

SONDAGES GÉOMAGNÉTIQUES PRÉLIMINAIRES DANS L'OUEST AFRICAIN

Yves ALBOUY*, Hans Gustave BARSCZUS**, Bernard CANER***

*Géophysicien ORSTOM, laboratoire de Géomagnétisme, Centre de Recherches Géophysiques, 24, rue Lhomond, 75005 Paris.

**Technicien ORSTOM, BP 529, Papeete, Polynésie.

***Géophysicien de l'Observatoire de Victoria, Victoria Magnetic Observatory, British Columbia, Canada. Décédé.

RÉSUMÉ

L'observatoire magnétique de M'Bour au Sénégal étant choisi comme station de référence, on essaie de déterminer, par la méthode des sondages géomagnétiques, des modèles de résistivité pour quelques stations de l'Ouest Africain. Tambacounda et Kedougou ont été retenues pour un essai d'interprétation quantitative.

La normalisation des données de ces stations par rapport à celles de la station de référence nécessite une correction de l'effet de bord de mer. De plus, la présence à M'Bour d'un bassin sédimentaire très épais et très conducteur, atténue considérablement les amplitudes des variations de Z aux courtes périodes, ce qui limite la précision de l'interprétation quantitative.

Il est cependant possible de mettre en évidence l'existence à Tambacounda d'une couche intermédiaire modérément conductrice et d'épaisseur moyenne. Cette couche, de résistivité comprise entre 5 et 50 Ω .m, pourrait être située entre 10 et 50 km de profondeur. La présence d'une telle couche à M'Bour ne peut être démontrée, mais il est vraisemblable qu'elle existe dans toute la zone mobile (à l'ouest de Kedougou).

ABSTRACT

PRELIMINARY GEOMAGNETIC DEPTH SOUNDING IN WEST AFRICA

Using the magnetic observatory of M'Bour (Senegal) as a reference base, we have tried to determine resistivity models for a few stations in West Africa by applying the geomagnetic sounding method. Tambacounda and Kedougou sites were used to do a quantitative interpretation.

Data of these sites which must be normalized in reference with those of M'Bour, are necessarily corrected for edge effect. The amplitudes of Z variations are considerably reduced for the short periods because M'Bour is situated in a very thick and conductive sedimentary basin. Consequently, the accuracy of quantitative interpretation is limited.

Nevertheless, it is possible to reveal in Tambacounda an interjacent layer which is moderately conductive and fairly thick. This layer ($5 < \rho < 50 \Omega$.m) could be situated between 10 and 50 km deep. The existence of such a layer at M'Bour cannot be established, but it probably exists in the whole moving zone (westward of Kedougou).

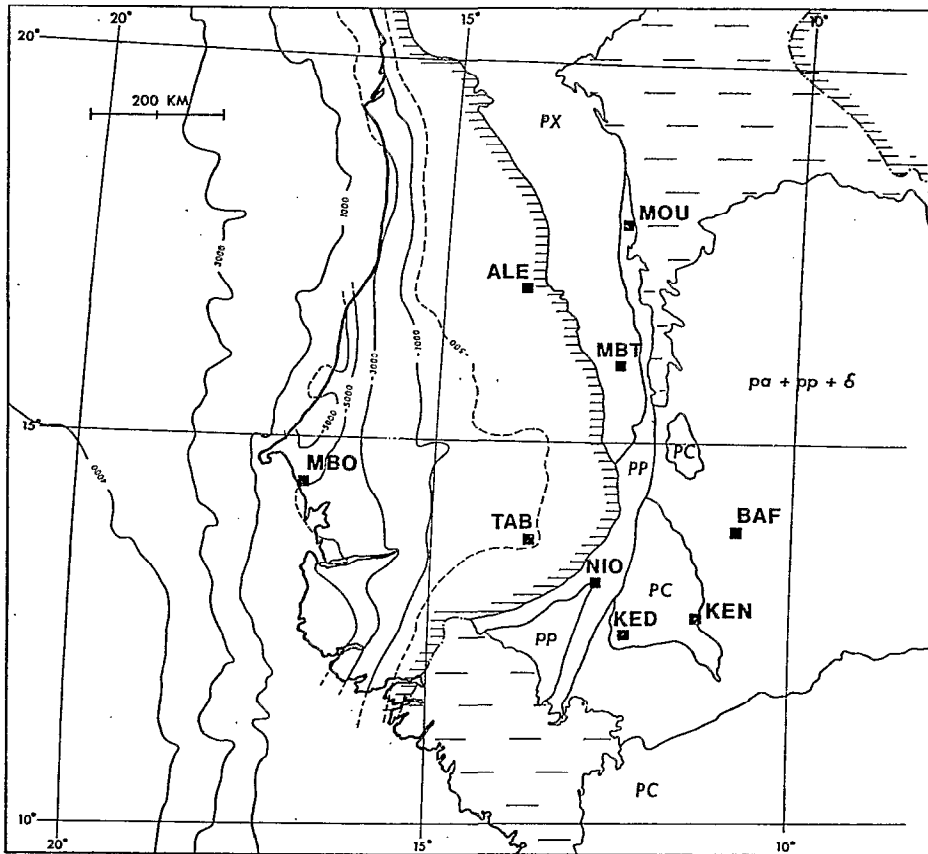


FIG. 1. — Emplacement des stations de mesures magnétiques sur la carte tectonique de l'Afrique de l'Ouest.

1. Introduction

On applique la méthode des sondages géomagnétiques à des enregistrements simultanés du champ magnétique obtenus en 1960-61 à M'Bour et en différents points de l'Ouest Africain.

Les valeurs d'échelle du variographe La Cour de M'Bour étaient de l'ordre de $4,5 \gamma/\text{mm}$ pour H, $8 \gamma/\text{mm}$ pour D et $2 \gamma/\text{mm}$ pour Z. Celles du variographe de terrain, Askania GV3 thermostaté, étaient de l'ordre de $3 \gamma/\text{mm}$ pour chaque composante.

Les différentes stations occupées sont les suivantes :

TABEAU I

Station	Lat. géogr.	Long. géogr.
<i>Stations côtières</i>		
M'Bour (MBO)	14°23'N	16°57'W
Louly	14°26'N	16°50'W
Thiadiaye	14°25'N	16°57'W
Sangue	14°43'N	16°53'W

<i>Stations de l'intérieur</i>		
Aleg (ALE)	17°03'N	13°54'W
Bafoulabe (BAF)	13°48'N	10°50'W
Kedougou (KED)	12°34'N	12°11'W
Kenieba (KEN)	12°51'N	11°14'W
M'Bout (MBT)	16°02'N	12°35'W
Moudjeria (MOU)	17°45'N	12°30'W
Niokolo-Koba (NIO)	13°04'N	12°43'W
Tambacounda (TAB)	13°46'N	13°40'W

M'Bour et les stations de l'intérieur sont reportées sur la figure 1.

On note que trois stations sont situées sur le bassin sédimentaire, mais les épaisseurs de ce bassin sont très différentes d'une station à l'autre : 5.000 m environ pour M'Bour, 600 m pour Tambacounda, 70 m pour Aleg. Ce bassin sédimentaire est très conducteur : sa résistivité est inférieure à 5 ohm.m, d'après les sondages électriques en grande longueur de ligne faits dans la région.

Toutes les autres stations sont situées sur des formations résistantes. Quatre d'entre elles sont très proches de la limite du craton Ouest Africain, qui est représentée par la limite orientale des formations PP (fig. 1) selon la définition de R. BLACK. Ces quatre stations sont : Moudjeria au Nord sur la limite, M'Bout et Niokolo-Koba qui sont situées dans la zone mobile, Kedougou qui est sur le craton. Kenieba et Bafoulabe sont situées plus à l'intérieur du craton : Kenieba sur les mêmes formations que Kedougou (socle granitisé) et Bafoulabe sur couvertures de plate-forme.

Compte tenu des conditions géologiques très différenciées, on peut s'attendre à trouver des « anomalies des variations géomagnétiques » assez nettes entre les 3 dernières stations et celles situées encore sur le bassin sédimentaire, Aleg et Tambacounda, ou par rapport à l'observatoire permanent de M'Bour, situé en bordure de l'Océan Atlantique.

La méthode du sondage géomagnétique (étude des variations sur les 3 composantes orthogonales du champ géomagnétique) a fait ses preuves comme instrument d'investigation des résistivités à grande profondeur. Principalement développée par WIESE (1956), SCHMUCKER (1959), RIKITAKE (1959), PARKINSON (1959) (voir bibliographie de BARSCZUS 1970), elle a été utilisée dans de nombreux pays.

Les sondages géomagnétiques se font habituellement à partir d'enregistrements simultanés, obtenus en plusieurs stations. Dans notre étude, nous ne disposons que d'une station mobile, par rapport à M'Bour, station fixe.

2. M'Bour et les stations côtières

Les déterminations du vecteur de Parkinson conduisent aux résultats suivants (tabl. II) :

TABLEAU II
Vecteurs de Parkinson

Station	Phénomène	Nombre d'événements	Azimut (Op)	Module (Jp)
M'Bour	ssc	54	280°	0,17
	variations			
	T 10 min	56	275°	0,34
	T 20 min	84	275°	0,42
	T 30 min	85	270°	0,42
	T 40 min	65	265°	0,50
	T 60 min	55	265°	0,57
	<i>moyenne</i>		270°	0,42
Louly	T 10-40 min	45	270°	0,42
Thiadiaye	T 10-30 min	37	255°	0,42
Sangué	T 10-30 min	40	265°	0,46

On note que le module du vecteur de Parkinson J_p est très grand à M'Bour ainsi qu'aux autres stations, pour des périodes comprises entre 10 et 40 mn.

Toute la région de M'Bour faisant l'objet d'une étude magnéto-tellurique récente plus détaillée, dont les enregistrements sont actuellement en cours d'étude, il a paru préférable d'étudier en détail les enregistrements obtenus aux stations temporaires de l'intérieur, susceptibles d'apporter des informations sur la structure de la croûte et du manteau.

3. Choix d'une station de référence

Les stations de l'intérieur sont situées, pour la plupart, à 500 ou 600 km de M'Bour. Cette distance n'est pas un obstacle à la « normalisation » de ces données par rapport à M'Bour, comme nous le savons d'après les constatations faites à des latitudes géomagnétiques beaucoup plus élevées : 55-56° N contre 21-22° N (CANER *et al.* 1967), nous avons vu que le site de M'Bour est « anormal » : J_p est de l'ordre de 0,5 pour les périodes de l'heure.

Pour voir dans quelle mesure une « normalisation » donnée est possible, nous avons établi les spectres de puissance des enregistrements obtenus aux observatoires suivants (enregistrements du 31.3.1969 - 09 h au 1.4.1960 - 8 h, fig. 2a, 2b, 2c) :

- M'Bour (MBO) et Kedougou (KED) : MBO station sur la côte, KED station à l'intérieur ;
- Paramaribo (PAR) : latitude géomagnétique : 17° N ;
- Tamanrasset (TAM) : latitude géomagnétique : 26° N ;
- Honolulu (HON) : latitude géomagnétique : 21° N ;
- Kakioka (KAK) : latitude géomagnétique : 26° N.

Les analyses spectrales de la composante horizontale ΔB ($\Delta B = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta D^2}$) et de la composante verticale ΔZ , sont représentées sur les figures 3a et 3b.

Nous pouvons en tirer les conclusions suivantes :

ΔB est uniforme entre M'Bour et Kedougou, rendant possible la normalisation par rapport à M'Bour. Nous verrons plus loin ce qu'il en est pour ΔZ .

Paramaribo ne peut pas être utilisée comme station de référence, car beaucoup trop différente de Kedougou et de M'Bour dans ses trois composantes. D'ailleurs, c'est un site fortement anormal : $J_p \neq 0,60$ (PARKINSON, 1962).

A Tamanrasset, ΔB est peu différent, mais par contre ΔZ présente des amplitudes extrêmement faibles dans toute la gamme du spectre.

Les variations de la composante Z sont très faibles à M'Bour pour des périodes inférieures à 45 mn, alors que les variations de Z à Kedougou doivent être considérées comme « normales ».

4. Les stations de l'intérieur

La comparaison visuelle des enregistrements des stations : Aleg (fig. 4), Tambacounda (fig. 5), Bafoulabe (fig. 6), Kenieba (fig. 7), Moudjeria et M'Bout (fig. 8) avec ceux simultanés de M'Bour, conduit aux remarques suivantes :

Les composantes horizontales D et H sont généralement uniformes entre les diverses stations et M'Bour, avec les exceptions suivantes :

(a) Si l'on observe un accroissement des variations de la composante D à Kenieba, il n'est vraisemblablement dû qu'à une valeur d'échelle erronée et on n'en tiendra pas compte. Les variations de la composante D sont atténuées aux stations de Tambacounda et Aleg, pour des périodes inférieures à 120 mn.

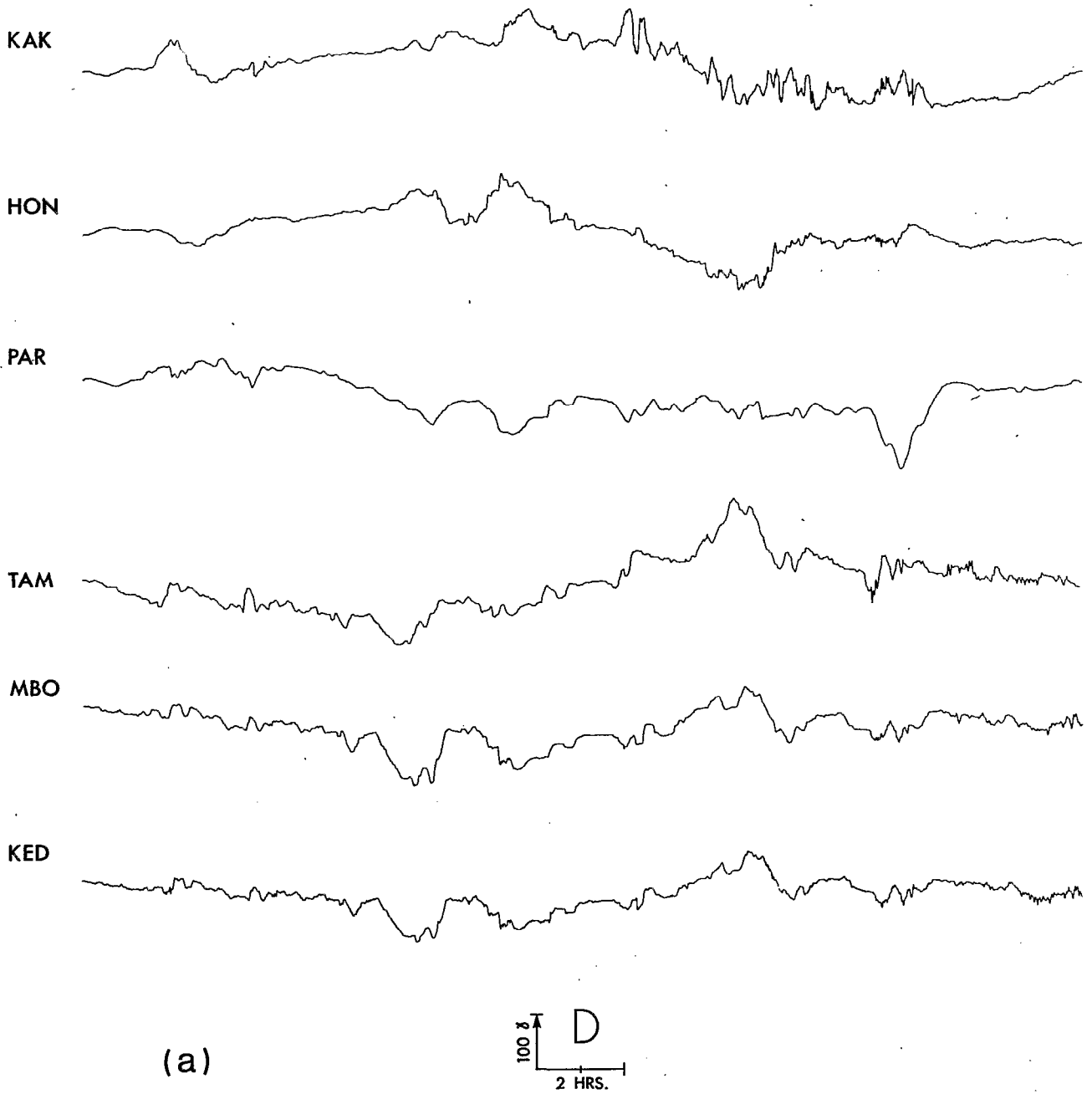
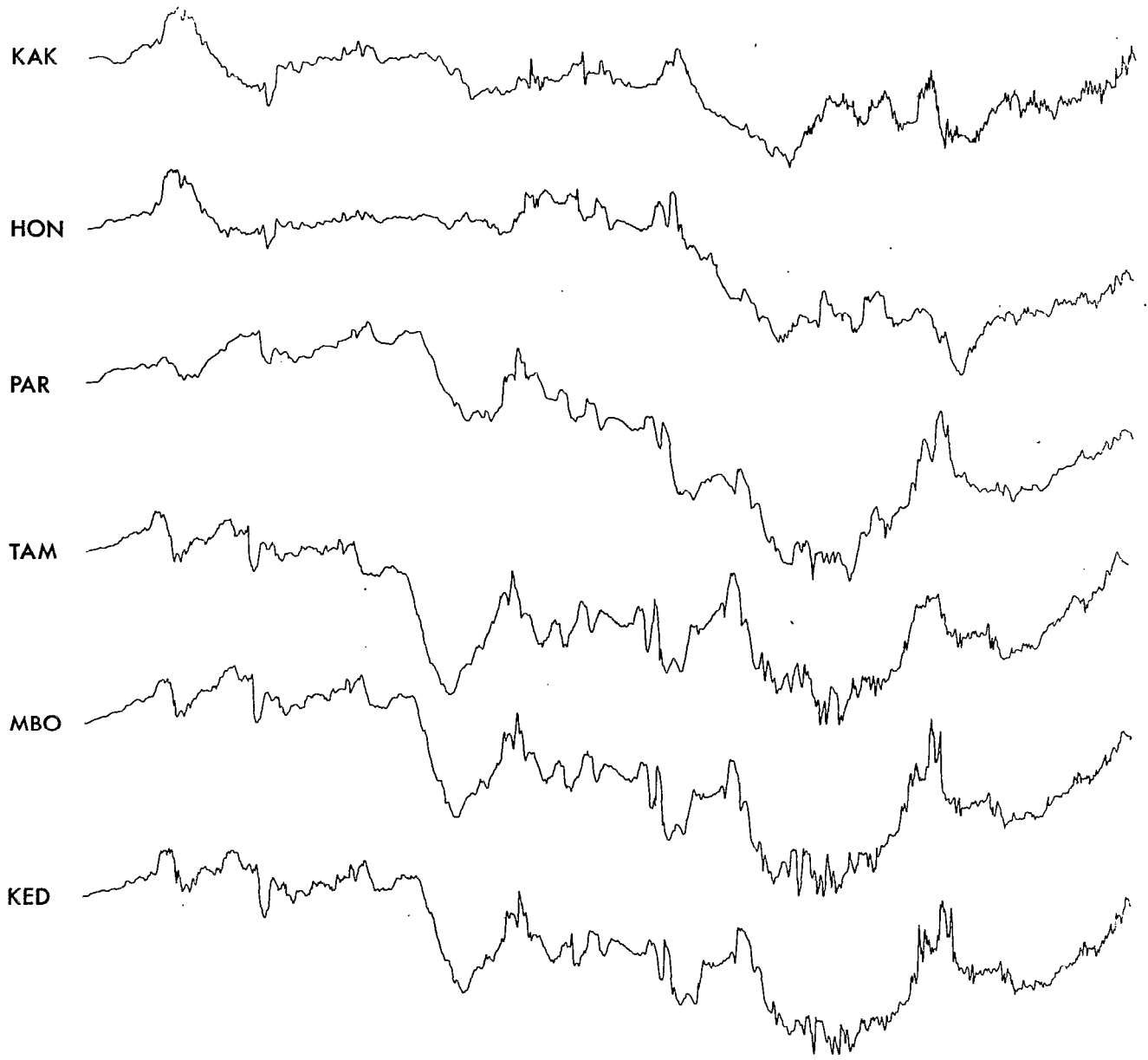


FIG. 2a. — Enregistrements de la composante magnétique D du 31.3.1960 au 1.4.1960.



(b)

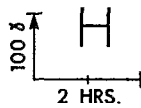


FIG. 2b. — Enregistrements de la composante magnétique H du 31.3.1960 au 1.4.1960 aux stations de M'Bour, Kedougou, Paramaribo, Tamanrasset, Honolulu, Kakioka.

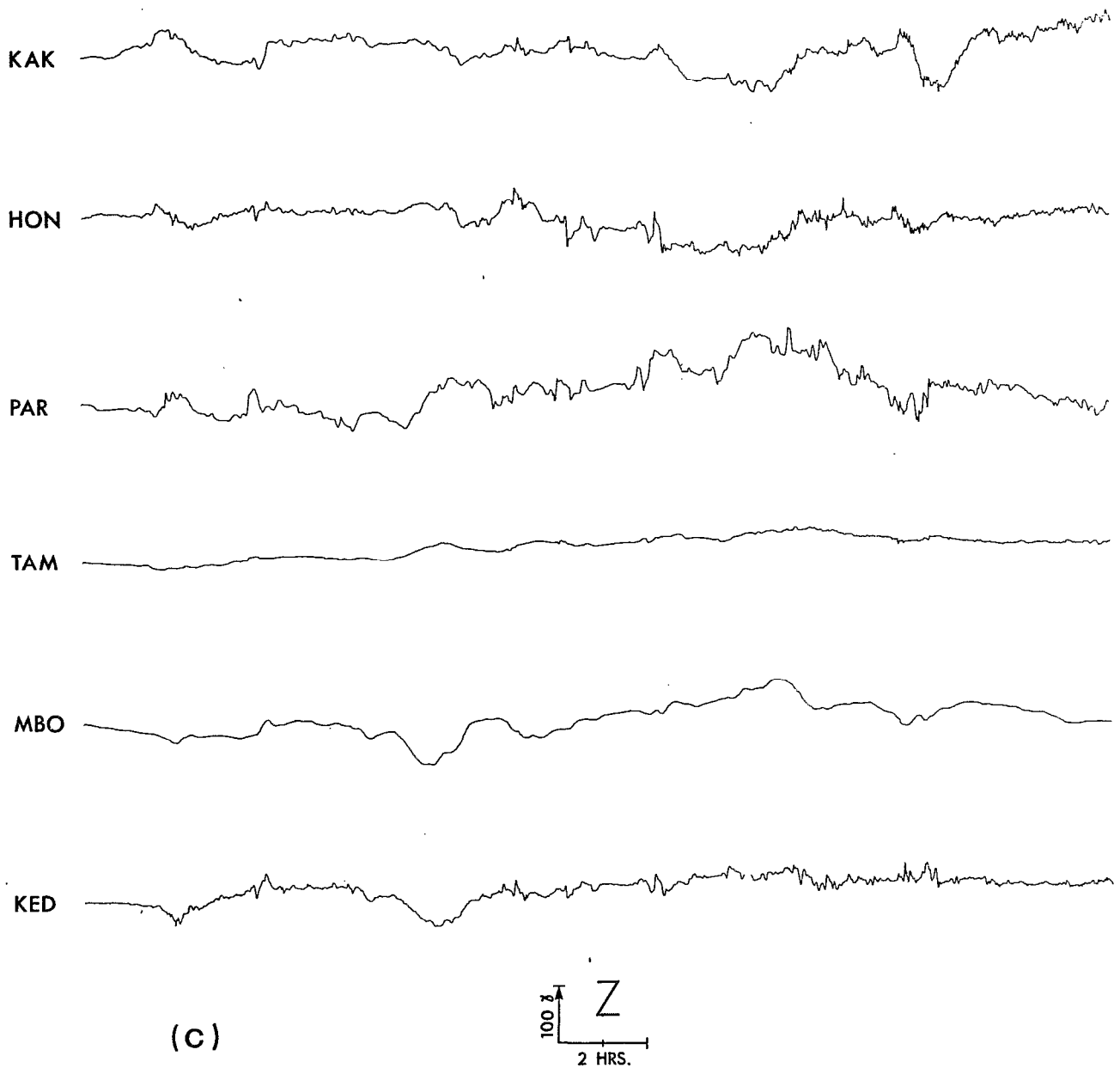


FIG. 2c. — Enregistrements de la composante magnétique Z du 31.3.1960 au 1.4.1960 aux stations de M'Bour, Kedougou, Paramaribo, Tamanrasset, Honolulu, Kakioka.

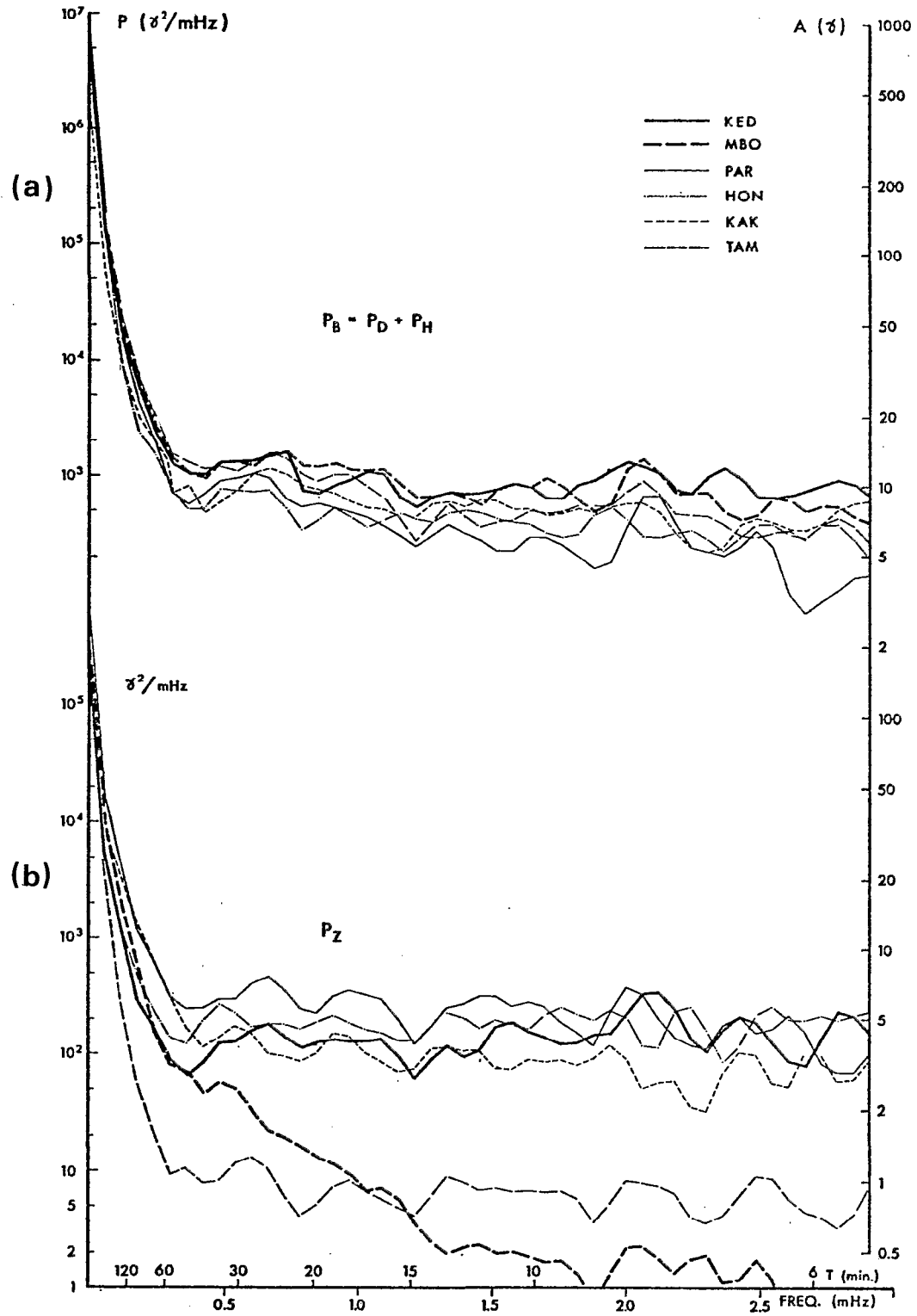


FIG. 3a, 3b. — Puissances spectrales des variations des composantes horizontales ΔB , ($\Delta B = \sqrt{\Delta H^2 + D^2}$) et verticales ΔZ des enregistrements des figures 2.

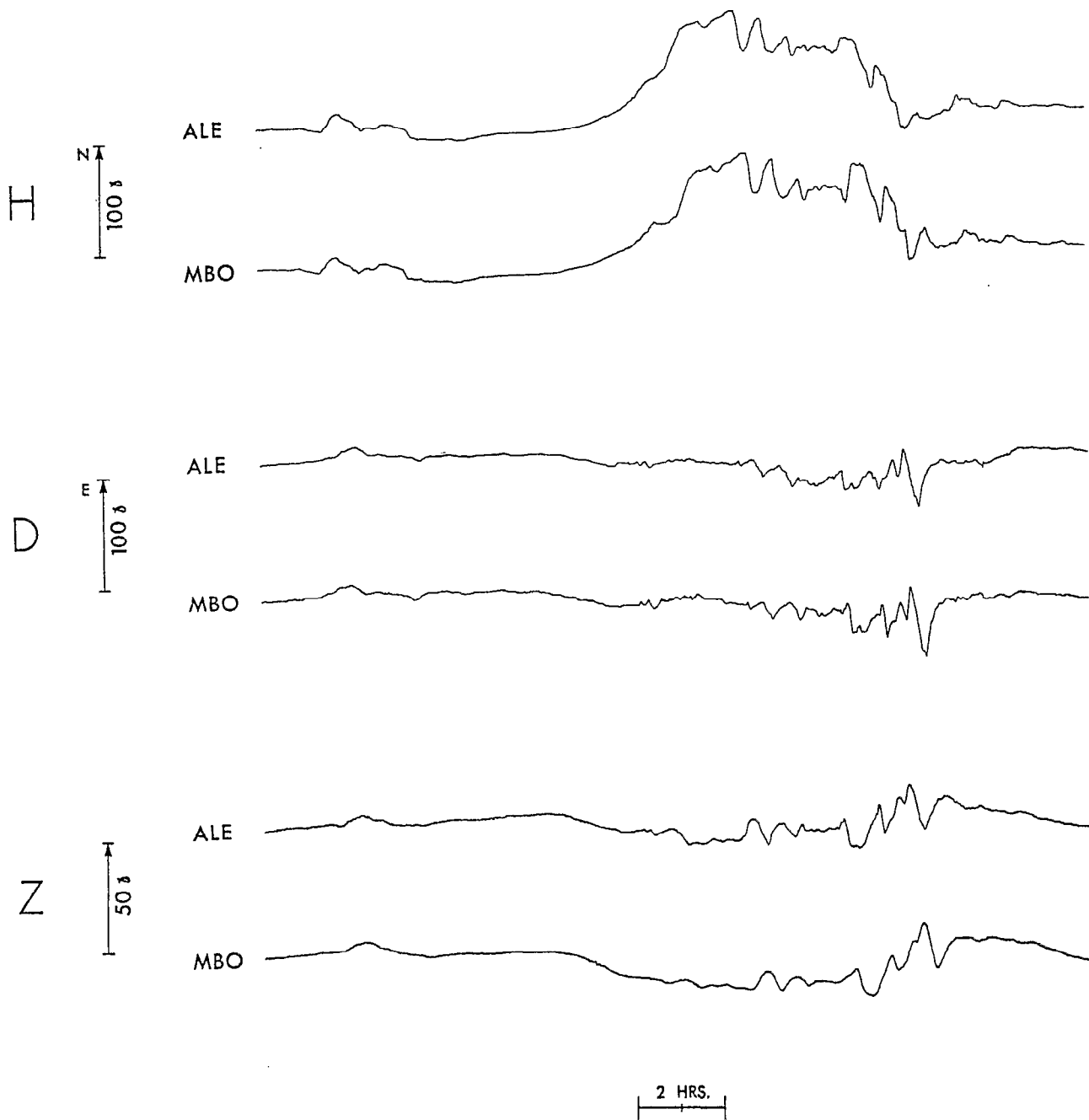


FIG. 4. — Enregistrements simultanés de M'bour et d'Aleg.

(b) Moudjeria et M'Bout (fig. 8) présentent une faible réduction des amplitudes de la composante H, ainsi qu'Aleg (fig. 4). Le caractère apparemment régional de cette atténuation pour les stations du Nord ne s'explique pas. Un effet de source est fort peu probable pour H à cette latitude, et on devrait observer une augmentation des amplitudes vers le Nord : à M'bour l'on n'observe pas d'accroissement anormal pour H, car si cet accroissement existait il serait vérifié par comparaison avec les autres stations.

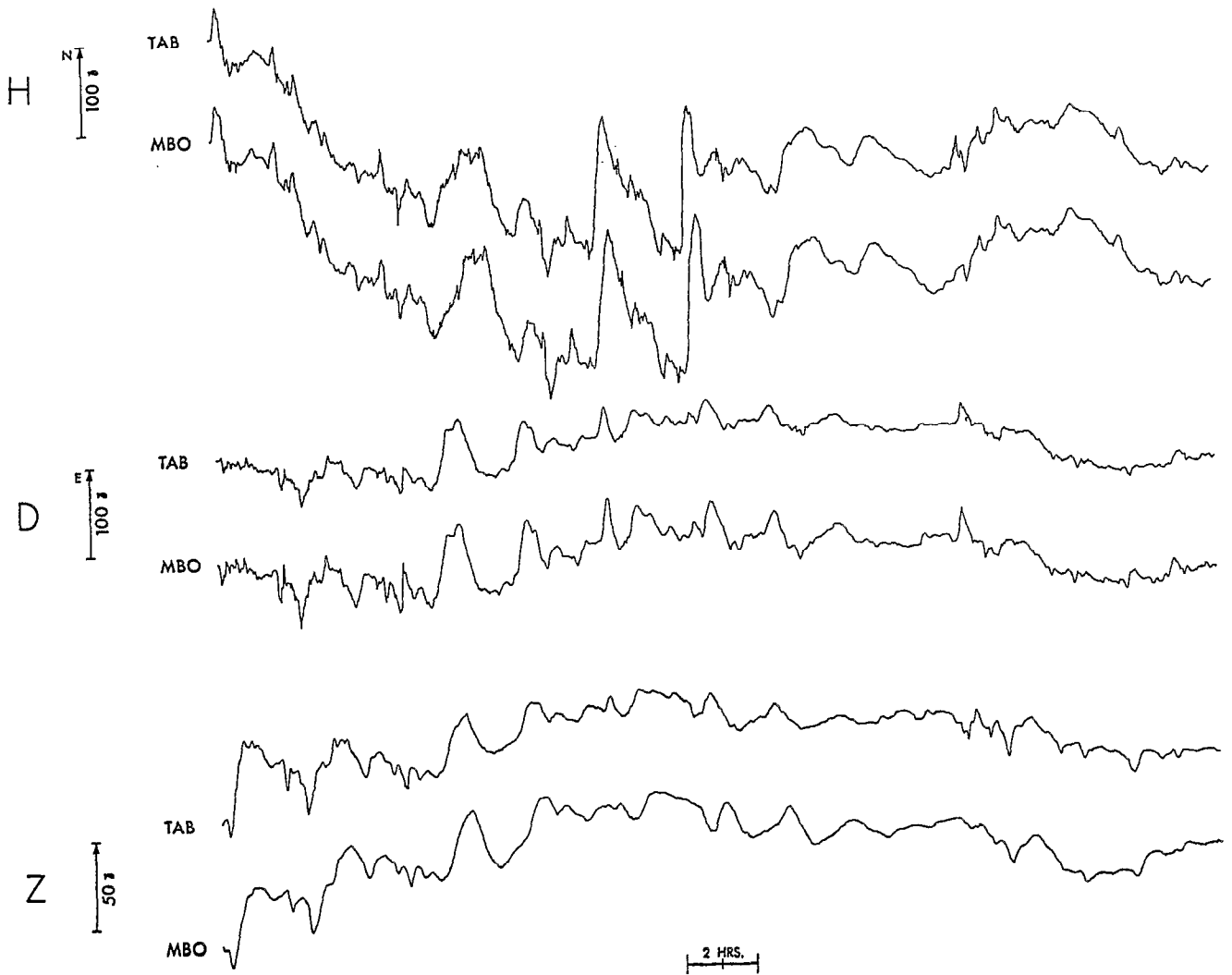


FIG. 5. — Enregistrements simultanés de M'Bour et de Tambacounda.

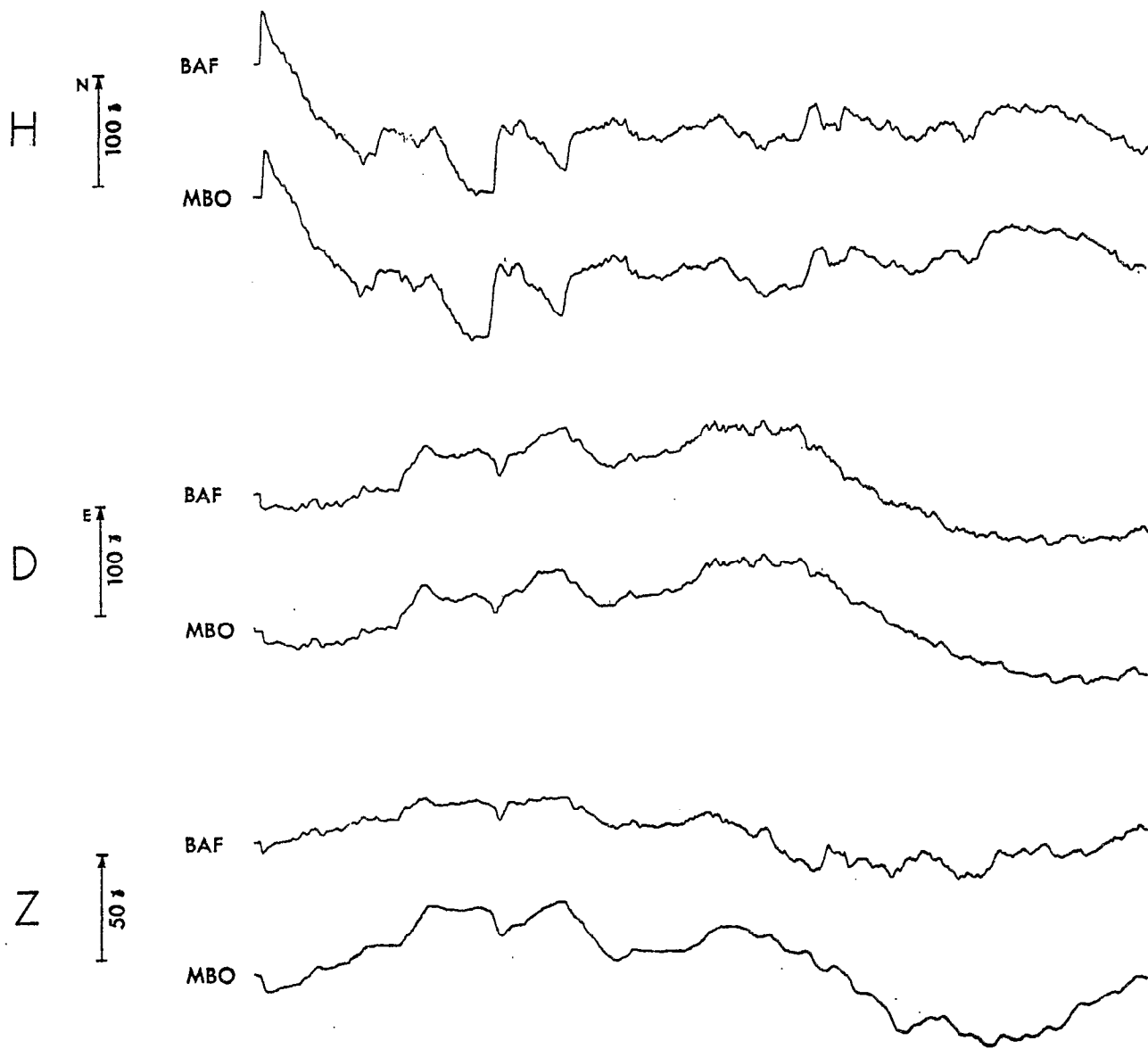


FIG. 6. — Enregistrements simultanés de M'Bour et de Bafoulabe.

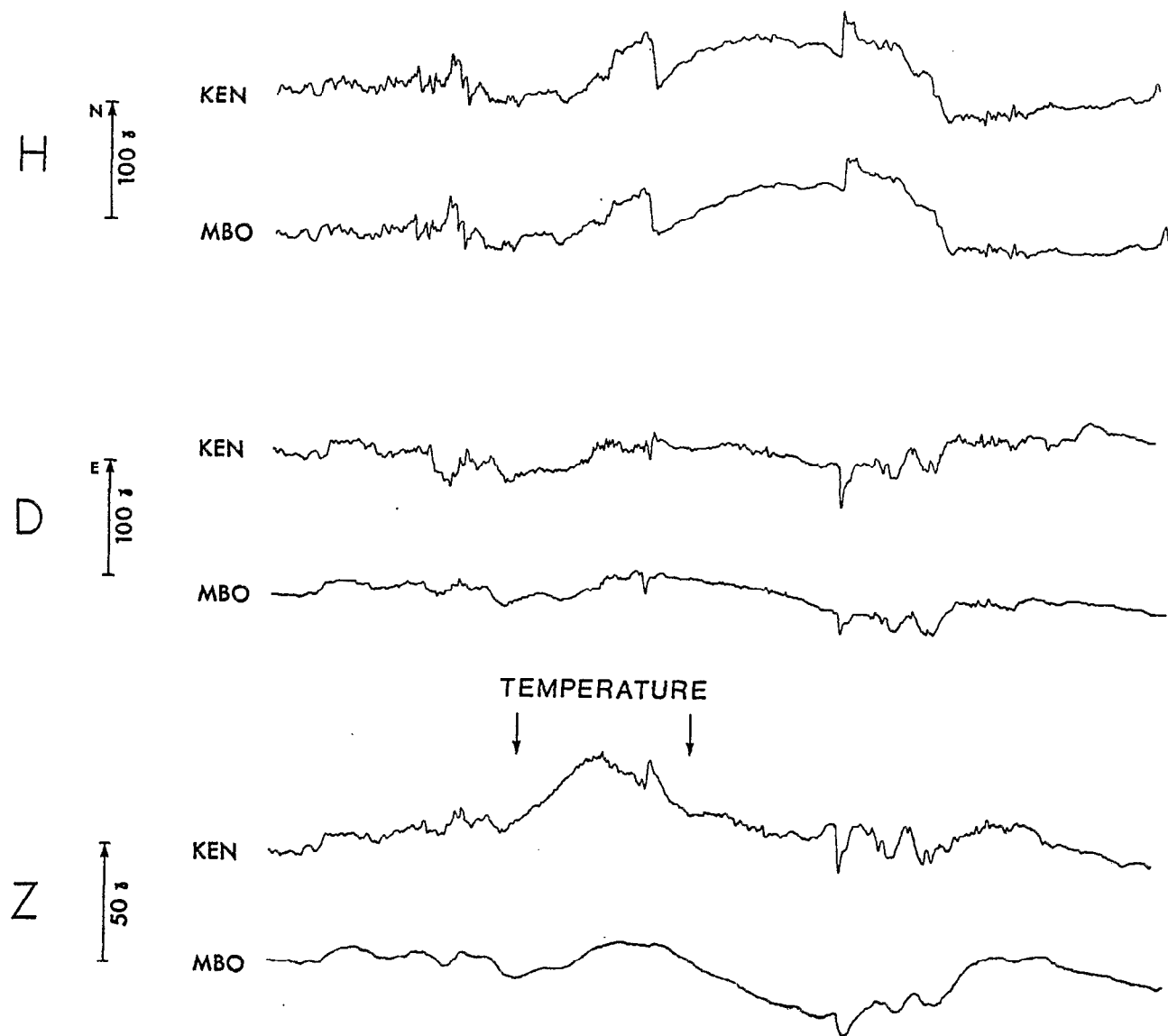


FIG. 7. — Enregistrements simultanés de M'Bour et de Kenieba.

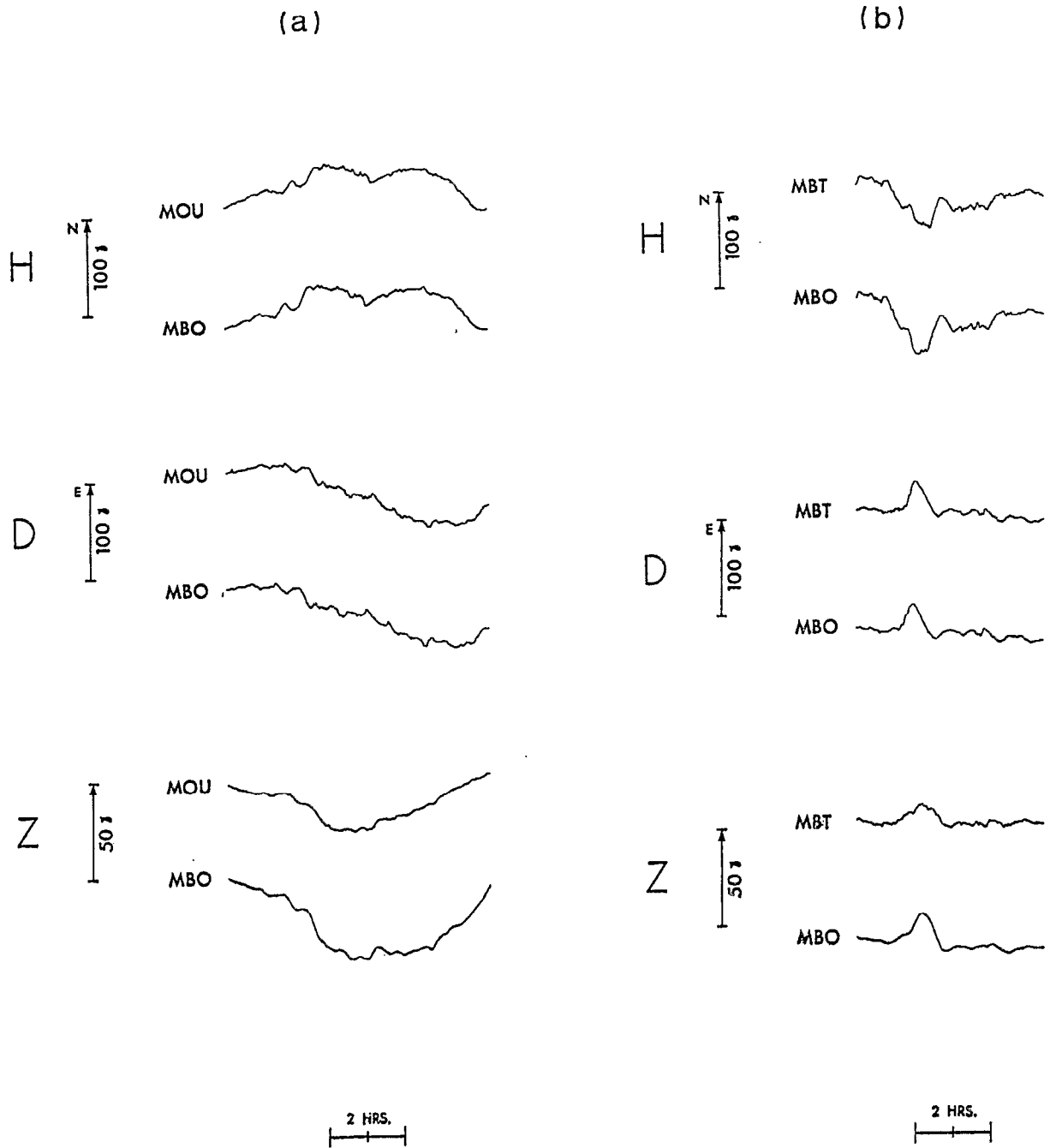


FIG. 8. — Enregistrements simultanés de M'bour et Moudjeria d'une part, de M'bour et M'bour d'autre part.

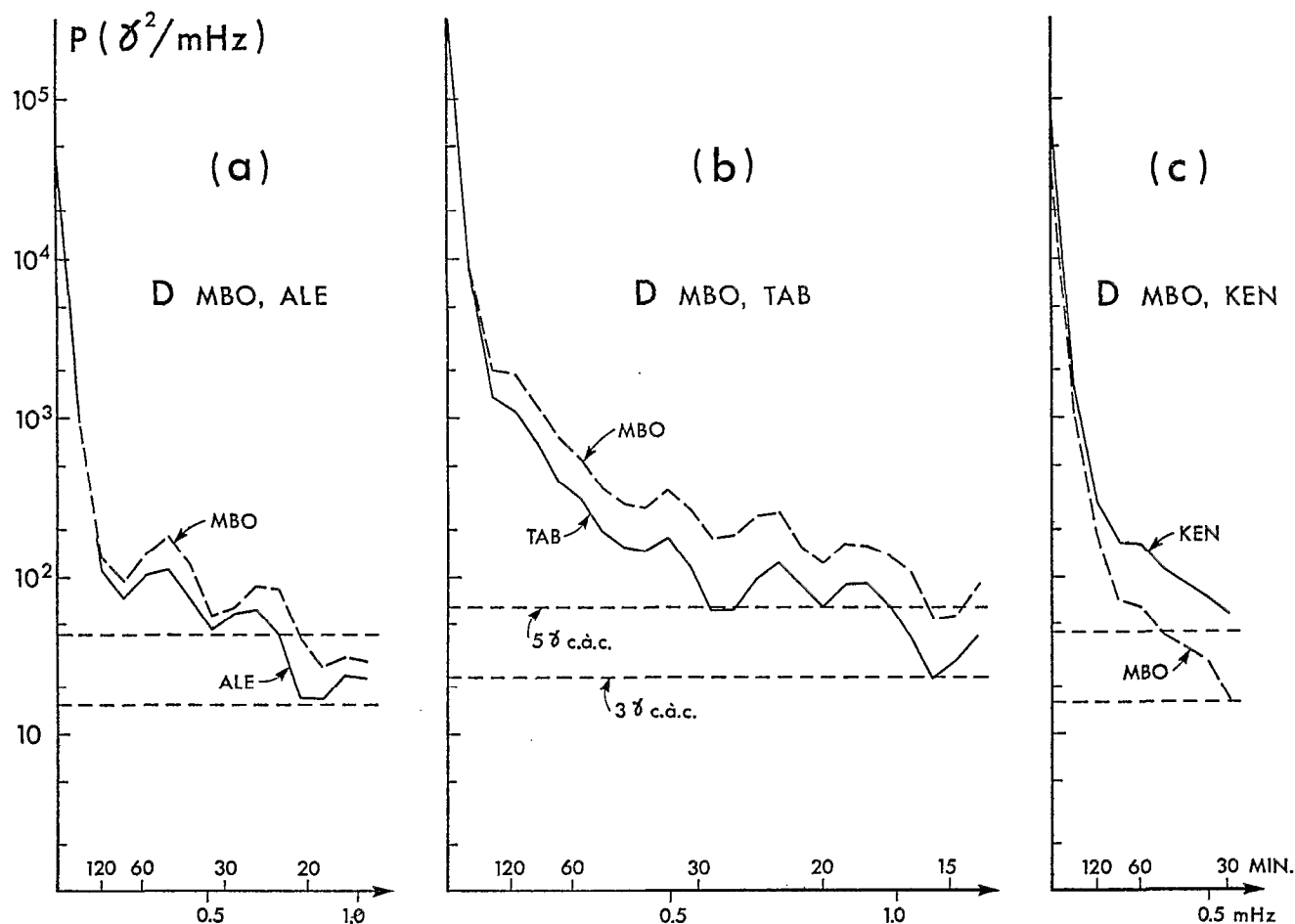


FIG. 9. — Puissances spectrales des variations de la composante D à la station de M'Bour et aux stations d'Aleg, Tambacounda et Kenieba.

La figure 9 illustre ces remarques. La réduction d'amplitude des variations de D est pratiquement constante, par rapport à M'Bour : 30 à 40 % à Tambacounda, 15 à 20 % à Aleg. La valeur d'échelle de Kenieba est certainement fautive (fig. 9c).

Quant aux amplitudes de la composante Z, elles donnent lieu aux observations suivantes :

(a) Aux 2 stations situées le plus au Sud, Kedougou (fig. 2c) et Kenieba (fig. 7) ainsi qu'à Bafoulabe, les amplitudes des variations de longue période (supérieure à 1 heure) sont inférieures à celles de M'Bour, alors que les variations de courte période sont d'un niveau nettement inférieur à M'Bour.

Ces stations, situées sur le craton, sont probablement représentatives de la « norme continentale ». Le site de M'Bour est doublement anormal, du fait de l'atténuation des variations de courte période de la composante Z et du fait de l'accroissement des variations de longue période dû certainement à un effet de bord de mer. Remarquons que la corrélation aux longues périodes des composantes D et Z est vérifiée également pour les stations de l'intérieur.

(b) Les observations sont moins nettes pour les stations du groupe Nord : si Moudjeria et M'Bout montrent un affaiblissement assez remarquable des variations de longue période par rapport à M'Bour, l'on ne peut faire aucune constatation sur les variations de courte période.

Cet examen rapide des enregistrements nous permet de constater une décroissance des variations de H vers le Nord et une décroissance des variations de D aux stations de la bordure du bassin sédimentaire; mais l'observation principale est celle des accroissements pour les courtes périodes, et des atténuations pour les longues périodes, des variations de Z entre les stations continentales et la station côtière de M'Bour. Dans ce qui suit nous étudierons de façon quantitative le rapport $Z_{station}/Z_{M'Bour}$, à la place du rapport classique $Z/B_{station}/Z/B_{base}$.

5. Analyse spectrale de la composante verticale

L'analyse spectrale des variations ΔZ confirme les observations visuelles. Les enregistrements ont été digitalisés à l'observatoire de Victoria, avec un pas de 45 s et une résolution de 0,1 mm. Pour les cinq stations de Kedougou, Tambacounda, Kenieba et Bafoulabè, nous avons obtenu entre 1.600 et 2.400 points, un peu moins pour M'Bout et Moudjeria.

Les spectres de puissance sont représentés sur la fig. 10. Notons que les données M'Bout et Moudjeria ont été traitées sur une largeur de bande plus faible. Sur chaque graphique les lignes horizontales correspondent aux amplitudes de 2, 3 et 5 gammas crête à crête. Des amplitudes de 2 γ doivent être considérées comme la limite inférieure d'une étude quantitative. Nous devons nous limiter à l'étude des couples M'Bour-Kedougou, M'Bour-Tambacounda, pour lesquels le niveau d'énergie est suffisant, à M'Bour, l'indice K_p est de l'ordre de 8-9, le niveau de 2 γ crête à crête est atteint pour des périodes de l'ordre de 20 mn.

Les observations visuelles précédemment décrites sont bien confirmées : d'une part les variations de Z aux longues périodes sont plus grandes à M'Bour qu'aux stations temporaires (excepté à Kenieba où l'effet de température a entraîné la création d'une « fausse baie »); d'autre part les variations de courtes périodes sont nettement plus grandes aux stations de l'intérieur qu'à M'Bour. La séparation de ces deux bandes de périodes se situe vers 60 mn.

Les rapports des spectres de puissance $PZ(MBO)/PZ(station)$ sont représentés en fig. 11. Le catalogue des modèles structuraux de « résistivité » déjà constitué par B. CANER nous permet de passer directement à l'interprétation quantitative. Quelques remarques s'imposent auparavant.

(a) L'atténuation observée des périodes longues est maximale à Bafoulabe, station la plus continentale, ce qui pourrait correspondre à l'atténuation maximale de l'« effet de bord de mer ».

(b) Pour les périodes moyennes (entre 30 et 60 mn) il ne paraît pas exister de différences significatives entre les différentes stations.

(c) Enfin pour les courtes périodes (< 30 mn) il semble que les variations de Z soient plus prononcées à Kenieba, Bafoulabe et Kedougou (stations du craton) qu'à Tambacounda et Aleg (station de la zone mobile). Des considérations sur les différences de résistivité à faible profondeur pourraient expliquer ces différences mais il n'est pas possible d'établir des modèles pour l'ensemble des stations. Nous devons nous limiter aux enregistrements de Kedougou et de Tambacounda, pour lesquels le niveau d'énergie est suffisant à la station de référence.

6. Interprétation quantitative

La technique d'interprétation, basée sur les études théoriques de PRICE (1962) et WAIT (1962), a été développée par WHITHAM (1963), SRIVASTAVA et JACOBS (1964).

L'équation de base s'écrit :

$$\frac{Z}{H} = \frac{P}{\partial P / \partial x} \cdot \nu^2 \cdot f(F, \nu, h, \rho)$$

P : fonction du potentiel de la source;

ν : nombre d'onde spatial, $\nu = 2\pi/\lambda$, λ étant la mesure de l'échelle horizontale du champ de la source;

$f(F, \nu, h, \rho)$: fonction explicite de la fréquence F, du nombre d'onde spatial ν , des profondeurs h et des résistivités ρ des terrains sous-jacents.

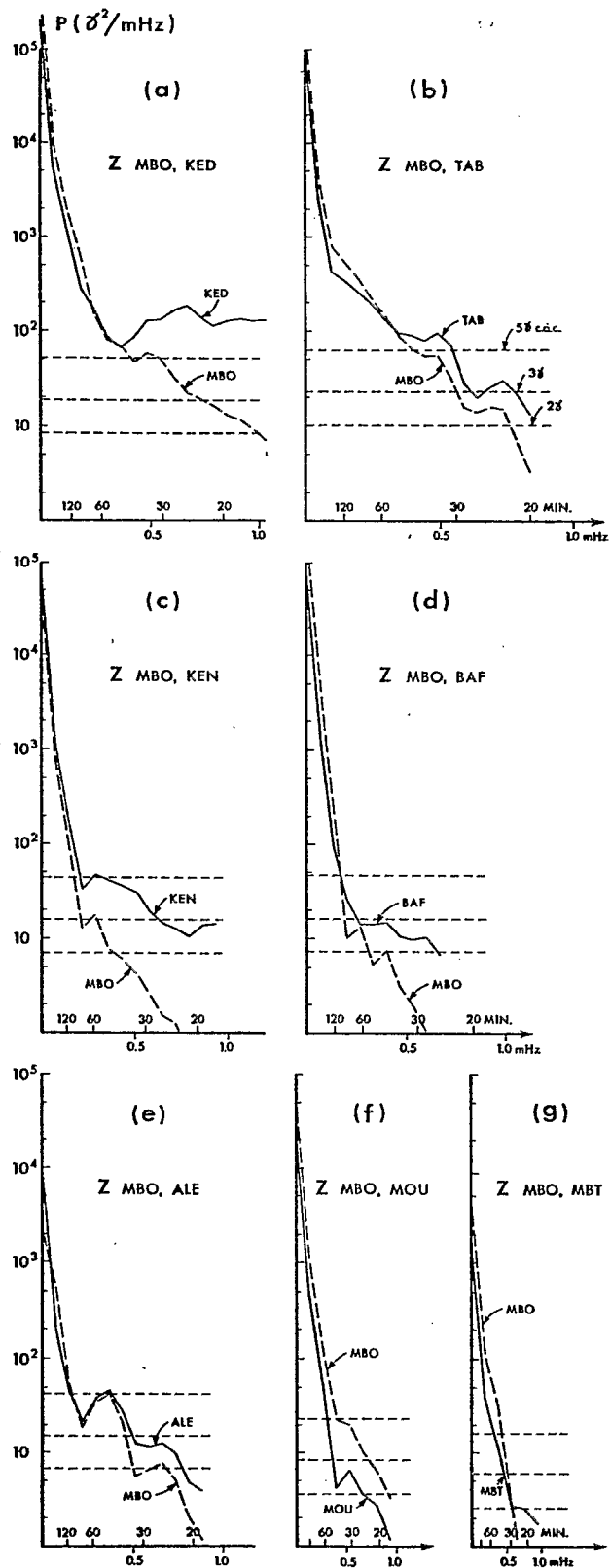


FIG. 10. — Puissances spectrales des variations de la composante Z à la station de M'Bour et aux stations de Kedougou, Tambacounda, Kenieba, Bafoulabe, Aleg, Moudjeria et M'Bour.

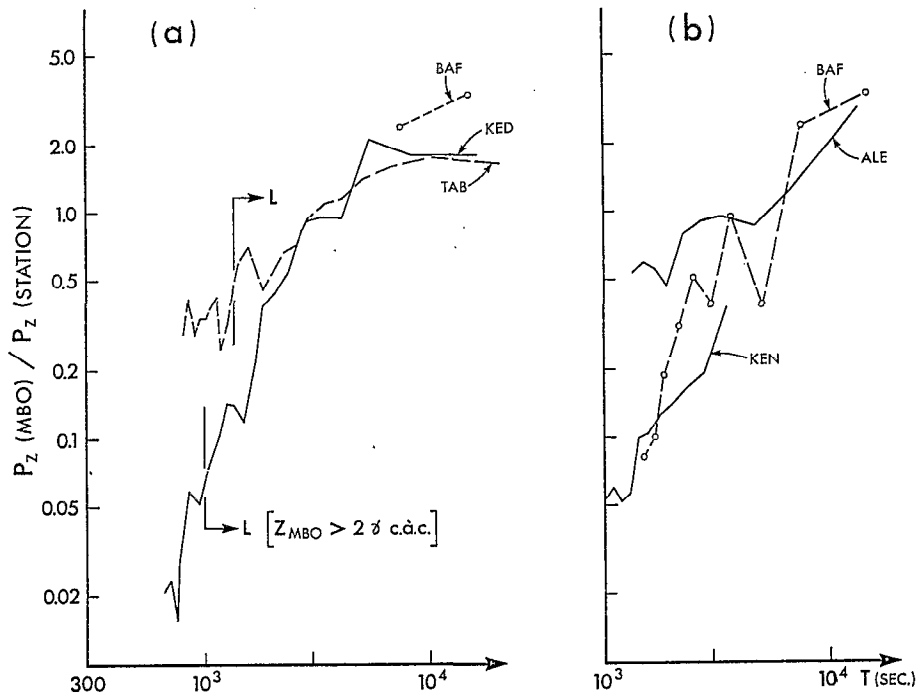


FIG. 11a, 11b. — Rapport des puissances spectrales (PZ) de M'Bour et des stations Bafoulabe, Kedougou et Tambacounda d'une part (a), de M'Bour et des stations de Bafoulabe, Aleg et Kenieba d'autre part (b).

Dans le cas d'un réseau étendu de stations P et ν peuvent être évalués. Il n'en est pas de même dans le cas d'un simple profil et a fortiori dans notre étude où nous ne disposons que de deux stations simultanées. Si cependant l'une des deux stations a une structure connue, l'interprétation est possible pour l'autre station (WHITHAM, 1963; CANER *et al.*, 1967).

Les termes ν^2 , P, $\partial P / \partial x$ disparaissent en formant le rapport :

$$\frac{(Z/H)_{\text{station 1}}}{(Z/H)_{\text{station 2}}} = \frac{f(F, \nu, h, \rho)_{\text{station 1}}}{f(F, \nu, h, \rho)_{\text{station 2}}} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

En fait l'on se sert plutôt du rapport $M = Q_1^2 / Q_2^2$, du fait que les analyses classiques utilisent les puissances spectrales.

Cette technique n'est applicable qu'aux structures tabulaires; c'est dire que toutes les composantes anormales — dépendant de l'azimut — doivent être éliminées des données. Nous savons qu'à M'Bour le module du vecteur de Parkinson est compris entre 0,42 et 0,57 pour des périodes comprises entre 20 et 40 mn, pour un azimut de 265° environ (voir paragr. 2). Pour des périodes supérieures à 1 h nous trouvons 0,52 et 261°.

Pour déterminer la correction nécessaire dans les rapports M'Bour - Tambacounda, les vecteurs d'induction ont été calculés pour des variations simultanées de longues périodes. Les diagrammes d'induction correspondant à ces calculs sont représentés en figure 12. Ces diagrammes sont la projection Mercator de la représentation de Parkinson : en échelle verticale on porte les angles entre le vecteur total et sa composante horizontale α ($\alpha = \arctg \Delta Z / \Delta B$), avec $\Delta B = \sqrt{(\Delta H)^2 + (\Delta D)^2}$; sur l'échelle horizontale sont portés les azimuts de ΔB . Les courbes tracées sont les fonctions sinus déterminées à partir des données par la méthode des moindres carrés. La direction du vecteur de Parkinson est celle pour laquelle α est minimum, son module est le sinus de $|\alpha \text{ minimum}|$.

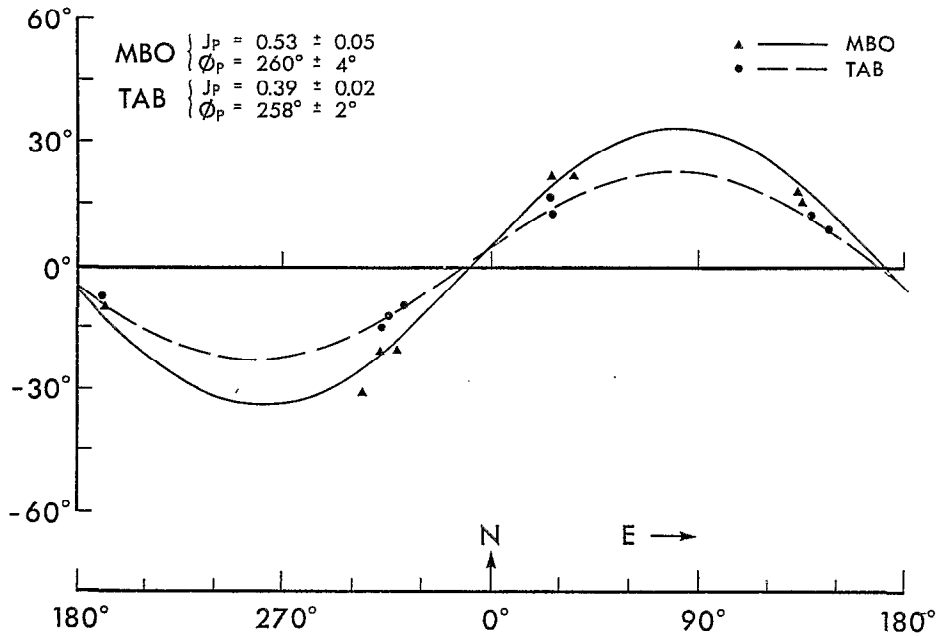


FIG. 12. — Diagrammes d'induction des stations de M'Bour et de Tambacounda.

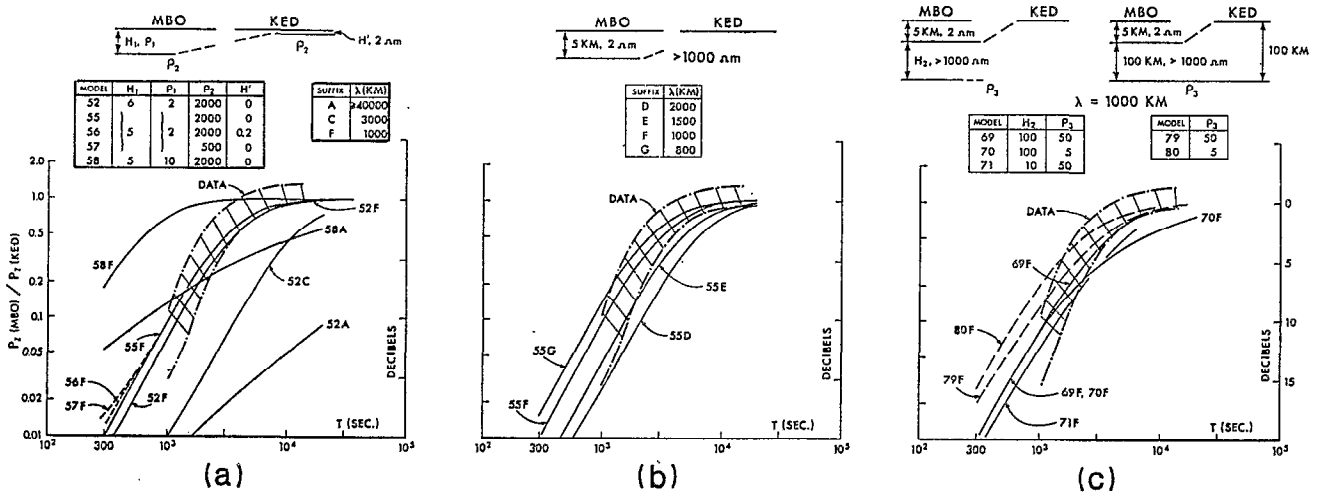


FIG. 13a, 13b, 13c. — Rapports corrigés des puissances spectrales (PZ) de M'Bour et Kedougou et rapports calculés d'après différents modèles.

Quoique nous n'ayons obtenu que 8 points correspondant à des phénomènes simultanés pour chaque courbe, la comparaison des résultats avec ceux obtenus à partir d'un très grand nombre de données pour M'Bour montre bien la validité de ces déterminations : $0,53 \pm 0,05$ pour le module au lieu de $0,52 \pm 0,02$, $260^\circ \pm 4^\circ$ pour l'azimut au lieu de $261^\circ \pm 2^\circ$.

Les directions obtenues pour M'Bour et Tambacounda sont très voisines : $260^\circ \pm 4^\circ$ et $258^\circ \pm 2^\circ$, confirmant que les vecteurs d'induction sont de même direction sur de grandes distances (300 - 400 km), tout au moins pour les longues périodes.

La correction à apporter à ΔZ sera pratiquement indépendante de l'azimut. Nous avons en effet, hormis dans les secteurs $0^\circ \pm 5^\circ$ (ΔZ minimum) un rapport constant ($\Delta Z / \Delta B(\text{MBO})$) / ($\Delta Z / \Delta B(\text{TAB})$).

Ce rapport est égal à $1,41 \pm 4\%$ avec un maximum de $1,47 = \text{tg } 32^\circ / \text{tg } 23^\circ$ pour ΔZ maximum. L'accroissement anormal calculé du rapport des puissances spectrales ($P_Z(\text{MBO}) / P_Z(\text{TAB})$) correspond au carré du rapport des tangentes soit $2,0 \pm 8\%$ (nous prendrons en fait 10%).

On a appliqué ce facteur de correction aux données de la figure 11a (Tambacounda), ce qui conduit aux graphiques de la figure 14.

Un facteur de correction calculé de la même manière, mais avec moins de précision, a été appliqué aux données de Kedougou (fig. 11 et 13).

Pour l'interprétation quantitative nous supposons qu'aucune couche à conductivité faible, à l'exception des sédiments de surface, n'existe à Kedougou, station qui doit, comme on l'a déjà dit, représenter la « norme continentale ».

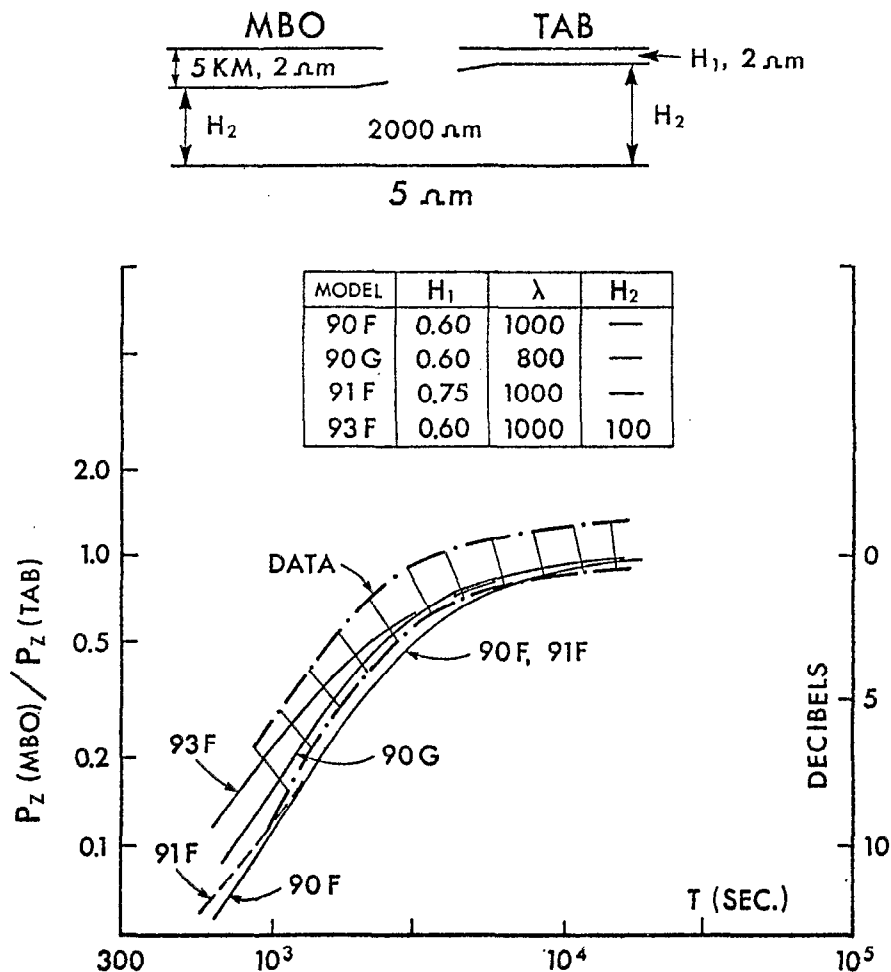


FIG. 14. — Rapports corrigés des puissances spectrales (PZ) de M'Bour et de Tambacounda et rapports calculés d'après différents modèles.

6.1. MODÈLES POUR M'BOUR - KEDOUGOU (DETERMINATION DE LA STRUCTURE AU-DESSOUS DE M'BOUR)

Les rapports $PZ(MBO)/PZ(KED)$, corrigés, sont représentés en fig. 13 par une bande hachurée dont la largeur correspond à l'erreur estimée.

Nous connaissons, grâce à des forages et à des sondages électriques (Direction Fédérale des Mines, 1956-57), les paramètres du bassin sédimentaire du site de M'Bour : épaisseur 5 à 6 km, résistivité 2-3 ohm.m.

Différents modèles (5-6 km, 2-10 ohm.m) ont été calculés pour plusieurs valeurs de λ (fig. 13a : A : $\lambda = 40.000$ km, C : $\lambda = 3.000$ km, F : $\lambda = 1.000$ km). Seuls les modèles F peuvent convenir et parmi ceux-ci les modèles à faible résistivité sont les meilleurs : 52 F (6 km, 2 ohm.m) 55 F (5 km, 20 ohm.m).

Les couches conductrices dont on peut supposer l'existence à Kedougou en surface ne modifient pas les rapports des spectres dans la gamme étudiée : même avec une couche de 200 m à 2 ohm.m il n'y a aucun effet sur des périodes supérieures à 500 secondes : modèle 56F.

La résistivité du socle résistant peut varier dans de larges limites. Même en supposant une résistivité de 500 ohm.m il n'y a aucune modification sur des périodes supérieures à 500 secondes : modèle 57F.

La figure 13b montre qu'aucun accord satisfaisant ne peut être obtenu pour des « longueurs d'onde » comprises entre 1.000 et 3.000 km : modèle 55D et 55E).

Pour les précédents modèles on a supposé que le socle résistant s'étendait à très grande profondeur. Or FOURNIER et METZGER (1969) estiment que le toit d'une couche modérément conductrice (50 ohm.m) se situe à une profondeur de 100 km, au site de M'Bour. Le modèle 69F (fig. 13a) illustre l'effet de l'addition d'une telle couche au modèle 55F. L'écart entre ces modèles n'est pas significatif. Si l'on suppose un terrain beaucoup plus conducteur (5 ohm.m : modèle 70F), le modèle n'est pas du tout valable, à moins de considérer des longueurs d'onde extrêmement faibles et donc hautement improbables.

Si l'on place le toit de la couche moyennement conductrice à l'intérieur de la croûte (10 km : modèle 71F), le modèle est franchement mauvais. En conclusion l'existence de cette couche modérément conductrice est possible à M'Bour, mais ne peut être prouvée par suite de l'effet d'écran des terrains conducteurs de surface. Dans l'hypothèse où cette couche existerait également à Kedougou (modèle 79F et 80F), on aboutirait à un désaccord entre modèle et courbe expérimentale, qui cependant pourrait être atténué en augmentant λ jusqu'à environ 3.000 km.

6.2. MODÈLES POUR TAMBACOUNDA ET M'BOUR (DETERMINATION DE LA STRUCTURE EN-DESSOUS DE TAMBACOUNDA)

Une première constatation s'impose, à savoir que la faible épaisseur de sédiments conducteurs à Tambacounda, connue d'après forage : 600 m (dont seulement 300 m entre 2 et 7 ohm.m) ne peut expliquer la courbe expérimentale. Pour améliorer l'accord il faudrait supposer soit une longueur d'onde plus faible, ce qui est peu vraisemblable, soit une couche profonde conductrice illimitée vers le bas (5 ohm.m, 100 km, 93F).

6.3. MODÈLES POUR TAMBACOUNDA ET KEDOUGOU (DETERMINATION DE LA STRUCTURE AU-DESSOUS DE TAMBACOUNDA)

Les rapports $PZ(TAB)/PZ(KED)$, sont représentés dans la fig. 15. Notons qu'ici la bande d'incertitude n'est pas figurée mais il faut garder à l'esprit qu'elle existe et qu'elle est même plus large que précédemment, ces rapports étant établis de façon indirecte :

$$\frac{PZ(TAB)}{PZ(MBO)} \bigg/ \frac{PZ(MBO)}{PZ(KED)}$$

Dans la figure 15a, des modèles ont été calculés pour des « longueurs d'onde » différentes, dans l'hypothèse d'un terrain conducteur (2 ohm.m) de 500 m d'épaisseur au-dessous de Tambacounda, terrain conducteur inexistant à Kedougou. Aucun accord n'est possible, sauf aux périodes très longues pour des valeurs de λ de 2.000 ou 3.000 km (modèles 103C, 103D). Il faut donc envisager l'hypothèse de terrains conducteurs en profondeur. Ces terrains ne peuvent exister à la foi au-dessous de Kedougou et de Tambacounda, ainsi que le montre le modèle 106D.

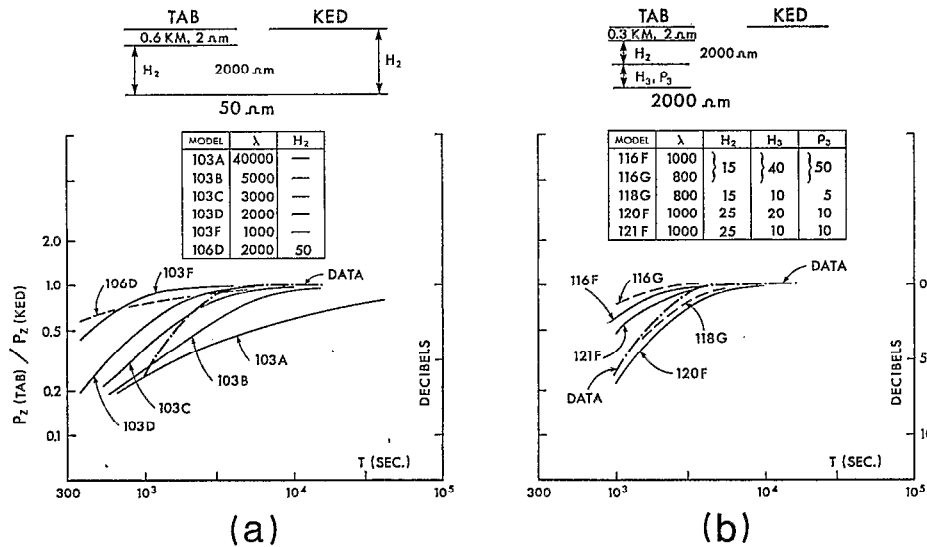


FIG. 15a, 15b. — Rapport des puissances spectrales (PZ) de Kedougou et Tambacounda après normalisation par rapport à M'Bour et rapports calculés d'après différents modèles.

Dans l'hypothèse d'un terrain conducteur profond, uniquement sous Tambacounda, on obtient les modèles de la figure 15b. Les valeurs des terrains de surface à Tambacounda sont plus proches que précédemment des mesures obtenues par sondages électriques : 0,3 km à 2 ohm.m ; les rapports ne varient que de 5 % à une période de 1.000 secondes. Les modèles supposant une couche conductrice à grande profondeur n'ont pas été représentés ici, aucun ne donne le moindre accord avec les données expérimentales.

En fait des couches modérément conductrices d'épaisseur moyenne peuvent conduire à un assez bon accord : couches situées à 15-25 km de profondeur et de résistivité comprise entre 5 et 25 ohm.m, d'épaisseur égale à 10 km ou moins, pour une « longueur d'onde » de 1.000 km. Pour une « longueur d'onde » de 2.000 km, il pourrait exister des couches moins conductrices et plus profondes : 40 à 50 ohm.m pour une profondeur de 30 à 40 km. Il n'est pas possible de choisir entre ces types de structure, du fait que la normalisation par rapport à M'Bour fait perdre les informations se rapportant aux variations de courtes périodes.

7. Conclusions

A M'Bour, il est possible d'obtenir un accord acceptable entre les données expérimentales et les modèles pour des couches conductrices en surface et dont l'épaisseur est de l'ordre de 5 à 7 km et la résistivité de 2 ohm.m (ou des combinaisons équivalentes d'épaisseur et de résistivité), pour des « longueurs d'onde » de l'ordre de 800 à 2.000 km. Bien que des indications très nettes existent, que cet accord serait le meilleur pour une couche d'épaisseur de 6 km environ à 2 ohm.m, les données de base ne sont pas suffisamment précises pour obtenir une résolution nette d'un tel détail. Retenons que la couche conductrice doit avoir 5 km ou plus d'épaisseur.

La valeur de la résistivité du socle ne peut pas être définie par nos données, mais se situe au-dessus de 500 ohm.m, sans limite supérieure. Ce manque de résolution quantitative des milieux résistants est inhérent à la plupart des modèles d'induction géomagnétique (en magnéto-tellurique comme en sondage géomagnétique), bien que ceci ne soit pas toujours explicitement constaté. Une limitation similaire existe pour les carottages électriques bien qu'elle ne soit pas non plus toujours admise.

L'existence possible des couches conductrices à des profondeurs plus grandes en-dessous de M'Bour ne peut pas être prouvée à cause de l'effet écran de l'énorme couche conductrice en surface. Cependant, si une telle

couche existe, elle serait soit profonde, soit peu conductrice. On peut estimer les valeurs suivantes : résistivité au-dessus de 25 ohm.m pour 100 km de profondeur, ou en-dessus de 100 ohm.m pour 10 km de profondeur ; mais même ces limites sont très peu sûres à cause de l'effet prépondérant du conducteur en surface à cette localité.

A Tambacounda, les paramètres connus des sédiments en surface ne peuvent pas expliquer des données expérimentales. Seule l'adjonction de couches conductrices plus profondes (croûte inférieure ou manteau supérieur) au-dessous de Tambacounda — mais non au-dessous de Kedougou — peut concilier les modèles de structure de la conductivité avec les données expérimentales.

Il n'est pas possible de déterminer les paramètres de ce conducteur plus profond à Tambacounda, à cause des données trop limitées. On peut cependant trouver des indications assez nettes de l'existence d'une couche de dimensions limitées dans la croûte inférieure ou le manteau supérieur (profondeurs possibles : 10 à 40 km, épaisseur : non définie, résistivités probables : 5 à 50 ohm.m).

On n'observe aucune indication nette quant à l'extension latérale de cette couche ; existe-t-elle en-dessous de Tambacounda et de M'Bour, ou seulement en-dessous de Tambacounda ? Cependant l'étude qualitative des données de toutes les stations conduit à penser qu'une telle couche existe réellement dans toute la région tectoniquement plus jeune et située à l'Ouest.

Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 18 mai 1978.

BIBLIOGRAPHIE

- BARSCZUS (H.G.), 1970. — Sondages géomagnétiques. Bibliographie. O.R.S.T.O.M. M'Bour, 84 p., *multigr.*
- BLACK (R.), 1967. — Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique occidentale. *Chronique des Mines*, n° 364 : 225-238.
- CANER (B.), CANNON (W.H.), LIVINGSTONE (C.E.), 1967. — Geomagnetic deep sounding and upper mantle structure in the Cordillera région of western North America. *J. Géophys. Res.* n° 72 : 6.335-6.351.
- CANER (B.), AULD (D.R.), DRAGERT (H.), CAMPFIELD (P.A.), 1971. — Geomagnetic deep sounding and crustal structure in western Canada. *J. Geophys. Res.* n° 76 : 7.181-7.201.
- FOURNIER (H.G.), METZGER (J.), 1969. — Sondage M.T. directionnel à la station géomagnétique de M'Bour (Sénégal). *C.R. Acad. Sc.* n° 269 : 297-300.
- PARKINSON (W.D.), 1959. — Direction of rapid geomagnetic fluctuations *Geophysical J.*, n° 2 : 441-449.
- PARKINSON (W.D.), 1962. — The influence of continents and oceans on geomagnetic variations. *Geophysical J.*, n° 67 : 1.907-1.918.
- PRICE (A.T.), 1962. — The theory of magnetotelluric methods when the source field is considered. *J. Geophys. Res.*, n° 67 : 1.907-1.918.
- Reconnaissance hydrologique et structurale par sondages électriques au Sénégal et en Mauritanie, 1957. — Direction Fédérale des Mines de l'A.O.F., 120 p.
- RIKITAKE (T.), 1959. — Anomaly of geomagnetic variations in Japan. *Geophysical J.*, n° 2 : 276-287.
- SCHMUCKER (U.), 1959. — Erdmagnetische Tiefensondierung in Deutschland 1957-59. Magnetogramme und erste Auswertung. *Abhandl. Akad. Wiss. in Göttingen, Math. Phys. Klasse. Beitrage zum Internationalen Geophysik Jahr.* n° 5 : 1-51.

- SRIVASTAVA (S.P.), JACOBS (J.A.), 1964. — Determination of the resistivity distribution at Meanock, Alberta, Canada, by the magneto-telluric method. *J. Geomagn. Geoelectr.*, n° 15 : 280-288.
- WAIT (J.R.), 1962. — Theory of magnetotelluric fields. *J. Res. nation. Bur. Stand.*, n° 6 : 509-541.
- WHITHAM (K.), 1963. — An anomaly in geomagnetic variations at Mould Bay in the arctic archipelago of Canada. *Geophysical J.*, n° 8 : 26-43.
- WIESE (H.), 1956. — Tiefentellurik Abhandl. Meteorol. Hydrol. Dienst. D.D.R. *Geomag. Inst. obs. Potsdam, Niemegk.*, n° 18 : 5-36.