

Etude structurale par la méthode audiomagnétotellurique des complexes du Protérozoïque inférieur au Sénégal oriental

M. RITZ*, A. DIA et M. F. K. NIANG

*ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal
Université CH. A. Diop, Département de Géologie, Dakar, Sénégal

(First received 21st May, 1992; revised version received 14th June, 1993)

Abstract - Audiomagnetotelluric (AMT) soundings have been made at 14 sites along a 7 km profile in the Tonkouto-Léoba area across Early Proterozoic formations of the Kedougou Inlier in Eastern Senegal. The purpose of the study was to gain information about the electrical properties of the Mako Supergroup. The results, shown in the form of apparent resistivity pseudosections, indicate marked anisotropies for orthogonal components recorded at all sites. Consequently, two-dimensional (2-D) modelling is required to establish the electrical characteristics of the major geological units. The modelling results indicate resistivities in the range 20 000-100 000 Ω m for the Early Proterozoic units which extend to depths of 18 km. A major discontinuity characterized by a resistivity of 1000 Ω m may arise from a structural change associated with the southeastern boundary of the Kakadian batholith. Beneath the highly resistive formations, a sharp fall of resistivity has been detected, which may be due in part to the presence of trapped fluids.

Résumé - Pour tenter d'élucider la structure profonde du segment Protérozoïque inférieur de la boutonnière de Kédougou au Sénégal oriental, des mesures audiomagnétotelluriques (AMT) ont été effectuées dans le secteur de Tonkouto-Léoba en 14 points sur un profil long de 7 km. Des pseudo-sections de résistivité apparente en fonction de la fréquence font apparaître des anisotropies marquées suivant les deux directions orthogonales de mesure. L'interprétation des données par des modèles bi-dimensionnels (2-D) met en évidence des formations très résistantes (entre 20 000 et 100 000 Ω m), fortement enracinées à des profondeurs de l'ordre de 18 km. Dans la partie Sud-Est du profil, une discontinuité majeure entre le Supergroupe de Mako et le batholite de Kakadian permet de différencier ces structures et de préciser la localisation du contact. Au niveau de la croûte profonde, une chute brutale de résistivité peut-être attribuée à la présence de fluides.

INTRODUCTION

Les investigations géophysiques (Dorbath *et al.*, 1983; Ponsard, 1984; Ritz et Robineau, 1988) effectuées sur le Birrimien du Sénégal oriental n'ont pas encore permis de bien comprendre la structuration de la lithosphère dans cette partie du Craton Ouest-africain. En particulier, qu'en est-il de l'enracinement du Protérozoïque inférieur? L'interprétation de données gravimétriques (Ponsard, 1964) montre que la puissance de ces séries ne dépasse pas 3500 mètres. D'un autre côté, les données pétrographiques et géochimiques mettent en évidence un événement majeur de production de croûte juvénile entre 2200 et 2100 M.A. (Dia, 1988; Abouchami *et al.*, 1990).

Pour tenter d'élucider la structure lithosphérique sous la boutonnière de Kédougou (Fig. 1), une prospection AMT dans la gamme de fréquences 1-5000 Hz, a été entreprise dans le secteur-clief de Tonkouto-Léoba (Fig. 2) très caractéristique par la diversité des faciès (Dia, 1988) et la présence de

contacts entre différents unités géologiques, le plus souvent recouvertes par une épaisse couche latéritique. En première reconnaissance nous avons réalisé 14 sondages AMT répartis le long d'un profil NW-SE (Fig. 2). Ce profil s'étend sur 7 km avec une équidistance des stations de 500 m.

Le secteur étudié est caractérisé par une association de roches volcaniques et volcano-sédimentaires appartenant au Supergroupe de Mako recouvertes par le complexe plutonique du batholite de Kakadian (Bassot, 1966). Dans ce contexte, un des objectifs de notre étude a été de cartographier les résistivités apparentes du sous-sol afin de localiser les contacts, d'une part entre les différentes formations du Supergroupe de Mako et d'autre part entre les séries de ce Supergroupe et le batholite de Kakadian. L'autre objectif qui en découle a été de préciser l'enracinement des éléments du Supergroupe de Mako et de définir l'ampleur de la fracturation des roches en profondeur. La méthode AMT ne se distingue pas de la méthode MT (Cagniard, 1953), si ce n'est par le

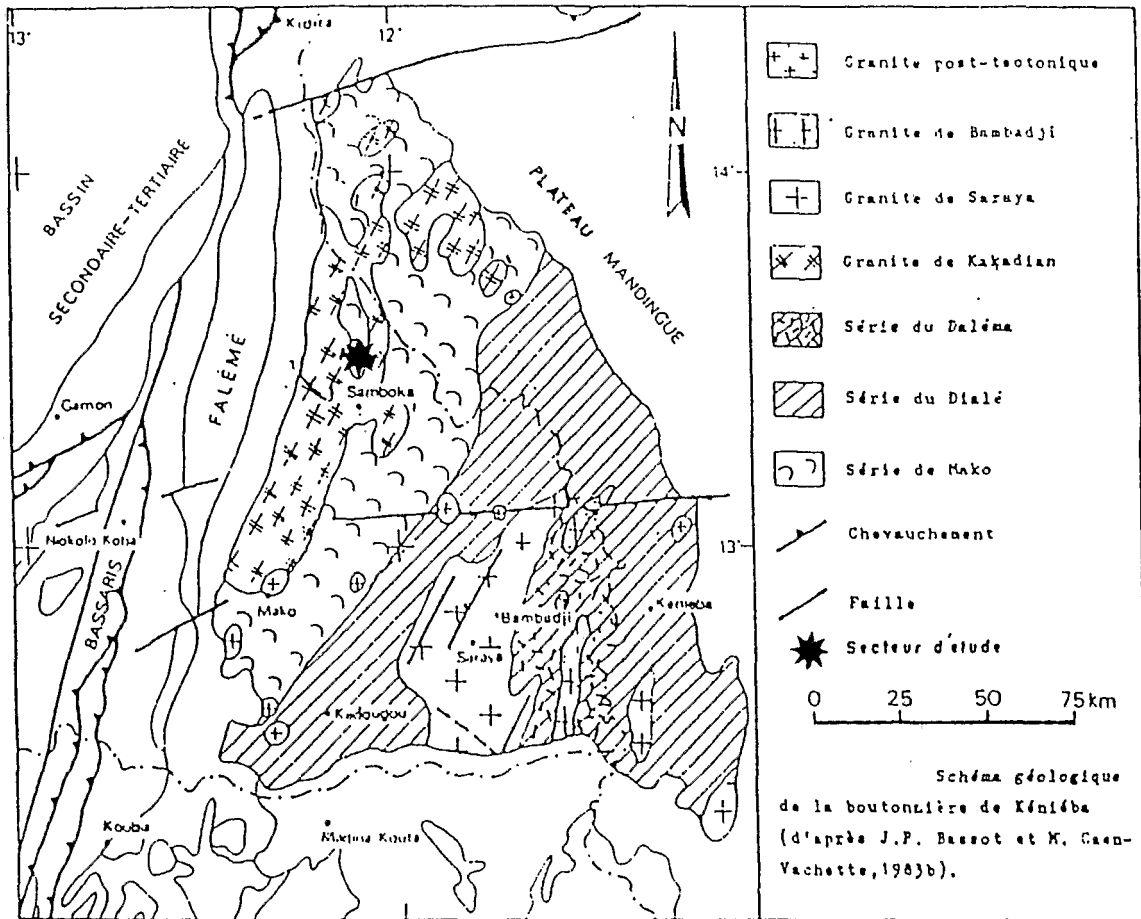


Fig. 1. Carte de localisation de la boutonnière de Kédougou et du Supergroupe de Mako.

Fig. 1. Map showing the location of the Kedougou Inlier and the Mako Supergroup.

domaine de fréquences utilisées (1 Hz-5000 Hz). Elle est fondée sur la mesure des composantes électrique et magnétique du champ électromagnétique naturel induit par les orages de la zone équatoriale. Par effet pelliculaire, les courants induits par les orages s'enfoncent dans le sol d'autant plus profondément que leur fréquence est basse. L'étude de ces champs permet alors d'obtenir les résistivités électriques des terrains sous-jacents jusqu'à plusieurs km de profondeur. Généralement, la résistivité obtenue est une résistivité apparente par suite de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des terrains réels. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un résistivimètre SAMT scalaire de la marque SAGAX qui fournit directement la valeur de la résistivité apparente dans la gamme de fréquences 1-5000 Hz. L'appareillage se compose du résistivimètre proprement dit, d'une bobine d'induction pour la mesure du champ magnétique et d'une ligne tellurique de quelques dizaines de mètres.

PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE

Le secteur d'étude (Fig. 2) fait partie de la boutonnière de Kédougou (Sénégal oriental) qui apparaît

comme un socle d'âge essentiellement Protérozoïque inférieur (autour de 2.1 Ga). Le secteur de Tonkouto-Léoba est localisé dans la partie NW du Supergroupe de Mako qui occupe la partie occidentale de la boutonnière. La géologie de la boutonnière de Kédougou a fait l'objet de nombreuses études (Bassot, 1966; Dia, 1988; Dioh *et al.*, 1990 et Abouchami *et al.*, 1990), qui ont permis la définition des grandes structures et de préciser les traits majeurs de la géochimie des différentes unités. Le Supergroupe de Mako est formé d'associations de roches volcaniques (basaltes andésitiques, andésites et rhyodacites) et hypovolcaniques (microdiorites et microgabbros), en intercalations avec des ensembles de roches volcano-sédimentaires (tufs, cinérites et grauwackes) et sédimentaires (calcaires, pélites et grès). Toutes ces formations sont métamorphosées dans le faciès schiste vert et intrudées par un plutonisme basique à acide, constituant le batholite composite de Kakadian (Fig. 1).

A l'échelle de notre secteur d'étude, très peu de données géologiques ou structurales sont disponibles et par conséquent il est difficile d'avoir une idée précise de la nature et du pendage des contacts. La Fig. 2 présente une esquisse géologique

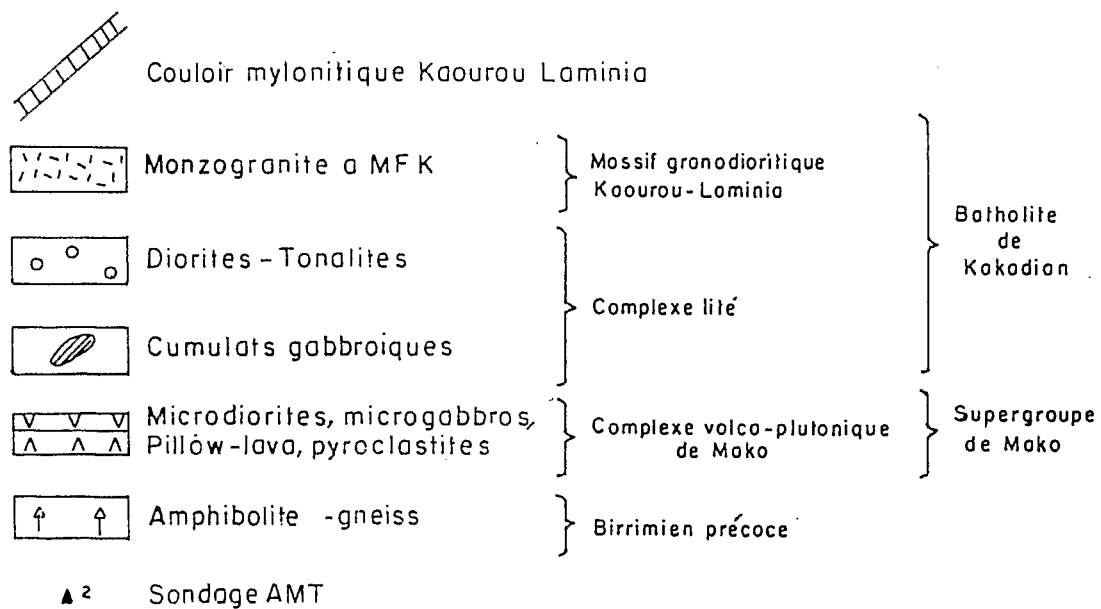
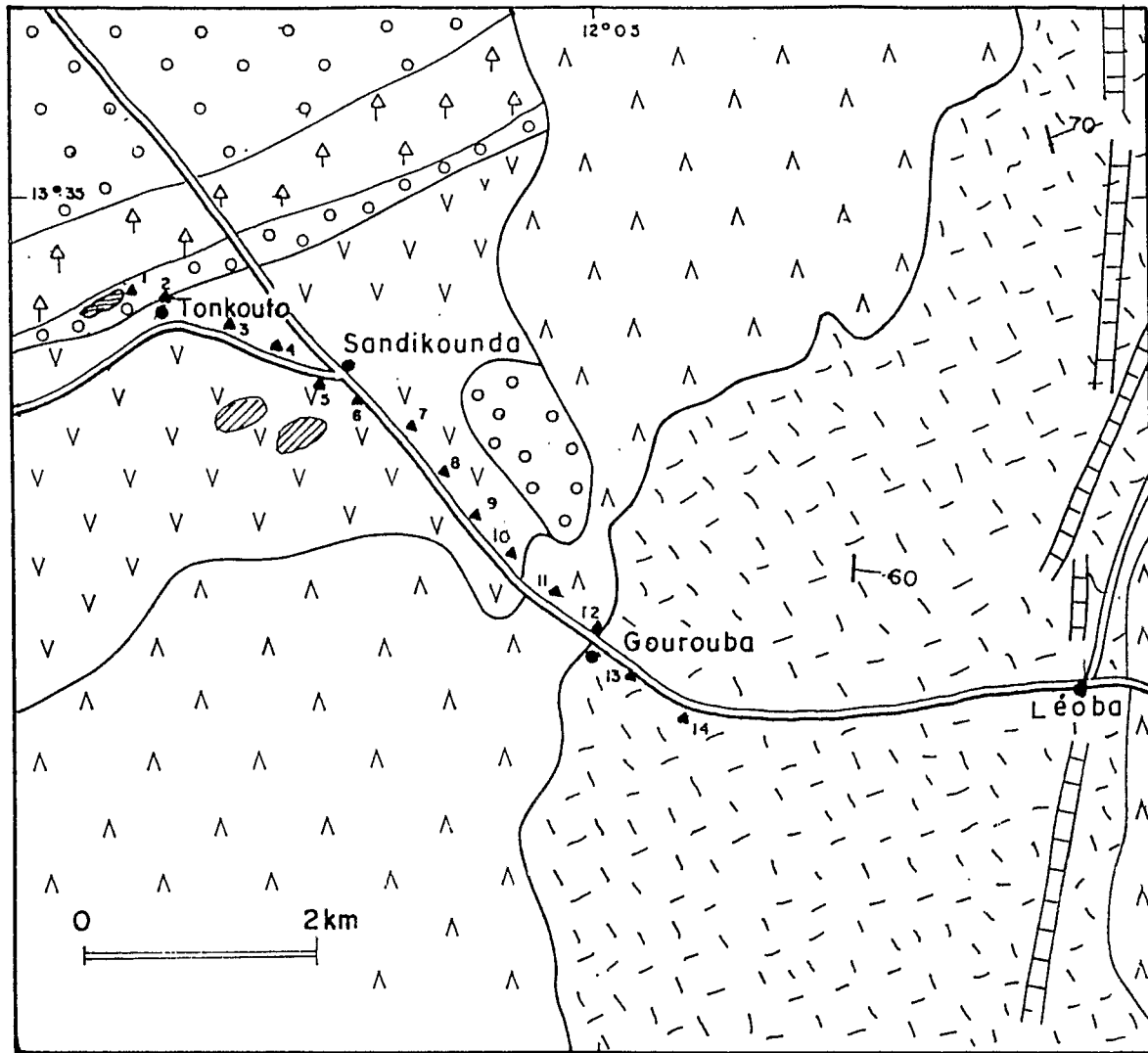


Fig. 2. Esquisse géologique du secteur d'étude d'après Dia (1988) et position du profil audiomagnétotellurique.
 Fig. 2. Geological sketch map of the study area from Dia (1988) and location of the AMT profile.

du secteur étudié (Dia, 1988). On notera la succession de complexes magmatiques avec la chronologie suivante : le Supergroupe de Mako constitué de pillow-lavas, de formations pyroclastiques, intrudés par un plutonisme marqué à la base, par un complexe lité allant des cumulats gabbroïques jusqu'aux tonalites et, au sommet, par un complexe plutonique essentiellement granodioritique. Par endroit, des panneaux de roches hautement métamorphiques ont été observés (amphibolites et gneiss).

L'évolution tectonique et structurale de la partie NW du Supergroupe de Mako est marquée par l'existence de couloirs de cisaillement métriques à hectométriques de direction générale N-S à N160°, repris par endroit par une composante N40°. Les différentes unités géologiques de l'encaissant des granitoïdes ont été redressées lors de la mise en place des plutons (structuration péri-plutonique).

DONNEES AUDIOMAGNETOTELLURIQUES

A chaque station, les mesures de la résistivité apparente pour une vingtaine de fréquences, ont été effectuées suivant deux directions perpendiculaires N110° et N20°, afin de mettre en évidence les propriétés d'anisotropie électrique des roches en profondeur et pour permettre une interprétation 2-D de la structure. Nous avons choisi d'utiliser les pseudo-sections des résistivités apparentes pour visualiser les données AMT. Dans ce type de représentation, les distances entre stations sont reportées en abscisses (échelle linéaire) et les fréquences, fonction croissante de la profondeur, sont reportées en ordonnées (échelle logarithmique). Les résistivités apparentes mesurées à chaque fréquence sont reportées pour chaque sondage. La pseudo-section est obtenue en traçant les courbes d'iso-valeur de la résistivité apparente. Nos données, dans les deux directions de mesure, sont montrées sous cette forme sur les Figs 3 et 4.

D'une façon générale, les deux pseudo-sections mettent en évidence des structures très résistantes associées aux formations birrimiennes avec des valeurs de la résistivité apparente croissante du NW vers le SE. une augmentation régulière de la résistivité avec la fréquence, donc avec la profondeur est également indiquée, suggérant des roches saines en profondeur. Néanmoins, la distribution des résistivités est différente d'une pseudo-section à l'autre, mettant en évidence, surtout dans la partie SE du profil, des zones d'anisotropie majeure de type structural. Les variations de résistivité le long du profil, sont faiblement contrastées dans la direction N20° (Fig. 3), contrairement à la direction perpendiculaire où des zones de fort gradient de résistivité sont bien individualisées. Ainsi les sondages 8 à 14 (Fig. 4) montrent une distortion

dans le dessin des courbes d'iso-résistivité apparente. Ce secteur présente une zonation croissante du NW vers le SE des résistivités apparentes. Elle est marquée sur la pseudo-section par l'imbrication de zones de résistivité différentes. Cette zone de variation très rapide est limitée au SE par une zone plus résistante (environ 50 000 Ωm) qui peut résulter de l'effet latéral d'une structure conductrice. Au voisinage des stations 1 et 2, on constate également une anomalie verticale, surtout visible sur la pseudo-section dans la direction N110°

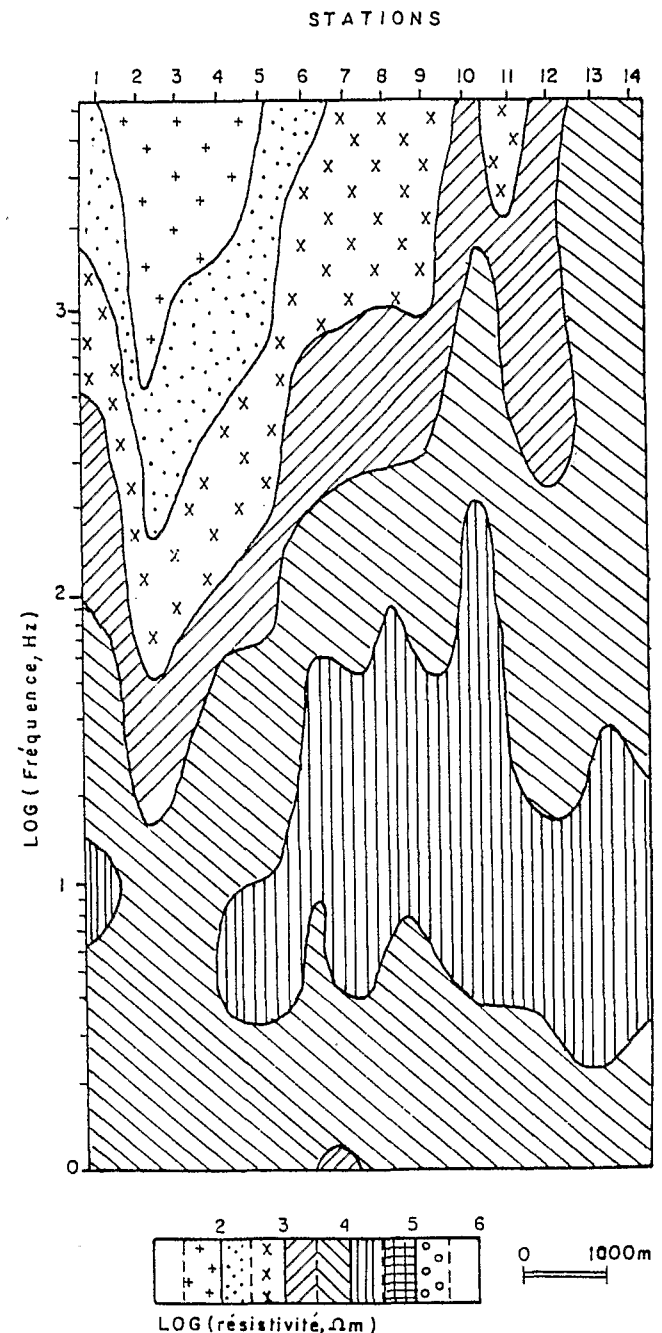


Fig. 3. Pseudo-section de résistivité apparente dans la direction N20°.

Fig. 3. Apparent resistivity pseudosection in the N20° direction.

(Fig. 4) Elle est cependant moins importante que la précédente; le contraste de résistivité est atténué.

INTERPRETATION DES SONDAGES AUDIOMAGNETOTELLURIQUES

Les résistivités apparentes dans la direction N110° (Fig. 4), réagissent brusquement et semblent délimiter les variations latérales à la manière de la résistivité d'un modèle 2-D en polarisation H (Wannamaker *et al.*, 1987). L'évolution des valeurs de résistivité apparente dans l'autre direction de mesure (Fig. 3) est plus progressive et s'apparente

au mode de polarisation E d'un modèle 2-D. L'interprétation des données AMT par des modèles 2-D peut donc fournir une approximation raisonnable de la structure en profondeur. Le programme de simulation 2-D utilisé est celui de Wannamaker *et al.* (1987). Différents modèles ont été testés pour répondre simultanément aux deux modes de polarisation. La figure 5 montre le modèle ayant le mieux approché les réponses AMT dans les deux directions de mesure. A partir d'exemple, la figure 6 représente les résultats de la modélisation à 100 Hz pour la polarisation E, en relation avec les données de terrain. Dans l'ensemble, l'allure des courbes ainsi que l'ordre de grandeur des résistivités apparentes sont conservés selon les deux directions. Au niveau des stations 6 à 11, la réponse du modèle passe au milieu des résistivités apparentes mesurées; celles-ci présentent une dispersion de part et d'autre de la courbe calculée. En raison de l'horizon résistant, la profondeur de pénétration est très importante et ceci permet de modéliser la chute de résistivité apparente qui apparaît aux basses fréquences sur l'ensemble des réponses AMT vers 15 km de profondeur.

La figure 5 montre les caractéristiques électriques des vingt premiers km de la croûte. On y trouve en surface un terrain moyennement conducteur (50-100 Ωm), épais de 50 à 100 m qui correspond à l'ensemble cuirasse latéritique et altérites. Au niveau des stations 13 et 14, la résistivité en surface croît fortement (10 000 Ωm). La deuxième couche du modèle est caractérisée par des terrains très résistants (20 000 à 100 000 Ωm), fortement enracinés à des profondeurs de l'ordre de 12-18 km. Ces terrains présentent également de fortes disparités: on distingue trois blocs électriquement différents dont la résistivité croît du NW vers le SE. Les limites géologiques définies par Dia (1988, Fig. 2) entre les différents termes du Supergroupe de Mako (stations 2 à 12) ne semblent pas correspondre avec les limites géoélectriques (Fig. 5). Les résistivités des granitoïdes de Kakadian (stations 12 à 14) et de certains termes du Supergroupe de Mako (stations 6 à 11) sont les plus élevées (100 000 Ωm). A la station 12 une structure étroite, moyennement conductrice (1000 Ωm) et fortement pentée vers le SE marque un contact entre un faciès du pluton de Kaourou-Laminia au SE et un faciès du Supergroupe de Mako au NW (Fig. 2), malgré des valeurs identiques de la résistivité de part et d'autre de cette limite (Fig. 5). Cette zone de faiblesse coïncide avec les "migmatites franches" de Witschard (1965), elle serait associée à la présence d'argile ou d'eau.

Au niveau de la croûte profonde, vers 18 km de profondeur, le modèle indique une chute brutale de résistivité. Cette couche présente également des disparités: résistante (10 000 Ωm) à l'extrémité SE

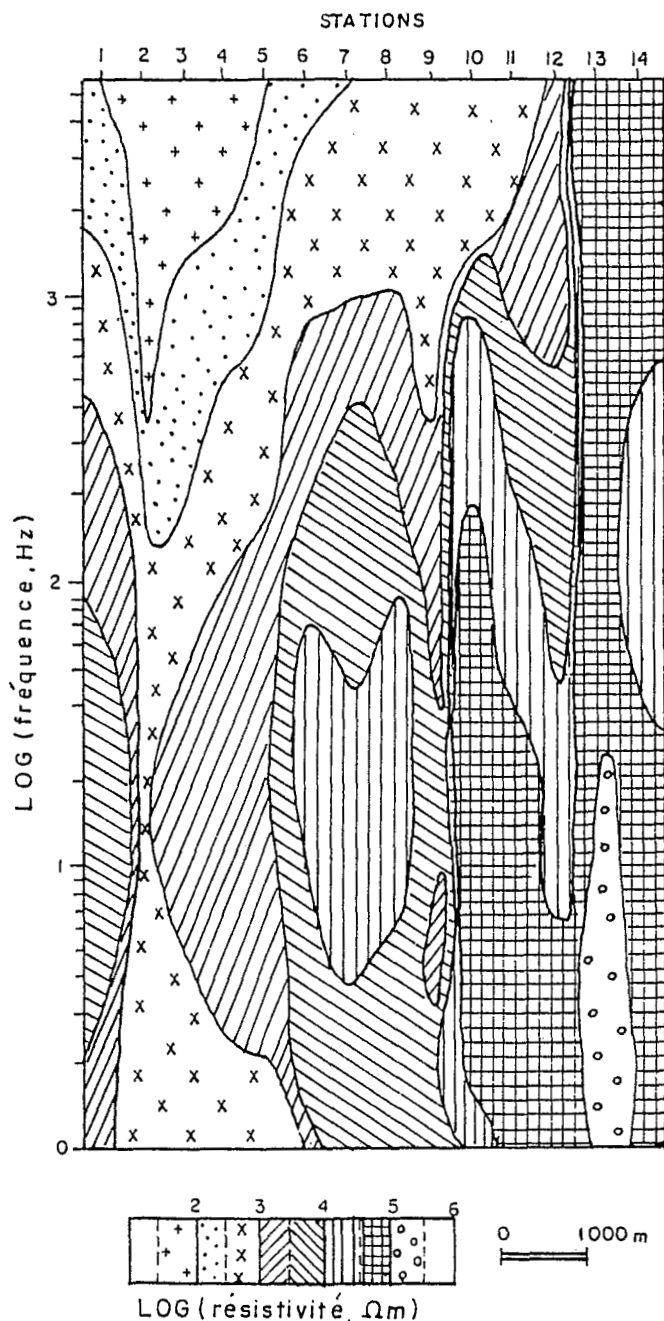


Fig. 4. Pseudo-section de résistivité apparente dans la direction N110°

Fig. 4. Apparent resistivity pseudosection in the N110° direction.

du profil et moyennement conductrice (1000 Ωm) au NW. On observe aussi une remontée du toit du conducteur (stations 3 à 7) jusqu'à 12 km de profondeur mais l'épaisseur de cette couche n'a pu être précisée. Ce dernier niveau, difficile à déterminer peut correspondre à l'existence d'une couche profonde plus ou moins conductrice de la croûte au-dessous de segments crustaux anciens (Jones, 1981; Bailey *et al.*, 1989). L'explication généralement admise pour cette chute de résistivité à des profondeurs de 15-20 km peut-être liée à la présence de fluides (Gough, 1986; Yardley, 1986).

CONCLUSIONS

Sur l'ensemble du secteur étudié, l'AMT a mis en évidence l'existence de zones électriquement dissemblables. En particulier, nous avons pu localiser le contact à pendage vraisemblable vers le SE, entre le Supergroupe de Mako et le batholite de Kakadian. Bien que local, ce contact est un élément géométrique non négligeable du pluton dont la forme générale ne pourra cependant être précisée que par l'analyse de son contact SE avec le

Supergroupe de Mako. La discontinuité électrique (Fig. 5) détectée à l'intérieur du Supergroupe de Mako ne se rattache à aucun changement de faciès géologique connu (Fig. 2). La variation brutale de résistivité au passage de cette discontinuité pourrait être liée à des fissurations plus ou moins importantes. Parmi les résultats géophysiques de cette prospection, il faut noter la mise en évidence d'une forte épaisseur des unités géologiques qui permet d'envisager un enracinement des formations supracrustales du Protérozoïque inférieur à la verticale du secteur étudié, à une profondeur minimum de 12 à 18 km. On notera également dans la structure lithosphérique, sous les formations très résistantes, une chute brutale de résistivité qui pourrait être en relation avec la présence de fluides (Gough, 1986; Yardley, 1986).

Cependant, vu le caractère très local de la zone prospectée, des mesures complémentaires sont prévues sur l'ensemble du Supergroupe de Mako afin de pouvoir affiner l'interprétation et de proposer un modèle structural plus précis du mécanisme de la croissance crustale ayant enregistré la croûte juvénile.

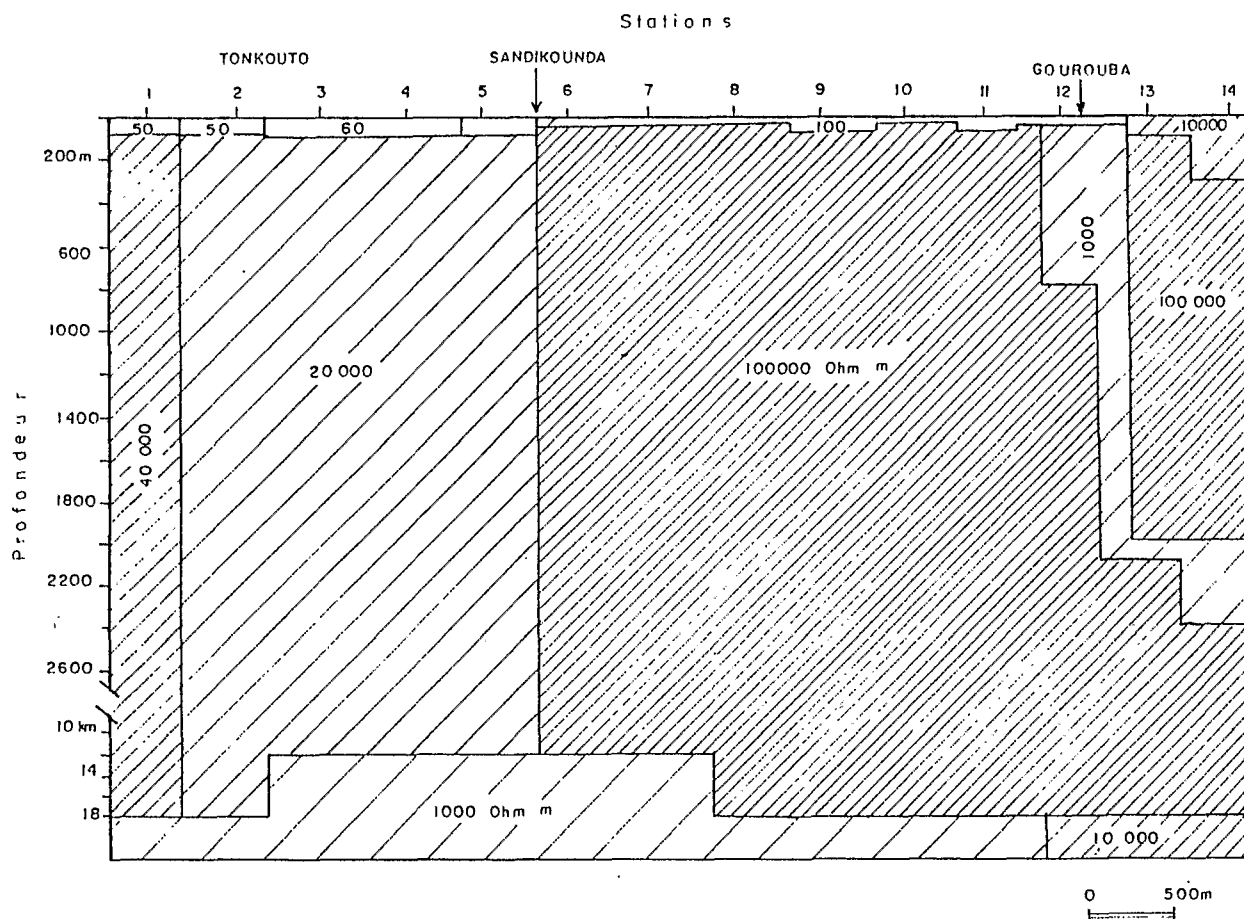


Fig. 5. Modèle de résistance à deux dimensions du secteur étudié. Les résistivités sont données en Ωm .
Fig. 5. Final two-dimensional resistivity model cross section of transect. Resistivities are given in Ωm .

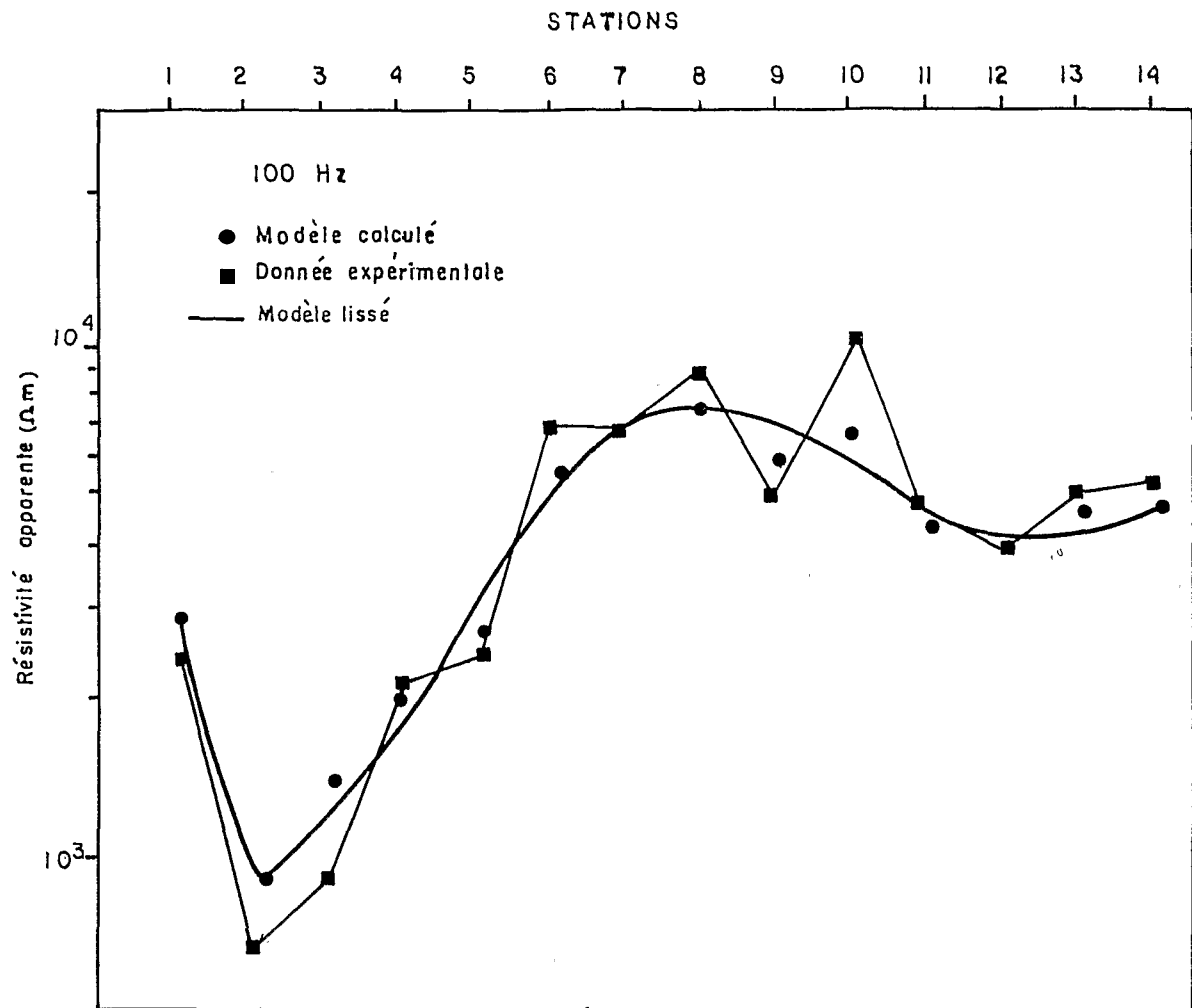


Fig. 6. Profil de résistivité à 100 Hz en polarisation E, d'après le modèle de la Fig. 5.

Fig. 6. E polarization response of the model in Fig. 5 at 100 Hz.

REFERENCES

- Abouchami, W., Boher, M., Michard, A. and Albarede, F. 1990. A major 2.1 Ga old event of mafic magmatism in West Africa: An early stage of crustal accretion. *J. Geophys. Res.* **95**, 17605-17629.
- Bailey, R. C., Craven, J. A., Macnae, J. C. and Polzer, B. D. 1989. Imaging of deep fluids in Archaean crust. *Nature* **340**, 136-138.
- Bassot, J. P. 1966. Etude géologique du Sénégal oriental et de ses confins guinéo-maliens. *Mém. B. R. G. M.* **40**, 322 p.
- Bassot, J. P. et Caen-Vachette, M. 1983. Données nouvelles sur l'âge du massif de granitoïde du Niokolo-Koba (Sénégal oriental), implications sur l'âge du stade précoce de la chaîne des Mauritanides. *Jour. Afri. Earth Sci.* **2**, 159-165.
- Cagniard, L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics* **18**, 605-635.
- Dia, A. 1988. Caractères et signification des complexes magmatiques et métamorphiques du secteur de Sandikounda-Laminia. *Thèse Sci. Université Dakar, Sénégal*, 350 p.
- Dioh, E., Debat, P., Pons, J., Rocci, G. et Rollet, M. 1990. Caractérisation d'un complexe basique rubané dans les formations birrimiennes de la partie septentrionale de la boutonnière de Kédougou (Sénégal oriental). *C. R. Acad. Sci.* **301**, 935-940.
- Dorbath, C., Dorbath, L., Lepage, A. and Gaulon, R. 1983. The West-African Craton margin in eastern Senegal: a seismological study. *Annales Geophys.* **1**, 25-36.
- Gough, D. I. 1986. Seismic reflectors, conductivity, water and stress in the continental crust. *Nature* **323**, 143-144.
- Jones, A. G. 1981. On a type classification of lower crustal layers under Precambrian regions. *J. Geophys.* **49**, 226-233.
- Ponsard, J. F. 1984. La marge du Craton Ouest-africain du Sénégal à la Sierra Leone: interprétation géophysique de la chaîne panafricaine et des bassins du Protérozoïque à l'Actuel. *Thèse Doct. Sciences, Univ. Aix-Marseille III*, 198 p.
- Ritz, M. and Robineau, B. 1988. Tectonic interpretation of electrical structures beneath the West African Craton edge in eastern Senegal. *Am. Jour. Sci.* **288**, 756-776.

- Wannamaker, P. E., Stodt, J. A. and Rijo, L. 1987. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modelling. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **88**, 277-296.
- Witschard, F. 1965. Contribution à l'étude géologique, pétrographique et métallogénique des massifs granitiques du Sénégal oriental. *Mém. B. R. G. M.* **44**, 172 p.
- Yardley, B. W. D. 1986. Is there water in the deep continental crust? *Nature* **232**, 111 p.