

GÉOPHYSIQUE

UN ESSAI DE DÉTERMINATION DE LA RÉSISTIVITÉ
DES COUCHES PROFONDES DE L'ÉCORCE RÉALISÉ
EN RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE PAR SONDAGES
SCHLUMBERGER ET DOUBLE DIPÔLE

Centre ORSTOM - BANGUI

F. COLLIGNON

UN ESSAI DE DETERMINATION DE LA RESISTIVITE
DES COUCHES PROFONDES DE L'ECORCE REALISE
EN REPUBLIQUE CENTRAFRICAINE PAR SONDAGES
SCHLUMBERGER ET DOUBLE DIPOLE

- F. COLLIGNON *

RESUME

Après un rappel de quelques notions théoriques concernant le sondage dipôle, sa comparaison avec le sondage SCHLUMBERGER, nous rendons compte d'un grand sondage électrique réalisé sur un massif granitique de la R.C.A. Les deux méthodes précédentes ont été utilisées de façon complémentaire jusqu'à une distance de séparation entre dipôles, voisine de 100 km. Une étude succincte du champ tellurique s'est révélée insuffisante pour réduire l'influence des effets locaux sur les mesures de résistivité apparente, qui rend l'interprétation des résultats relatifs aux sondages dipôles particulièrement délicate.

* Centre ORSTOM - BANGUI.

INTRODUCTION

L'étude de la distribution des résistivités à l'intérieur du globe par les méthodes électriques a fait l'objet de nombreux travaux parmi lesquels nous citerons les plus récents en rappelant les principaux résultats obtenus. A l'occasion de l'année géophysique internationale, MIGAUX, par un sondage électrique de 70 km dans le massif granitique de Mortagne, obtenait une valeur de la résistance transversale de la croûte terrestre (1960). Les travaux de KELLER avec l'U.S. Geological Survey (1966) montrèrent clairement les possibilités et les limites des techniques dipôles dans l'exploration géoélectrique. De nombreux sondages furent en effet réalisés dans cinq régions géologiques des U.S.A. et si la qualité des courbes de sondages prises individuellement, restait moyenne, l'ensemble des résultats confirmait l'existence d'une couche conductrice sous la croûte résistante. Le compte-rendu de cette campagne nous incita à essayer en 1969-1970, la combinaison des méthodes SCHLUMBERGER et Dipôle en République Centrafricaine. C'est à peu près à cette époque que parut l'article de Van ZIJL, qui relatait l'expérience d'un sondage SCHLUMBERGER de 270 km en Afrique du Sud et modifiait sensiblement les idées sur la distribution des résistivités en fonction de la profondeur. Le Tableau I, résume l'état de nos connaissances sur la croûte terrestre avant le sondage de POFFADER. Le Tableau II présente l'interprétation proposée par Van ZIJL pour le sondage de POFFADER, en Afrique du Sud.

Tableau I

Auteur	Résistivité en ohm.m	Profondeur max. en km	Résistance trans. $R = h/\rho$ en ohm-m ²
LUNDHOLM (1946)	10 000	35	
KRAEV (1948)			$2 \cdot 10^8$
MIGAUX (1960)	15 000 (min)		$4 \cdot 10^8$
KELLER (1966)	10 000 (min)		$10 \cdot 10^7$ à 10^8

Tableau II

couche	Résistivité en ohm.m	Epaisseur h en km	Profondeur max en km	$T = h\rho$	h/ρ
1	30	0,012		faible	0,4
			0,012		
2	255	0,168		faible	0,7
			0,18		
3	15.000 (min)	3,5 (max)		$5 \cdot 10^7$	faible
			3,7		
4	3.000	17		$5 \cdot 10^7$	5,7
			21		
5	37.000 (min)	30 (max)		$11 \cdot 10^8$	0,8
			51		
6	0			0	∞

On remarquera la présence d'une couche nettement moins résistante (3.000 ohm.m) à 4 km de profondeur qui a pour effet de retarder l'apparition des couches à très basse résistivité dans le diagramme de sondage électrique. Par ailleurs, la couche numérotée 5 présente une résistance transversale supérieure à celle fournie par les estimations antérieures. L'ampleur de l'expérience réalisée a permis à Van ZIJL une intéressante confrontation de ses résultats avec ce que l'on sait de la distribution des vitesses dans la croûte et le manteau supérieur.

En comparaison de ces résultats, la portée de notre essai apparaît modeste. Il s'agit essentiellement de voir dans quelle mesure, avec la même source d'énergie, la méthode dipôle est susceptible de relayer la méthode SCHLUMBERGER au-delà d'une distance AB de 40 kilomètres, soit approximativement le double des grands sondages réalisés par l'O.R.S.T.O.M. dans le bassin tchadien.

M. PERRICHON, technicien du laboratoire de Bondy a assuré

la bonne réalisation des mesures sur le terrain, pendant toute la durée de l'expérience c'est à dire de novembre 1969 à février 1970.

I - COMPARAISON THEORIQUE DES SONDAGES SCHLUMBERGER ET DIPOLE.

Rappelons les différences existant entre ces deux types de quadripôle.

Dans le dispositif SCHLUMBERGER les électrodes de mesure M et N sont situées sur le segment AB joignant les électrodes d'injection. Le paramètre est la distance $d = 2r$ séparant les électrodes A et B.

Dans le dispositif Dipôle-Dipôle les électrodes A et B sont fixes. Les électrodes M et N sont mobiles. La distance r séparant les centres des dipôles d'injection AB et de mesure MN est grande devant la longueur de ces dipôles. Le paramètre principal est la distance de séparation r.

L'augmentation de l'un ou l'autre de ces paramètres a pour effet de faire pénétrer les filets de courant dans des terrains de plus en plus profonds. Par ailleurs, on montre facilement que dans un terrain homogène le champ électrique varie comme $\frac{1}{r^2}$ en SCHLUMBERGER et $\frac{1}{r^3}$ en double dipôle, ce qui entraîne les conséquences suivantes :

a) une très grande longueur de câble est nécessaire pour explorer les couches profondes lorsqu'on utilise la méthode SCHLUMBERGER.

b) une très grande puissance d'injection est nécessaire pour obtenir un bon rapport signal/bruit aux grandes distances de séparation dans le cas de la méthode dipôle.

Enfin la méthode dipôle est beaucoup plus sensible que la méthode SCHLUMBERGER à l'influence des hétérogénéités locales. Précisons ce point : dans un sondage classique les à-coups de prise se produisent d'une façon indépendante sur A et B ce qui

réduit un peu leur effet. D'autre part pour les grandes longueurs de ligne AB les à-coups sur MN liés à l'influence des hétérogénéités locales en A et B s'estompent. Les à-coups sur MN sont rarement brutaux et les "embrayages" permettent d'en effacer l'essentiel.

Dans un sondage dipôle, la discontinuité des positions de MN entraîne dans la mesure des différences de potentiel, des variations brutales et imprévisibles dues aux hétérogénéités locales.

A défaut de pouvoir éliminer l'influence des hétérogénéités locales, on va s'efforcer de l'évaluer en ayant recours aux courants naturels circulant dans le sol. On sait en effet que les phénomènes telluriques présentent un caractère de large régionalité. C'est-à-dire qu'en supposant négligeable le skin effect, la nappe tellurique se comporte à un instant donné comme une nappe artificielle de courant continu. La connaissance du champ en un point de la zone d'uniformité détermine donc le champ en n'importe quel autre point. Dans le sondage dipôle lorsque la distance de séparation entre AB et MN devient grande, le champ électrique dû à l'émission sur AB est, tout autour de MN, aussi un champ uniforme. On peut donc admettre que les hétérogénéités superficielles perturbent de la même façon le champ dipôle et le champ tellurique. La méthode va alors consister à déterminer la distorsion locale que subit le champ tellurique pour corriger les mesures faites en champ dipôle au même point.

II - ETUDE DU CHAMP DIPOLE

Dans le cas d'un milieu homogène de résistivité ρ_0 le potentiel créé par un dipôle de puissance μ a pour valeur en un point M (r, θ)

$$U = \frac{\mu \cos \theta}{r^2}$$

avec $\mu = \frac{\rho_0 I l}{2 \pi}$

On en déduit les composantes du champ

$$E_r = \frac{2\mu \cos \theta}{r^3}$$

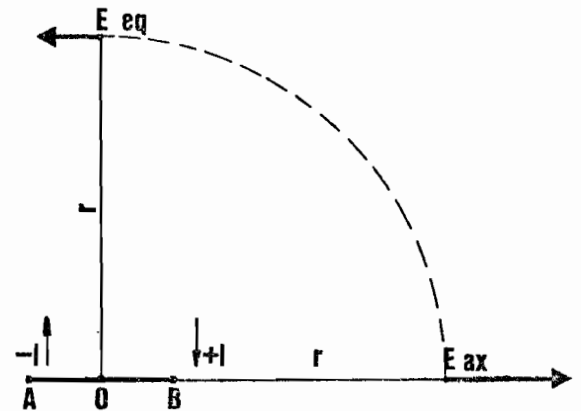
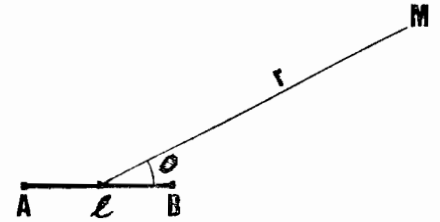
$$E_\theta = \frac{\mu \sin \theta}{r^3}$$

en particulier pour les dipôles axial et équatorial le plus couramment utilisés, les champs correspondants sont :

$$\theta = 0 \quad E_{ax} = \frac{2\mu}{r^3}$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \quad E_{iq} = \frac{\mu}{r^3}$$

Nous voyons en particulier qu'en terrain homogène le champ varie en raison inverse du cube de la distance et que le dipôle axial reçoit un signal double de celui reçu par le dipôle équatorial pour une même distance de séparation.



Prenons maintenant le cas d'un milieu où la résistivité vraie est fonction de la profondeur seulement. Soit ρ_a la résistivité apparente qui serait mesurée en utilisant une électrode unique au lieu du dipôle AB.

Le potentiel créé par le dipôle a pour expression :

$$U' = \mu \frac{\cos \theta}{r^2} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_0}$$

$$E'_n = - \frac{\partial U'}{\partial n} = \frac{\mu \cos \theta}{n^3 \rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial n} \rho_a - \frac{\partial \rho_a}{\partial n} \right]$$

$$E'_\theta = - \frac{1}{n} \frac{\partial U'}{\partial \theta} = \frac{\mu \sin \theta}{n^3 \rho_0} \rho_a$$

d'où les valeurs particulières

$$\theta = 0 \quad E'_{ax} = \frac{2 \mu}{n^3 \rho_0} \left[\rho_a - \frac{n}{2} \frac{\partial \rho_a}{\partial n} \right]$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \quad E'_{eq} = \frac{\mu}{n^3 \rho_0} \rho_a$$

Nous avons d'autre part

$$\frac{\rho_{eq}}{\rho_0} = \frac{E'_{eq}}{E_{eq}} \quad \text{et} \quad \frac{\rho_{ax}}{\rho_0} = \frac{E'_{ax}}{E_{ax}}$$

d'où nous déduisons

$$\rho_{eq} = \rho_a$$

$$\rho_{ax} = \rho_a - \frac{n}{2} \frac{\partial \rho_a}{\partial n} \quad \left\{ (1) \text{ avec } \frac{d \rho_a}{d n} = \frac{\rho_a}{n} \cdot \frac{\partial \text{Log } \rho_a}{\partial \text{Log } n} \right.$$

Les relations (1) nous montrent que l'interprétation d'un sondage équatorial peut se faire de la même façon que pour un sondage SCHLUMBERGER alors que pour un sondage axial, il convient de transformer les abaques ce qui peut se faire assez simplement puisque ρ_{ax} peut s'écrire $\rho_{ax} = \rho_a \left(1 - \frac{m}{2} \right)$, m étant la pente de la courbe de résistivité telle qu'elle serait établie par un sondage SCHLUMBERGER.

Pour une branche montante $0 < m < 1 \quad \frac{\rho_{eq}}{2} < \rho_{ax} < \rho_{eq}$

Pour une branche descendante $m < 0 \quad \rho_{ax} > \rho_a$

III - PERTURBATION DU SIGNAL ELECTRIQUE - SKIN EFFECT - COURANTS TELLURIQUES

Les mesures du champ électrique artificiel créé par la ligne d'injection se trouvent systématiquement mêlées d'effets parasites dont on s'efforce d'éliminer l'influence.

1) Skin Effect.

Au courant normal circulant dans le sol j_n se superpose un courant de skin effect j_s . La valeur asymptotique du rapport $\frac{j_s}{j_n}$ est, pour les grandes valeurs du temps écoulé t après l'établissement du courant :

$$\left(\frac{j_s}{j_n}\right)_{\text{asy}} = \frac{11\pi}{3} \left(\frac{r^2}{\rho t}\right)^{3/2} \text{ (C.G.S.) avec } r = \frac{AB}{2}$$

dans le cas d'un sondage SCHLUMBERGER effectué dans un terrain homogène de résistivité ρ

Dans le cas d'un sondage dipôle, il convient de préciser le dispositif utilisé. En effet le courant normal circulant dans le sol est

$$j_n = \frac{AB \cdot I}{\pi r^3} \quad (\text{axial})$$

$$j_n = \frac{AB \cdot I}{2\pi r^3} \quad (\text{équatorial})$$

La valeur asymptotique du courant de skin effect est

$$\left(\frac{j_s}{j_n}\right)_{\text{asy}} = \frac{AB \cdot I}{2\pi r^3} \cdot \frac{4 R^3}{3\sqrt{\pi}} \quad \text{avec } R^2 = \frac{\pi r^2}{\rho t}$$

On en déduit :

$$\left(\frac{j_s}{j_n}\right)_{\text{asy}} = \frac{11\pi}{3} \left(\frac{r^2}{\rho t \frac{4}{\pi}}\right)^{3/2} \text{ (axial)}$$

$$\left(\frac{I_s}{I_m}\right)_{ax} = \frac{H \pi}{3} \left(\frac{r^2}{\rho t}\right)^{3/2} \text{ (équatorial)}$$

Pour un même rapport de $\frac{I_s}{I_m}$ et une même distance de séparation, on voit que les temps d'attente nécessaires sont identiques dans les dispositifs SCHLUMBERGER et Dipôle équatorial, ils sont divisés par $\sqrt[3]{4} = 1,58$ dans le dispositif Dipôle axial.

Si nous prenons par exemple

$$r = 50 \text{ km}$$

$$\rho = 10 \text{ ohm.m}$$

$$t = 5 \text{ s}$$

$$\frac{r^2}{\rho t} = \frac{25 \cdot 10^{10}}{5 \cdot 10^{12}} = 5 \cdot 10^{-2}$$

$$\frac{I_s}{I_m} = \frac{H \pi}{3} \cdot (5 \cdot 10^{-2})^{3/2} \approx 4,7\%$$

Dans un dispositif SCHLUMBERGER ou équatorial les valeurs de $\frac{r^2}{\rho t}$ inférieures à $5 \cdot 10^{-2}$ permettent d'obtenir une valeur de $\frac{I_s}{I_m}$ inférieure à 5%.

Prenons comme second exemple un sondage axial

$$r = 100 \text{ km}$$

$$\rho = 1.000 \text{ ohm.m}$$

le temps d'attente nécessaire est alors $\frac{5 \cdot (20)^2}{100 \times 1,58} \frac{I_s}{I_m} = 4,7\%$ soit environ 12 secondes.

Nous allons voir maintenant que le régime transitoire du galvanomètre compense l'effet de Skin Effect dans les dispositifs SCHLUMBERGER et Equatorial. Le galvanomètre utilisé était un galvanomètre immergé AV 15T de période propre 15 secondes. Les résistances interne et externe du galvanomètre assurent un fonctionnement en régime critique ou hypercritique.

En appelant θ la position d'équilibre finale, la déviation angulaire θ a pour expression en régime critique

$$\theta = \theta_f [1 - e^{-\lambda_0 t} (1 + \lambda_0 t)]$$

Calculons la valeur t_1 de t telle que $\frac{\theta}{\theta_f} = 95\%$

$$e^{-\lambda_0 t_1} = 20 (1 + \lambda_0 t_1)$$

$$\lambda_0 t_1 \approx 4,74 \text{ avec } \lambda_0 = \omega_0 = \frac{2 \pi}{T_0}$$

$$t_1 = \frac{4,74 \times 15}{2 \times 3,14} = 11,3 \text{ s}$$

Dans le dispositif axial de 100 km, I_{ob} et I_{m} étant de sens contraire une mesure effectuée 12 secondes après l'établissement du courant ne sera qu'à

$$\left(1 - \frac{5}{100}\right) \left(1 - \frac{5}{100}\right) \# \quad 90 \% \text{ de sa valeur finale.}$$

Dans le dispositif équatorial de 100 km, un temps d'attente de 12 secondes donnera un rapport $\frac{10}{I_{m}}$ 10,1 % mais la mesure globale sera à

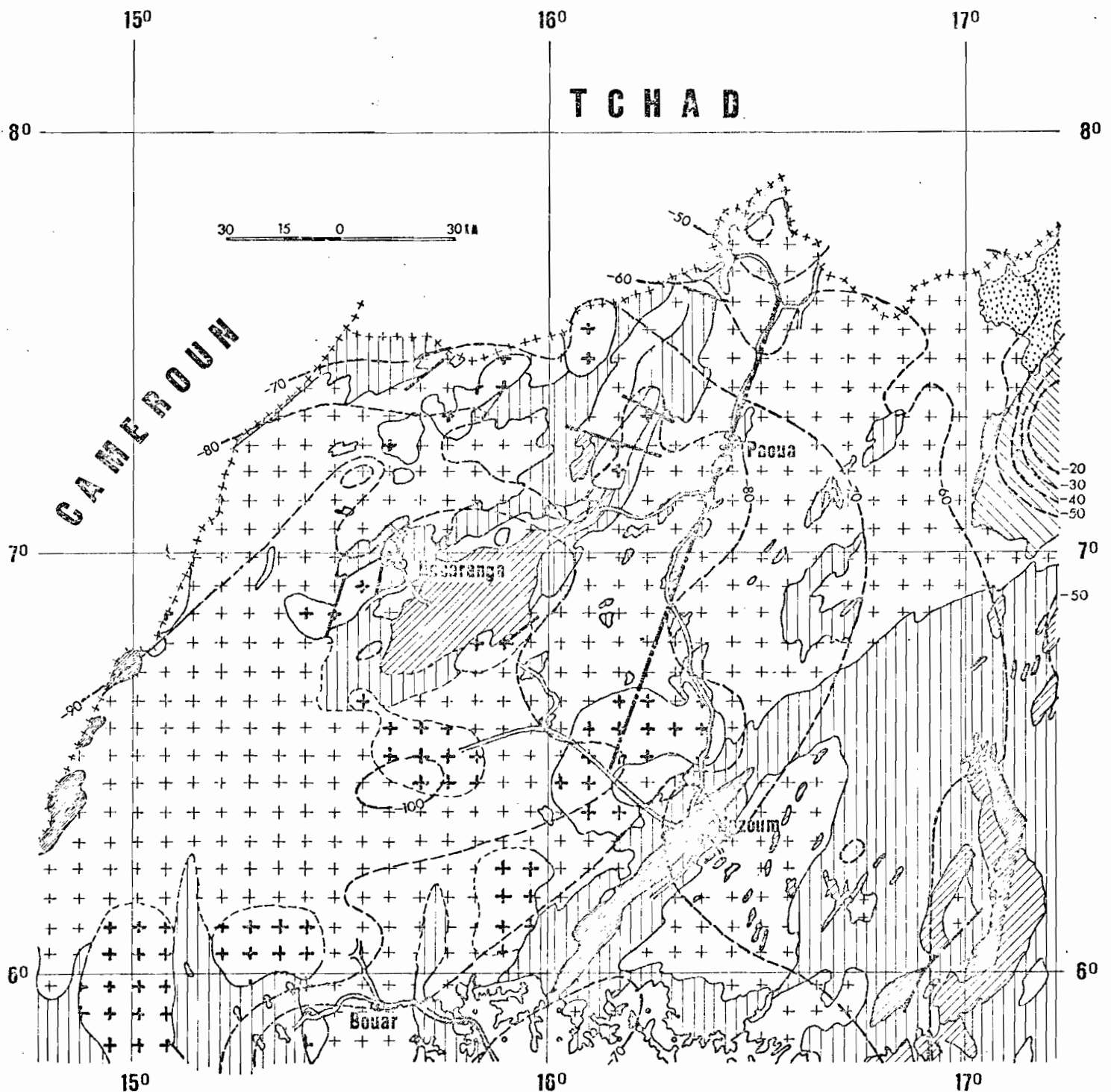
$$\left(1 + \frac{10}{100}\right) \left(1 - \frac{5}{100}\right) \# \quad 105 \% \text{ de sa valeur finale.}$$

Les mesures furent réalisées avec des inversions de courant de 30 secondes en SCHLUMBERGER, de 10 et 30 secondes en dipôle. Dans ce dernier cas, les résultats obtenus étaient pratiquement identiques.

2) Courants telluriques

A la différence de potentiel due à l'injection de courant, se superpose inévitablement une différence de potentiel aléatoire correspondant aux courants telluriques. Ceux-ci sont assez lentement variables et leur élimination se fait avec une bonne approximation en répétant un assez grand nombre de fois les inversions de courant de façon à obtenir une valeur moyenne. Il n'a été fait qu'une dizaine d'inversions, mais on pourrait améliorer sensiblement la sensibilité, sans grand effort supplémentaire, en augmentant ce nombre, jusqu'à une centaine.

EXTREMITÉ ORIENTALE DU MASSIF DE YADE



QUATERNAIRE

□ Alluvions

TERTIAIRE

▨ Continental terminal

SECONDAIRE

◻ Grès de Carnot

PRECAMBRIEN

▨ Série de Kouki

Complexe de base

▨ Amphibolites ▨ Schistes ▨ Gneiss

⊕ Granites hétérogènes concordants

⊕ Granites en massifs circonscrits

— Faille

~ Isanomale

--- Axe de sondage

IV - REALISATION DES SONDAGES ELECTRIQUES

1) Choix de l'emplacement

L'étude de la carte géologique et des voies de communication de RCA nous a conduit à retenir la zone de Paoua pour réaliser la campagne de sondages. Les formations granitiques de cette région constituent l'extrémité orientale du vaste massif de Yadé qui s'étend de part et d'autre de la frontière Centrafricano-Camerounaise. (Fig. 1).

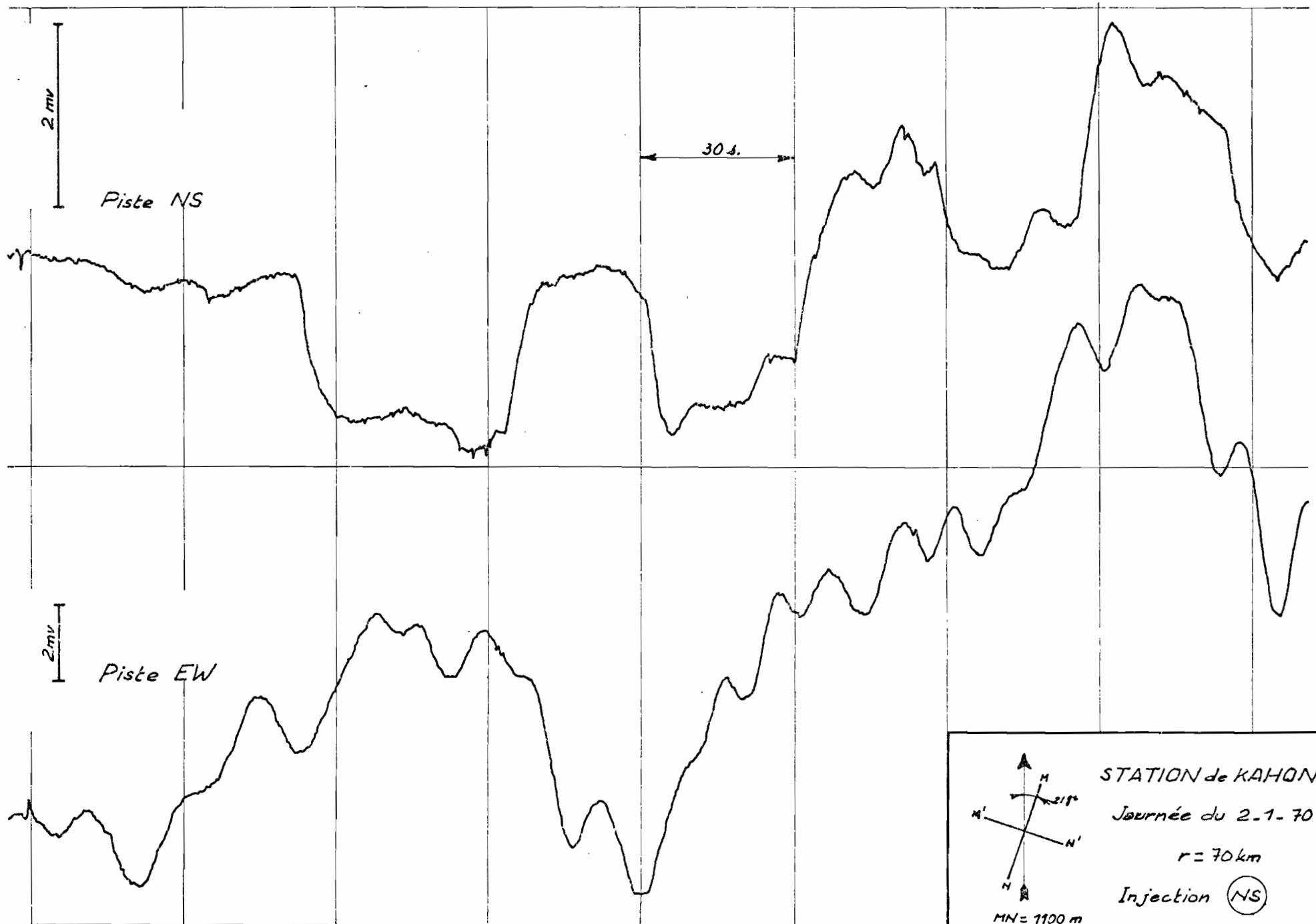
De composition calcoalcaline dominante, les formations présentent un faciès orienté dont la direction coïncide généralement avec la direction NE relevée dans les terrains métamorphiques bordant les massifs.

La piste secondaire Bozoum-Paoua-Goré présente un aspect quasi rectiligne sur 80 km ce qui a facilité le déroulement des câbles et l'implantation des stations. Elle traverse un relief assez monotone dû à l'épais manteau d'altération, rompu localement par des dômes granitiques dénudés ayant mieux résisté à l'érosion. La carte indique également des lambeaux de gneiss parsemant l'axe du sondage. Enfin dans la partie méridionale de notre zone d'étude, on aborde un massif circonscrit de jeunes granites.

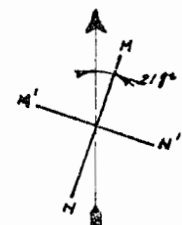
L'étude des enregistrements telluriques a montré que l'on se trouvait dans une zone de forte canalisation, la direction privilégiée étant sensiblement Nord 108 gr ce qui favorisait la réalisation du sondage suivant l'orientation générale de la piste. L'agitation moyenne se situe autour de 10 mV/km sur les enregistrements recueillis dans les diverses stations.

Une trentaine de petits sondages a été réalisée pour étudier la couverture superficielle. Le recouvrement dépasse rarement la centaine de mètres. Il comprend généralement une pellicule

SONDAGE DIPÔLE AXIAL



on remarquera l'influence très faible de l'injection NS sur la ligne EW



MN = 1100 m

M'N' = 800 m

STATION de KAHON

Journée du 2-1-70

$r = 70 \text{ km}$

Injection (NS)

$I = 2,20 \text{ A.}$

$AB = 7500 \text{ m}$

superficielle de quelques mètres d'épaisseur dont la résistivité varie entre 300 et 2.000 ohm.m et un terrain conducteur (20 à 200 ohm.m) correspondant aux niveaux d'altérations du granite.

2) Déroulement des opérations

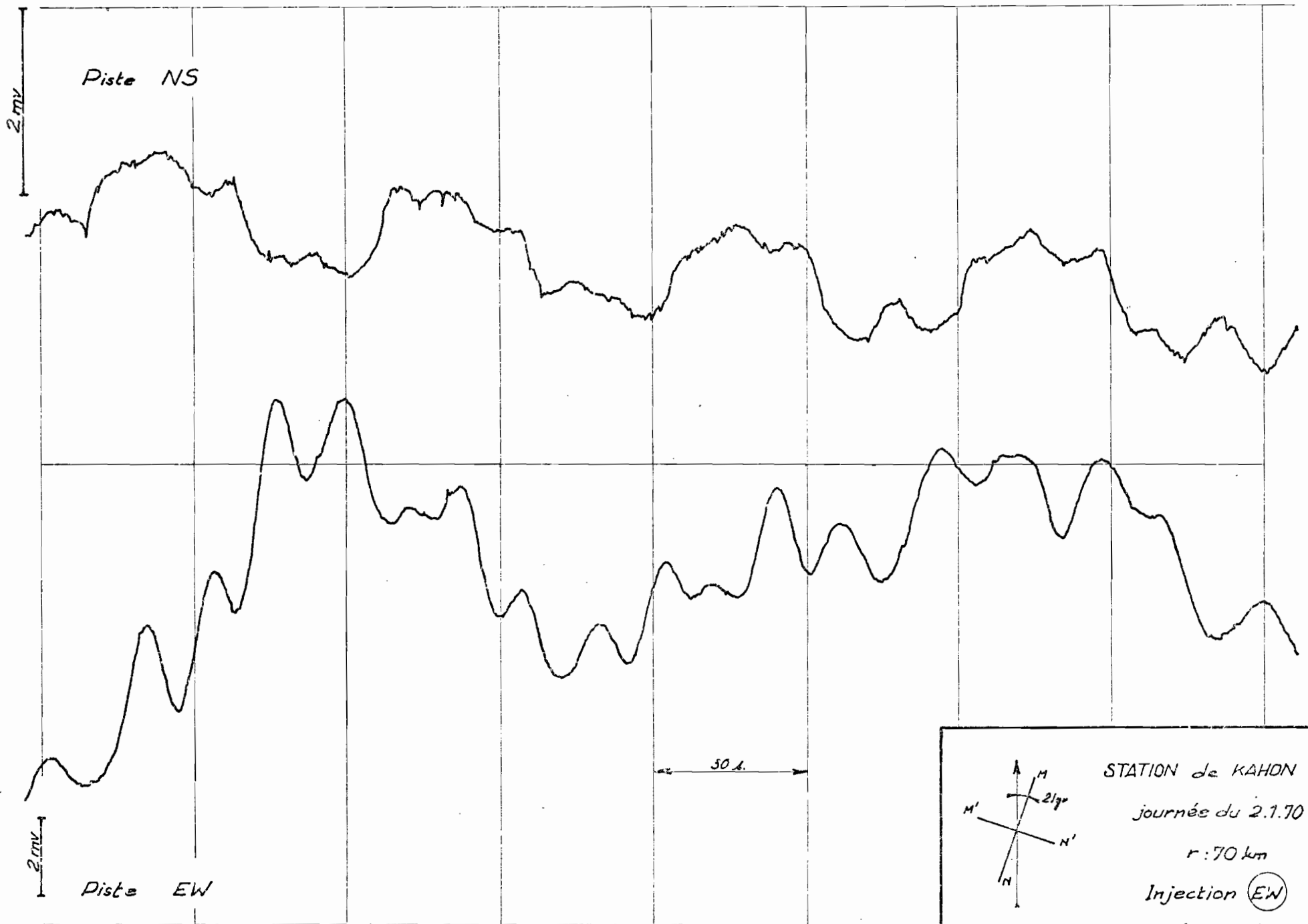
Un sondage SCHLUMBERGER fut exécuté entre le 8 et le 13 décembre sur une longueur totale de 40 km. Jusqu'à $AB = 800$ m, les mesures ont été exécutées au potentiomètre type BRGM. A partir de cet espacement, les différences de potentiel ont été enregistrées sur un suiveur de spot SEFRAM. Le galvanomètre de mesure, de type AV 15, avait une sensibilité de $0,2 \cdot 10^{-9}$ A/mm à 1 m. Au début et à la fin de chaque mesure, l'ensemble du circuit était étalonné à l'aide de sources dont la tension était définie à moins de 1 % près.

Le courant d'injection était produit par un groupe électrogène de 2 KVA. Les prises de terre AB étaient constituées par 4 ou 5 piquets d'acier inoxydable enfoncés dans le sol. Des essais de fuite ont été systématiquement réalisés pour contrôler le bon isolément de la ligne, que l'on obtenait d'ailleurs facilement en raison de la sécheresse du sol et du climat. Les électrodes de mesure M et N étaient constituées par des tiges en cuivre disposées plusieurs heures avant l'enregistrement. Pour les grandes valeurs de AB, trois longueurs différentes ont été utilisées : $MN = 40, 200$ et 800 m. On verra sur le diagramme que "l'embrayage" entre ces différentes longueurs ne s'est pas trouvé réalisé.

A partir de $AB = 15$ km les mesures ont été reprises en utilisant les dispositifs dipôles. Le problème s'est posé de savoir comment augmenter la puissance du dipôle d'injection pour améliorer le rapport signal/bruit à la réception. Dans le cas d'un terrain homogène cette puissance a pour expression : (Fig. 2 et 3)

$$P = \rho \frac{I^2 l}{2 \pi} \quad (2)$$

SONDAGE DIPÔLE EQUATORIAL



On remarquera l'influence, très importante de l'injection EW sur la ligne NS, très faible sur la ligne EW

Fig. 3

La puissance électrique utilisée est

$$P = \left(r_{\text{int}} + \rho_{\text{fil}} \frac{l}{s} + R_A + R_{\text{sol}} + R_B \right) I^2 \quad (3)$$

Posons pour simplifier

$$\alpha = \rho_{\text{fil}} \cdot \frac{l}{s}$$

$$\beta = r_{\text{int}} + R_A + R_B + R_{\text{sol}}$$

La résistance du sol peut être considérée comme indépendante de l et de toute façon négligeable devant la résistance des prises de terre.

Nous obtenons à partir de (3) et (2)

$$I = \left(\frac{P}{\alpha l + \beta} \right)^{1/2}$$

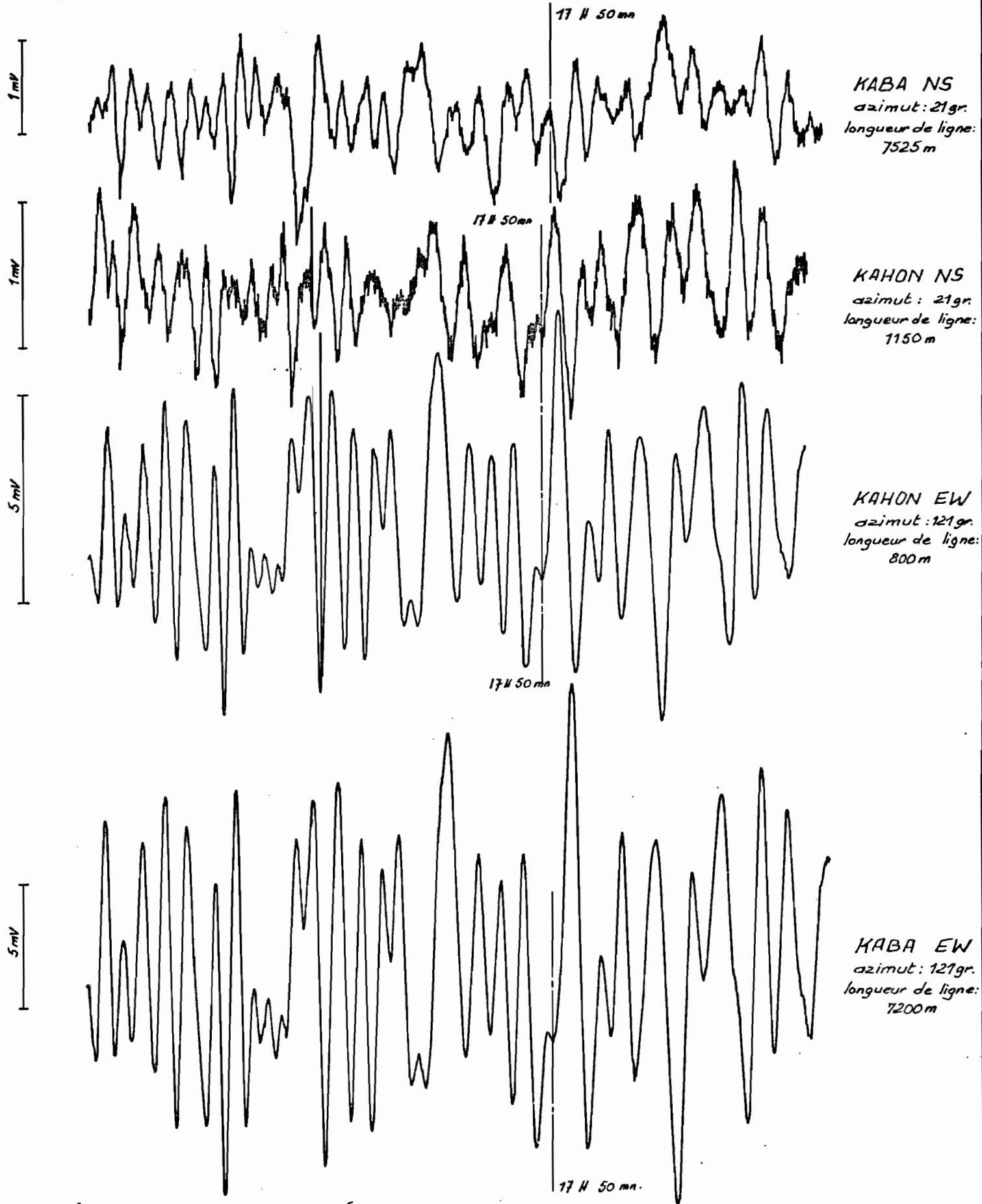
$$\mu = \frac{P_0}{2\pi} \left(\frac{P l^2}{\alpha l + \beta} \right)^{1/2}$$

On voit qu'il y a intérêt à diminuer le plus possible la résistance des prises de terre R_A et R_B et aussi à augmenter l - ce qui n'était pas évident à priori à cause de l'effet Joule - puisque μ varie comme \sqrt{l} pour les grandes valeurs de l .

Les électrodes A et B ont été implantées systématiquement dans des points d'eau ou des bas-fonds et l'on a utilisé 4 fils en parallèle dans la ligne d'émission. Pour des longueurs de dipôle voisines de 7 km, la résistance totale a été généralement abaissée en dessous de 300 ohms ce qui a permis le passage d'un courant compris entre 2 et 3 ampères dans la ligne. La longueur du dipôle de réception était de 800 m.

3) Corrections déduites des enregistrements telluriques

Dans l'hypothèse de l'uniformité du champ tellurique, les relations liant les différences de potentiel tellurique pour



ENREGISTREMENTS TELLURIQUES

base: KABA - Station: KAHON

Journée du 2.1.70.

vitesse approchée du déroulement: 12mm/mn.

Fig. 4

deux stations pas trop éloignées sont linéaires et peuvent s'écrire

$$x = aX + bY \quad (4) \quad (x, Y) \text{ composantes à la "base"}$$

$$y = cX + dY \quad (5) \quad (x, y) \text{ composantes à la "station"}$$

La méthode de correction indiquée dans le paragraphe I consiste à déterminer pour chaque position du dipôle mobile les coefficients a, b, c, d caractérisant le point d'enregistrement par rapport au point d'émission pris comme référence. (Fig. 4)

Différents procédés ont été essayés et comparés pour dépouiller les enregistrements et calculer les coefficients. Généralement les corrélations entre les phénomènes enregistrés étaient suffisamment bonnes pour obtenir en première approximation les coefficients a et d en calculant les rapports $\frac{x}{X}$ et $\frac{y}{Y}$ sur un certain nombre d'à-coups (Tableau III).

Un deuxième procédé a consisté à isoler des fragments d'enregistrements à l'intérieur desquels se trouvaient des phénomènes assez réguliers, à faire la somme des valeurs absolues de toutes les élongations puis à former les quotients

$$\frac{\sum |x_i|}{\sum |X_i|} \quad \text{et} \quad \frac{\sum |y_i|}{\sum |Y_i|}$$

(Tableau IV)

Un troisième procédé plus rigoureux en théorie mais parfois aussi plus délicat à mettre en pratique s'est inspiré de la remarque suivante : pour un à-coup déterminé les équations fondamentales (4) et (5) peuvent s'écrire

$$b = \frac{x_i}{Y_i} - a \frac{X_i}{Y_i} \quad (6)$$

$$d = \frac{y_i}{Y_i} - c \frac{X_i}{Y_i} \quad (7)$$

Un à-coup peut se représenter par deux droites, l'une dans le plan (a, b), l'autre dans le plan (c, d). En traçant les deux ensembles de droites correspondant aux différents à-coups, on obtient deux "chapeaux" dont les coordonnées sont a et b d'une part, c et d d'autre part (Fig. 5).

Le Tableau V représente les coefficients obtenus par cette méthode pour les différentes stations correspondant à la base de KABA. La détermination des coefficients a, b, c, d, de la matrice de transformation permet de construire l'ellipse relative de la station qui est la transformée d'un cercle de la base (Fig. 6 et 7).

Les points ($X = 1, Y = 0$) et ($X = 0, Y = 1$) se transforment en ($x = a, y = c$) et ($x = b, y = d$) qui constituent deux diamètres conjugués de l'ellipse dont une construction classique fournit les axes.

Les valeurs de "a" trouvées par ces trois méthodes sont voisines ce qui s'explique par le fait que la canalisation du champ tellurique suivant la direction Est-Ouest permet une bonne précision dans la détermination des coefficients équatoriaux. Les valeurs de "d" présentent au contraire une certaine dispersion.

Trois bases telluriques ont été utilisées : ce sont les trois emplacements successifs des dipôles d'injection Kaba, Bedaña, et Gouzé. A partir des Tableaux V pour Kaba, IV pour Bedaña et Gouzé, on a caractérisé chaque emplacement du dipôle réception par deux coefficients de correction l'un caractérisant la réception axiale suivant l'orientation générale du sondage, l'autre caractérisant la réception équatoriale suivant la direction orthogonale.

L'application de ces coefficients de correction s'est révélée assez décevante. En effet, la grande dispersion observée dans les résultats des sondages dipôles n'a pu être compensée que dans une faible proportion. Parfois, elle s'est trouvée aggravée.

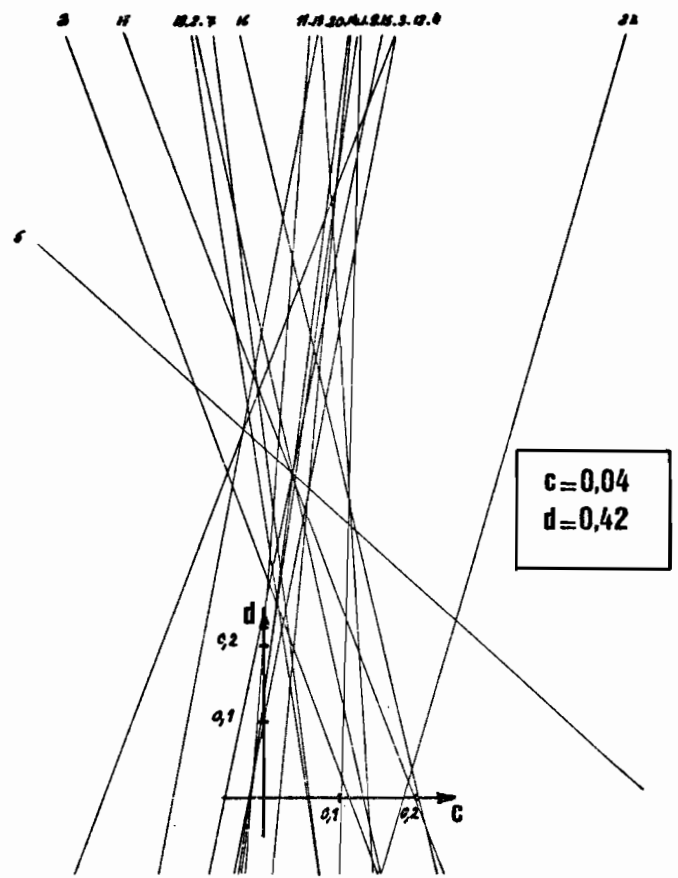
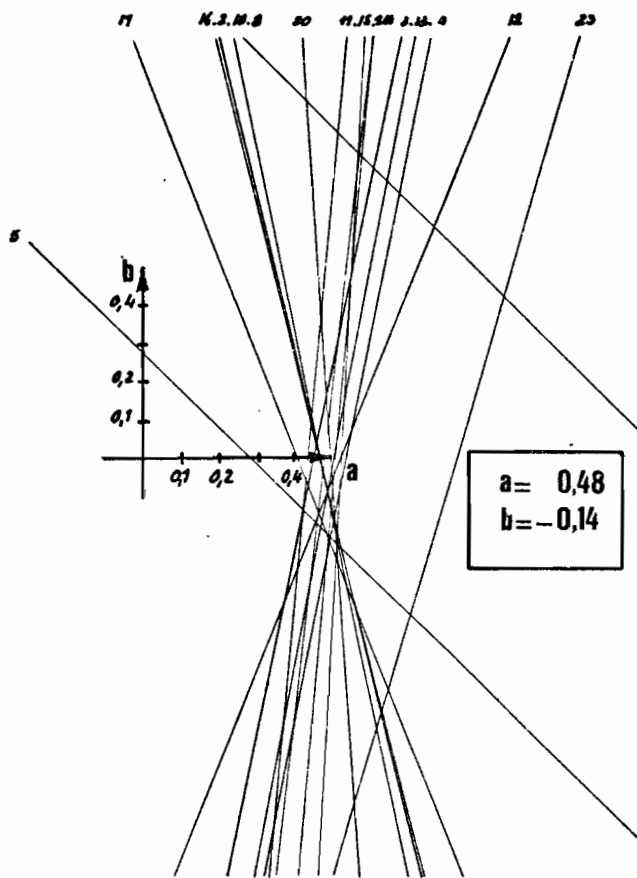


FIG.5 Détermination graphique des termes a,b,c,d.

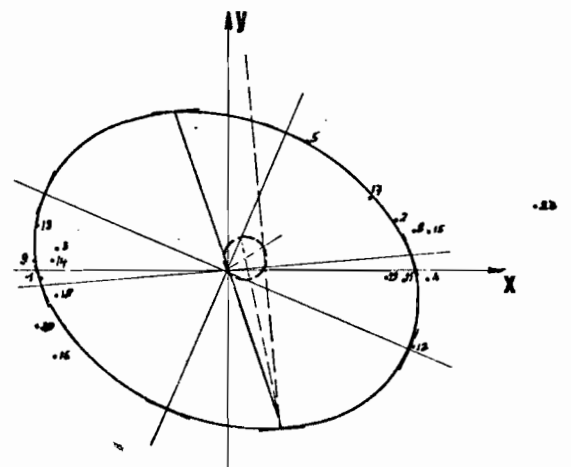
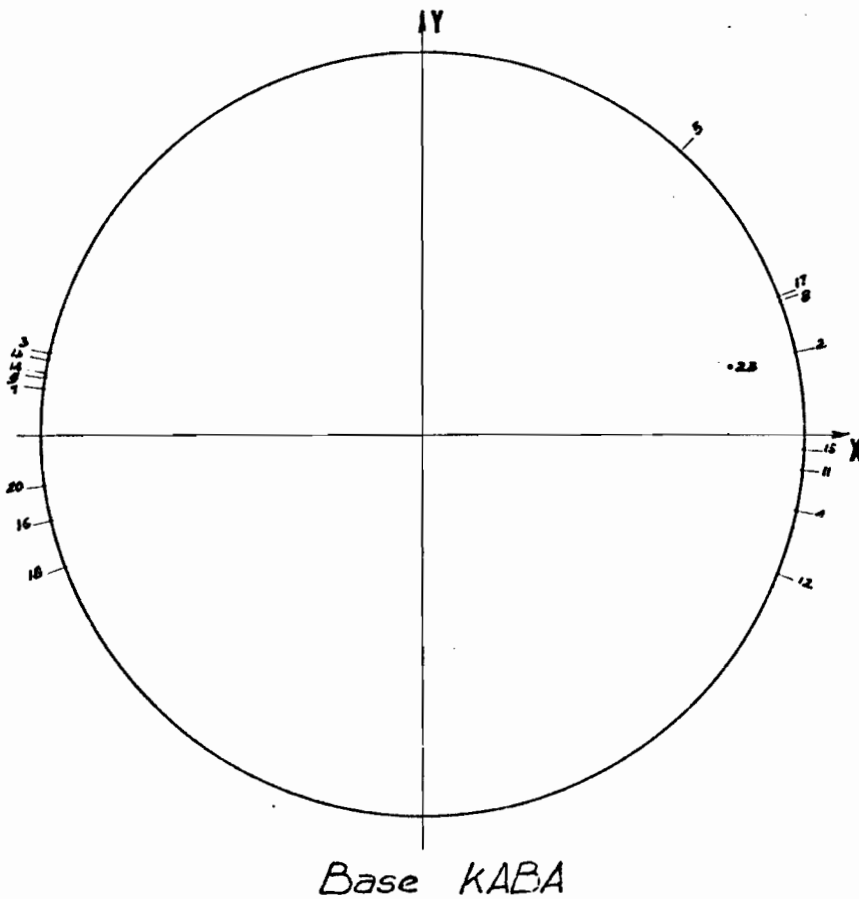
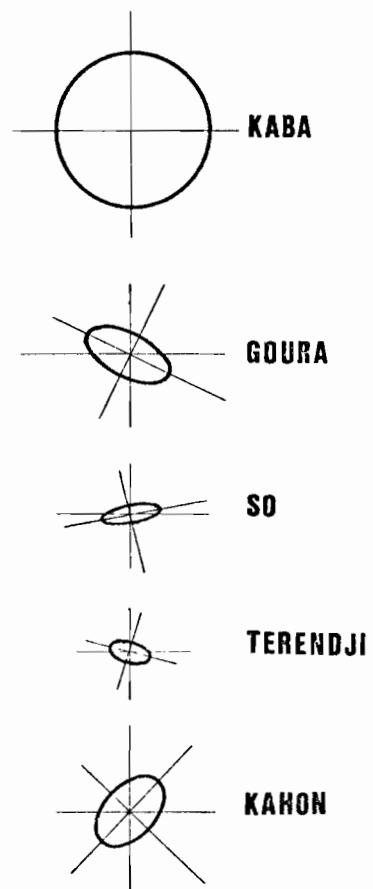
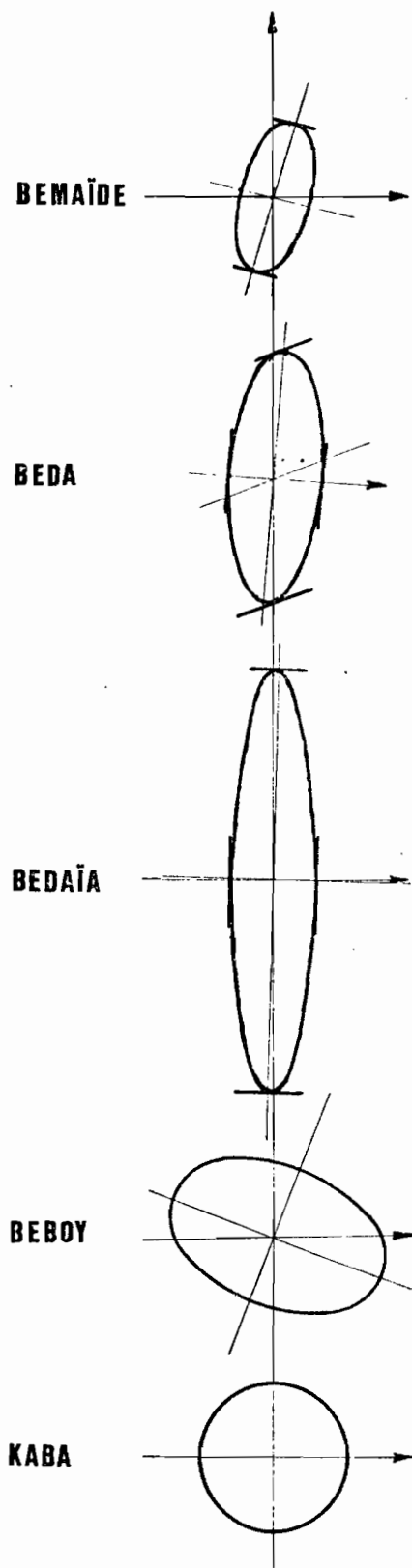


FIG.6 Correspondance entre le cercle de la base et l'ellipse de la station.



Correspondance entre le cercle de la base de KABA
et les différentes stations

Il est permis de se demander si une reconnaissance tellurique préalable de la région et l'emploi d'une carte géologique plus détaillée n'eussent pas permis d'écarter à priori certains emplacements de station.

4) Examen des résultats

On définit la résistivité apparente comme la résistivité du terrain homogène qui donnerait avec le dispositif (AB, MN) et l'intensité de courant (I) utilisée, la même différence de potentiel que celle qui est effectivement observée, On peut écrire.

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

K est un facteur géométrique caractérisant le dispositif
Il vaut $\frac{AB^2 - MN^2}{MN}$ en SCHLUMBERGER

Il vaut $\frac{2\pi r^3}{AB \cdot MN}$ en dipôle équatorial

Il vaut $\frac{\pi r^3}{AB \cdot MN}$ en dipôle axial

On a vu plus haut, dans l'étude du champ dipôle que l'on avait les relations

$$\rho_{\text{eq}} = \rho_a = \rho_{\text{sch}}$$

$$\rho_{\text{ax}} = \rho_a \left(1 - \frac{m}{2}\right) = \rho_{\text{sch}} \left(1 - \frac{m}{2}\right)$$

Tableau III

- Dépouillement tellurique par à-coups.

km	Base Station	x / X			y / Y		
		KABA	GOUZE	BEDAIA	KABA	GOUZE	BEDAIA
0	Bemaïde	0,65	0,72		3,34	1,55	
9,7	Beda	0,87	0,79		0,46	2,11	
16,7	Bedaïa	0,57	1,22	1,00	2,80	1,33	1,00
22,6	Beboy	1,52	1,00		1	1,15	
37,1	Kaba	1,00	0,97	1,27	1,00	0,23	0,59
52,2	Pouhol			0,97			0,76
56,0	Gouzé		1,00			1,00	
57,3	Goura	0,57		1,21	0,95		0,77
68,4	So	0,38	0,40	0,60	0,41	0,12	0,27
85,8	Terendji	0,36	0,68	0,62	0,17	0,25	1,50
106,9	Kahon	0,50	0,82	0,53	0,24	0,66	0,28
133,2	Boulot	0,63	1,73		0,75	2,63	
149,0	Bara		0,85			2,65	

Tableau IV

- Dépouillement tellurique par somme des élongations prises en valeur absolue.

km	Station	x / X			y / Y		
		KABA	GOUZE	BEDAIA	KABA	GOUZE	BEDAIA
0	Bemaïde	0,60	0,77	1,08	2,73	1,96	0,94
9,7	Beda	0,76	0,80		2,29	2,01	
16,7	Bedaïa	0,57	1,00	1,00	2,39	4,06	1,00
22,6	Beboy	1,55	0,98		1,10	0,96	
37,1	Kaba	1,00	1,22	1,18	1,00	0,74	0,24
52,2	Poubol			0,93			0,42
56,0	Gouzé		1,00			1,00	
57,3	Goura	0,51		1,33	1,37		0,28
68,4	So	0,39	0,59	0,59	0,40	0,46	0,28
85,8	Terendji	0,27	0,62	0,61	0,15	0,27	0,10
106,9	Kahon	0,46	0,93	0,68	0,90	0,75	0,20
133,2	Boulot	0,51	1,65		0,47	1,79	
149,0	Bara		0,75			1,54	

Tableau V

- Dépouillement tellurique par détermination graphique des termes de la matrice de transformation entre la base de Kaba et différentes stations.

km	Station	a	b	c	d
0	Bemaïde	0,56	- 0,08	0,27	1,0
9,7	Beda	0,65	0,25	0,14	1,70
16,7	Bedafa	0,60	0,04	0,05	2,80
22,6	Beboy	1,41	- 0,59	0,0	1,0
37,1	Kaba	1	0	0	1
57,3	Goura	0,54	- 0,08	- 0,12	0,31
68,4	So	0,39	0,06	- 0,10	0,06 (?)
85,8	Terendji	0,28	- 0,02	- 0,04	0,13
106,9	Kahon	0,48	- 0,14	0,04	0,42

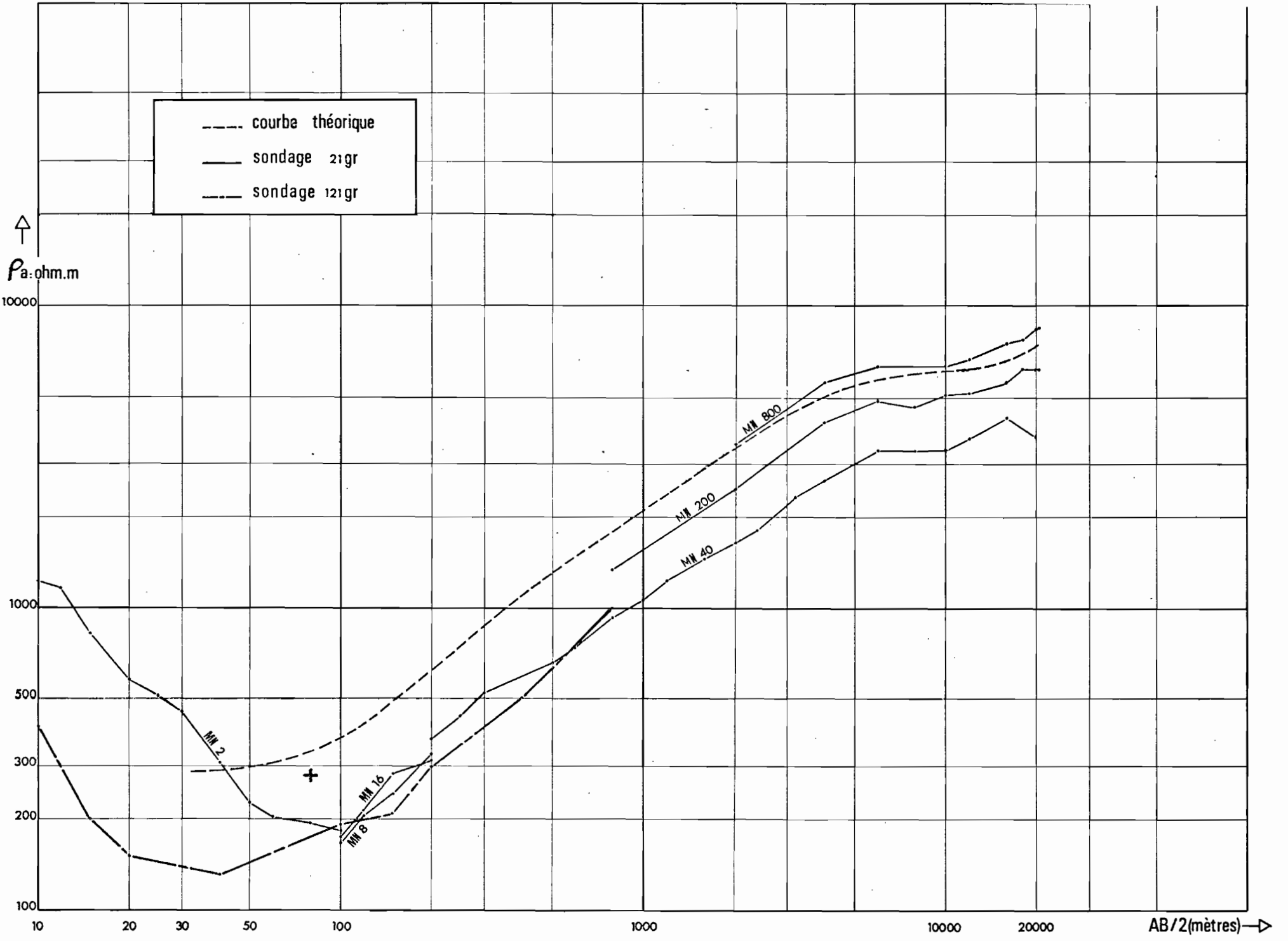
L'ensemble des résultats peut donc être reporté sur un même diagramme où la résistivité apparente est représentée comme une fonction de r . Rappelons que dans le sondage SCHLUMBERGER r présente la demi distance de séparation soit $\frac{AB}{2}$ tandis que dans les sondages dipôles il représente la distance de séparation entre les centres des dipôles. La courbe de sondage équatorial est directement comparable avec la courbe SCHLUMBERGER, la courbe de sondage axial ne l'est pas.

a) Sondage SCHLUMBERGER.

Le sondage a été réalisé selon deux directions perpendiculaires jusqu'à $\frac{AB}{2} = 800$ m. Les courbes correspondantes mettent en évidence un effet latéral important. En ne regardant que la courbe relative au sondage principale, on peut donner comme interprétation sommaire des premiers terrains

) 10 m à 1300 ohm.m
(
) 80 m à 135 ohm.m
(

Dès que l'on aborde les terrains résistants ($AB > 200$ m) l'accord entre les deux diagrammes du sondage en croix s'améliore. La pente est alors voisine de 45° , parfois même supérieure, en raison d'effets latéraux. Ensuite la résistivité apparente croît moins rapidement et l'on peut observer deux paliers, l'un



Sondage Schlumberger de Paoua

fig.8

très peu marqué pour $\frac{AB}{2} = 2\ 000\ m$, l'autre nettement plus accentué à partir de $\frac{AB}{2} = 6\ 000\ m$ et jusqu'à $\frac{AB}{2} = 12\ 000\ m$.

Au-delà de cette valeur et jusqu'à la fin du diagramme, la résistivité apparente croît assez rapidement. On remarquera que les valeurs obtenues à partir de trois MN de longueur différente ne donnent pas des résultats identiques mais sensiblement proportionnels, le plus petit MN indiquant la plus faible résistivité. Ceci peut s'interpréter en supposant une distribution horizontale des résistivités non uniformes. En effet, si pour les faibles valeurs de MN on se trouve sur une zone plus conductrice, on aura des différences de potentiel anormalement faibles. Dans l'interprétation on peut donc admettre que la forme générale de la courbe correspondant à MN = 40 m est bonne, mais qu'il faut multiplier les ordonnées de façon à obtenir la coïncidence avec la courbe MN = 800 m. On peut naturellement se demander si les résultats ne seraient pas encore meilleurs avec un plus grand MN. Pour répondre à cette question on fera observer d'une part que le rapport des résistivités mesurées avec différents MN semble tendre vers une limite et que d'autre part un plus grand MN nous éloignerait de l'approximation propre au dispositif SCHLUMBERGER. (Fig. 8).

Il est assez difficile de passer du diagramme de résistivité apparente à la distribution des résistivités vraies et des épaisseurs, notamment pour la branche montante de la courbe. En effet, même en supposant une stratification parfaitement horizontale, on sait que des couches dont la résistivité est intermédiaire entre celles des couches encaissantes, ne modifient pas sensiblement l'allure du diagramme, tant que leur épaisseur reste faible. C'est l'application du principe bien connu de

suppression au cas de l'"escalier montant". Ce qui nous paraît remarquable c'est l'existence du palier de résistivité apparente que l'on observe à partir de $\frac{AB}{2} = 6\ 000\ m$. Ce caractère qui se retrouve aussi bien dans le sondage de MIGAUX que celui de Van ZIJL, correspond à un milieu relativement conducteur qui a pour effet en canalisant les filets de courant, de repousser vers la droite le maximum de la courbe. Nous avons cherché à rendre compte à l'aide d'une courbe théorique calculée par ordinateur suivant un programme mis au point à la Compagnie Générale de Géophysique, de l'allure générale de la courbe expérimentale.

Nous avons imposé à la courbe théorique de présenter un maximum vers $\frac{AB}{2} = 100\ km$ et de décroître ensuite rapidement. Cette hypothèse n'est pas contredite, dans l'ensemble, avec les résultats des sondages dipôles.

Le programme de calcul a fourni une solution comportant 16 terrains. On a ensuite essayé de regrouper ensemble plusieurs couches adjacentes. Il est apparu que la présence d'une couche de conductivité assez élevée était indispensable pour rendre compte du palier observé. Un assez bon accord est encore observé avec la solution simplifiée suivante (en négligeant la couverture superficielle)

Couche n°	h (m)	ρ (ohm.m)	
1	80	280	
2	240	5100	A titre indicatif, la couche
3	80	545	numérotée 6 présente une
4	1930	16000	résistance transversale
5	1920	1000	égale à $1,6 \cdot 10^9\ ohm.m^2$.
6	27000	59000	
7		100	

En résumé, le sondage SCHLUMBERGER de Paoua, ne donne pratiquement aucune indication sur la résistance transversale de la croûte. Il confirme l'existence d'une couche conductrice

à faible profondeur, qui se marque par un palier dont l'importance semble intermédiaire entre ceux trouvés par MIGAUX et Van ZIJL.

b) Sondages dipôles.

⊗) Présentation des résultats. Nous avons utilisé trois stations d'émission :

- KABA qui correspondait au centre du dispositif SCHLUMBERGER
- GOUZE située à 19 km au Sud de KABA
- BEDAIA située à 20 km au Nord de KABA.

Pour chacune de ces stations d'émission, nous avons réalisé un profil Nord et un profil Sud.

Enfin, nous avons utilisé 2 méthodes : Equatoriale et Axiale ce qui représente au total $3 \times 2 \times 2 = 12$ diagrammes distincts. Les figures 9, 10, 11 et 12 montrent les valeurs brutes et corrigées à partir des enregistrements telluriques dans les deux méthodes équatoriale et axiale.

β) Etude par station d'émission

GOUZE Pour des espacements des dipôles compris entre 13 et 30 km les valeurs des résistivités apparentes sont assez groupées en comprises entre 900 et 1 300 ohm.m. Pour une distance croissante on observe une grande dispersion des résultats. Les résistivités Nord sont cependant assez semblables et peuvent indiquer une décroissance de la résistivité vraie. Les résistivités Sud sont tout à fait disparates et on ne peut faire aucune interprétation - La valeur équatoriale mesurée à Kahon doit sans doute être écartée, par comparaison avec d'autres résultats comme nous le verrons plus loin.

SONDAGE DIPÔLE EQUATORIAL (VALEURS NON CORRIGÉES)

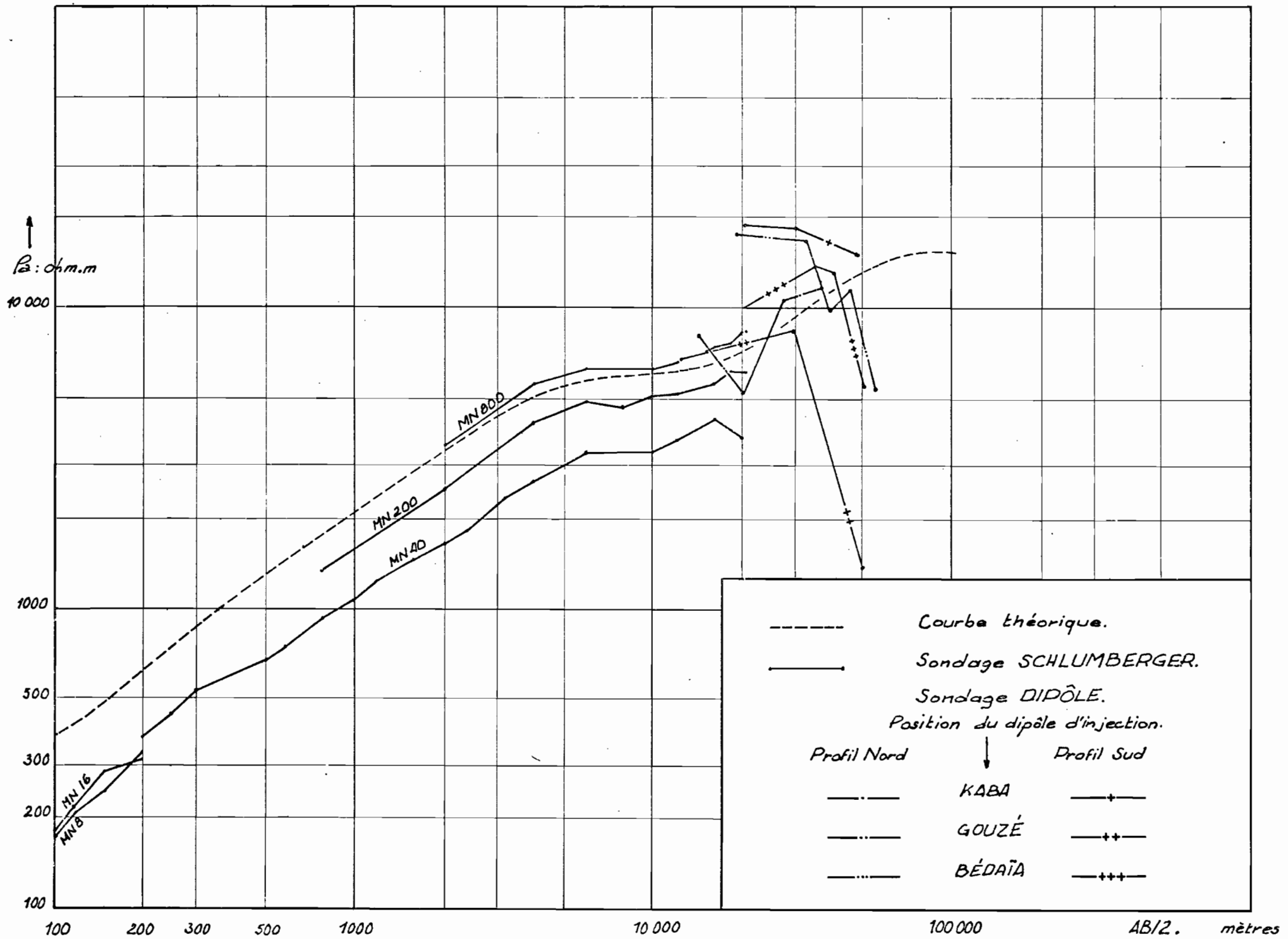
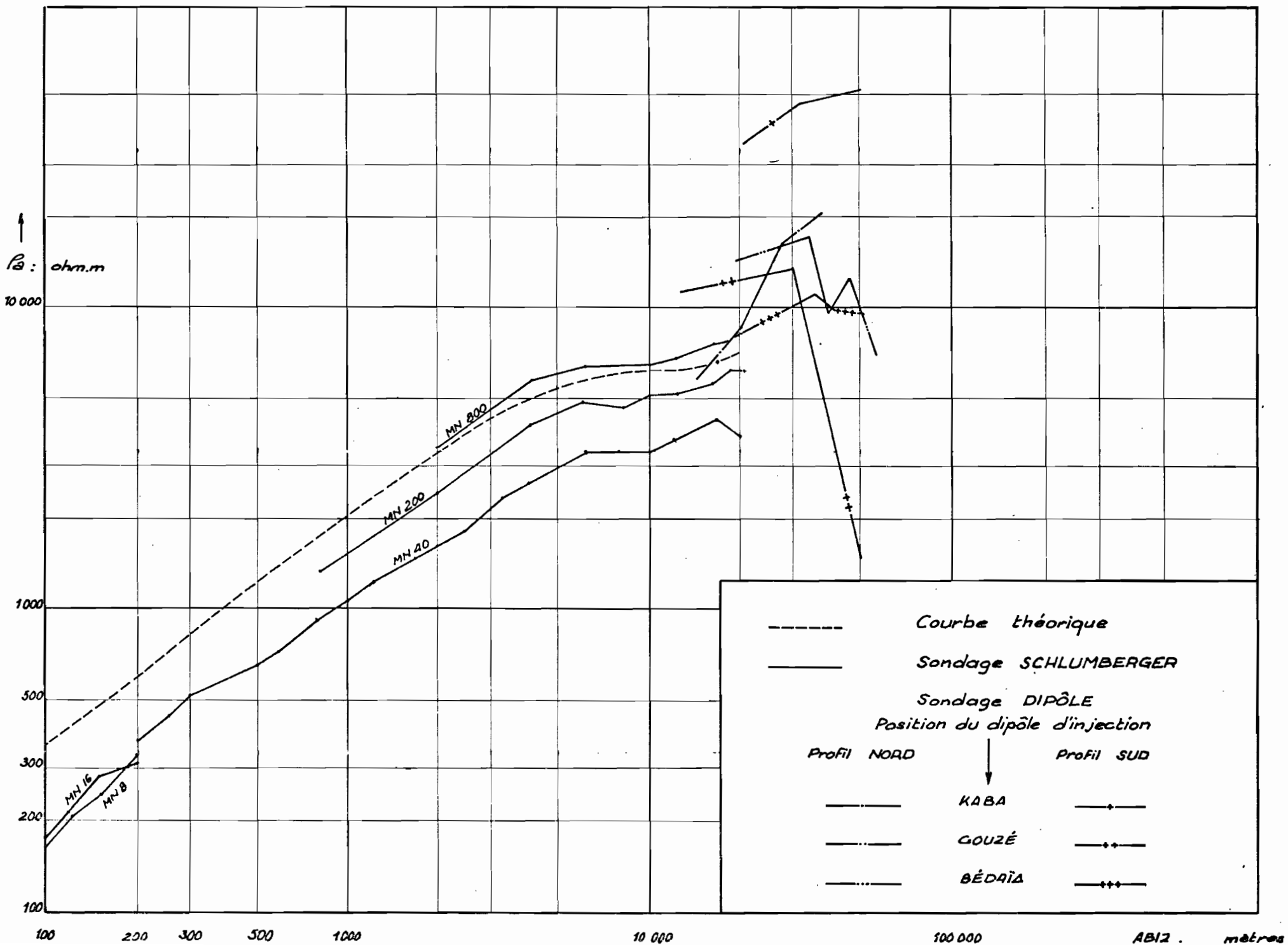
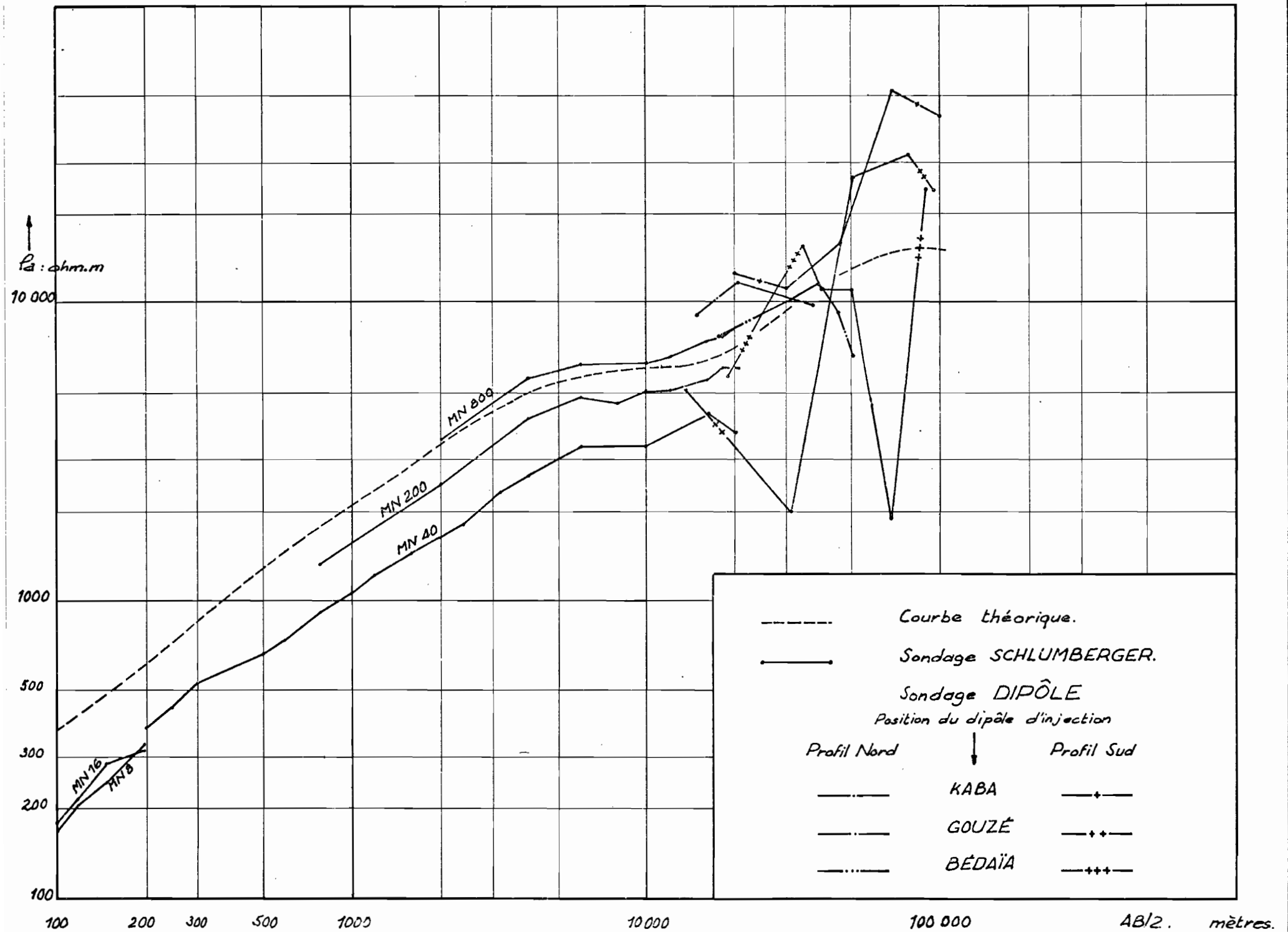


Fig. 9

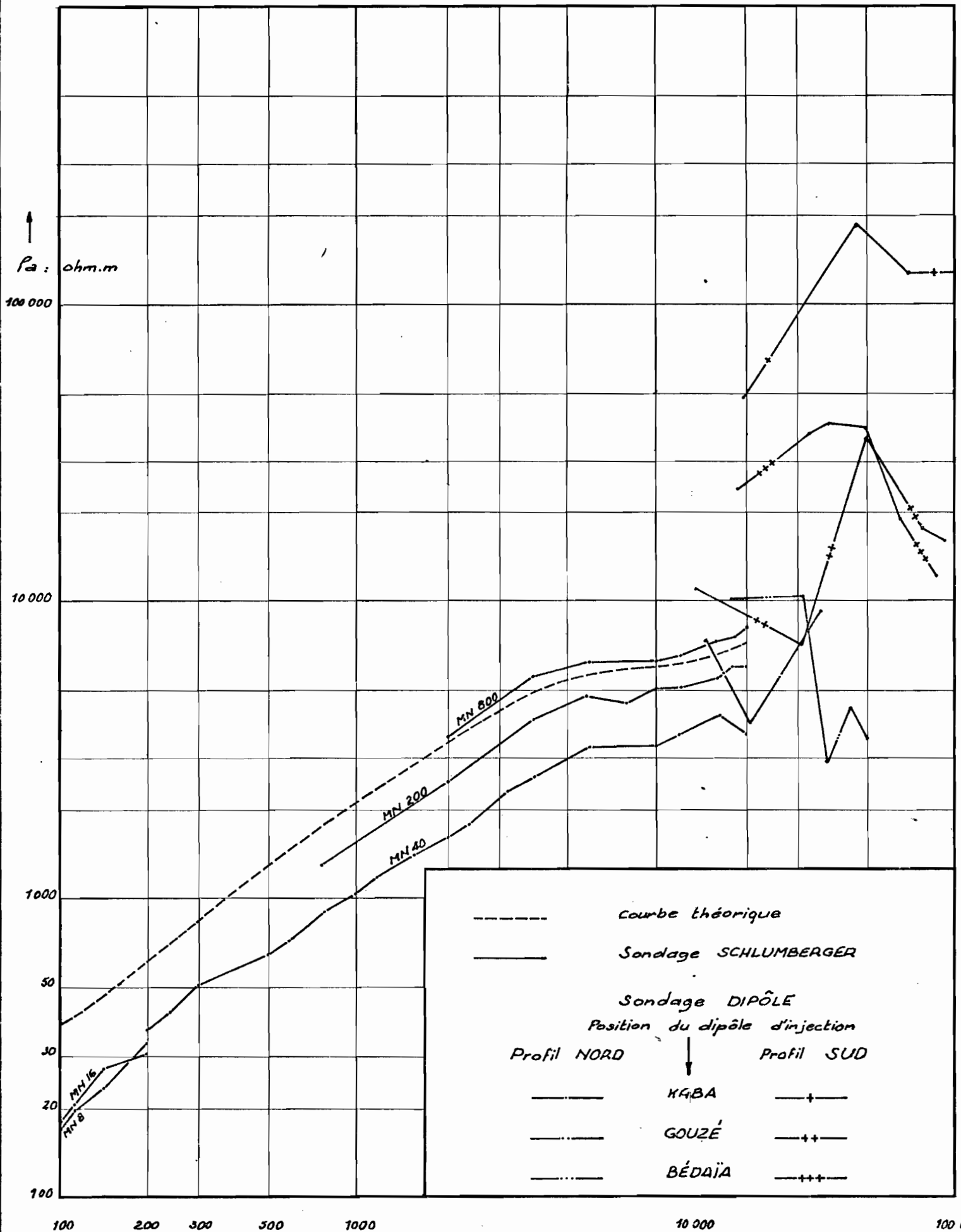
SONDAGE DIPÔLE ÉQUATORIAL (VALEURS CORRIGÉES)



SONDAGE DIPOLE AXIAL (VALEURS NON CORRIGÉES)



SONDAGE DIPÔLE AXIAL (VALEURS CORRIGÉES)



Dans le sondage de KABA où le dipôle d'injection se trouve 19 km plus au Nord que le précédent, on observe dans l'ensemble des résistivités croissantes et plus fortes que les précédentes. Malgré les corrections apportées, les pentes des diagrammes sont parfois supérieures à + 1 ; ce qui exclut toute interprétation par couches horizontales. Les résistivités Sud sont nettement supérieures aux Résistivités Nord.

BEDAIA Dans le profil Nord un seul dipôle récepteur a pu être mis en place. Les valeurs axiales du profil Sud sont très dispersées et supérieures aux valeurs équatoriales correspondantes.

γ) Etude par dispositif.

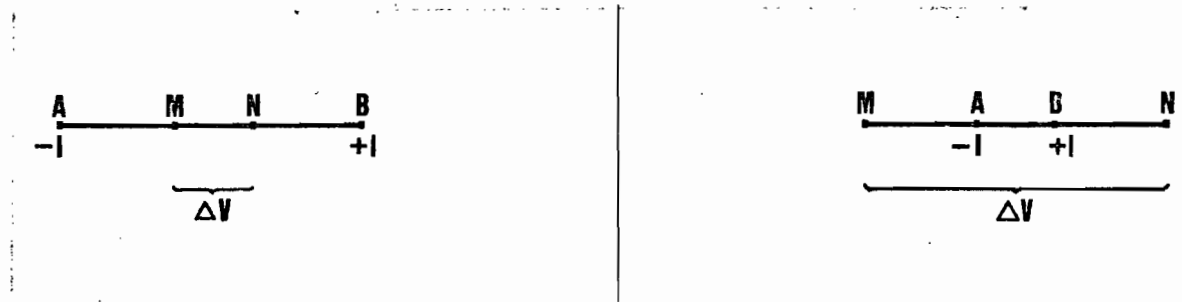
Dipôle Equatorial Les valeurs sont relativement groupées hormis la valeur mesurée à Kahon pour un dipôle d'émission situé à Gouzé. Cette valeur en contradiction avec le résultat correspondant obtenu en méthode axiale est sans doute à écarter. Les courbes équatoriales se classent par valeurs décroissantes pour une station d'émission se déplaçant du Nord au Sud.

Dipôle Axial C'est avec ce dispositif que les différences entre les profils Nord et Sud apparaissent les plus marquées : toutes les valeurs relatives aux profils Sud donnent des courbes en cloche avec un maximum de 60.000 ohm.m. situé vers 80 km. Les courbes Nord apparaissent au contraire nettement décroissantes ce qui laisse à penser que les filets de courants rencontrent des terrains de plus en plus conducteurs, au fur et à mesure que la distance de séparation augmente.

C O N C L U S I O N

La différence de qualité entre les résultats obtenus dans les sondages SCHLUMBERGER et Double Dipôle fait ressortir le caractère différentiel de la mesure dipôle. Nous avons vu théoriquement et expérimentalement que les lois de décroissance du champ dans chacune de ces méthodes étaient respectivement en $\frac{1}{r^2}$ et $\frac{1}{r^3}$ ce qui fait apparaître de façon intuitive la mesure dipôle comme une mesure dérivée par rapport à la mesure SCHLUMBERGER.

On peut donner une présentation simple de cette opération en appliquant au quadripôle classique (AMNB) le principe de réciprocité. Il est équivalent au quadripôle (MABN) c'est-à-dire que l'on recueille la même différence de potentiel ΔV pour un même courant I circulant entre les électrodes A et B interverties avec les électrodes M et N précédentes. Or, par définition $\Delta V_{MN} = -\int_N^M E \, dl$ mais le second membre n'est autre que la somme des champs élémentaires mesurés suivant la méthode du dipôle axial sur toute la longueur du dispositif.



Le caractère différentiel de la mesure dipôle implique sa très grande sensibilité aux variations locales qui apparaît plus souvent comme un inconvénient que comme un avantage.

Dans le bilan de la campagne réalisée à Paoua, cet inconvénient pèse lourd dans la balance. Peut-être n'a t'on pas

considéré suffisamment le caractère spécifique de cette méthode dans la mise en oeuvre des moyens. Il nous apparaît en particulier indispensable d'augmenter sensiblement la partie commune du diagramme dans les deux méthodes, de façon à permettre une comparaison plus approfondie des mesures. Indispensable également de resserrer les points de mesure dipôle de façon à rétablir une plus grande continuité dans la variation de la résistivité apparente ; indispensable enfin de procéder à une campagne tellurique préalable qui permette un choix rationnel des stations de réception.

Moyennant ces précautions supplémentaires, on peut espérer maîtriser davantage la technique dipôle et pouvoir tirer parti de mesures effectuées à des distances de séparation atteignant la centaine de kilomètres que la campagne de Paoua a montré techniquement réalisables avec des moyens traditionnels.

B I B L I O G R A P H I E

- AL'PIN, (L.M.), 1950, Teoria dipolnik zondirovanii : Moscow, Gostoptekizdat, 88 p. in Dipole sounding methods for measuring earth conductivity : New York, Plenum Press, 1966.
- ___ ANDERSON, (L.A.), and PRITCHARD, (J.I.), 1966, Geological Survey investigations of the electrical properties of the crust and upper mantle : Geophysics, v. 31, p. 1078-1087.
- ___ and FRISCHKNECHT, (F.C.), 1966, Electrical methods in geophysical prospecting : London, Pergamon Press.
- KUNETZ, 1946, Principles of direct current resistivity prospecting : Berlin, Gebrüder Borntraeger.
- MIGAUX, (L.), ASTIER, (J.L.), and REVOL, (P.), 1960, Un essai de détermination expérimentale de la résistivité électrique des couches profondes de l'écorce terrestre : Annales de Geophysique, V. 16, P. 555-560.
- ROUSSEL, (J.), TOURNIER, (D.), 1968, Sur la détermination de la résistivité électrique des couches profondes du sous-sol par sondage dipôle azimutal - CR. Acad. Sc. Paris, t 267 (4 novembre 1968).
- Van ZIJL, (J.S.V.), 1969, A deep SCHLUMBERGER sounding to investigate the electrical structure of the crust and upper mantle in South Africa. Geophysics, Vol. 34, n° 3 (June), p. 450-462, 8 Figs., 1 Table.