratiquement isotrope et situé à moins de 100 m de profondeur. La limite entre les deux types de roche-mère a pu être clairement tracée et ne montre aucune relation avec la morphologie générale du plateau.

### Distinction by electrical properties of two types of parent rock below a thick lateritic cover in South Mali

**Abstract** — The ferricrete plateau of Banankoro, in South Mali, about 14 km long, has been entirely mapped by magnetotelluric method. It was possible to show, from the electrical properties of the bedrock, the existence of two types of parent rock beneath a thick lateritic cover. In the eastern part, the parent rock consists of Birrimian schists which are electrically strongly anisotropic. At its base is a conductive zone overlying a resistive granitic basement located at several hundred meters depth. In the western part, the lateritic cover directly overlies a granitic bedrock highly resistive and practically isotropic within one 100 m depth. The boundary between the two types of parent rock is clearly delineated by magnetotelluric mapping and shows no relation with the general morphology of the plateau.

**Abridged English Version** — In a previous paper [1], first results of Magnetotelluric (MT) mapping in the eastern part of the Banankoro Plateau (South Mali) were presented. It was possible to show that the bedrock, in this part, consists of Birrimian schists.

In the previous area, approximately 3 by 4 km, only four profiles oriented NS (P1, P2, P3 and P4) were carried out. This area is now extended by one more profile P0 to the East and by five profiles P5, P6, P7, P8 and P9 to the West and the North-West (Fig. 1), so that the Banankoro plateau, about 14 km long, is entirely covered by magnetotelluric mapping. The new results of the plateau show that, in the western part, the bedrock has completely different electrical characteristics which correspond to another type of parent rock. This difference may be observed clearly by the comparison of the Magnetotelluric Sounding (MTS) curves respectively in the two parts of the plateau.

Let us recall that the MTS curves represent the variation of apparent resistivity  $\rho_a$  (in  $\Omega\text{m}$ ) versus period  $T$  (in second) of the natural electromagnetic field. By "skin effect", the depth of penetration of the electromagnetic waves increases with the period ([2], [3]). The quantitative interpretation of these curves with a tabular model by computer gives values of resistivity and thickness of the various beds corresponding to the geoelectrical section of the ground. For this study, the MTS curves were constructed from 13 experimental values corresponding to the periods between  $6.77 \times 10^{-5}$  and 0.33 sec. Moreover, for each station, the measurements were carried out along two directions NS and EW in order to observe the anisotropy behaviour [1].

Note présentée par Georges MILLOT.

As an exemple, Figure 2 A shows a typical MTS curve at the station 250N of profile P2 located in the eastern part. The two sounding curves, respectively corresponding to the two measurement directions, diverge towards long periods, and therefore indicate that the bedrock is strongly anisotropic. The geoelectrical section, obtained by quantitative interpretation and shown in the upper part of the Figure, corresponds to the "five layers" model. The first layer (CA) relatively resistive ( $500 \Omega\text{m}$ ) and of 30 m thick, is attributed to both ferricrete and mottled zone. The second layer (LK), highly conductive ( $20\text{-}30 \Omega\text{m}$ ) and of 35 m thick, corresponds to the water-saturated saprolite. The third layer (SB) of 450 m thick, shows a strong electrical anisotropy, the NS resistivity ( $200 \Omega\text{m}$ ) being much lower than the EW resistivity ( $1,500 \Omega\text{m}$ ). The anisotropy which is observed in the whole eastern part of the Banankoro Plateau constitutes a characteristic property of the Birrimian schists, the schistosity plane of which is oriented NS [1]. The fourth layer (FG) of 200 m thick, more conductive ( $35\text{-}75 \Omega\text{m}$ ), occurs at the base of the schists. It was attributed to the presence of graphitic schists and quartzites [1], but the presence of a water table at the bottom of the permeable schists layer is also quite plausible to explain the drop of resistivity. Finally, the fifth layer (SG) highly resistive ( $100,000 \Omega\text{m}$ ) undoubtedly correlates with the granitic basement which outcrops 40 km towards the North, close to the City of Kangaba [4].

Figure 2 B shows a typical MTS curve at the station 4300N of profile P8 located in the western part. Contrary to the preceding case, the two sounding curves respectively corresponding to the two measurement directions are practically identical, suggesting the presence of an isotropic bedrock. Moreover the corresponding geoelectrical section is a "three layers" model, as shown in the upper part of the Figure. The two first layers (CA and LK) are electrically similar to those of the station 250N of the profile P2 and represent the lateritic cover. Immediately below occurs the granitic basement (SG), highly resistive ( $100,000 \Omega\text{m}$ ) and isotropic.

The existence of the later typical MTS curves of "three layers" model is systematically observed in the whole western part of the Banankoro Plateau. This indicates clearly the change in the type of parent rock from the eastern part to the western part. These two parts are separated by a well-marked boundary (Fig. 1).

It is interesting to notice that the boundary does not correspond to any change in composition or in morphology of laterites exposed at the surface. None of the previous geological and geochemical works has reported its existence. It is finally confirmed that the magnetotelluric method is quite powerful for the investigation of the type and structure of deeply bedrock under thick lateritic cover.

---

I. INTRODUCTION. — Dans une Note précédente [1], nous avons présenté les résultats d'une première campagne de cartographie magnéto-tellurique réalisée en 1987 à l'intérieur d'un périmètre de  $3 \times 4$  km environ dans la partie est du plateau cuirassé de Banankoro au Sud Mali. Nous avons montré que la technique de Sondage Magnéto-Tellurique (SMT) dans la gamme audio-fréquence, a permis non seulement d'évaluer l'épaisseur des profils d'altération (de l'ordre de 100 m sous les plateaux cuirassés et 50 m sous les vallées, valeurs confirmées récemment par les forages mécaniques) mais aussi de mettre en évidence la structure et les propriétés électriques caractéristiques du substratum qui, dans le périmètre étudié, est constitué principalement de schistes birrimiens. Depuis, deux autres campagnes, réalisées en 1988 et 1989, notamment dans les parties ouest et NW, ont permis de couvrir pratiquement tout le plateau de Banankoro, soit sur une longueur

de 14 km environ. Aux quatre premiers profils NS (P1, P2, P3 et P4) [1], sont ajoutés un autre profil PO à l'Est et cinq autres profils (P5, P6, P7, P8 et P9) à l'Ouest (fig. 1). Le plateau de Banankoro qui est de direction générale E-SE, W-NW dans la partie est, forme un coude au niveau du profil P7 pour prendre la direction générale SE-NW. De ce fait, les deux derniers profils P8 et P9 ont été décalés vers le Nord afin de recouper entièrement le plateau dans toute sa longueur.

Les nouveaux résultats confirment ceux déjà obtenus notamment en ce qui concerne les caractéristiques de la couverture latéritique. De plus, l'extension de la zone d'étude a permis de mettre clairement en évidence un changement important et systématique des propriétés électriques au niveau du substratum qui ne peut s'expliquer que par le changement de la nature de la roche-mère.

II. DIFFÉRENCES DES COURBES DE SONDAGE MAGNÉTO-TELLURIQUE ENTRE LA PARTIE EST ET LA PARTIE OUEST. — Dans la Note déjà citée [1], nous avons évoqué l'existence de deux parties électriquement différentes : la partie E-SE est nettement plus anisotrope que la partie W-NW. Mais nous n'avions pas retenu l'hypothèse du changement de la nature de la roche-mère pour deux raisons. D'une part le changement électrique observé, qui se trouve à la limite de la bordure ouest du premier périmètre d'étude, correspond de fait à une zone de transition et ne présente pas un caractère systématique. D'autre part on n'observe pas de changement notable de faciès de cuirasse en surface tant sur le plan géologique que sur le plan géochimique.

L'extension des mesures vers l'Ouest a montré un changement systématique des propriétés électriques du substratum qui se manifeste par un autre type de Sondage Magnéto-Tellurique (SMT) totalement différent de celui obtenu dans la partie est.

Rappelons que la technique SMT permet d'établir les courbes SMT qui représentent la variation de la résistivité apparente  $\rho_a$  exprimée en  $\Omega\text{m}$  en fonction de la période  $T$  exprimée en secondes du champ électromagnétique naturel. Par suite de « l'effet de peau », plus la période est grande, plus la profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique est importante ([2], [3]). Par conséquent les variations de la courbe SMT traduisent les variations des propriétés électriques en profondeur. L'interprétation quantitative des courbes SMT par un modèle tabulaire permet d'obtenir, pour chaque station, une section géoélectrique donnant la distribution des couches avec leur résistivité et leur épaisseur. A Banankoro, les sondages ont été effectués suivant deux directions perpendiculaires NS et EW pour mettre en évidence l'anisotropie électrique. Chaque courbe SMT comporte 13 valeurs expérimentales comprises entre les périodes  $6,67 \cdot 10^{-5}$  et 0,33 s.

A titre d'exemple, les figures 2 A et B montrent respectivement les courbes SMT caractéristiques de la partie est et de la partie ouest.

A la station 250N du profil P2 (fig. 2A), située dans la partie est, les deux courbes correspondant aux deux directions de mesure NS et EW divergent vers les longues périodes, indiquant la présence d'une forte anisotropie électrique au niveau du substratum. Par ailleurs, leur interprétation quantitative donne une section géoélectrique à « cinq terrains » dont les résistivités et les épaisseurs sont indiquées en haut de la figure. Le premier terrain (CA) relativement résistant ( $500 \Omega\text{m}$ ) épais de 30 m, correspond à l'ensemble cuirasse et argiles tachetées. Le deuxième terrain (LK) très conducteur, de résistivité 20-30  $\Omega\text{m}$  et d'épaisseur 35 m, indique la présence d'une lithomarge kaolinique saturée d'eau. Le troisième terrain (SB) d'épaisseur 450 m, présente une forte anisotropie électrique, la résistivité suivant la direction NS ( $200 \Omega\text{m}$ ) étant beaucoup plus faible que

la résistivité suivant la direction EW (1 500  $\Omega\text{m}$ ). Cette anisotropie, observée dans toute la partie est, est une propriété caractéristique des schistes birrimiens dont on sait que le plan de schistosité est de direction NS [1]. Le quatrième terrain (FG) d'épaisseur 200 m correspond à une zone relativement plus conductrice (35-75  $\Omega\text{m}$ ), située à la base des schistes auxquels sa présence semble être étroitement liée. Nous avons avancé l'hypothèse de l'existence d'un faciès plus graphiteux [1]. Mais l'existence d'une nappe phréatique profonde par l'infiltration de l'eau à travers les schistes relativement perméables, est également plausible. Enfin, le cinquième terrain (SG) très résistant (100 000  $\Omega\text{m}$ ), indique incontestablement la présence d'un socle granitique qui affleure par ailleurs à 40 km au Nord, près de Kangaba [4].

La figure 2 B montre les courbes de sondage obtenues à la station 4300N du profil P8 située dans la partie ouest. Contrairement au cas précédent, les deux courbes correspondant aux deux directions de mesure NS et EW sont pratiquement identiques, ce qui indique la présence d'un substratum électriquement isotrope. Par ailleurs, elles montrent clairement les caractéristiques d'une section géoélectrique à « trois terrains » représentée en haut de la figure. On y retrouve les deux premiers terrains (CA et LK) électriquement semblables à ceux de la station 250N du profil P2 (fig. 2 A), correspondant à la couverture latéritique. Immédiatement au-dessous, on rencontre le substratum très résistant (100 000  $\Omega\text{m}$ ) et isotrope.

L'existence de ce deuxième type de courbes SMT à « trois terrains » est systématiquement observée dans toute la partie ouest du plateau de Banankoro. L'absence d'une forte anisotropie électrique et de la zone conductrice profonde exclut la présence des schistes, du moins sur une grande épaisseur. Toutes ces observations permettent de conclure que la roche-mère dans la partie ouest est de nature différente, probablement de type granitique.

L'interprétation de l'ensemble des courbes SMT a permis de bien différencier les propriétés électriques du substratum des deux parties. Leur évolution a pu être observée d'un profil à l'autre et d'une station à l'autre, notamment dans la partie centrale, où la limite de séparation a pu être localisée et tracée sur la figure 1.

Ainsi, il est possible que l'altération ait affecté profondément la partie est du plateau par suite de l'infiltration de l'eau à travers toute l'épaisseur des schistes. Les mouvements tectoniques auraient pu créer des ouvertures favorisant la circulation des fluides hydrothermaux dans le plan de schistosité, ce qui explique la présence des zones conductrices aussi bien à l'intérieur qu'à la base des schistes [1]. Au contraire, dans toute la partie ouest où le substratum est de type granitique, l'altération n'affecterait que la zone superficielle. Le granite plus compact et plus imperméable, retient l'eau en surface et se comporte d'une façon générale comme une roche électriquement très résistante en profondeur. Même si, localement, on observe une diminution de résistivité ou une faible anisotropie liée probablement à la tectonique régionale, l'absence de zone conductrice profonde exclut une forte infiltration de l'eau au sein du granite.

### III. CONCLUSION. — En conclusion plusieurs faits apparaissent.

(1) De très nombreux auteurs s'accordent sur l'importance du rôle des roches-mères dans le processus d'altération ([5] à [12]). Or, dans les régions latéritiques où les profils sont très épais, les études géologiques et géochimiques en surface ne permettent pas toujours de déceler la nature des matériaux parentaux. Les résultats présentés ci-dessus montrent que nous disposons désormais d'une méthode géophysique fiable pour distinguer

les différents types de roche-mère, même à grande profondeur, par leurs propriétés électriques.

(2) L'étude géophysique montre clairement que la ligne de contact entre granite et schistes recoupe perpendiculairement la bordure qui sépare le plateau cuirassé des glacis également cuirassés et situés en contre-bas. Le contact entre schistes et granite ne se marque donc pas dans la topographie. A Banankoro, la nature de la roche-mère n'est donc pas le facteur prépondérant qui détermine le tracé des limites des glacis cuirassés situés à des niveaux différents, comme cela a été décrit dans d'autres régions [7]. La latéritisation s'effectue donc de façon continue à travers les différents types de roches-mères et tend à effacer les caractères chimiques et minéralogiques qui les distinguaient au départ [13].

(3) La découverte de l'existence possible de deux types de roche-mère sous le plateau de Banankoro, constitue un guide intéressant permettant d'orienter les recherches futures, à différentes échelles, pour mieux comprendre les mécanismes d'altération, de mise en place des vieux paysages latéritiques et de concentration des minéralisations aurifères observées dans ce secteur et dans les couvertures latéritiques ([4], [14]).

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Programme PIRAT de l'I.N.S.U.-O.R.S.T.O.M. Les auteurs remercient la Direction nationale de la Géologie et des Mines du Mali (D.N.G.M.) et particulièrement M. Hilarion Traore ainsi que le Bureau de Recherches géologiques et minières (B.R.G.M.) et particulièrement M. Zeegers pour leur aide et les facilités matérielles qu'ils ont fournies sur le terrain.

Note remise le 10 août 1989, acceptée après révision le 20 septembre 1989.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] V. N. PHAM, D. BOYER, Ph. FREYSSINET et Y. TARDY, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, 1988, p. 1355-1362.
- [2] V. N. PHAM, D. BOYER et M. CHOUTEAU, *Geophysical Prospecting*, 26, n° 1, 1978, p. 218-246.
- [3] V. N. PHAM, D. BOYER, J.-L. LE MOUËL et V. COURTILLOT, *Bull. Soc. géol. Fr.*, XXII, 1980, p. 863-871.
- [4] P. COTTARD, A. DOMMANGET, M. KEITA et H. ZEEGERS, *Rapport B.R.G.M.*, RDM 003AF, 1981 (inédit).
- [5] N. LENEUF, L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites de Côte-d'Ivoire forestières, *Thèse Fac. Sci.*, Paris, 1959, 210 p.
- [6] J. DELVIGNE, Pédogenèse en milieu tropical, *Mém. O.R.S.T.O.M.*, 13, 1965, 177 p.
- [7] Y. TARDY, Géochimie des Altérations, *Mém. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 31, 1969, 199 p.
- [8] A. BLOT, J. C. PION et J. M. WACKERMANN, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, série Géologie, 5, 1973, p. 25-34.
- [9] J. C. PION, *Mém. Sci. Géol., Strasbourg*, 57, 1979, 220 p.
- [10] J. C. LEPRUN, *Mém. Sci. Géol., Strasbourg*, 58, 1979, 224 p.
- [11] M. J. MCFARLANE, *Geol. Surv. India, Mem.*, 120, 1986, p. III-1, III-12.
- [12] G. J. PALACKY, *First Break*, 5, n° 8, 1987, p. 296-306.
- [13] Y. TARDY, D. MAZALTARIM, J. L. BOEGLIN, C. ROQUIN, J. C. PION, H. PAQUET et G. MILLOT, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, 1988, p. 1765-1772.
- [14] Ph. FREYSSINET, H. ZEEGERS et Y. TARDY, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 305, série II, 1987, p. 867-874.

V. N. P. et D. B. : *Laboratoire de Géophysique appliquée et structurale*,  
 L.A. G.A.S., U.R. n° 235 du C.N.R.S.,  
 École nationale supérieure de Géologie, B.P. n° 40, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy;  
 A. N. et Y. T. : *Institut français de Recherche scientifique*  
 pour le Développement en Coopération (O.R.S.T.O.M.),  
 Centre O.R.S.T.O.M., B.P. n° 2528, Bamako, Mali.

## EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Morphologie du plateau cuirassé de Banankoro et limite de séparation, dans le cadre de l'étude, entre la partie est à substratum schisteux et la partie ouest à substratum granitique.

Fig. 1. — *Morphology of the ferricrete plateau of Banankoro and boundary between the schistous bedrock in the eastern part and the granitic bedrock in the western part inside the study area.*

Fig. 2. — Courbes de Sondage Magnéto-Tellurique (SMT) à la station 250N du profil P2 caractéristique de la partie est (fig. 2 A) et à la station 4300N du profil P8 caractéristique de la partie ouest (fig. 2 B). Légende : CA, cuirasse et argiles tachetées; LK, lithomarge kaolinique; SB, schistes birrimiens anisotropes; FG, zone conductrice profonde; SG, socle granitique.

Fig. 2. — *Typical Magnetotelluric Sounding (MTS) curves in the eastern part at the station 250N of profile P2 (Fig. 2 A) and in the western part at the station 4300N of profile P8 (Fig. 2 B). Legend: CA, ferricrete and mottled zone; LK, kaolinitic saprolite; SB, anisotropic birrimian schists; FG, deep conductive zone; SG, granitic basement.*

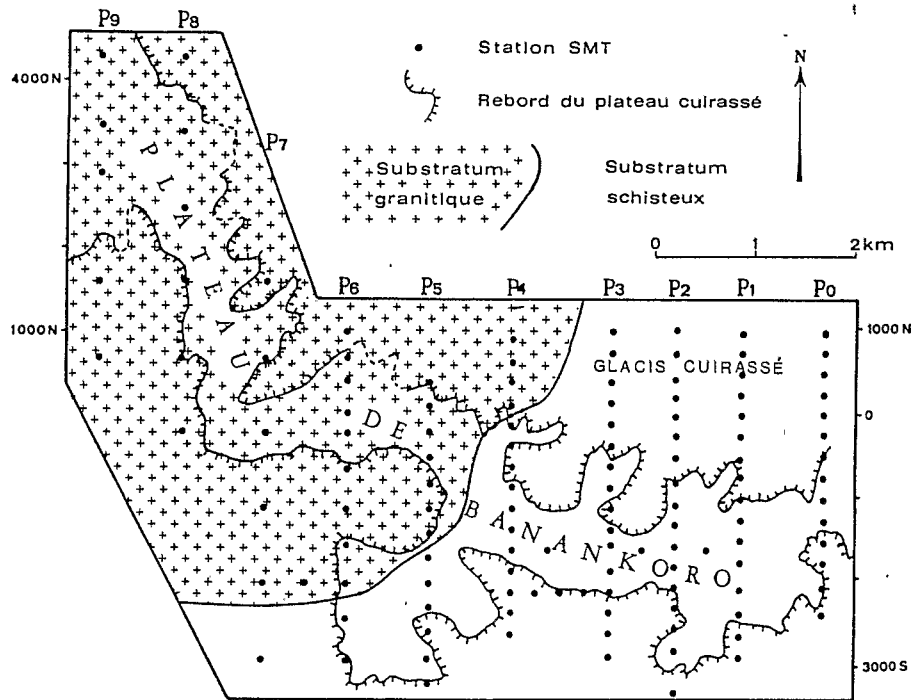


Fig. 1

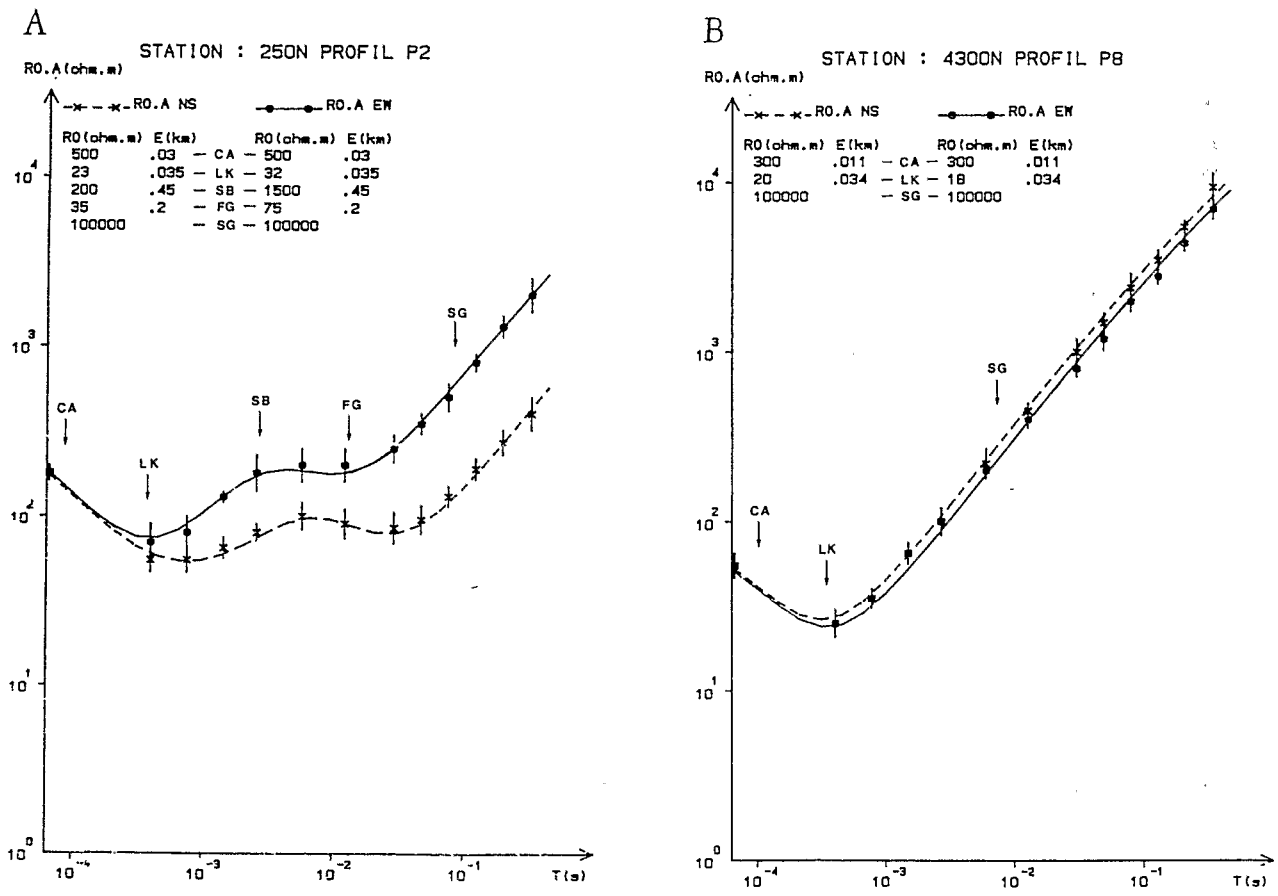


Fig. 2