

**SONDAGES MAGNETO - TELLURIQUES
ET GEOMAGNETIQUES EN REPUBLIQUE
DU MALI**

Rapport d'ensemble préliminaire

établi par M. RITZ

avec la collaboration de H. G. BARSCZUS

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE O.R.S.T.O.M. DE DAKAR

OCTOBRE 1973

O R S T O M M'BOUR



**SONDAGES MAGNETO - TELLURIQUES
ET GEOMAGNETIQUES EN REPUBLIQUE
DU MALI**

Rapport d'ensemble préliminaire

établi par M. RITZ

avec la collaboration de HG. BARSCZUS

Octobre 1973

ORSTOM M'BOUR

I N T R O D U C T I O N

La mission magnéto-tellurique (M.T.) a opéré en République du Mali pendant 2 ans environ. Ce travail avait pour but l'étude des structures du sous-sol et plus particulièrement du manteau supérieur, sur un profil Dakar - Niamey. Le profil avait déjà été commencé en République du Sénégal (M'Bour, Tambacounda, Saraya) et doit se poursuivre en République de Haute-Volta. Auparavant, un certain nombre d'études préliminaires avait été effectué, utilisant des enregistrements obtenus vers 1960 (ALBOUY et BARSCZUS, 1969; ALBOUY, BARSCZUS et CANER, 1972), d'autre part des essais préliminaires pour la mise au point de l'appareillage ont eu lieu (dans la région de M'Bour, à Kaédi et à Kayes).

Pour la détermination des structures de la conductivité on utilise deux méthodes géophysiques complémentaires: la méthode magnéto-tellurique (M.T.) et la méthode du sondage géomagnétique (S.G.).

La figure 1 représente l'emplacement des différentes stations, énumérées ci-après avec leurs coordonnées et dates de fonctionnement.

Station	lat.géogr.	long.geogr.	fonctionnement	lat.géom.
M'Bour	14°24'N	16°57'W	observatoire	21°16'N
Saméa	13°46'N	10°31'W	mars-avril 72	19°50'N
Kita	13°02'N	09°30'W	mai-juin 72	18°20'N
Kobala	12°38'N	08°01'W	août 72	17°30'N
Bafo	13°25'N	06°16'W	avril-mai 72	18°20'N

A cet effet, on enregistre à l'aide de capteurs magnétiques et telluriques les variations du champ électromagnétique à la surface du sol, la profondeur de pénétration de ces variations dépendant de la résistivité du sous-sol et de leur période.

Ainsi à l'aide des deux composantes horizontales du champ géomagnétique (H et D) et des deux composantes telluriques (EW et NS) correspondantes, l'on détermine, connaissant les amplitudes et les périodes de variations analysées, la résistivité d'une certaine tranche du sous-sol (méthode M.T.). Pour le sondage géomagnétique, la connaissance des deux composantes horizontales (H et D) et de la composante verticale (Z) du champ géomagnétique est suffisante pour obtenir des renseignements sur la résistivité des couches profondes.

Les avantages que peut présenter la méthode S.G. par rapport à la méthode M.T., particulièrement aux longues périodes, sont:

- appareillage moins encombrant (en particulier la longueur des lignes telluriques limite le choix du site dans le cas de la méthode M.T.),
- enregistrements pour des périodes supérieures à 10 000 secondes presque indépendantes des conditions de surface.

Cependant ces avantages de la méthode S.G. sont compensés par le fait qu'il est nécessaire d'avoir au moins une deuxième station simultanée pour permettre une interprétation quantitative des enregistrements.

La méthode S.G. offre également une excellente résolution horizontale (les discontinuités latérales de la conductivité peuvent être localisées avec précision), quant à la méthode M.T., elle possède un pouvoir de résolution verticale intéressant.

Ce rapport préliminaire sur les travaux effectués au Mali entre mars 72 et mai 73 est divisé en 6 parties.

La première partie traite de l'appareillage utilisé sur le terrain et des modifications qui y ont été apportées.

La deuxième partie donne un aperçu des méthodes utilisées pour la détermination des flèches d'induction géomagnétiques; ces flèches d'induction permettent de localiser les grandes structures du sous-sol.

La troisième partie est l'application de ces méthodes aux stations du Mali. La quatrième partie traite de la détermination des coefficients harmoniques de la variation diurne et leur utilisation dans l'étude des structures profondes du sous-sol.

Enfin la cinquième partie est une application de l'exploitation des enregistrements M.T. longues périodes, pour la détermination des structures de résistivité.

Les dernières parties donnent une conclusion générale et traitent de la bibliographie etc...

PREMIERE PARTIE

APPAREILLAGE UTILISE AU COURS DES MISSIONS M.T. AU MALI

L'appareillage utilisé pendant les travaux au Mali est celui utilisé pour les travaux au Sénégal, à un changement près: à la fin des missions au Mali (pour les stations de Bafo et de Kobala), des enregistreurs Servotraces SEFRAM à deux pistes ont remplacé les enregistreurs photographiques à la station principale (Schéma figure 2). (Voir aussi les rapports préliminaires précédents, ALBOUY et al., 1970 a,b; 1973 a,b).

1. LONGUES PERIODES.

a. Enregistrements magnétiques.

Les enregistrements magnétiques ont été obtenus à l'aide du variographe AOKANIA GV3 N° 79 dont les caractéristiques données par le constructeur sont les suivantes:

- valeurs d'échelle à l'étalonnage:

D: 2,60 γ /mm)
H: 3,21 γ /mm) \pm 0,3 γ /mm
Z: 3,02 γ /mm)

- constantes des bobines d'étalonnage:

D: 73,9 γ /mA)
H: 73,7 γ /mA) \pm 0,7 γ /mA
Z: 73,3 γ /mA)

- vitesse de déroulement du papier: 20 mm/h.

Ce variographe a subi certaines modifications concernant le moteur assurant le déroulement du papier photographique, le dispositif d'étalonnage, le circuit du thermostat et le circuit de l'horloge.

1. Déroulement du papier photographique.

Le dispositif d'origine d'enroulement du papier photographique (moteur synchrone Askania) est alimenté à partir d'un convertisseur courant continu - courant alternatif à fréquence régulée par diapason.

2. Dispositif d'étalonnage.

La résistance fixe (de 400 Ω) du circuit d'étalonnage d'origine a été remplacé par une résistance métallique de 940 Ω et de précision 0,2 %. Par méthode d'opposition, l'on fixe le courant d'étalonnage i à une valeur telle que $940 i = 1,018$ Volt (tension de la pile étalon). Le courant d'étalonnage est donc de 1,083 mA et l'étalonnage se fait à mieux que 0,5 %.

3. Circuit thermostat.

Les circuits de commande et les circuits de chauffe sont séparés. Un deuxième relais, plus puissant que le relais Askania mais commandé par celui-ci, commande un convertisseur alimentant tout le circuit de chauffe.

4. Circuit horloge.

L'un des circuits libres du relais de l'horloge a été utilisé pour donner des tops horaires sur les enregistrements telluriques.

b. Enregistrements telluriques.

Les courants telluriques ont été enregistrés à l'aide d'électrodes constituées de plaques de plomb d'une surface de 1 m², enterrées à 2 m de profondeur. La longueur des lignes utilisées est de 500 m, leur orientation a été effectuée suivant la direction de polarisation du champ tellurique, respectivement perpendiculaire à celle-ci. Les directions ont été déterminées à l'aide d'une boussole-théodolite, à $\pm 10'$ près; et les longueurs ont été mesurées à $\pm 1,5$ m près. - L'enregistreur même a été fabriqué à l'observatoire de N'Bour à partir d'une machine ronéo dont le déroulement est réglé par un convertisseur à fréquence stabilisée (vitesse de déroulement 24 mm/h).

2. MOYENNES ET COURTES PERIODES

a. Enregistrements magnétiques.

L'appareillage employé est constitué par trois magnétomètres JOLIVET auxquels divers modifications ont été apportées. Ces modifications, principalement destinées à diminuer les effets thermiques, sont les suivantes:

- Emploi d'une cellule photorésistante plus sensible (ce qui permet de raccourcir le trajet optique);
- emploi d'une ampoule à très faible consommation de courant (diminution notable de l'effet thermique);
- modification du circuit contre-réaction (utilisation d'un amplificateur opérationnel, monté à l'intérieur du magnétomètre);
- emploi de filtres (dénommés F1, F2 et F3 et centrés sur des bandes passantes de 2000, 80 et 10 secondes).

b. Enregistrements telluriques.

Les mêmes électrodes et lignes utilisées pour l'enregistrement des longues périodes ont été employés pour l'enregistrement des courtes et moyennes périodes.

D'autre part on a employé un filtrage approprié, à l'aide de filtres identiques à ceux utilisés pour l'enregistrement des composantes magnétiques, sauf pour les périodes longues pour lesquelles un filtre passe-bas a été ajouté.

L'enregistrement même a été effectuée par voie photographique aux stations de Saméa et de Kita, et par enregistreurs Servotraces SEFRAM aux stations de Kóbala et de Bafo.

3. CONCLUSION.

Pour les longues périodes, le fonctionnement des appareils ne pose pratiquement aucun problème; c'est surtout pour les courtes et moyennes périodes que les difficultés apparaissent, en particulier au niveau des capteurs magnétiques.

Les défauts des capteurs JOLIVET, dûs à leur conception et leur vétusté (la moitié a plus de 10 ans) sont en effet de plus en plus criants, à mesure que la précision générale des enregistrements s'améliore (manque de fidélité, bruit important, précision douteuse). Leur remplacement par un système de barres à noyau de mu-métal devrait se faire avant le début des missions en Haute-Volta.

Les enregistreurs Servotraces SEFRAM utilisés au cours des deux dernières missions au Mali ne sont précis et fidèles que s'ils sont parfaitement propres et entretenus. Ceci impliquera à l'avenir de les installer dans des abris en "dur" (banco), les cases en paille utilisées jusqu'à présent laissant passer trop de poussière. D'autre part, ces enregistreurs n'étant pas prévus pour travailler dans les conditions rencontrées sur le terrain en Afrique et pour l'usage que la mission H.T. en fait, il faudra prévoir un large éventail de pièces de rechange, de nombreuses défaillances étant à prévoir.

Finalement, il serait bon d'utiliser des filtres plus élaborés que ceux actuellement en service.

DEUXIEME PARTIE

DETERMINATION DE LA FLECHE D'INDUCTION

1. INTRODUCTION.

Le champ magnétique, produit par les courants électriques circulant dans l'ionosphère, variable dans le temps, crée dans le sous-sol un système de courants induits qui est fortement modifié en grandeur et en direction par les différences des résistivités en direction horizontale des structures géologiques (figure 3).

Cette modification du système des courants induits entraîne une modification locale du comportement du champ magnétique dans le voisinage de telles interfaces, qui finalement entraînent des anomalies des variations magnétiques.

Le premier pas d'un sondage géomagnétique profond (= SG) consistera donc à déceler par des moyens appropriés leurs directions générales. On définit ainsi une flèche d'induction géomagnétique qui est perpendiculaire à la structure en cause.

Si l'on dispose d'une chaîne de plusieurs variomètres enregistreurs, en fonctionnement simultané, il est relativement aisé de déceler de telles anomalies par la comparaison des enregistrements obtenus simultanément. Ne pouvant disposer que d'un seul variographe Askania pour l'étude du profil proposé, il est nécessaire, pour mettre en évidence des éventuelles anomalies des variations ma-

gnétiques, d'utiliser les méthodes graphiques de WIESE (1965) et de PARKINSON (1959) pour la détermination des flèches d'induction. Ces deux méthodes sont basées sur l'étude des corrélations existant entre la composante verticale Z et les composantes horizontales H et L du champ géomagnétique. La composante Z est la plus sensible aux modifications introduites par une discontinuité horizontale de la résistivité (ou de son inverse, la conductivité), c'est-à-dire l'anomalie.

Dans le cas d'une structure tabulaire, le sous-sol conducteur amoindrit les variations de la composante Z et renforce celles des composantes horizontales.

Pour SCHMUCKER (1964), les discontinuités horizontales de la conductivité du sous-sol équivalent à un "canal conducteur", correspondant soit à des inhomogénéités de surface, soit à des inclusions conductrices dans les couches intermédiaires peu conductrices, soit à des déformations de la couche conductrice dans le manteau supérieur.

Au niveau des discontinuités de la conductivité électrique il y a concentration des lignes de courant (c'est le canal conducteur). Ce "canal" engendre des effets magnétiques supplémentaires, en particulier sur la composante Z et qui sont perçus dans la région autour de l'anomalie.

Chacune des flèches d'induction de WIESE ou de PARKINSON dépend de la position de la station par rapport à l'anomalie et, comme il s'agit de variations de leur durée (ou "période"); il est donc possible d'obtenir pour une station donnée plusieurs flèches en fonction de la période ou moyenne de périodes de la perturbation ou d'un groupe de perturbation magnétiques.

Comme au cours d'une période d'enregistrement dans une station temporaire le nombre de perturbations est souvent réduit, une autre méthode "vectogramme" ou méthode de UNTIEDT (1964) a été élaborée. Cette méthode a l'avantage de pouvoir être utilisée même si les perturbations en forme de baie (par ex.) sont peu nombreuses: en fait, il en suffit d'une pour déterminer la flèche d'induction.

2. RAPPEL DES DIFFÉRENTES MÉTHODES.

A. Méthode de PARKINSON.

La méthode de PARKINSON (1959, 62) a été mise au point lors de l'étude des phénomènes magnétiques observés dans des observatoires situés au voisinage de la mer.

Soient (figure 4):

- $\vec{\Delta F}$ le vecteur perturbation du champ magnétique pendant l'intervalle de temps dt , vecteur dont les composantes sont ΔH , ΔD et ΔZ ;
- φ l'angle formé par la projection de $\vec{\Delta F}$ sur le plan horizontal $\vec{\Delta H\mathcal{E}}$ et le nord magnétique, $\Delta H\mathcal{E} = (\Delta H^2 + \Delta D^2)^{1/2}$,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta D}{\Delta H} \quad (1)$$

- α l'angle formé par $\vec{\Delta F}$ et sa projection sur l'axe vertical z ,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(\Delta H^2 + \Delta D^2)^{1/2}}{\Delta Z} = \frac{\Delta H\mathcal{E}}{\Delta Z} \quad (2)$$

$\vec{\Delta F}$ peut alors être représenté en diagramme polaire par un point P tel que (figure 5):

$$|\vec{OP}| = \alpha \quad (3)$$

$$(\vec{ON}, \vec{OP}) = \varphi \quad (4)$$

Le cercle supérieur de ce diagramme correspond aux variations ΔZ négatives; le cercle inférieur aux variations ΔZ positives.

Les intersections des vecteurs perturbateurs avec la sphère de rayon ON se répartissent en général au voisinage d'un grand cercle qui est tracé sur la sphère du plan préférentiel des variations et dont la projection sur le plan horizontal est une ellipse.

Après l'étude d'un nombre assez important de perturbations, l'on peut tracer une ellipse moyenne de grand axe AA' et de petit axe BB' (figure 6).

Considérons la figure 7 avec les définitions suivantes:

Δ = tracé du plan préférentiel,

\vec{OC} = vecteur unitaire perpendiculaire à Δ , et dirigé vers le bas,

β = angle formé par le plan des directions privilégiées du vecteur perturbation avec le plan horizontal.

On définit alors le vecteur \vec{OD} de PARKINSON de la façon suivante:

- il est parallèle à \vec{OB} et de même sens,

- son module est égal à $\sin \beta$.

On appelle θ l'angle formé par le vecteur de PARKINSON avec le nord magnétique.

B. Méthode de WIESE

Pour la détermination générale d'une anomalie de variations, l'on part du fait singulier que dans un lieu donné et pour une période donnée, les vecteurs perturbateurs magnétiques se trouvent en général dans un plan fixe (plan préférentiel). Autrement dit, l'une des trois composantes des variations dépend linéairement et homogènement des deux autres (WIESE 1965).

Dans ce cas, il est logique de considérer comme composante dépendante la verticale ΔZ , parce qu'elle change beaucoup plus d'un lieu à l'autre que les autres composantes horizontales ΔH et ΔD . Approximativement, l'on peut donc écrire

$$\Delta Z = A \Delta H + B \Delta D \quad (5)$$

avec des coefficients A et B dépendant du lieu et de la période.

Il existe alors un vecteur \vec{C} qui a pour composantes A et B, ce vecteur \vec{C} définit la "flèche d'induction selon WIESE". Par rapport au nord magnétique ce vecteur a:

$$\text{- pour direction } \frac{B}{A} = \operatorname{tg} \theta \quad (6)$$

$$\text{- pour grandeur } C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (7)$$

ΔZ ne dépend donc que de la composante du champ perturbateur $\Delta \mathcal{H}$ dans la direction de \vec{C} ; il y a proportionnalité:

$$C = \frac{\Delta Z}{\Delta \mathcal{H}} = \operatorname{tg} \beta \quad (8)$$

Pour des anomalies de variations allongées, ces flèches d'induction se trouvent approximativement perpendiculaires à leur direction générale. Les longueurs C ne varient essentiellement qu'en travers de la direction générale.

Les deux coefficients A et B sont déterminés graphiquement par les deux équations suivantes (dédites de (5)):

$$\frac{\Delta Z}{\Delta H} = A + B \frac{\Delta D}{\Delta H} \quad (9a)$$

$$\frac{\Delta Z}{\Delta D} = B + A \frac{\Delta H}{\Delta D} \quad (9b)$$

Les coordonnées des ordonnées de ces deux droites permettent alors de déterminer les deux coefficients A et B .

Remarque

Entre la flèche d'induction selon WIESE (dénnotée \vec{a}) et celle selon PARKINSON (dénnotée \vec{b}) existe la relation suivante: (UNTIEDT, 1964):

$$\vec{b} = - \frac{\vec{a}}{\sqrt{1+a^2}} \quad (10)$$

\vec{a} est donc plus long que \vec{b} , mais surtout \vec{a} et \vec{b} pointent dans des directions opposées. D'autre part, l'extrémité de \vec{a} s'éloigne du canal conducteur tandis que celle de \vec{b} se dirige vers le canal conducteur.

Finalement, la méthode de WIESE semble être en représentation et interprétation nettement plus simple.

C. Méthode de UNTIJEET

Contrairement aux méthodes de PARKINSON et de WIESE, conçues pour l'étude d'un assez grand nombre de perturbations, la méthode de UNTIJEET (1964) est une méthode directe pour l'étude d'une perturbation individuelle et pour la détermination d'une flèche d'induction qui lui correspond.

On représente, par cette méthode, dans le plan horizontal ($\Delta H, \Delta D$) le comportement spatio-vectorel de la perturbation. Ce vecteur décrit une courbe sur laquelle sont indiquées les valeurs de ΔZ ; on figure alors les lignes d'égaux valeurs de ΔZ .

Pour une courbe plane, toutes les droites de liaison seraient parallèles et équidistantes. La flèche d'induction correspondante devrait pointer perpendiculairement aux droites en direction des valeurs croissantes de ΔZ . Sa longueur serait égale au rapport de la distance ΔZ de deux droites quelconques, avec leur distance dans le diagramme vectoriel.

Le module C est égal à:

$$C = \frac{\Delta Z(B) - \Delta Z(A)}{\sqrt{(\Delta D(B) - \Delta D(A))^2 + (\Delta H(B) - \Delta H(A))^2}} \quad (11)$$

La direction θ est égale à l'angle que fait la flèche avec le nord magnétique.

La direction de cette flèche est comptée à partir du nord magnétique positivement vers l'est.

La flèche d'induction selon UNTIJEET sera désignée par \vec{a} , étant identique à celle selon WIESE.

L'emploi de cette méthode est essentiellement réservé à l'exploitation des baies se formant lorsque le champ magnétique avant et après apparition de la baie est relativement calme (homogénéité de la source de la baie) -- l'exploitation de "baies d'orage" conduisant à des valeurs aberrantes.

3. APPLICATION A L'ETUDE DES STATIONS AU MALI

A. Généralités

Les quatre stations situées au Mali (Saméa, Kita, Kobala et Bafo) ont été analysées successivement par les différentes méthodes décrites auparavant, en comparant les mêmes phénomènes observés à chaque station et simultanément à l'observatoire magnétique de N'Bour (qui pour de telles études doit servir de station de référence).

Les données utilisées ont été relevées sur des magnétogrammes Askania pour les stations temporaires au Mali; et sur des magnétogrammes La Cour à l'observatoire de N'Bour. Les sensibilités moyennes (en γ/mm) des enregistrements utilisés sont résumées dans le tableau 1 suivant:

composante				vitesse
station	H	D	Z	déroulement
N'Bour	4,40	8,06	4,60	15 $\gamma/\text{mm}/\text{h}$
Saméa	3,29	4,85	3,16	20 "
Kita	3,27	4,81	3,15	20 "
Kobala	3,30	4,82	3,17	20 "
Bafo	3,30	4,72	3,16	20 "

Tableau 1

Le tableau 2 suivant indique, pour chaque paire N'Bour - station, le nombre de phénomènes utilisé et les valeurs moyennes absolues des amplitudes correspondant à ces phénomènes. La comparaison directe des stations temporaires n'est pas possible parce que seulement un variographe était disponible - la comparaison des stations temporaires ne devient possible que par utilisation d'une station de référence permanente, c'est-à-dire de N'Bour.

Station	nombre phénom.	$ \Delta H $ %	$ \Delta D $ %	$ \Delta Z $ %	$ \Delta \mathcal{H} $ %
M'Bour	30	15,03	14,77	7,94	21,07
Saméa	30	17,56	6,99	4,58	18,89
M'Bour	19	14,60	14,55	7,05	20,61
Kita	19	8,10	5,55	4,57	9,80
M'Bour	19	7,80	7,83	3,78	11,04
Kobala	19	7,61	5,41	4,~7	9,33
M'Bour	13	15,51	12,48	6,26	19,90
Bafo	13	14,72	10,15	7,55	17,89

Tableau 2

Ce tableau 2 permet de constater que:

- à M'Bour, les variations des composantes horizontales sont pratiquement identiques et assez voisines à Kita, Kobala et Bafo;
 - par contre, elles sont très différentes à Saméa;
- d'autre part:
- pour la composante H, elles sont identiques pour M'Bour - Saméa, M'Bour - Kobala et M'Bour - Bafo, à l'exception de Kita où les amplitudes sont nettement réduites,
 - pour la composante D, elles sont assez voisines pour M'Bour - Kobala et M'Bour - Bafo, par contre nettement différentes (et réduites) à Saméa et à Kita;
 - pour le champ horizontal \mathcal{H} , on trouve une grande différence pour M'Bour - Kita;
- et finalement:
- la composante Z semble être nettement plus faible à Saméa et à Kita qu'à M'Bour, et légèrement plus forte à Bafo (et éventuellement Kobala).

B. Utilisation de la méthode de PARKINSON

1. Station de M'Bour.

Les diagrammes polaires ont été construits en utilisant des phénomènes de durée inférieure à 60 minutes (figures 8 et 9). Seuls ont été représentés les graphiques des résultats obtenus pour M'Bour pour les paires M'Bour - Saméa et M'Bour - Kita, les résultats obtenus pour M'Bour dans les autres cas sont identiques.

Les points représentatifs se répartissent de 0 à 180° pour l'hémisphère inférieur et de 180 à 360° pour l'hémisphère supérieur. La variation de la composante verticale Z est maximale suivant la direction est-ouest. Le vecteur de PARKINSON pointe vers l'ouest et fait un angle de 270° avec le nord magnétique, en accord avec des résultats trouvés antérieurement (ALBOUY, BARSCZUS et CANER, 1972). L'angle, formé par le plan des directions privilégiées du vecteur perturbation et le plan horizontal est de 30°, conduisant à un module du vecteur de 0,50.

2. Station de Saméa

Comme pour la station de M'Bour, les points représentatifs du vecteur perturbation se répartissent de la même façon (figure 10) et le graphique conduit à un résultat identique: le vecteur de PARKINSON fait un angle de 270° avec le nord magnétique et son module est de 0,50.

3. Station de Kita

La répartition des points est identique (figure 11) à celle trouvée à M'Bour et Saméa, conduisant à une direction de 270° pour le vecteur de PARKINSON, avec un module cependant plus fort: 0,59.

4. Station de Kobala

A nouveau, la répartition des points est identique (figure 12), conduisant à une direction de 270° pour le vecteur de PARKINSON, avec un module de 0,56.

5. Station de Bafo

Un changement très remarquable se produit à cette station: les points se répartissent entre 90° et 270° pour l'hémisphère inférieur et 270° et 90° pour l'hémisphère supérieur (figure 13). Ainsi le vecteur de PARKINSON pointe vers le nord magnétique et son module est de 0,44.

6. Résultats

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3 suivant; les directions sont alors données par rapport au nord géomagnétique.

Station	direction	module
M'BOUR	257°	0,50
SAMEA	259°	0,50
KITA	260°	0,59
KOBALA	261°	0,56
BAFO	352°	0,44

Tableau 3

Le trait le plus remarquable qui se dégage de cette étude est que pour les stations - pourtant continentales - de Saméa, Kita et Kobala les vecteurs pointent vers le bassin sédimentaire du Sénégal (ou comme pour les stations situées dans ce bassin, vers l'océan), et que ce n'est qu'à Bafo que l'on observe une autre direction du vecteur, pointant vers le nord, c'est-à-dire vers le bassin de Taoudeni (figure 1).

C. Utilisation de la méthode de WIESE

1. Introduction

Pour pouvoir effectuer la représentation graphique avec assez de certitude malgré un nombre d'observations relativement restreint, l'on peut déterminer les coefficients A et B par l'équation ci-dessous

$$1 = A \frac{\Delta H}{\Delta Z} + B \frac{\Delta D}{\Delta Z} \quad (12)$$

On obtient ainsi directement dans la représentation graphique de $\Delta H / \Delta Z$ et $\Delta D / \Delta Z$ l'inverse des coefficients A et B . Cependant cette représentation n'est pas favorable dans le cas de variations de la composante verticale Z petites par rapport aux composantes horizontales (et c'est le cas des 4 stations du Mali) puisque des valeurs $\Delta H / \Delta Z$ et $\Delta D / \Delta Z$ deviennent très grandes. Une méthode plus facile à mettre en oeuvre consiste à utiliser l'une des équations suivantes:

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \frac{\Delta Z}{\Delta H} &= A + B \frac{\Delta D}{\Delta H} \\ \text{(b)} \quad \frac{\Delta Z}{\Delta D} &= B + A \frac{\Delta H}{\Delta D} \end{aligned} \quad (13)$$

Dans le cas de la première équation, la distance par rapport à l'origine du point d'intersection de la droite formée par les points expérimentaux et l'axe $\Delta Z / \Delta H$ donne A et la pente de la droite donne B ; et de même, la deuxième équation permet d'obtenir B directement et A par la pente de la droite formée par les points expérimentaux.

En principe, on obtient exactement le même résultat dans les deux cas. Les deux diagrammes, indépendants l'un de l'autre, permettent ainsi un contrôle réciproque.

C. Utilisation de la méthode de WIESE

1. Introduction

Pour pouvoir effectuer la représentation graphique avec assez de certitude malgré un nombre d'observations relativement restreint, l'on peut déterminer les coefficients A et B par l'équation ci-dessous

$$1 = A \frac{\Delta H}{\Delta Z} + B \frac{\Delta D}{\Delta Z} \quad (12)$$

On obtient ainsi directement dans la représentation graphique de $\Delta H / \Delta Z$ et $\Delta D / \Delta Z$ l'inverse des coefficients A et B. Cependant cette représentation n'est pas favorable dans le cas de variations de la composante verticale Z petites par rapport aux composantes horizontales (et c'est le cas des 4 stations du Mali) puisque des valeurs $\Delta H / \Delta Z$ et $\Delta D / \Delta Z$ deviennent très grandes. Une méthode plus facile à mettre en oeuvre consiste à utiliser l'une des équations suivantes:

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \frac{\Delta Z}{\Delta H} &= A + B \frac{\Delta D}{\Delta H} \\ \text{(b)} \quad \frac{\Delta Z}{\Delta D} &= B + A \frac{\Delta H}{\Delta D} \end{aligned} \quad (13)$$

Dans le cas de la première équation, la distance par rapport à l'origine du point d'intersection de la droite formée par les points expérimentaux et l'axe $\Delta Z / \Delta H$ donne A et la pente de la droite donne B; et de même, la deuxième équation permet d'obtenir B directement et A par la pente de la droite formée par les points expérimentaux.

En principe, on obtient exactement le même résultat dans les deux cas. Les deux diagrammes, indépendants l'un de l'autre, permettent ainsi un contrôle réciproque.

2. Station de M'Bour

Les coefficients A et B obtenus par les deux équations (13) sont pratiquement identiques. Sur la figure 14 sont représentés les points obtenus à partir de l'équation (13b). Bien que la dispersion des valeurs ne soit pas négligeable, on peut déterminer avec netteté les grandeurs A et B (tableau 4).

	méthode graphique	méthode moindres carrés
A	-0,12	-0,15
B	0,38	0,39
C	0,40	0,41
θ_{NM}	108°	111°

Tableau 4

Les valeurs A, B, C, θ ont été calculées également par la méthode des moindres carrés, on s'aperçoit que la méthode graphique (plus facile) reste valable en utilisant les précautions d'usage.

3. Station de Saméa

Les coefficients A et B ont été calculés à l'aide de l'équation (13 b). La dispersion par rapport à la droite expérimentale n'est pas négligeable (figure 15), la vérification par la méthode des moindres carrés s'impose dans le cas présent. (tableau 5).

	méthode graphique	méthode moindres carrés
A	0,01	0,004
B	0,53	0,54
C	0,53	0,54
θ_{NM}	89°	91°

Tableau 5

4. Station de Kita

Les coefficients A et B ont été déterminés à l'aide de l'équation (13), les points correspondants sont représentés dans la figure 16, les résultats dans le tableau 6.

	méthode graphique	méthode moindres carrés
A	-0,15	-0,16
B	0,58	0,61
C	0,60	0,63
θ_{NM}	105°	105°

Tableau 6

5. Station de Kobala

Les enregistrements obtenus à cette station sont très pauvres en phénomènes exploitables et il est d'autant plus difficile de tracer une courbe expérimentale. Les coefficients A et B ont néanmoins pu être déterminés (équations 13 a et b, donnant le même résultat, figure 17), tableau 7.

	méthode graphique	méthode moindres carrés
A	-0,12	-0,12
B	0,64	0,63
C	0,65	0,64
θ_{NM}	101°	102°

Tableau 7

6. Station de Bafo

La dispersion des points est très grande (figure 18), les coefficients A et B ont été déterminés à l'aide de l'équation (15b). Le résultat intéressant est le changement de la direction de la flèche d'induction, par rapport aux autres stations maliennes (tableau 8).

	méthode graphique	méthode moindres carrés
A	-0,52	-0,56
B	-0,12	-0,08
C	0,53	0,56
θ_{NE}	193°	188°

Tableau 8

7. Remarque

Alors que pour les 5 premières stations au Mali les coefficients B est de 4 à 5 fois supérieur au coefficient A, pour la dernière station (Bafo) c'est le contraire. Pour la gamme de périodes étudiées (20 à 60 min), il y a un changement dans la direction générale des structures.

D. Comparaison des résultats fournis par les 2 méthodes

Dans le tableau 9 ci-dessous sont rassemblés les résultats en ce qui concerne la direction et le module des flèches d'induction \vec{a} et \vec{b} , obtenus d'après les méthodes de WIESE et de PARKINSON. Les valeurs de \vec{a} dans ce tableau sont celles obtenues par la méthode des moindres carrés.

Station	\vec{a}	θ_a	\vec{b}	θ_b	$\theta_{\vec{a}+180^\circ}$
M'Bour	0,41	111°	0,50	270°	291°
Saméa	0,54	91°	0,50	270°	271°
Kita	0,63	105°	0,59	270°	285°
Kobala	0,64	102°	0,56	270°	282°
Bafo	0,56	188°	0,44	360°	368°

Tableau 9

Les directions θ sont données par rapport au nord magnétique (la déclinaison magnétique étant comptée positivement vers l'est). Les directions θ selon WIESE sont systématiquement différentes des directions θ selon PARKINSON (mais on remarquera que la détermination de la direction θ selon PARKINSON est nettement moins précise).

De même, \vec{b} est nettement inférieur à \vec{a} (sauf pour M'Bour), mais ceci est normal, les modules \vec{a} et \vec{b} n'étant pas tout à fait identiques (voir équation 10).

D'une façon générale, la méthode de WIESE paraît plus précise - notamment dans le cas de petites valeurs pour ΔZ - et donc préférable.

B. Utilisation de la méthode de UNTLEDT

La méthode de UNTLEDT (1964) n'est que suffisamment précise sous certaines conditions: utilisation d'une baie "parfaite" apparaissant dans des conditions de calme général du champ géomagnétique, appréciation "correcte" de l'allure générale de l'évolution de la baie, "choix correct" de la "période" de la baie. Pour ces raisons, cette méthode a été peu utilisée et ne le sera que si le nombre de phénomènes est trop insuffisant pour permettre l'emploi des méthodes habituelles.

TROISIEME PARTIE

UTILISATION DES COEFFICIENTS DE LA VARIATION DIURNE DU CHAMP GEOMAGNETIQUE POUR L'ETUDE D'ANOMALIES DE LA CONDUCTIVITE HORIZONTALE. ETUDE QUALITATIVE ET APPLICATION AUX STATIONS DE L'OUEST AFRICAIN.

Il avait été remarqué antérieurement (BARSCZUS 1969 a,b) que la comparaison des coefficients harmoniques de la variation diurne du champ géomagnétique pouvait donner en première approximation un renseignement qualitatif sur la similitude ou non-similitude de point de vue conductivité en grande profondeur entre des stations situées à des latitudes géomagnétiques voisines, par comparaison graphique des séquences $S_1 - S_2 - S_3 - S_4$ (dans le cas normal les valeurs sont décroissantes de S_1 vers S_4). Dans ce qui suit, l'on essaie de comparer les premiers 6 harmoniques des composantes géomagnétiques rectangulaires X, Y, Z selon cette méthode.

1. INTRODUCTION

Soit gr, i , l'amplitude d'un phénomène g à chaque heure i du jour r , avec

$$(14) \quad i = 1, 2, \dots, 25.$$

Les coefficients harmoniques sont calculés pour $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$:

$$(15) \quad Ar, n = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{25} gr, i \cos \frac{2\pi n (i-1)}{24} + (gr, 25 - gr, 1)/24$$

$$(16) \quad Br, n = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{25} gr, i \sin \frac{2\pi n (i-1)}{24} + (gr, 25 - gr, 1)/24$$

A l'aide des coefficients harmoniques de la variation diurne, au jour r, on peut calculer les coefficients S_n :

$$(17) S_{r,n} = (A^2_{r,n} + B^2_{r,n})^{1/2}$$

Nous avons calculé ainsi les six premiers coefficients S_n pour les 3 composantes X, Y et Z du champ géomagnétique, avec

$$(18) \quad \begin{cases} \Delta X = \Delta H \cos D - \Delta D \sin D \\ \Delta Y = \Delta H \sin D + \Delta D \cos D \end{cases}$$

Toutes les valeurs, ci-dessus, sont exprimées en gammas; D étant la déclinaison magnétique en degrés.

2. VARIATION DIURNE AUX QUATRE STATIONS DU MALI

A. Station de Saméa

Sur les figures 19 à 21 sont représentées les variations diurnes observées simultanément aux stations de M'Bour et de Saméa et les composantes H, D et Z.

Pour la composante H, le maximum se situe vers midi local (à M'Bour, 12 h TU = 11 TML), les deux phénomènes ont sensiblement la même amplitude (environ 75 %).

Pour la composante D, l'amplitude est supérieure à M'Bour (environ 40 % contre environ 30 % à Saméa). Le maximum se situe à 15 h TU à M'Bour, et à 14 h TU à Saméa. Le fait marquant est surtout un léger maximum qui s'observe à 17 h TU à Saméa et qui n'existe pas à M'Bour.

Pour la composante Z finalement, les amplitudes sont différentes (environ 30 % à M'Bour contre 20 % à Saméa), le minimum est atteint déjà à 12 h TU à Saméa contre 13 h TU à M'Bour, le maximum vers 7 h TU s'observe bien à Saméa tandis qu'il n'existe pas à M'Bour, et celui de M'Bour vers 18 h TU n'existe qu'imparfaitement à Saméa.

B. Station de Kita

Pour les deux composantes horizontales H et D (figures 22 et 23), les courbes sont pratiquement identiques en amplitude et répartition des maxima et minima. Pour la composante Z (figure 24), si la répartition des maxima et minima est identique, c'est surtout l'amplitude qui diminue beaucoup à Kita par rapport à M'Bour (Kita 20 ‰ contre M'Bour plus de 30 ‰).

C. Station de Kobala

Pour toutes les composantes (figures 25 à 27), l'allure des courbes est pratiquement identique, les maxima sont à peine décalés en ce qui concerne la composante Z (atteint à Kobala à 7 h TU au lieu de 8 h TU à M'Bour, respectivement 17 h et 18 h TU). L'on remarquera cependant que l'amplitude de la composante H est supérieure à Kobala par rapport à M'Bour (presque 80 ‰ à Kobala contre 60 ‰ à M'Bour) l'inverse étant le cas pour la composante D (environ 65 ‰ à Kobala contre 75 ‰ à M'Bour). En ce qui concerne la composante Z, elle atteint environ 70 ‰ à Kobala contre 60 à M'Bour.

D. Station de Bafo

Si l'allure des trois courbes est assez semblable (figures 28 à 30), les maxima n'ont plus lieu tout à fait aux mêmes heures..

Quant aux rapports des composantes, pour la composante H l'amplitude est supérieure à Bafo (environ 65 ‰ à Bafo contre 55 ‰ à M'Bour), elle est inférieure pour la composante D (25 ‰ à Bafo contre 30 ‰ à M'Bour). Pour Z, si les courbes ont encore un aspect commun, le maximum du matin est plus élevé à Bafo et celui du soir l'est davantage à M'Bour (choix du niveau 0?). Les amplitudes seraient approximativement identiques: 25 ‰ à Bafo comme à M'Bour

Remarque

Les rapports sont consignés dans le tableau 10. Pour les exemples choisis, ΣK à M'Bour est compris entre 7 et 10, ce sont des jours calmes. Les valeurs dans chaque figure (19 à 28) sont des moyennes de 5 jours.

MB / St	H	D	Z
St			
Saméa	1	1,3	1,5
Kita	1	1	1,5
Kobala	0,75	1,2	0,9
Bafo	0,8	1,2	1

Tableau 10

3. CALCUL DES COEFFICIENTS S_n

Les coefficients S_n ($n=1,2 \dots 6$) ont été calculés à l'aide d'un calculateur OLIVETTI P602, lequel nous avons pu utiliser grâce à l'extrême bienveillance de Monsieur GIRAUD, ingénieur météorologiste de l'ASECNA et à qui nous devons toute notre gratitude.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 11 ci-après qui contient les valeurs des coefficients S_n ($n=1,2 \dots 6$) pour les stations de M'Bour, Saméa, Kita, Kobala et Bafo. Les valeurs sont exprimées en gammas et ont été déterminées en utilisant les 5 jours les plus calmes des enregistrements disponibles pour chaque station, à l'exception de M'Bour pour qui les valeurs indiquées correspondent à la moyenne des 5 jours calmes des 4 stations temporaires (donc à 4×5 jours).

Stations	Compo- santes	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
M'Bour	H	27,72	13,52	5,85	1,89	1,00	0,43
	D	12,67	11,00	5,93	3,02	1,22	1,20
	Z	9,56	8,10	5,13	2,97	1,15	1,00
Saméa	H	33,61	15,95	7,58	1,77	0,92	0,37
	D	8,32	6,00	4,88	2,72	1,63	0,67
	Z	6,12	3,59	2,51	0,91	0,13	0,18
Kita	H	27,51	12,76	6,31	2,11	0,37	0,30
	D	14,66	12,09	5,71	0,42	0,15	0,78
	Z	2,71	5,08	3,46	0,50	0,22	0,37
Kobala	H	29,89	19,13	9,40	3,77	1,24	0,40
	D	13,98	16,69	8,52	0,45	1,33	0,67
	Z	16,34	16,31	9,25	2,41	0,09	0,36
Bafo	H	27,51	14,73	5,24	2,47	1,28	0,57
	D	7,24	5,69	3,44	0,62	0,12	0,31
	Z	4,76	5,25	4,18	1,34	0,60	0,34

Tableau 12

Ces résultats sont représentés graphiquement en échelle sémi-logarithmique sur les figures 31, 32 et 33.

A. Composante H (figure 31)

En première approximation, les courbes obtenues sont parallèles jusqu'au coefficient S₄, la courbe pour la station de Bafo correspondant à un niveau légèrement supérieur à celui des autres stations. On pourrait noter quelques irrégularités: S₅ pour la station de Kita est faible par rapport aux autres coefficients, S₆ pour la station de M'Bour légèrement plus élevé. Dans l'ensemble, les valeurs des coefficients décroissant assez régulièrement de S₁ à S₆.

B. Composante D (figure 32)

L'ensemble des courbes correspondant à cette composante possède un aspect nettement différent que celui de la composante H. Les stations de M'Bour et de Saméa ont encore un comportement "normal": décroissance régulière des coefficients S_1 à S_6 (sauf $S_5 = S_6$ à M'Bour), mais on constate

- pour Kita et Bafo des coefficients S_4 et S_5 très faibles par rapport à S_3 et S_6 , S_6 étant supérieur à S_4 et S_5 à Kita, S_6 supérieur à S_5 à Bafo;
- pour Kobala, seul le coefficient S_4 (inférieur aux coefficients S_5 et S_6) est très faible, S_5 et S_6 semblant correspondre à une décroissance normale des valeurs des coefficients comme généralement observé; quant au coefficient S_1 à cette station il est légèrement inférieur à S_2 .

C. Composante Z (figure 33)

Seule la station de M'Bour possède un comportement "normal" (décroissance régulière des valeurs).

On observe, individuellement pour chaque station:

- pour Saméa une valeur très faible pour S_5 ($S_5 < S_6$);
- pour Kita, S_1 est nettement supérieur à S_2 , S_5 est nettement inférieur à S_6 ;
- pour Kobala, $S_1 \approx S_2$ et S_5 très inférieur à S_6 ;
- pour Bafo finalement, S_1 est légèrement inférieur à S_2 .

D. Conclusion

En résumé, par rapport à un comportement supposé "normal" tel que $S_1 > S_2 \dots S_6$, on obtient les anomalies classées dans le tableau 13 ci-après:

Station	H	D	Z
M'Bour	-	-	-
Saméa	-	-	$S_5 < S_6$
Kita	-	$S_5 < S_6$	$S_1 < S_2$ $S_5 < S_6$
Kobala	-	$S_1 < S_2$ $S_4 < S_5$	$S_1 \approx S_2$ $S_5 < S_6$
Bafo	-	$S_5 < S_6$	$S_1 < S_2$

Tableau 13

On observe donc essentiellement des "anomalies" pour S_5 . Il est difficile de conclure immédiatement à une anomalie de structure à la profondeur de pénétration des ondes S_5 : le niveau d'énergie de l'onde devient très faible à partir de S_4 quoique le niveau de S_5 et S_6 est supérieur à celui de S_4 à Kita (composante D). Par contre il est bien probable que l'affaiblissement de S_1 par rapport à S_2 aux stations de Kita et de Kobala (composante Z) et à la station de Bafo (composante D) soit significatif et corresponde à une différence de structure à grande profondeur.

QUATRIEME PARTIE

UTILISATION DES COEFFICIENTS HARMON- IQUES DE LA VARIATION DIURNE DU CHAMP GEOMAGNETIQUE POUR LE CALCUL DES ANOMALIES PROFONDES DE LA TERRE. ETUDE QUALITATIVE ET APPLICATION A QUELQUES STATIONS DE L'OUEST AFRI- CAIN.

I. GENERALITES

Le champ géomagnétique change continuellement sous l'influence de divers facteurs. La variation la plus importante est la variation diurne (ou journalière) dont l'origine est le rayonnement solaire électromagnétique. Ce rayonnement produit un système de courants dans l'ionosphère à environ 100 km au-dessus de la surface de la terre; il est plus ou moins stationnaire par rapport à une ligne allant du soleil au centre de la terre et s'étend jusqu'à l'hémisphère non éclairé de la terre. Le système de courants ionosphériques s'accompagne d'un champ magnétique qui renforce ou diminue le champ terrestre permanent et qui dépend de la position du lieu d'observation par rapport au courant ou, ce qui revient au même, de l'heure locale et de la latitude.

En outre, l'amplitude de la variation diurne est influencée par l'activité du soleil, mesurée par le nombre relatif des tâches solaire.

En tenant compte de la répartition du champ de variation (designé aussi S_q) dans l'espace et de la sphéricité de la terre, il est possible à partir des composantes du champ S_q , de déduire la distribution de la résistivité à l'intérieur de la terre.

Supposons que le champ Sq soit soumis à une analyse harmonique avec comme période fondamentale $T_0 = 24$ h; d'après ce qui suit, la composante (nord) H magnétique à un lieu donné de longitude λ et de latitude ϕ sera donc de la forme:

$$H(t, \lambda, \phi) = \sum_m H_{um} \cos m\omega t + H_{vm} \sin m\omega t = \quad (19)$$

$$\sum_m \operatorname{Re} \left[H_m \cdot e^{i\omega m t} \right],$$

avec $\omega = \frac{2\pi}{T_0}$

$$\text{et } H_m(\lambda, \phi) = H_{um}(\lambda, \phi) - i H_{vm}(\lambda, \phi), \quad (20)$$

$H_m(\lambda, \phi)$ étant la $m^{\text{ième}}$ amplitude de Fourier en écriture complexe. Des représentations identiques sont valables pour les autres composantes magnétiques et telluriques.

La dépendance de la longitude pour cette $m^{\text{ième}}$ harmonique sera $\exp(im\lambda)$; pour la latitude elle dépendra des fonctions sphériques $P_n^m(\cos \theta)$ d'ordre m et de degré $n = m, m + 1, m + 2, \dots$, ($\theta = 90^\circ - \phi = \text{colatitude du lieu}$). Si l'on se limite à la variation Sq à proximité des équinoxes, alors les membres avec $n = m, m + 2, \dots$, disparaissent par raison de symétrie, le membre $n = m + 1$ dépasse de loin les autres membres restants (CHAPMAN et BARTELS, 1940).

Si l'on considère, la résistivité comme fonction pure de la profondeur, la dépendance de la longitude et de la latitude est la même pour chaque harmonique de la partie intérieure et extérieure du champ Sq.

Alors sont valables pour les amplitudes de Fourier magnétiques et telluriques les relations suivantes (CHAPMAN et BARTELS, (1940) chap. XVII, équations 19-21, avec $\rho = 1$).

$$\frac{Z}{D}_m = -i \frac{m+1}{m} \sin \theta T_n^m, \quad (21)$$

$$\frac{Z}{H}_m = (m+1) \frac{P_n^{m+1}}{dP_n^m + 1/d\theta}, T_n^m = \frac{(m+1) \sin \theta \cos \theta}{m \cos^2 \theta - \sin^2 \theta} T_n^m, \quad (22)$$

$$\frac{E_{mN}}{D}_m = - \frac{E_{mE}}{H}_m = \frac{i n \omega a}{n+1} T_n^m; \quad (23)$$

a étant le rayon de la terre,

- E_N et E_E les composantes NS et EW du champ tellurique associé au champ Sq.

La répartition interne de la résistivité $\rho(r)$ est comprise dans le coefficient de transfert T_n^m . A l'aide de cette fonction de transfert, il est alors possible d'avoir une mesure directe de la profondeur de pénétration des courants induits (SCHLUCKER, 1970). On l'obtient à l'aide de

$$C_n^m = T_n^m \frac{a}{n + 1/2}, \quad (24)$$

$\frac{n + 1/2}{a}$ étant le nombre d'onde du champ à la surface.

De plus, on a:

$$T_n^m = \frac{1 - \frac{n+1}{n} S_n^m}{1 + S_n^m} \quad (25)$$

avec S_n^m comme rapport des parties intérieure et extérieure du champ de variation magnétique à la surface du sol.

Connaissant C_n^m , il est possible de lui associer une résistivité ρ telle que:

$$C_n^m = h_n^m - \frac{i}{2} P_n^m, \quad (26)$$

$$\rho_m^m = \frac{2 \pi (\omega)}{10} (P_n^m)^2 \quad (27)$$

Ces équations donnent en relation avec les profondeurs appropriées h_n^m , une répartition apparente de la résistivité ρ .

II. APPLICATION AUX STATIONS DU MALI

On se propose maintenant, de calculer d'après les équations (21) (22) et (23), à l'aide des amplitudes de Fourier de la variation S_q pour un lieu donné, un coefficient régional T_n^m , qui correspond, à chaque profondeur h_n^m . On suppose donc, préalablement, que dans ce rayon, les inhomogénéités latérales n'ont pas d'influence sur les amplitudes S_q , ou que leur effet a été éliminé par lissage dans l'espace.

Cependant, pour obtenir une valeur convenable pour T_n^m , il est nécessaire que certaines conditions indépendantes de la répartition de la résistivité entre H et D, respectivement E et Z soient remplies. D'après les équations (21) (22) et (23), il faut que:

$$\frac{H_m}{D_m} = 1 \left(\cos \theta - \frac{\sin^2 \theta}{m \cos \theta} \right), \quad (28)$$

$$\frac{E_{mN}}{Z_m} = \frac{m^2 (\omega) a}{\sin \theta (m+1)(m+2)} \quad (29)$$

$$\frac{E_{mE}}{Z_m} = \frac{i m^2 (\omega) a}{\sin \theta (m+1)(m+2)} \left\{ \frac{\sin^2 \theta}{m \cos \theta} - \cos \theta \right\} \quad (30)$$

D'une façon générale, ces conditions ne sont pas remplies.

On définit alors une latitude effective ϕ_m associée au Sq, telle que d'après (28)

$$\left| \frac{H_m}{D_m} \right| = \sin \phi_m - \frac{\cos^2 \phi_m}{m \sin \phi_m} \quad (31)$$

C'est, avec cette valeur ϕ_m , que l'on calculera alors le coefficient de transfert régional T_n^m .

1. Station de M'Bour

Sur le tableau 14, nous avons représenté les valeurs obtenues à M'Bour, pour h_n^m et f_n^m , ainsi que pour chaque valeur de m la latitude effective ϕ_m associée à la m^{ième} harmonique de la variation diurne Sq.

La latitude géomagnétique vraie est représentée par ϕ .

Station	m	$\phi(^{\circ})$	$\phi_m(^{\circ})$	T_n^m	h_n^m (km)	f_n^m (Θ_m)
M'Bour	1	21°16'N	20°50'	0,38-i 0,15	980	200
	2		17°50'	0,49-i 0,52	900	330
	3		14°50'	0,65-i 0,67	900	500
	4		15°10'	0,75-i 0,80	875	630
	5		11°	0,80-i 0,80	790	570
	6		10°40'	0,72-i 0,74	614	440
	7		10°30'	0,65-i 0,64	490	300
	8		12°50'	0,69-i 0,68	440	280
	9		13°50'	0,62-i 0,62	380	230

Tableau 14

Les variations de h_n^m et f_n^m sont représentées sur la figure 34.

Malgré la présence d'un bassin sédimentaire profond (6 km) et très conducteur ($2 \Omega m$) à M'Bour, l'onde S_1 à une profondeur de pénétration très grande. Il semblerait donc que la couche résistante soit très épaisse.

2. Station de Saméa

Sur le tableau 15, sont représentés les résultats concernant la station de Saméa.

Station	m	$\phi(^{\circ})$	$\phi_m(^{\circ})$	T_n^m	h_n^m (km)	ρ_n^m (Ωm)
Saméa	1	19°30'	14°	0,345-i 0,38	880	170
	2		10°	0,40-i 0,405	730	200
	3		11°	0,39-i 0,39	550	168
	4		14°	0,29-i 0,275	340	75
	5		13°40'	0,97-i 0,07	70	4
	6		10°	0,29-i 0,23	250	42

Tableau 15

On remarque pour $m = 5$, les valeurs de h_n^m et ρ_n^m sont "anormales".

La profondeur de pénétration est moindre qu'à M'Bour. La figure 35 représente ρ_n^m et h_n^m en fonction de la période T en secondes.

3. Station de Kita

Pour la station de Kita, les résultats sont "anormales": la profondeur de pénétration augmente lorsque la période diminue. Ceci vient du fait, de la très faible valeur de l'amplitude de Z de l'onde S_1 par rapport à l'onde S_2 ($S_1 \ll S_2$) (Tableau 16).

Station	m	$\phi(^{\circ})$	$\phi_m(^{\circ})$	T_n^m	h_n^m (km)	ρ_n^m (Ωm)
Kita	1	18°20'	22°30'	0,10-i 0,10	256	12
	2		19°	0,29-i 0,30	540	110
				13°30'	0,47-i 0,77	670

Tableau 16

A partir de $m = 4$, les valeurs de ϕ deviennent inférieures à 5° , donc les valeurs de h_n^m et ρ_n^m ne sont plus significatives.

4. Station de Kobala

Le tableau 17 représente les valeurs de h_n^m et ρ_n^m obtenues pour la station de Kobala.

Les valeurs obtenues pour les profondeurs de pénétration sont très grandes et guère probables.

Station	m	$\phi(^{\circ})$	$\phi_m(^{\circ})$	T_n^m	h_n^m (km)	ρ_n^m (Ωm)
Kobala	1	17°30'	20°30'	0,71-i 0,62	1820	460
	2		18°	0,685-i 0,685	1250	570
	3		15°30'	0,69-i 0,84	980	790

Tableau 17

A partir de $m = 4$, les valeurs de la latitude effective ϕ_m deviennent trop petites pour le calcul de h_n^m et ρ_n^m .

5. Station de Bafo

Les résultats sont représentés dans le tableau 18.

Station	m	$\phi(^{\circ})$	$\phi_m(^{\circ})$	T_n^m	h_n^m (km)	ρ_n^m (Q_m)
Bafo	1	18°20'	13°30'	0,34-i 0,34	860	135
	2		17°	0,32-i 0,64	585	500

Tableau 18

A partir de $m = 3$, les valeurs de ϕ_m deviennent trop petites.

6. Conclusion

Pour les stations de M'Bour Saméa et Bafo, nous avons pu calculer les profondeurs de pénétration des ondes S_1 et S_2 . Pour l'onde S_1 , la profondeur de pénétration est voisine de 900 km aux stations. Par contre, pour l'onde S_2 la profondeur de pénétration est différente entre les trois stations et particulièrement à Bafo, où elle est réduite.

La station de Kobala, présente des valeurs tout à fait improbables.

Dans le paragraphe précédent nous avons détecté le comportement "anormal" de certains coefficients S_n aux quatre stations du Mali (tableau 13). Connaissant, maintenant, la profondeur de pénétration des ondes S_n , nous pouvons localiser ces anomalies de la conductivité.

Pour la station de Saméa ($S_5 < S_6$), cette anomalie se situerait à 300 km de profondeur.

Pour la station de Bafo, on a un comportement "anormal" sur la première harmonique ($S_1 < S_2$), correspondant à une profondeur de 600 km.

Remarque:

Les valeurs de h considérées, correspondant à des profondeurs de pénétration, vraisemblables, des variations S_q . Les fortes valeurs obtenues pour les stations de M'Bour et de Saméa peuvent être imputées à la digitalisation qui s'est effectuée à la main. Une étude plus poussée pourra être faite avec les données actuellement en cours de digitalisation au centre de Bondy (digitalisation automatique).

Il est à remarquer que dans le cas du modèle "d" de LAHIRI et PRICE (1939), la profondeur de pénétration est pour $m = 2$, de 600 km.

CINQUIEME PARTIE

DETERMINATION DES SPECTRES D'ENERGIE.- APPLICATION DE LA METHODE MAGNETO-TELLU- RIQUE A LA DETERMINATION DES STRUCTURES PROFONDES AUX STATIONS DU MALI.

1. INTRODUCTION

On se propose de déterminer les spectres d'énergie des composantes magnétiques et telluriques pour la station de M'Bour et de celles du Mali: Saméa - Kita - Kobala - Bafo. Si la cohérence est suffisamment grande entre les composantes magnétiques et telluriques, on détermine alors une courbe de résistivité apparente en fonction de la période.

Les enregistrements n'étant pas simultanés aux stations du Mali, on est obligé de se référer à l'observatoire de M'Bour, pour la comparaison des spectres d'énergie obtenus à ces stations (normalisation par rapport à M'Bour).

A M'Bour, observatoire permanent, le variographe utilisé pour la normalisation est un La Cour dont les sensibilités étaient en 1972 - 1973, de l'ordre de 4,45 γ /mm pour H, 8,24 γ /mm pour D et 4,55 γ /mm pour Z. Le variographe de terrain est un Askania GV3, dont les sensibilités sont de l'ordre de 3,28 γ /mm pour H, 4,80 γ /mm pour D et de 3,16 γ /mm pour Z.

Alors que l'observatoire de M'Bour se trouve sur la zone mobile, les quatre stations du Mali se trouvent sur le crâton ouest-africain qui est une zone stable.

On devrait donc s'attendre à trouver entre M'Bour et le reste des stations des "anomalies" des variations géomagnétiques.

Pour pouvoir comparer les enregistrements de M'Bour à ceux des autres stations, il est nécessaire que le champ géomagnétique horizontale $\Delta \mathcal{H}$ soit uniforme entre la station de référence (M'Bour) et les stations temporaires.

Pour vérifier cette condition, nous avons tracé le spectre d'énergie $\Delta \mathcal{H}$ pour l'ensemble de ces stations; on constate une grande similitude entre la station de M'Bour et celles du Mali (fig. 36d, 37d, 38d, 39d) rendant ainsi possible la comparaison des spectres d'énergie entre la station de référence et les stations temporaires.

Le calcul des spectres s'est fait avec un programmeur Olivetti P 602, sur des enregistrements d'une durée de 48 h; nous avons calculé le spectre d'énergie pour les six premières harmoniques de la variation diurne.

Les enregistrements ont été dépouillés à la main avec un pas de "digitalisation" de 60'; l'erreur fait sur les amplitudes au cours de ce dépouillement manuel est de l'ordre de 0,3 mm. Le niveau du bruit, peut alors se calculer, il est (WHITHAM, 1963)

$$\text{bruit} = (0,3 K)^2 \Delta t \quad \text{en } \gamma^2 / \text{c.p. ks}, \quad (32)$$

$$t = \text{pas de digitalisation en ks} = 3,6 \text{ ks},$$

$$K \text{ est la valeur d'échelle en } \gamma/\text{mm}$$

Pour l'ensemble des stations K est de l'ordre de 6,35 γ/mm d'où un niveau de bruit de l'ordre de $10^4 \gamma^2/\text{Hz}$.

Nous prendrons cette valeur comme limite inférieure pour une étude quantitative des spectres d'énergie. Nous nous limiterons aussi aux spectres d'énergie ayant une cohérence supérieure à 0,75.

2. ANALYSE SPECTRALE DES COMPOSANTES MAGNETIQUES ET TELLURIQUES

A. Station de Saméa

Sur la figure 36 nous avons représenté les spectres de puissance des composantes magnétiques et telluriques.

La limitation du spectre à $10^4 \gamma^2/\text{Hz}$ fait que nous pouvons utiliser uniquement que les quatre premières harmoniques.

Pour la composante H, la cohérence entre les deux stations de M'Bour et Saméa est très bonne et supérieure à 0,80 pour les premières 5 harmoniques.

Pour la composante Z, la cohérence décroît à partir de 0,99 pour la deuxième harmonique jusqu'à 0,40 pour l'harmonique d'ordre 4. Dans ce cas uniquement les 2ème et 3ème harmoniques sont utilisables.

Pour la composante D, la cohérence semble distribuée au hasard: seules les harmoniques d'ordre 2 et 3 ont une cohérence supérieure à 0,75.

On remarquera que le spectre de puissance à la station de M'Bour pour la composante Z, est supérieur à celui de la station de Saméa.

Les spectres d'énergie pour les composantes telluriques EW et NS à Saméa sont également représentés sur la figure 36, de même les cohérences entre les composantes H et EW pour les quatre premières harmoniques. Par contre, pour les composantes D et NS, la cohérence est très mauvaise.

Le niveau du bruit étant évalué à $100 \text{ (mV/km)}^2/\text{Hz}$; nous ne tiendrons donc compte que des énergies ayant un spectre supérieur à $100 \text{ (mV/km)}^2/\text{Hz}$.

B. Station de Kita

La figure 37 représente les spectres de puissance pour les composantes magnétiques et telluriques aux stations de Kita et de M'Bour.

Pour la composante H, le spectre est pratiquement identique aux deux stations et la cohérence supérieure à 0,90.

Pour la composante Z, le spectre à la station de Kita, pour la fondamentale, est nettement inférieur à celui de M'Bour; la cohérence est d'ailleurs très faible (0,60):

Ensuite pour les harmoniques $n = 2; 3$ et 4 la cohérence devient supérieure ou égale à 0,90.

Pour la composante D, la cohérence est très bonne pour les trois premières harmoniques, ensuite la cohérence devient inférieure à 0,75 et le spectre d'énergie inférieur à $10^4 \text{ } \gamma^2/\text{Hz}$.

Pour les composantes telluriques le niveau du bruit est pris égal à $100 \text{ (mV/km)}^2/\text{Hz}$.

Pour l'ensemble de ces deux composantes, on remarque la très faible valeur de la cohérence pour les premières harmoniques. Le spectre de puissance suivant la composante NS est supérieur à celui de la composante EW; ceci est confirmé par l'existence d'un canal conducteur de direction NS à Kita (flèche de Parkinson dirigée vers l'est).

C. Station de Kobala

La figure 38 représente les spectres d'énergie pour les composantes telluriques et magnétiques à la station de Kobala, et les spectres magnétiques pour l'observatoire de M'Bour. On constate une parfaite cohérence (supérieure à 0,90) pour les trois composantes entre les deux stations. Le niveau de bruit à $10^4 \gamma^2/\text{Hz}$ nous limite cependant aux quatre premières harmoniques.

Pour les composantes telluriques, le niveau du bruit est pris égal à $1000 (\text{mV/km})^2/\text{Hz}$ du fait de la plus grande valeur d'échelle K, que dans les deux premières stations.

La cohérence entre les composantes telluriques et magnétiques est très faible. Cependant le niveau du signal tellurique est plus important qu'à Saméa et Kita (environ 10 fois plus). On constate que le spectre suivant la composante EW est supérieur à celui suivant la composante NS.

D. Station de Bafo

La figure 39 représente les spectres d'énergie pour les composantes magnétiques aux stations de Bafo et de M'Bour, et telluriques pour la seule station de Bafo.

On constate pour la composante H, une très bonne cohérence pour les quatre premières harmoniques entre la station de M'Bour et celle de Bafo. Ensuite, à partir de $n = 5$, le signal devient inférieur au niveau du bruit.

Pour la composante Z, la cohérence pour la fondamentale est très faible, ensuite elle devient voisine de 0,90.

Pour la composante D, la cohérence décroît régulièrement de $n = 1$ à $n = 6$.

Pour les composantes telluriques le niveau de bruit est pris égal à $100 \text{ (mV/km)}^2/\text{Hz}$.

On constate la très faible valeur de la cohérence entre les composantes telluriques et magnétiques.

Pour la composante NS, à partir de $n = 4$, le niveau du spectre devient inférieur à $1 \text{ (mV/km)}^2/\text{Hz}$.

La direction de la flèche de Parkinson, pointant vers le nord, est confirmée par la très grande valeur du spectre suivant la direction EW par rapport au spectre suivant la direction NS: il y a canalisation des courants dans la direction EW.

E. Conclusion

Pour l'ensemble des quatre stations, on remarque que:

- les spectres d'énergie pour la composante H sont pratiquement identiques avec ceux de la station de M'Bour,
- les spectres d'énergie pour la composante D sont inférieurs ou égaux à ceux de M'Bour pour les stations de Kita, Kobala et Bafo; c'est le contraire pour la station de Saméa.
- pour la composante Z, les spectres d'énergie sont inférieurs ou égaux à ceux de M'Bour; on remarque la faible valeur du spectre pour la station de Kita, pour les premières harmoniques;
- la très faible cohérence entre les composantes telluriques et magnétiques, cohérence voisine de 0,50.

Remarque:

Sur l'ensemble des figures 36 à 39, les spectres d'énergie pour les composantes magnétiques sont exprimés en γ^2/Hz (à droite); pour les composantes telluriques en $(\text{mV/km})^2/\text{Hz}$ (à gauche).

3. ETUDE DU COMPORTEMENT ANORMAL DES STATIONS DU MALI

A. Introduction

On remarque que pour l'ensemble des stations du Mali la normalisation du spectre, suivant la composante Z, par rapport à M'Bour donne des valeurs très différentes de l'unité dans la plus part des cas. Il est donc nécessaire, pour l'utilisation des données dans le cas des sondages géomagnétiques, de corriger ce comportement anormal d'un facteur que l'on se propose de calculer, par une méthode qui dérive de celle de Parkinson.

Pour une station dite "normale", c'est à dire ayant une distribution de la conductivité stratifiée horizontalement, le rapport $\Delta Z/\Delta \mathcal{H}$ est indépendant de l'azimut du vecteur champ inducteur; $\Delta \mathcal{H}$ étant la variation horizontale $\Delta \mathcal{H} = [(\Delta H)^2 + (\Delta D)^2]^{1/2}$. S'il existe des discontinuités latérales de la conductivité au voisinage de la station, des champs secondaires causés par des courants induits produisent une dépendance de l'azimut du rapport $\Delta Z/\Delta \mathcal{H}$.

Nous avons donc représenté graphiquement, sur une échelle linéaire, l'angle $\theta = \text{arc tg } \Delta Z/\Delta B$ en fonction de l'azimut du champ inducteur, $\phi = \text{arc tg } \Delta D/\Delta H$. L'échelle horizontale des azimuts a été corrigée de la déclinaison et représentée en coordonnées géographiques.

Chaque point de la figure représente un événement géomagnétique particulier compris entre 20 et 60 minutes de périodes

Pour une station normale, les points sont distribués au hasard; dans ce cas le milieu est stratifié horizontalement.

Pour une station "anormale", les points sont distribués suivant une sinusoïde, la valeur de θ est une fonction de ϕ .

"L'intensité" de l'anomalie et sa direction préférentielle sont caractérisées par une flèche d'induction (identique à celle de Parkinson). La direction de la flèche est définie par l'azimut pour lequel θ est minimum et son amplitude est donné par $\sin |\theta_{\min}|$. Les deux valeurs qui définissent la flèche, sont obtenues par la méthode des moindres carrés, à partir des données expérimentales. Pour des petites valeurs de l'amplitude ($\approx 0,25$) les erreurs peuvent être grandes à la fois sur la détermination de la direction et sur celle du module.

B. Etude des Stations

A. Station de M'Bour

Nous avons représenté sur la figure 40 les points correspondant à un certain nombre d'évènements géomagnétiques. Nous obtenons les valeurs suivantes.

$$J_p = 0,52 \pm 0,05$$

$$\theta_p = 255,1 \pm 3,4^\circ$$

On remarque que les points sont surtout localisés autour des azimuts -20° à -60° et 100° à 140° .

2. Station de Saméa

La figure 41 représente le diagramme d'induction pour la station de Saméa. La courbe en trait continu représente le meilleur ajustement d'une sinusoïde, obtenue par la méthode des moindres carrés.

Les valeurs qui définissent la flèche sont:

$$J_p = 0,50 \pm 0,06$$

$$\theta_p = 265,5 \pm 4,6^\circ$$

Pour cette station, les points sont mieux répartis et définissent complètement la sinusoïde.

3. Station de Kita

Sur la figure 42, on remarque que les points sont peu nombreux. En effet, les enregistrements magnétiques à cette station possède peu d'évènements magnétiques isolés, acceptables.

Cependant, on peut définir également une sinusoïde telle que:

$$J_p = 0,49 \pm 0,08$$

$$\theta_p = 282,7 \pm 8,4^\circ$$

On remarque, du fait du nombre de points réduits, l'erreur importante commise sur le module et la direction de la flèche d'induction. Ainsi, sur la direction, l'erreur est deux fois plus grande, pour une valeur de θ_p voisine aux deux stations précédentes.

4. Station de Kobala

Sur la figure 43, l'allure de la courbe est la même que pour les stations précédentes. Les points sont peu nombreux et possèdent une dispersion assez importante, ce qui entraîne une erreur sur le module et la direction de la flèche.

$$J_p = 0,55 \pm 0,09$$

$$\theta_p = 271,8 \pm 7,5^\circ$$

5° Station de Bafo

La figure 44 montre la sinusoïde la mieux adaptée aux données expérimentales. On remarque le changement dans l'allure de la courbe. Les points sont cependant très dispersés et peu nombreux.

$$J_p = 0,50 \pm 0,05$$

$$\theta_p = 354,3 \pm 10,1^\circ$$

6. Conclusion

Il semblerait, donc d'après les études ci-dessus qu'aucune des stations étudiées ait un comportement normal. Au contraire, l'intensité des anomalies considérées est importante, supérieure à 0,50. L'ensemble de ces flèches se rapporte à trois anomalies principales:

- pour M'Bour, à l'effet d'un canal conducteur supposé au large,
- pour Saméa, Kita et Kobala, à la présence d'une forte anomalie gravimétrique correspondant à la séparation zone stable et zone mobile (bassin du Sénégal),
- pour Bafo, à la présence du bassin de Taoudéni.

C. Elimination de la composante anormale

Nous pouvons éliminer maintenant les composantes anormales du champ dépendant de l'azimut; ainsi nous pourrions raisonner dans le cas des sondages géomagnétiques sur des structures tabulaires.

1. Calcul des facteurs de correction

Pour l'ensemble des quatre stations du Mali, nous nous sommes limités aux harmoniques ayant une énergie spectrale supérieure à $10^4 \gamma^2/\text{Hz}$ et une cohérence supérieure à 0,75.

Sur le tableau 19, nous avons représenté le rapport des densités spectrales non corrigé $nc = \frac{Pz \text{ station}}{Pz \text{ M'Bour}}$, le facteur de correction (f) obtenu d'après les courbes d'induction précédentes et le rapport $c = \frac{Pz \text{ station}}{Pz \text{ M'Bour}}$, corrigé.

Station	Saméa			Kita		
	nc	f	c	nc	f	c
1	0,250	1,64	0,42	0,135	5,2	0,70
2	0,24	1,40	0,34	0,25	2,72	0,69
3	0,60	1,35	0,81	0,38	2,67	1,01
4	0,52	1,56	0,81			

Station	Kobala			Bafo		
	nc	f	c	nc	f	c
1	1,58	0,60	0,95	0,53	1,61	0,85
2	0,94	0,89	0,84	0,68	1,04	0,71
3	0,91	0,85	0,77	1,26	0,59	0,74
4				2,45	0,26	0,64

Tableau 19

Nous constatons, que les valeurs corrigées du rapport $\frac{PZ \text{ station}}{PZ \text{ M'Bour}}$ sont voisines de l'unité, sauf pour la station de Saméa. Ceci est dû à la faible cohérence (fig. 36b) entre Saméa et M'Bour. (distribution en dent de scie). Pour la station de Kita, la cohérence pour $n = 1$ est inférieure à 0,75. On constate pour $n = 3$, la forte valeur du rapport c .

Seules les deux stations de Kobala et Bafo donnent une décroissance régulière du rapport c . Cependant pour la station de Bafo, la cohérence pour $n = 1$ est très faible ($\approx 0,25$). Pour ces deux stations, le rapport c est inférieur à l'unité. La différence du rapport c entre les deux dernières stations, montrerait donc que le contraste des résistivités entre Kobala et Bafo s'étend également à grande profondeur.

2. Conclusion

L'utilisation des enregistrements courtes et moyennes périodes nous permettra, dans un deuxième stade, de connaître l'ensemble du spectre magnétique pour les quatre stations du Mali. Le calcul des facteurs de correction, permettra alors le calcul des conductivités par la méthode des sondages géomagnétiques.

4. ETUDE MAGNETO-TELLURIQUE DES STATIONS DU MALI

A. Introduction

Connaissant les spectres de puissance magnétiques et telluriques, pour les quatre premières harmoniques de la variation diurne, on détermine les résistivités apparentes ρ_a suivant les directions NS et EW magnétiques. Ces résistivités sont fonction de la période et telles que:

$$\rho_{NS} = 0,2 T \frac{P_{NS}}{P_L}$$

$$\rho_{EW} \hat{=} 0,2 T \frac{P_{EW}}{P_H}$$

(33)

- ρ_{NS} et ρ_{EW} = résistivités apparentes en ohms-mètres (Ωm) dans les directions NS et EW magnétiques,

- T = période en secondes

- P_{NS} , P_{EW} = densité spectrale des composantes telluriques $(mV/km)^2/Hz$

- P_D , P_H = densité spectrale des composantes magnétiques en γ^2/Hz .

Pour les grandes périodes, il est difficile d'estimer jusqu'à où la résistance diminue ou quelle grandeur la conductivité atteint, parce que la variation diurne est encore de période trop courte. Pour cela, il faudrait utiliser les post-perturbations des grandes oranges. Dans ce cas, il est cependant de nouveau difficile de garantir la constance de base nécessaire des courant telluriques sans qu'ils soient falsifiés par d'autres influences.

B. Résultats aux 4 stations

1. Station de Saméa

Nous avons une bonne cohérence entre les composantes H et EW (fig. 36a). Pour les composantes D et NS, la cohérence est très faible et les valeurs de la résistivité apparente ne sont données qu'à titre indicatif (tableau 20).

n	ρ_{EW} (Ωm)	ρ_{NS} (Ωm)
1	268	121
2	306	82
3	233	52
4	1200	15

Tableau 20

On remarque que pour $n = 4$, le spectre d'énergie est égal au niveau du bruit; la valeur correspondante de la résistivité ne doit donc pas être prise en considération.

Pour la résistivité ρ_{NS} , les seules valeurs à considérer sont celles pour lesquelles la cohérence est supérieure à 0,75, c'est à dire les harmoniques $n=2$ et 3.

Les résistivités suivant la direction EW sont environ 4 fois supérieure à celles suivant la direction NS.

2. Station de Kita

Pour l'ensemble des deux composantes magnétiques et telluriques, la cohérence est très faible, en particulier sur les premières harmoniques. Cette faible valeur de la cohérence, surtout pour le couple D-NS, est caractéristique d'un bruit important dans le signal tellurique.

Le calcul des résistivités apparentes, à partir de ces données, est donc très problématique (tableau 21)

n	ρ_{EW} (Ωm)	ρ_{NS} (Ωm)
1	80	360
2	170	430
3	90	705
4	27	-

Tableau 21

3. Station de Kobala

Pour les quatre premières harmoniques, la cohérence entre les couples NS et D, respectivement EW et H, est voisine de 0,50, c'est à dire nettement en dessous de la limite que nous nous sommes fixés (0,75). Cependant le signal tellurique est plus important que pour les deux stations précédentes, de l'ordre de 10^6 (mV/km)²/Hz pour la fondamentale (la cohérence est pourtant faible: 0,75 pour le couple H-EW et 0,35 pour le couple D-NS). Les résistivités calculés pour les spectres magnétiques et telluriques de la figure 38 sont représentés sur le tableau 22 ci-dessous:

n	ρ_{EW} (Ωm)	ρ_{NS} (Ωm)
1	343	530
2	415	108
3	1615	435
4	319	900

Tableau 22

4. Station de Bafo

On constate sur les figures 39a et 39b la grande valeur du spectre tellurique EW, comparée à celle du spectre NS. La cohérence entre les composantes telluriques et magnétiques est encore de l'ordre de 0,50. Le calcul des résistivités suivant les deux directions orthogonales NS et EW magnétiques, donne (tableau 23):

n	ρ_{EW} (Ω_m)	ρ_{NS} (Ω_m)
1	22	10
2	1,4	7,7
3	3	7,7
4	2	22

Tableau 23

5. Conclusion

Le calcul des résistivités apparentes est gêné par la très faible valeur de la cohérence entre les composantes magnétiques et telluriques (jamais supérieure à 0,50).

Les résultats obtenus montrent des différences entre les directions EW et NS magnétiques. Pour un sous-sol en couches horizontales, on devrait obtenir dans chaque direction et pour une période donnée, les mêmes résistivités apparentes.

SIXIEME PARTIE

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation des enregistrements longues périodes nous a permis de déterminer les coefficients harmoniques de la variation diurne et à partir de là, une connaissance des profondeurs de pénétration de l'onde diurne et de ses harmoniques.

Les résultats sont surtout intéressants pour les stations de Saméa et Bafo. L'onde diurne à une profondeur de pénétration identique pour la fondamentale ($n=1$), par contre pour l'harmonique d'ordre 2 ($n=2$), on constate pour la station de Bafo une décroissance rapide de la profondeur (diminution de près de 300 km, alors qu'à Saméa, elle n'est que de 100 km).

L'application de la méthode M.T., s'est révélée décevante: cohérence très faible entre composantes magnétiques et telluriques ($\approx 0,50$), très grande dispersion des points. L'amélioration des enregistrements telluriques s'impose (dérive thermique).

Il s'avère maintenant nécessaire, de faire une digitalisation plus poussée des enregistrements longues périodes, pour pouvoir exploiter au maximum les orages magnétiques.

Les profondeurs de pénétration importantes, obtenues aux différentes stations, pour les harmoniques de la variation diurne montrent la nécessité de prendre au moins une dizaine de jours pour cette étude.

La profondeur de pénétration pour la fondamentale ne devrait pas dépasser 800 km (SCHMUCKER, 1970).

Actuellement, les enregistrements courtes, moyennes et longues périodes sont en cours de digitalisation automatique en France, à Bondy. Les résultats obtenus ensuite, par passage à l'ordinateur, permettront une étude beaucoup plus complète de la nature du sous-sol en République du Mali.

SEPTIEME PARTIE

BIBLIOGRAPHIE

ALBOUY, Y. et H.G. BARSCZUS - 1969

Etude d'effet de bord de mer et sondages géomagnétiques au Sénégal, 2° Avant-projet. Rapport polycop., ORSTOM, Centre de M'Bour, 31 p., fig., juin 1969

ALBOUY, Y., H.G. BARSCZUS et L. MOLLARD - 1970 a

Sondages géomagnétiques et magnéto-telluriques au Sénégal. Rapport prélim. N°1, Enregistrements magnétiques et telluriques à N'Dioukh-Médoune - Rapp. Polycop., ORSTOM, Centre de M'Bour, 7 p., 2 fig., juillet 1970

ALBOUY, Y., H.G. BARSCZUS et L. MOLLARD - 1970 b

Sondages géomagnétiques et magnéto-telluriques au Sénégal. Rapport prélim. N°2, Enregistrements magnétiques et telluriques à Diakhaté (1970-71) - Rapp. polycop., ORSTOM, Centre de M'Bour, 17 p., 18 fig., 1971

ALBOUY, Y., H.G. BARSCZUS et B. CANER - 1972

Preliminary geomagnetic soundings in Western Africa. Communication: Workshop on Electromagnetic Induction, University of Edinburgh, 20-27 september 1972

ALBOUY, Y., H.G. BARSCZUS, L. MOLLARD et M. RITZ - 1973 a

Sondages magnéto-telluriques et géomagnétiques en Afrique de l'Ouest. Rapport prélim. N°3, Enregistrements magnétiques et telluriques dans la région de Saméa (Bafoulabé) Mali. (mars-avril 1972) - Rapp. polycop., ORSTOM, Centre de M'Bour, 16 p., 7 fig., avril 1973

ALBOUY, Y., H.G. BARSCZUS, L. MOLLARD et M. RITZ - 1973 b

Sondages magnéto-telluriques et géomagnétiques en Afrique de l'Ouest. Rapport prélim. N°4, Enregistrements magnétiques et telluriques dans la région de Kita, Mali (mai 1972) - Rapp. polycop., ORSTOM, Centre de M'Bour, 14 p., 8 fig., avril 1973

BARSCZUS H.G. - 1969 a

Sur l'utilisation des coefficients harmoniques S_1 à S_4 de la variation diurne du champ géomagnétique pour la détection d'anomalies profondes de la conductivité. Application à l'anomalie du Japon. Rapport dactylogr., ORSTOM, Centre de M'Bour, 13 p., 16 fig., main 1969

BARSCZUS H.G. - 1969 b

Sur l'utilisation des coefficients harmoniques S_1 à S_4 de la variation diurne solaire pour la détection d'anomalies profondes de la conductivité. Application à la péninsule ibérique et des zones alpines et des Balkans. Rapport dactylogr., ORSTOM, Centre de M'Bour, 12 p., 4 fig., main 1969

CHAPMAN. S. et J. BARTELS - 1940

Geomagnetism, vol. 1 et 2 - Oxford, Clarendon Press, 1940

LAHIRI, B.N. et A.T. PRICE - 1939

Electromagnetic induction in non-uniform conductors and the determination of the conductivity of the earth from terrestrial magnetic variations. Phil transact. Roy. Soc. London, ser. A, 237 (1939) 509-540

PARKINSON, W.D. - 1959

Directions of rapid geomagnetic fluctuations, Geoph. J. roy. astr. Soc., 2. 1. (1959) 1-14

PARKINSON, W.D. - 1962

The influence of continents and oceans on geomagnetic variations. Geoph. J. roy. astr. Soc., 6. 4. (1962) 441 - 449

RITZ M., H.G. BARSCZUS, L. MOLLARD et R. FOY - 1973

Sondages magnéto-telluriques et géomagnétiques en Afrique de l'Ouest. Rapport prélim. N°5, Enregistrements magnéto-telluriques et magnétiques dans la région de Ségou, Mali (avril-mai 1973) - Rapp. Polycop., ORSTOM, Centre de M'Bour, 29 p., 27 fig., août 1973

SCHMUCKER, U. - 1964

Anomalies of geomagnetic variations in the Southwestern United States. J. Geomagn. Geoelectr. Japan, 15. 4. (1964) 193 - 221

SCHMUCKER, U. - 1970

Anomalies of geomagnetic variations in the Southwestern United States. Bull. Scripps Inst. Oceanogr., Univ. of Calif., San Diego, La Jolla, Calif, vol. 13 (1970) 165 p.

UNTIEDT, J. - 1964

Über den linearen Zusammenhang zwischen den Komponenten erdmagnetischer Variationen und seine Bedeutung für die erdmagnetische Tiefensondierung. Nachr. Akad - Wiss. Göttingen, math. - Phys. Kl., N°1 (1964) 24 p. (traduction française ORSTOM M'Bour).

WHITHAM, K. - 1963

An anomaly in Geomagnetic variation at Mould Bay in the Artic Archipelago of Canada. Geoph. J. roy. astr. Soc., 8. (1968) 26-43

WIESE, H. (1965)

Geomagnetische Tiefentellurik. Geomagn. Institut Potsdam, Abhandlz. N°36 (1965) 146 p. (traduction française ORSTOM M'Bour)

WIESE, H. (1965)

Geomagnetische Tiefentellurik. Geomagn. Institut Potsdam, Abhandlz. N°36 (1965) 146 p. (traduction française ORSTOM M'Bour)

HUITIEME PARTIE

FIGURES

- Fig. 1 Carte géologique montrant l'emplacement des différentes stations.
- Fig. 2 Chaines d'enregistrement des perturbations magnétiques et telluriques.
- Fig. 3 Distribution des courants induits dans le cas d'un changement de structure géologique.
- Fig. 4 Eléments du champ géomagnétique.
- Fig. 5 Diagramme polaire du vecteur perturbation du champ magnétique.
- Fig. 6 Ellipse montrant l'intersection des vecteurs perturbateurs avec une sphère de rayon 1, dans le plan horizontal.
- Fig. 7 Définition du vecteur de PARKINSON
- Fig. 8 Diagramme polaire pour la station de M'Bour
- Fig. 9 " " " "
- Fig. 10 " " " Saméa
- Fig. 11 " " " Kita
- Fig. 12 " " " Kobala
- Fig. 13 " " " Bafo
- Fig. 14 Diagramme des perturbations baie à M'Bour
- Fig. 15 " " " Saméa
- Fig. 16 " " " Kita
- Fig. 17 " " " Kobala
- Fig. 18 " " " Bafo
- Fig. 19 Variation diurne (Sq) pour la composante H
M'Bour-Saméa

- Fig. 20 Variation diurne (Sq) pour la composante D à
M'Bour - Saméa
- Fig. 21 " " Z à
M'Bour-Saméa
- Fig. 22 " " H à
M'Bour - Kita
- Fig. 23 " " D à
M'Bour Kita
- Fig. 24 " " Z à
M'Bour - Kita
- Fig. 25 " " H à
M'Bour - Kobala
- Fig. 26 " " D à
M'Bour - Kobala
- Fig. 27 " " Z à
M'Bour - Kobala
- Fig. 28 " " H à
M'Bour - Bafo
- Fig. 29 " " D à
M'Bour - Bafo
- Fig. 30 " " Z à
M'Bour - Bafo
- Fig. 31 Variation des coefficients de la variation diurne pour la composante H
- Fig. 32 " D
- Fig. 33 " Z
- Fig. 34 Variation de la profondeur de pénétration et de la résistivité apparente en fonction de la période à la station de M'Bour
- Fig. 35 " Saméa
- Fig. 36 Spectre d'énergie et cohérence en fonction de la période pour le couple M'Bour - Saméa
- Fig. 37 " " M'Bour - Kita
- Fig. 38 " " M'Bour - Kobala
- Fig. 39 " " M'Bour - Bafo

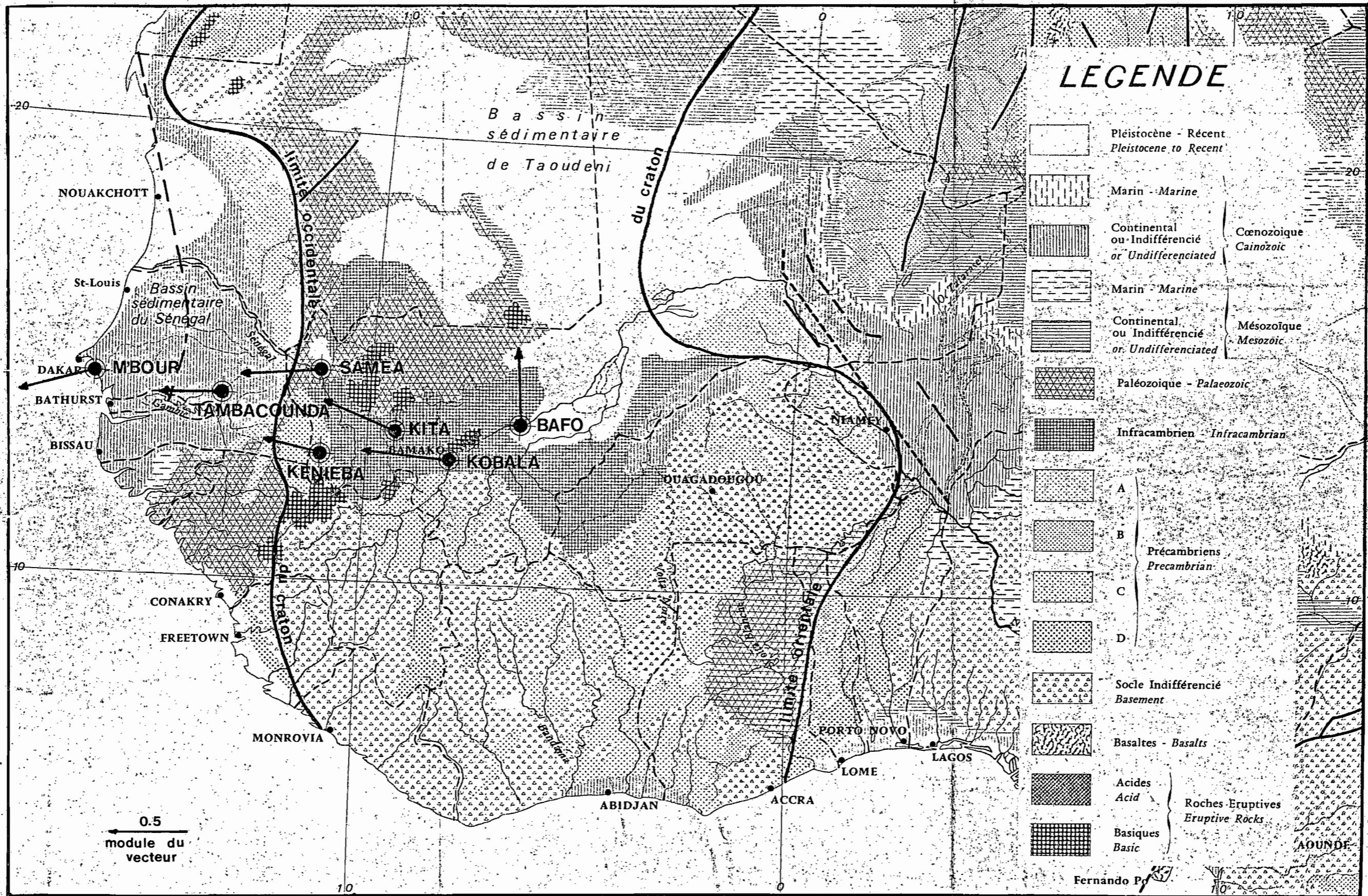


Figure 1

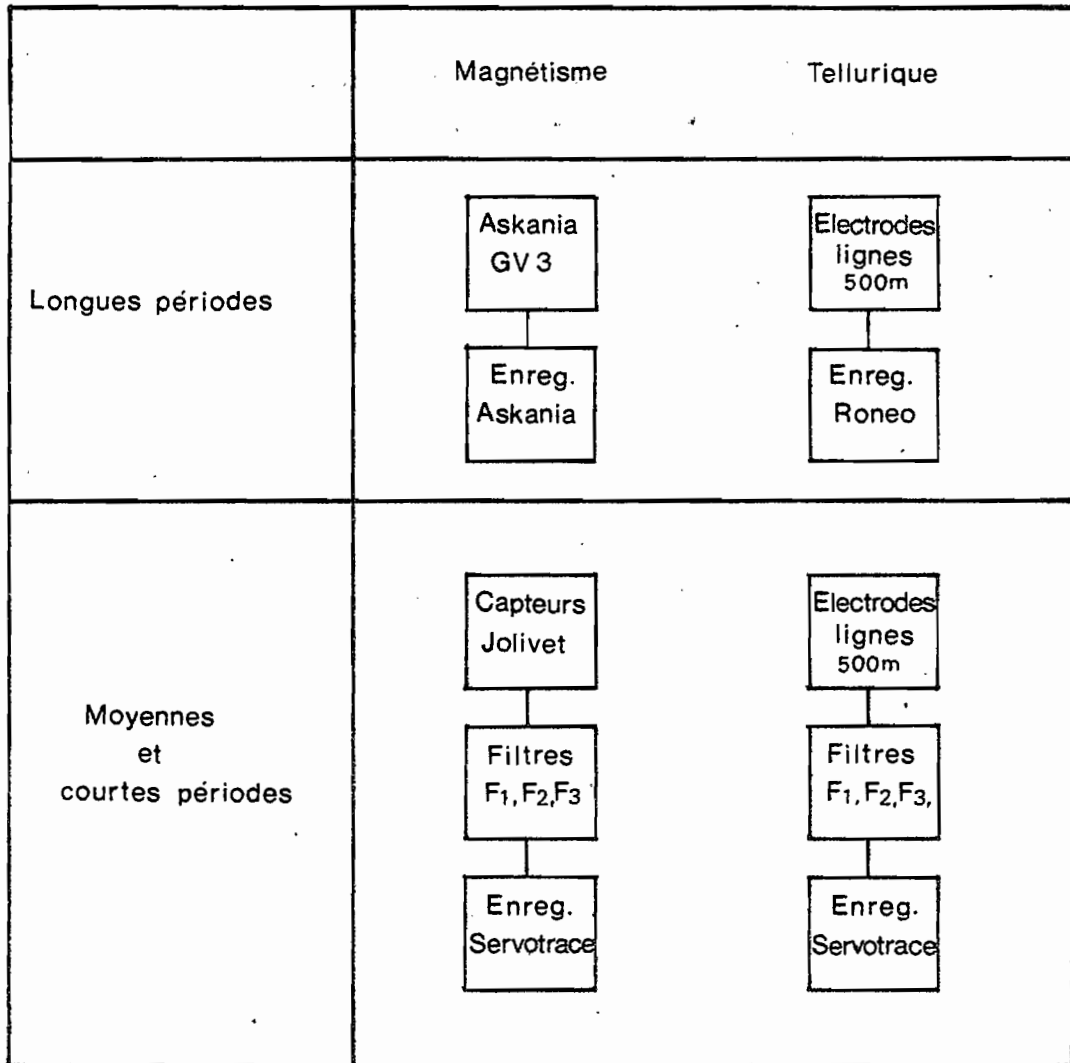


Figure 2

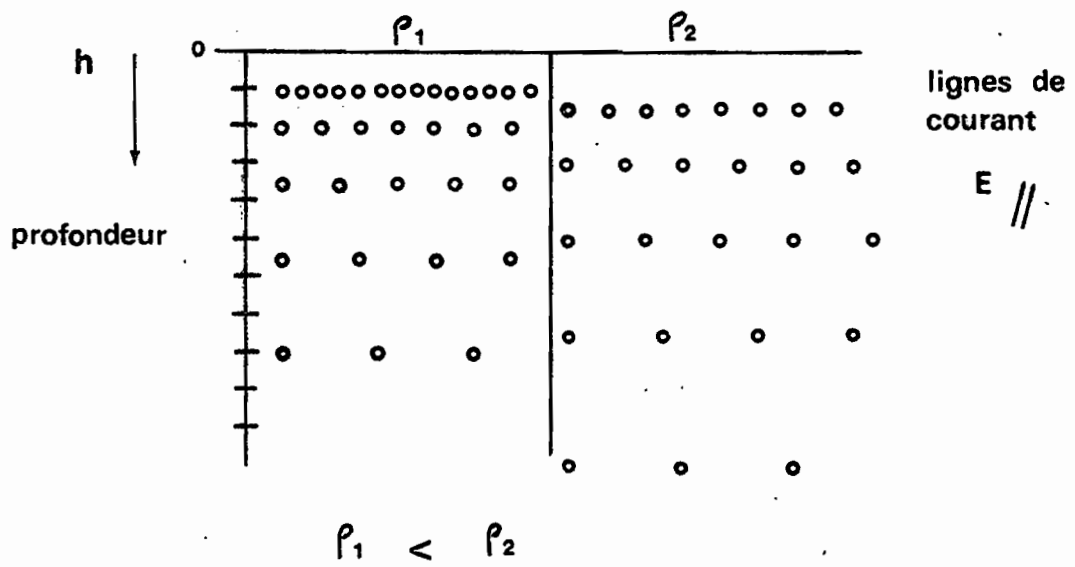
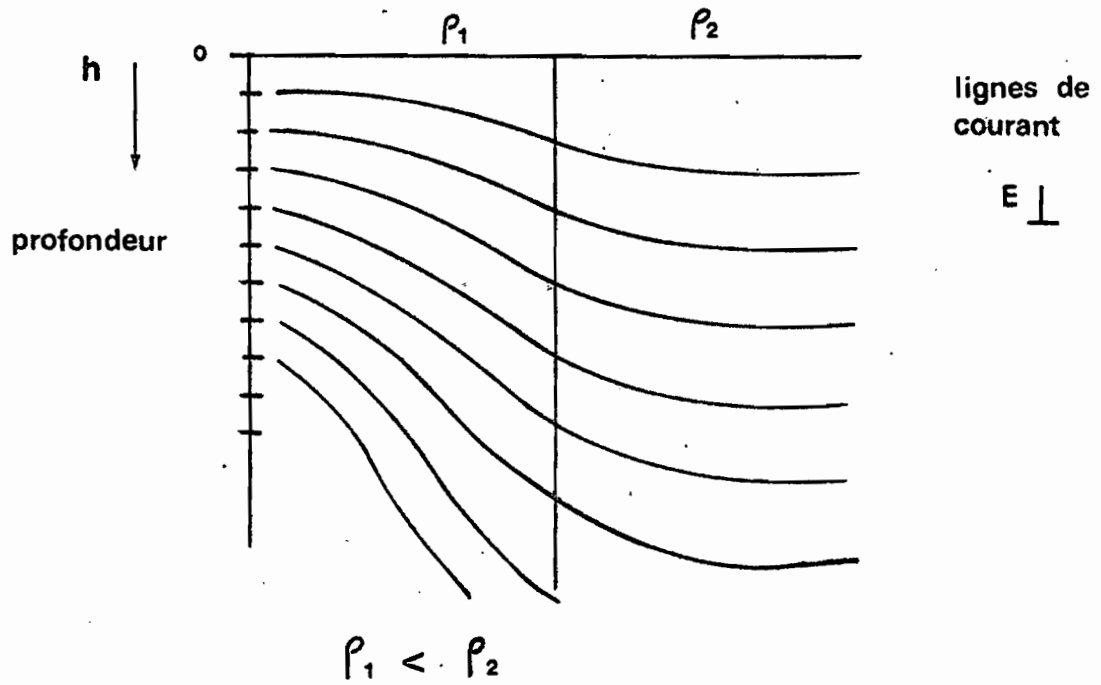


Figure 3

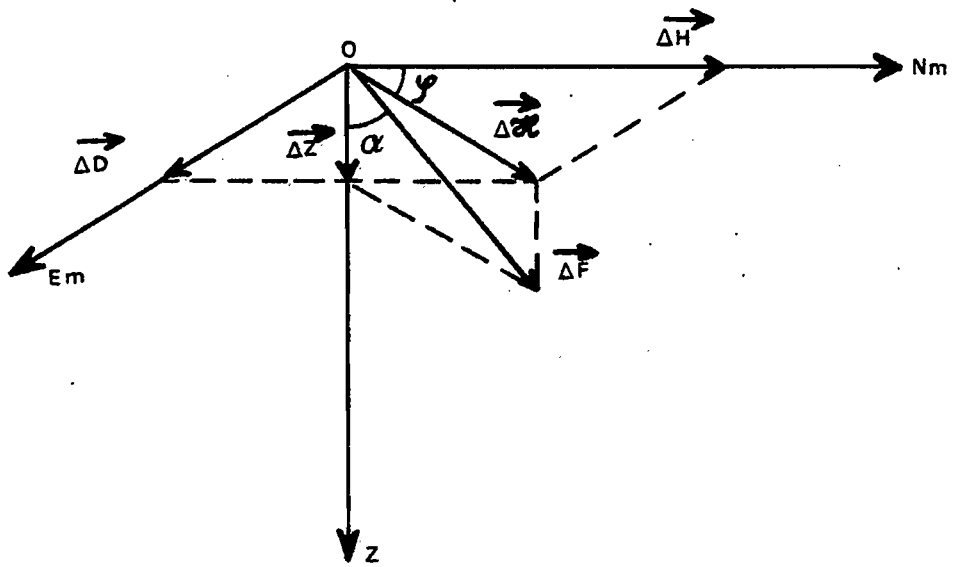


Figure 4

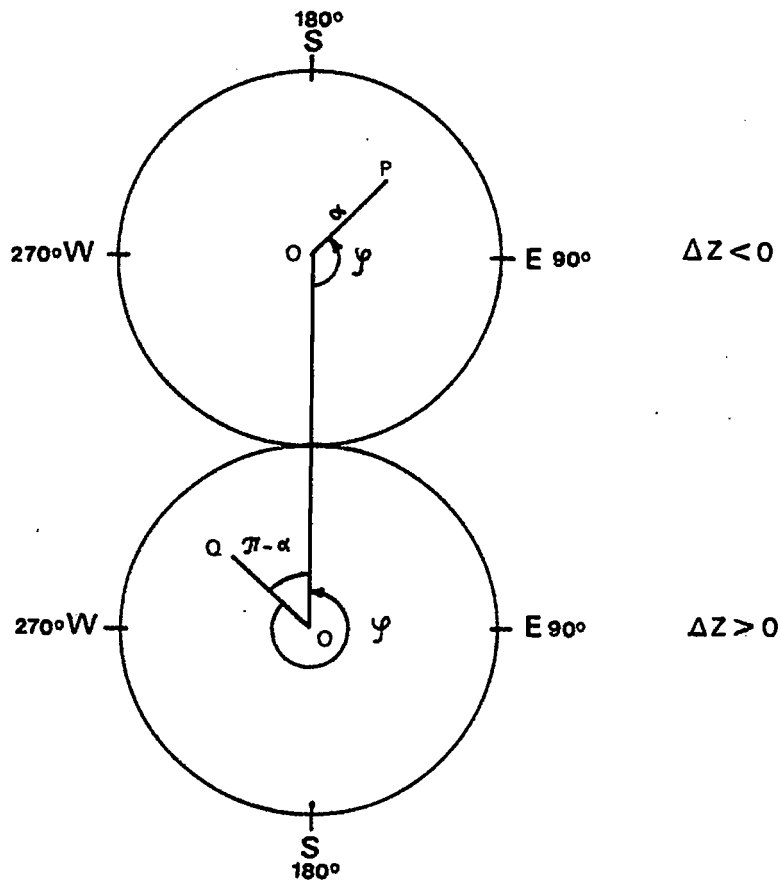


Figure 5

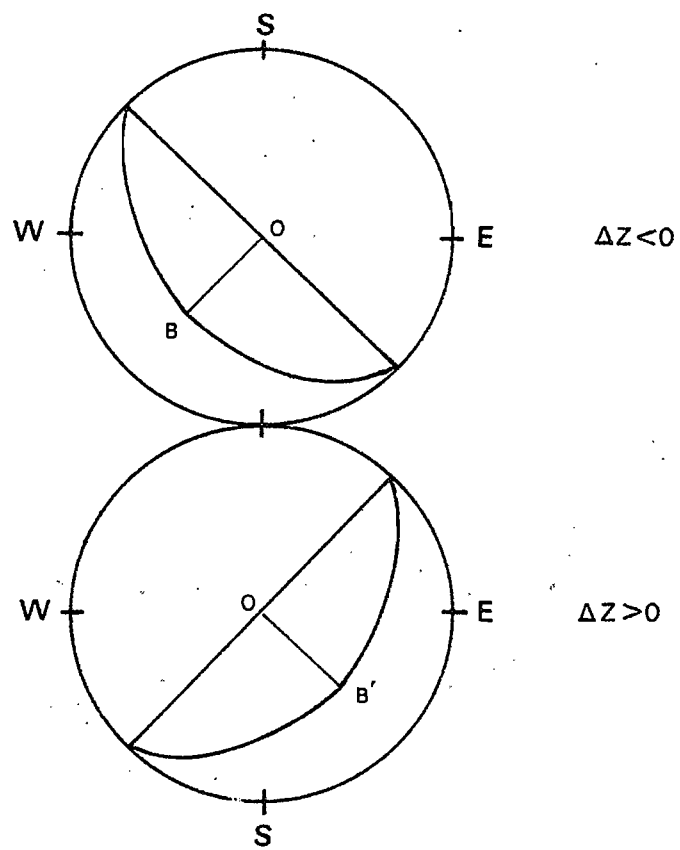


Figure 6

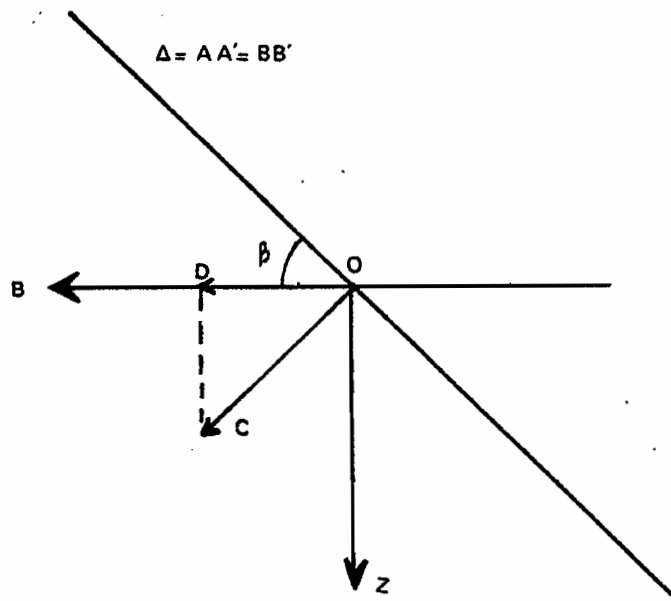


Figure 7

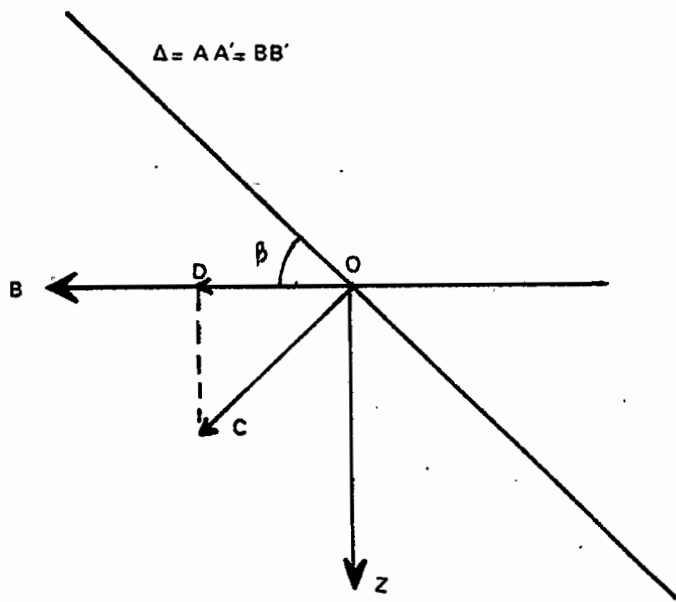


Figure 7

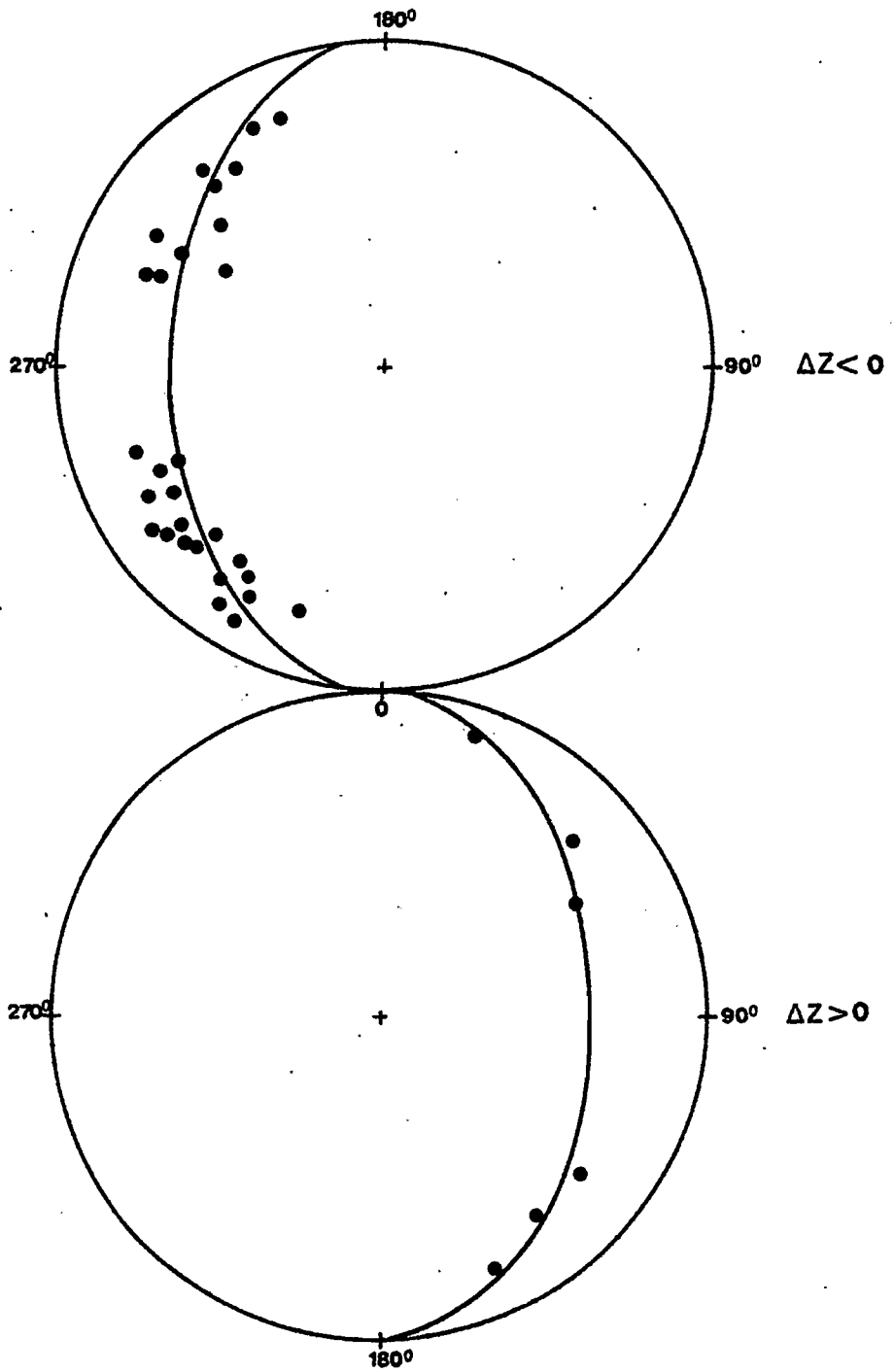


Figure 8

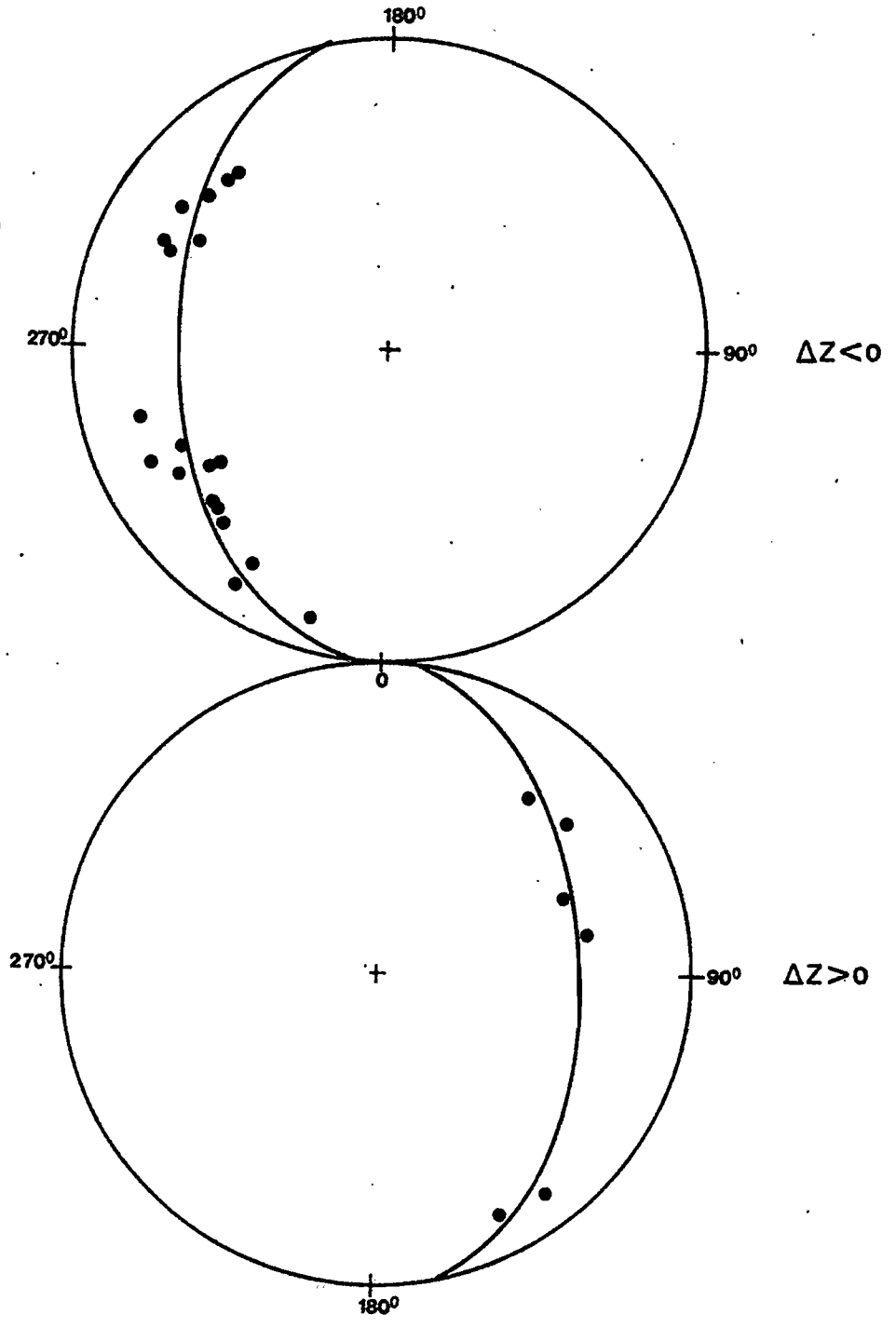


figure 9

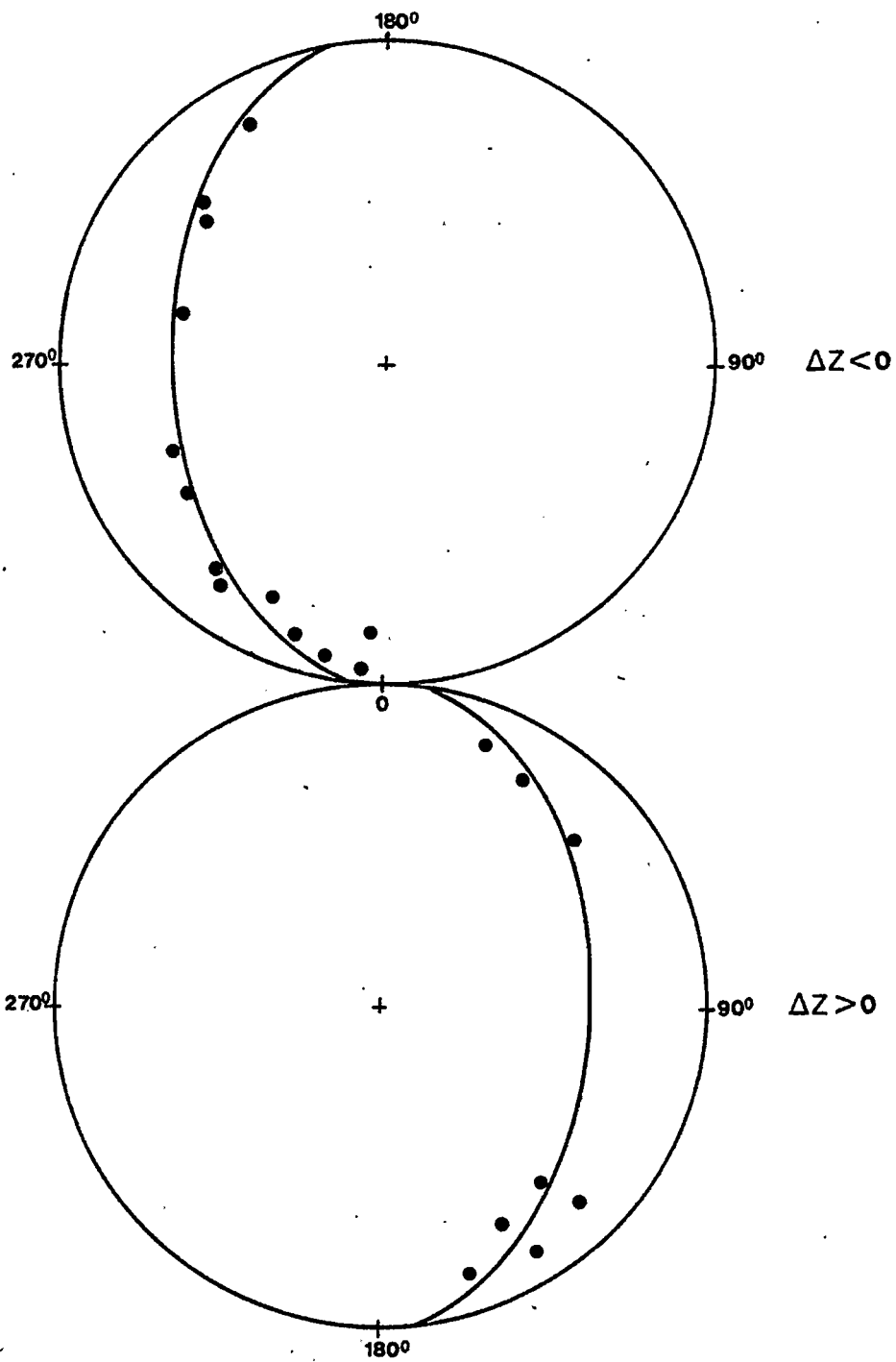


Figure 10

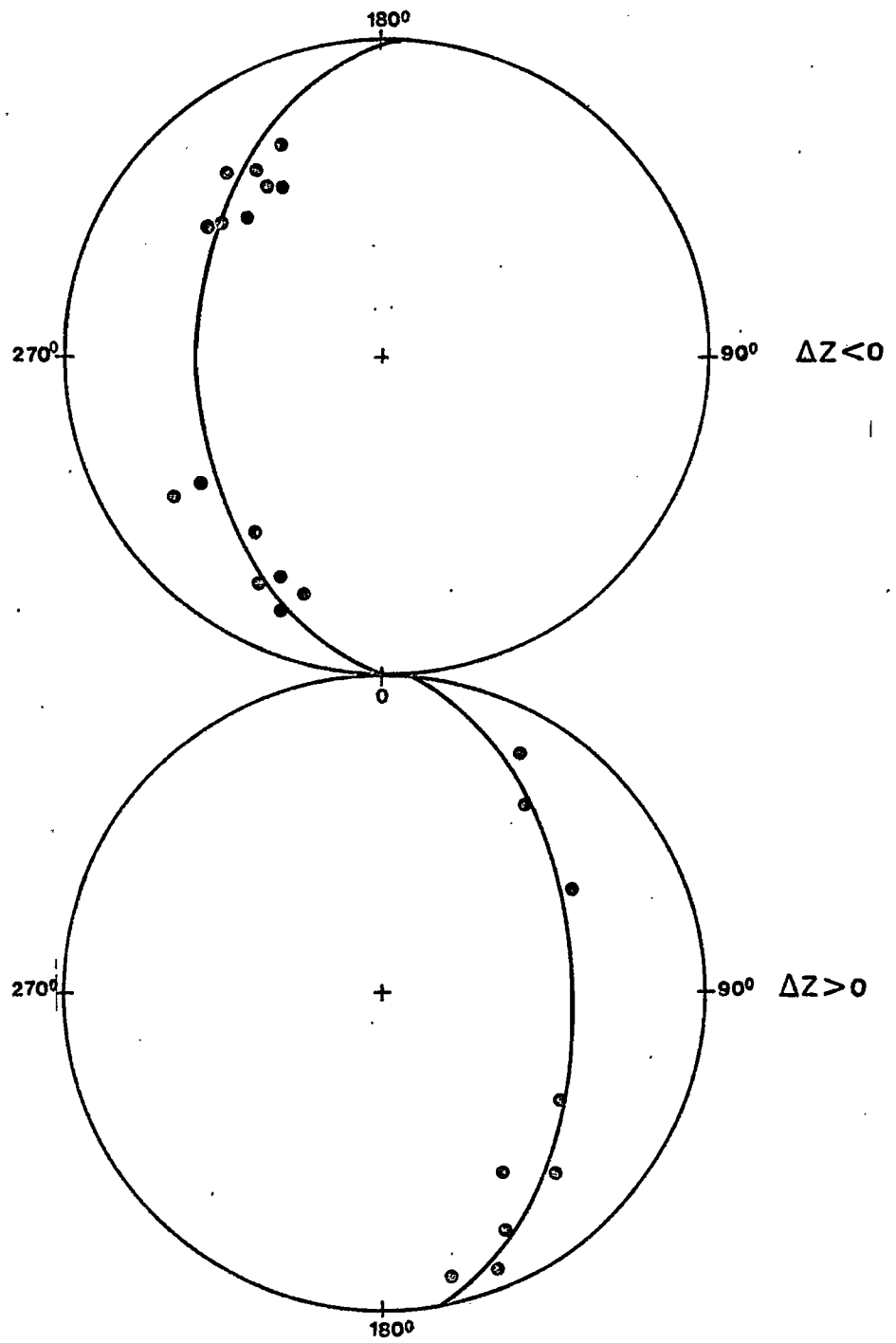


Figure 11

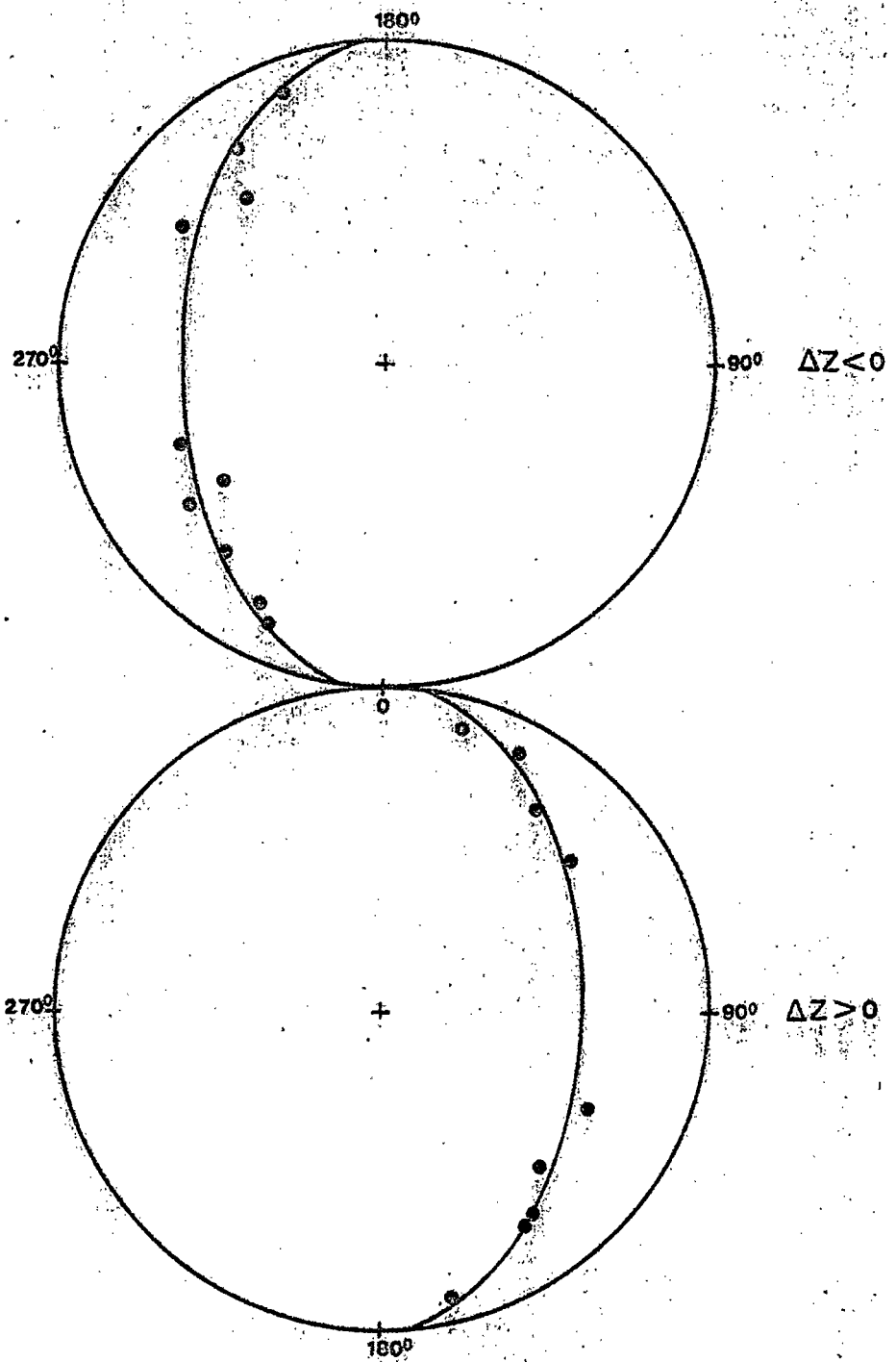


Figure 12

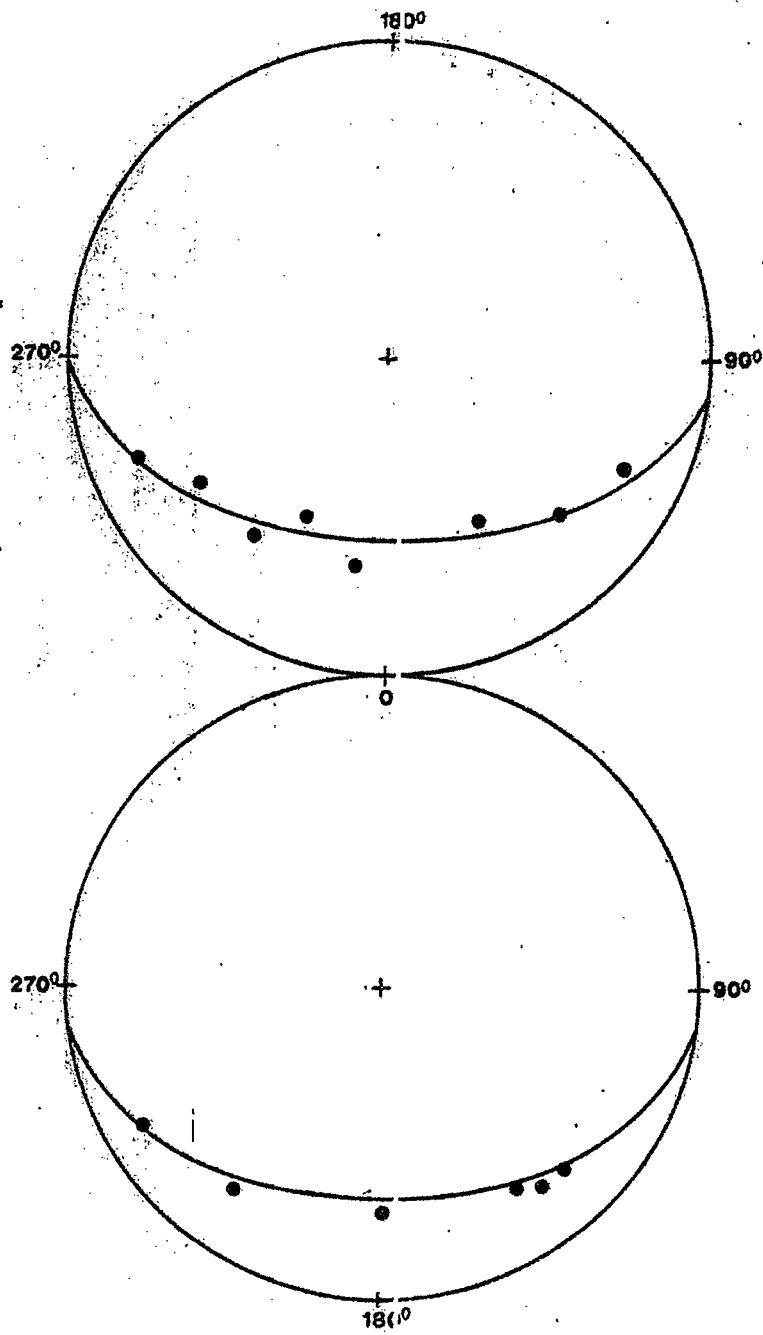


Figure 13

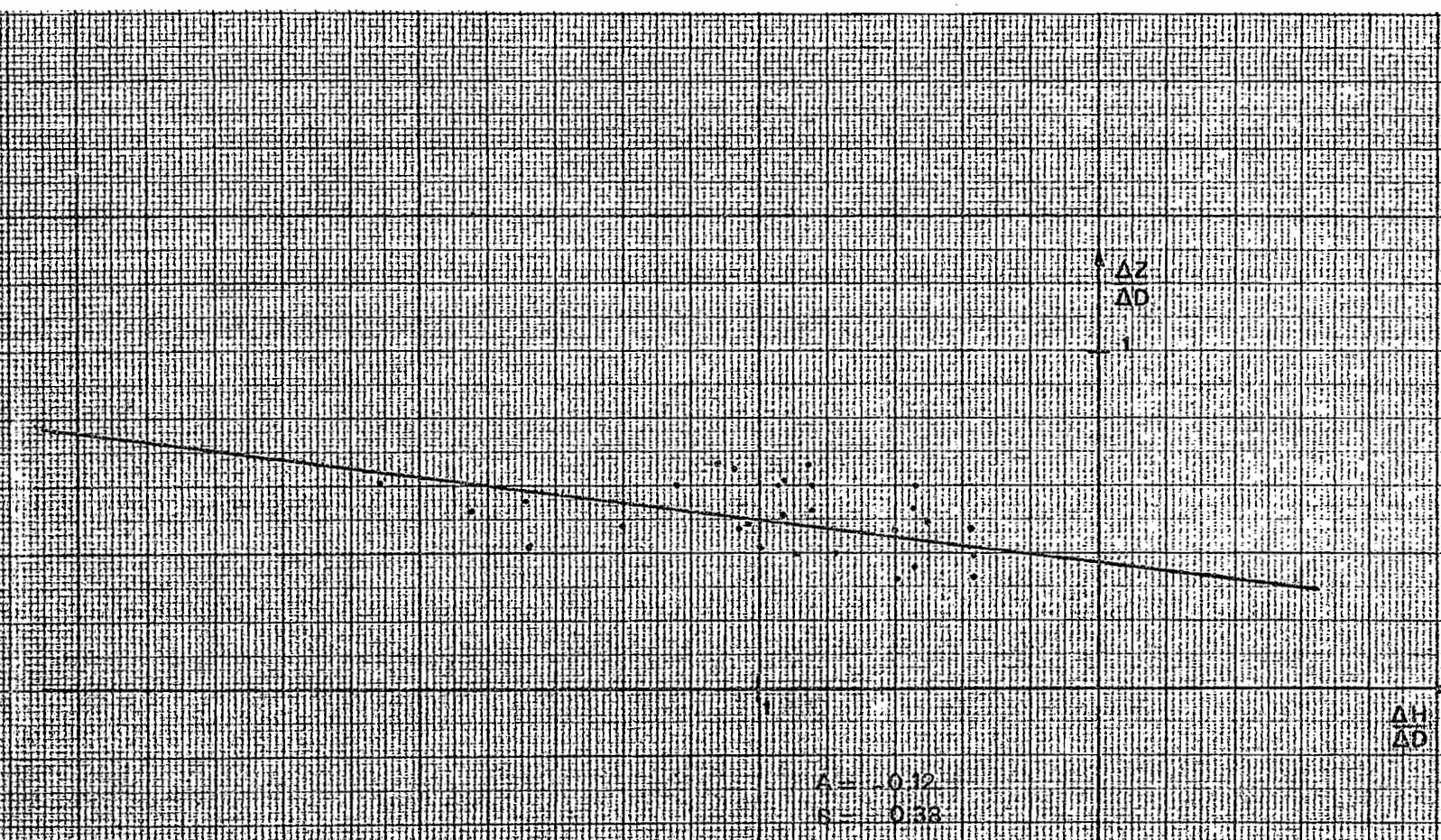


Fig. 10

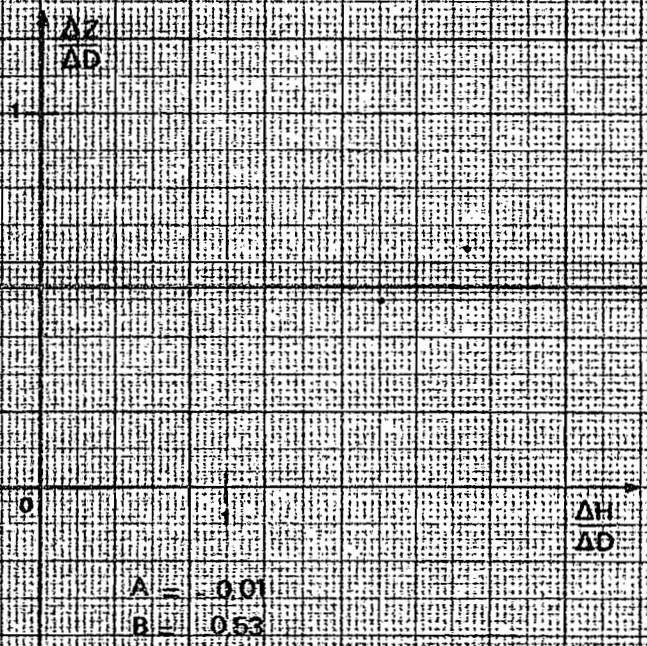


Fig. 15

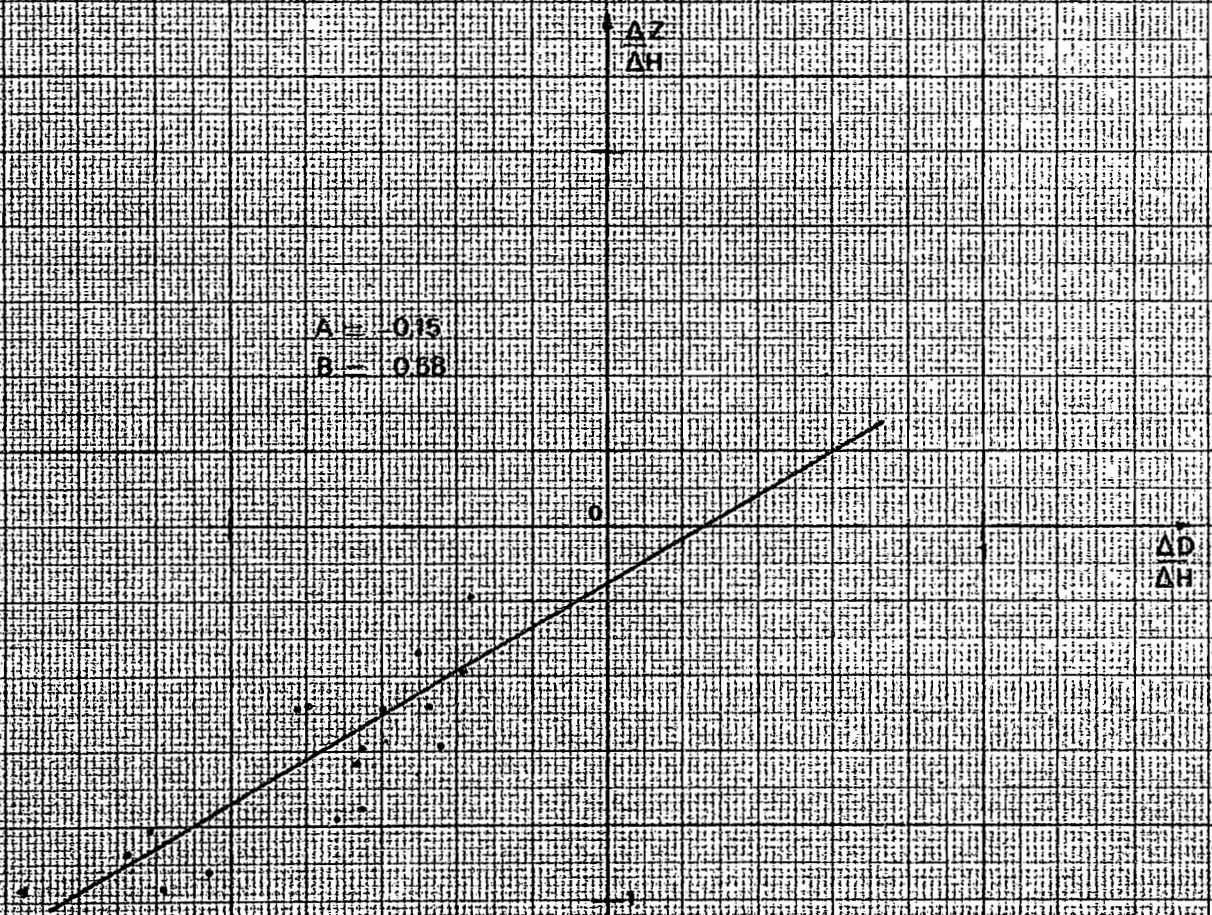


Fig. 16

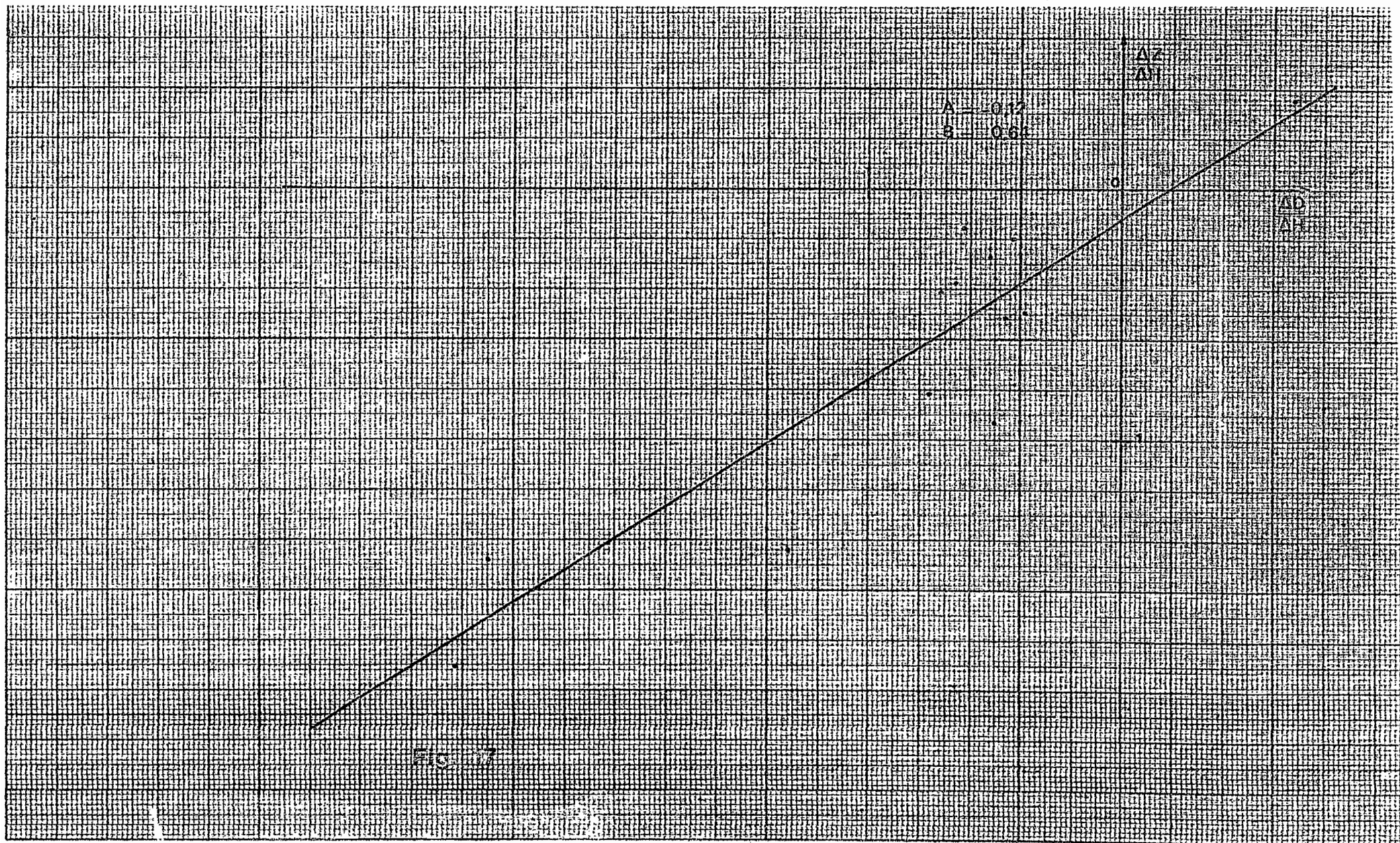


FIG. 17

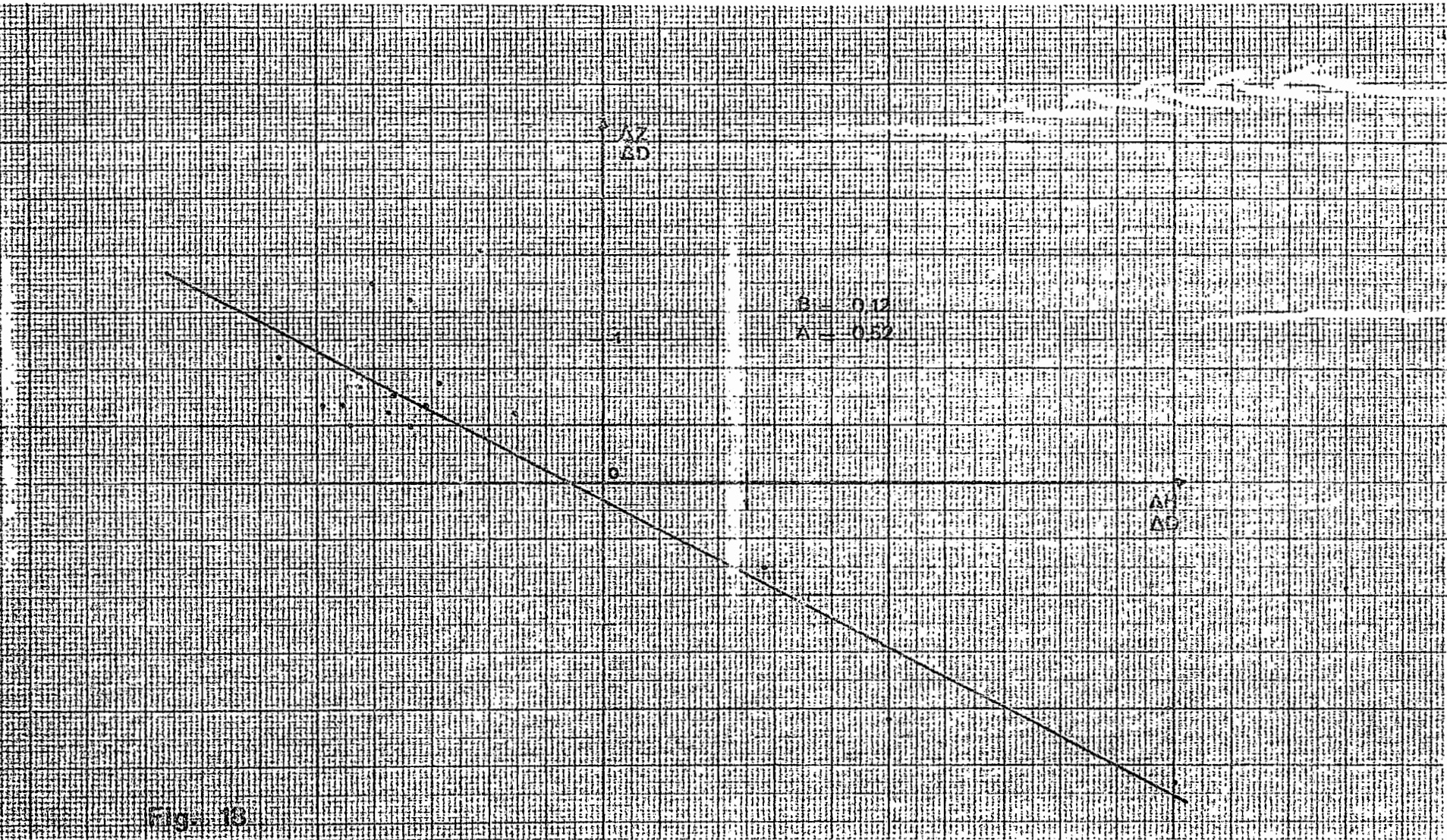


Fig. 10

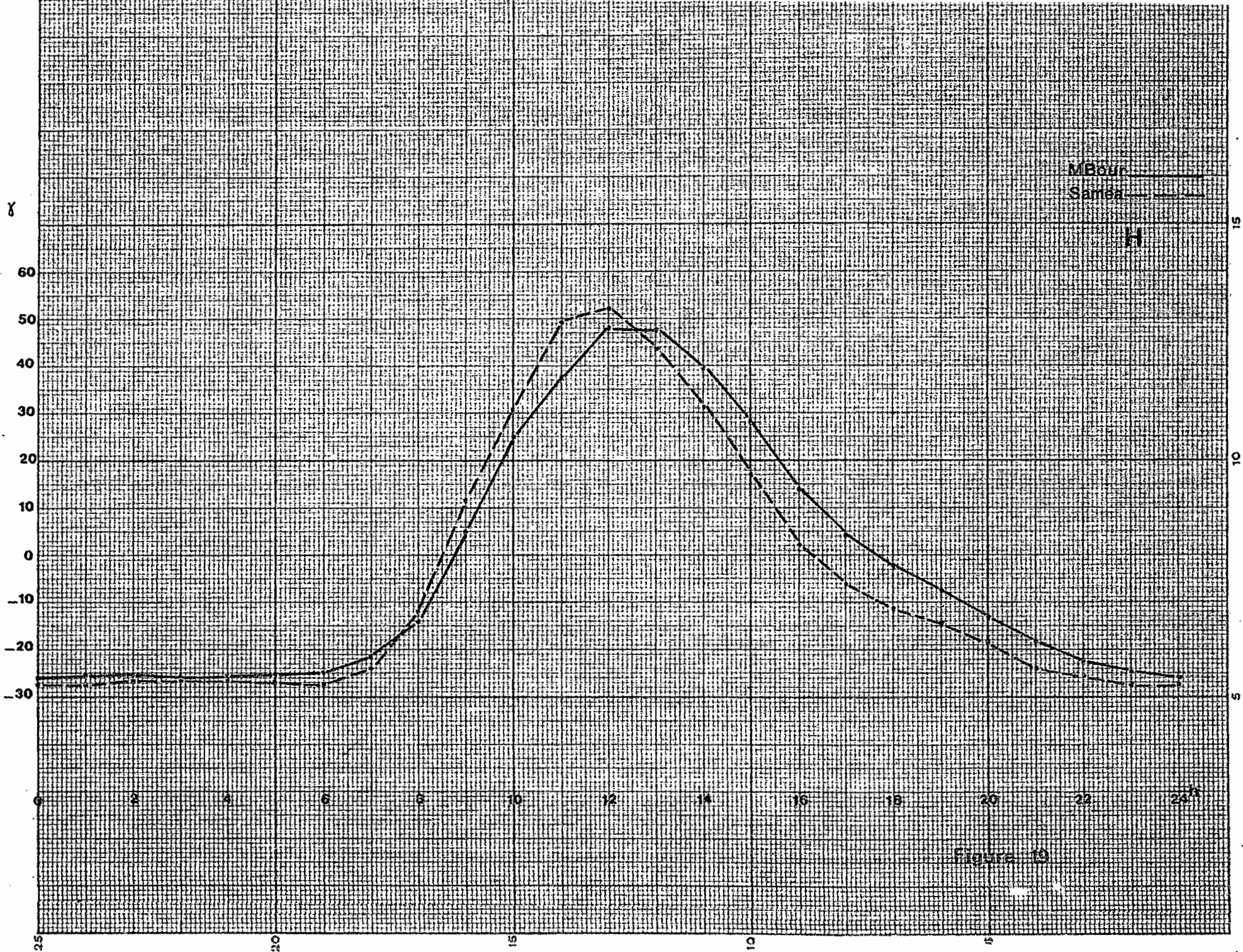


Figure 10

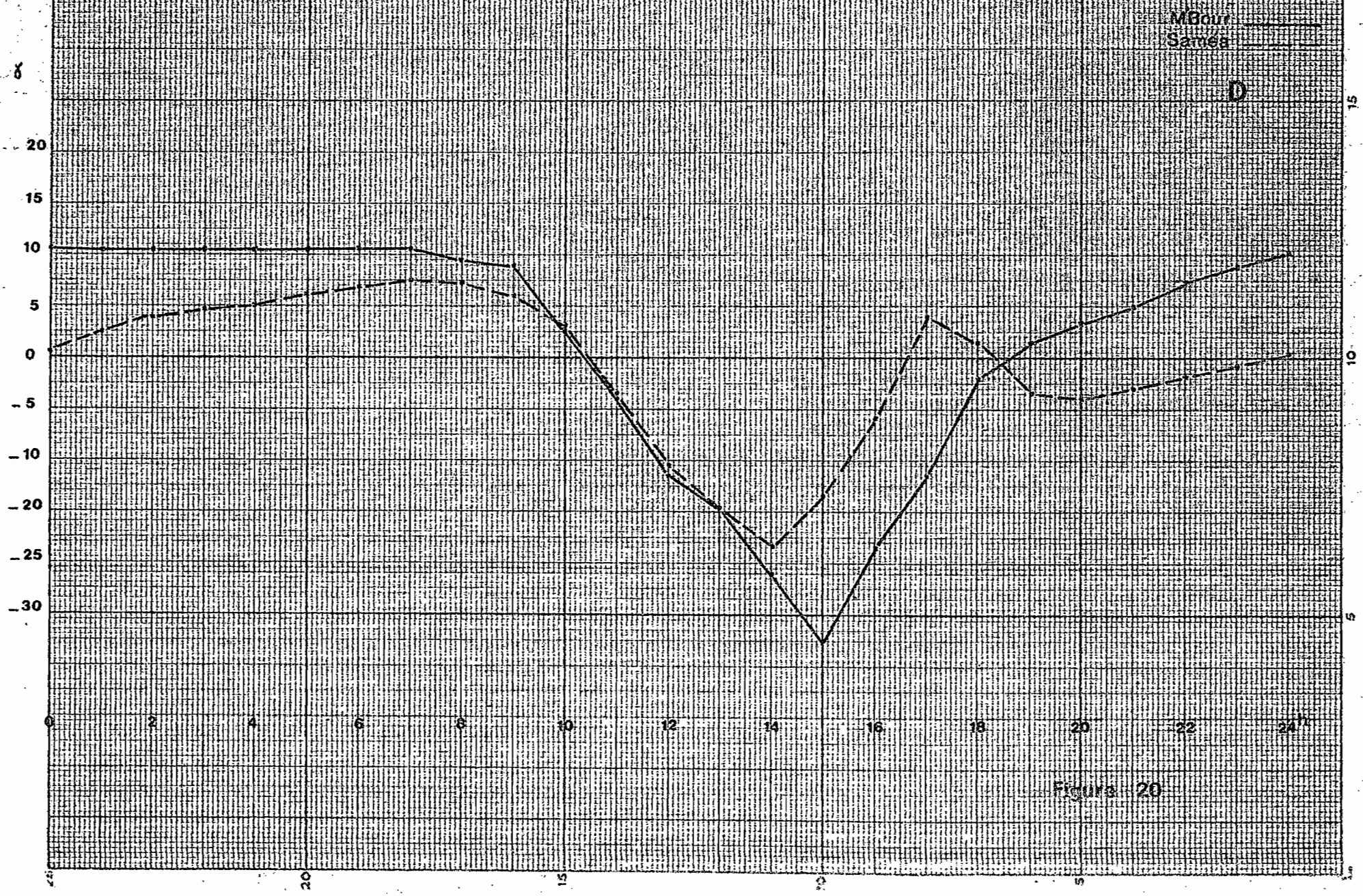


Figure 20

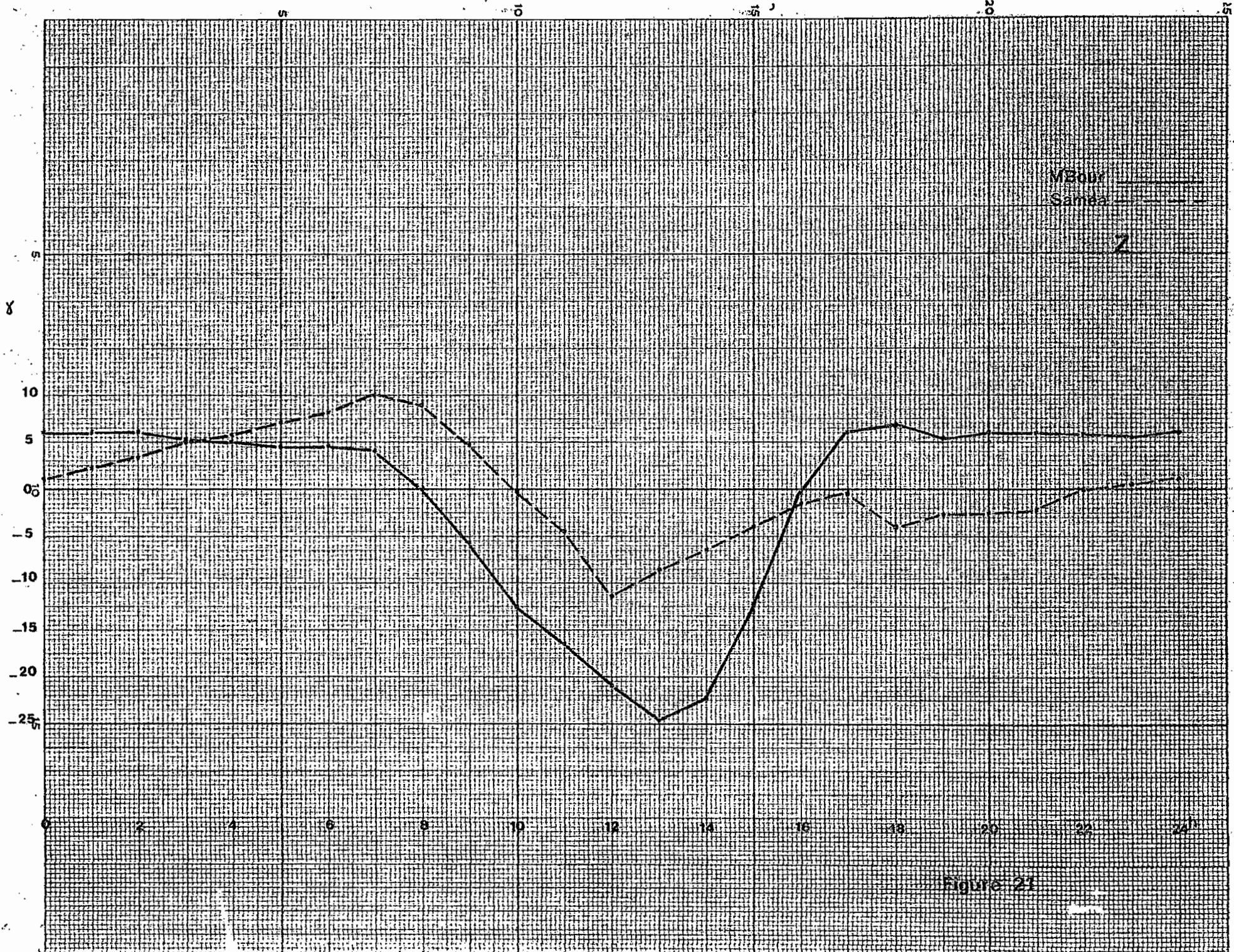


Figure 21

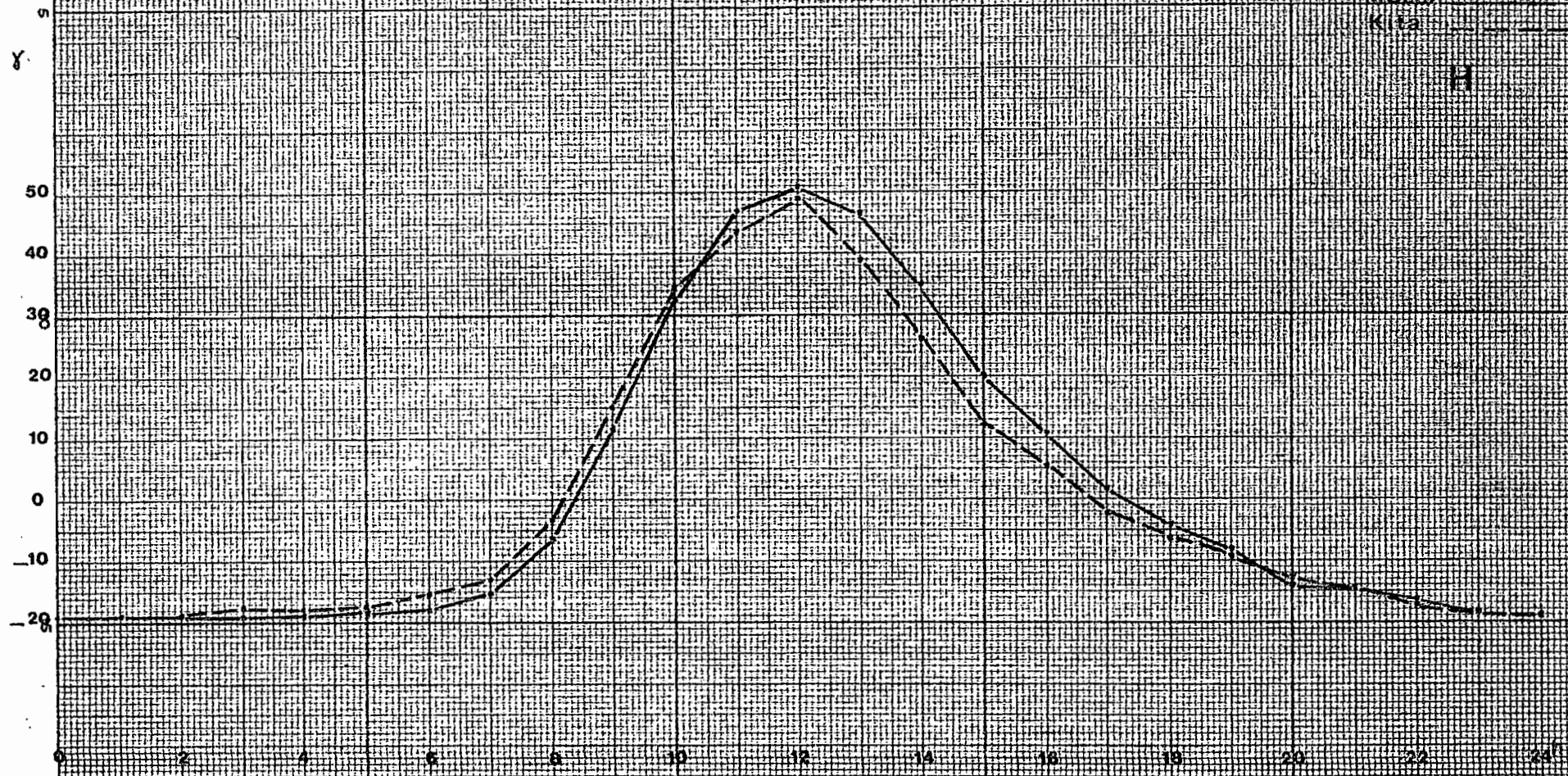
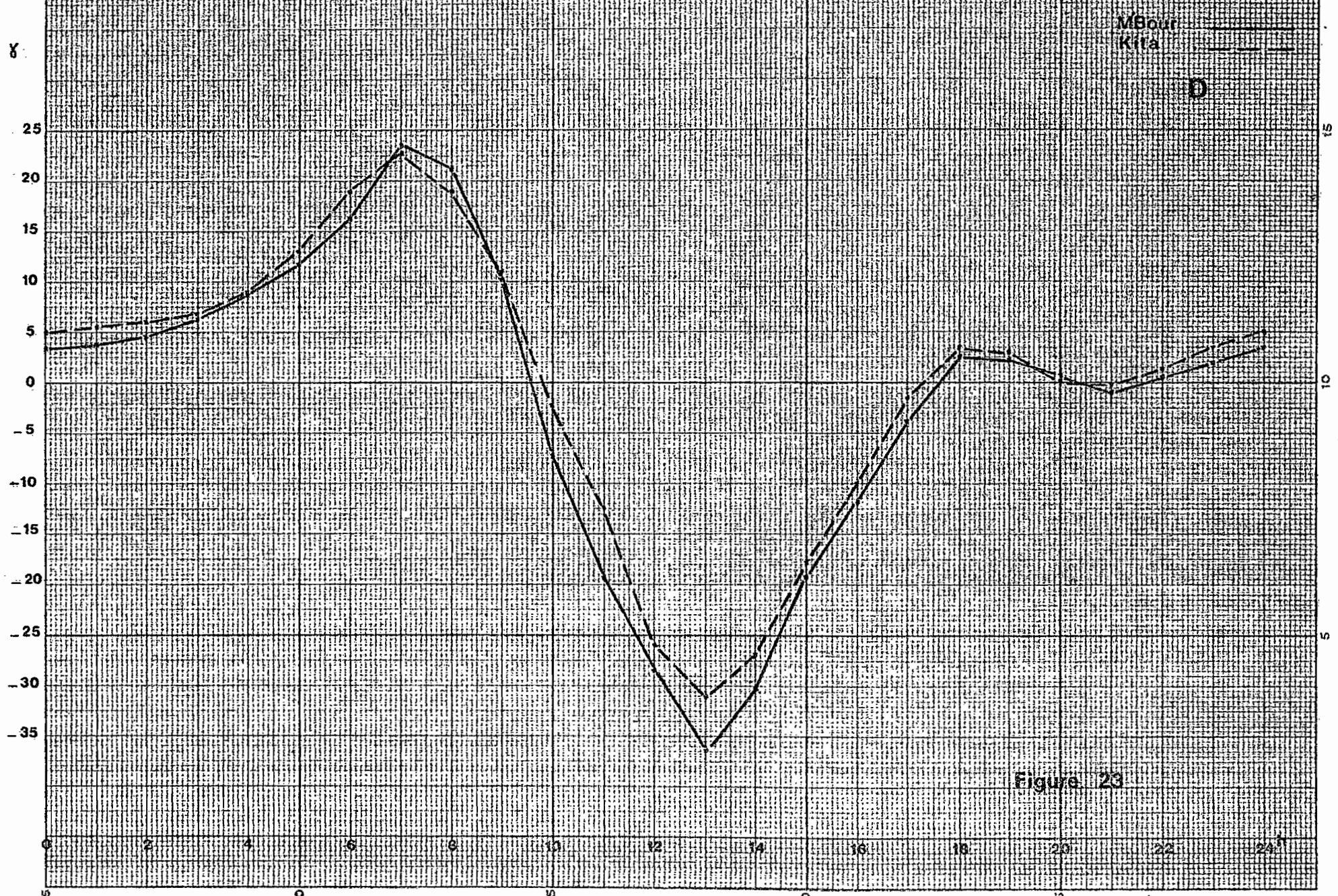


Figure 22

γ



M Bour
Kita
D

Figure 23

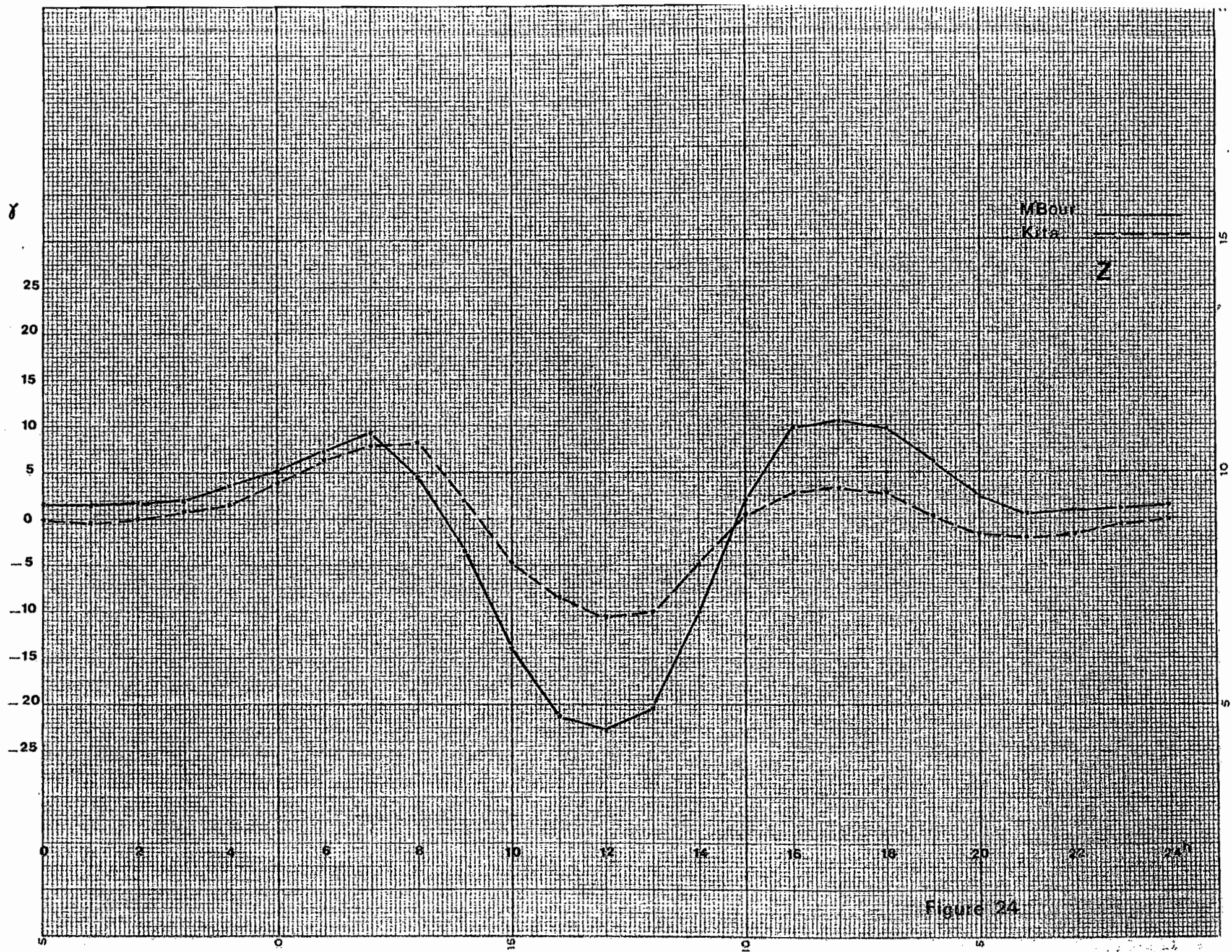
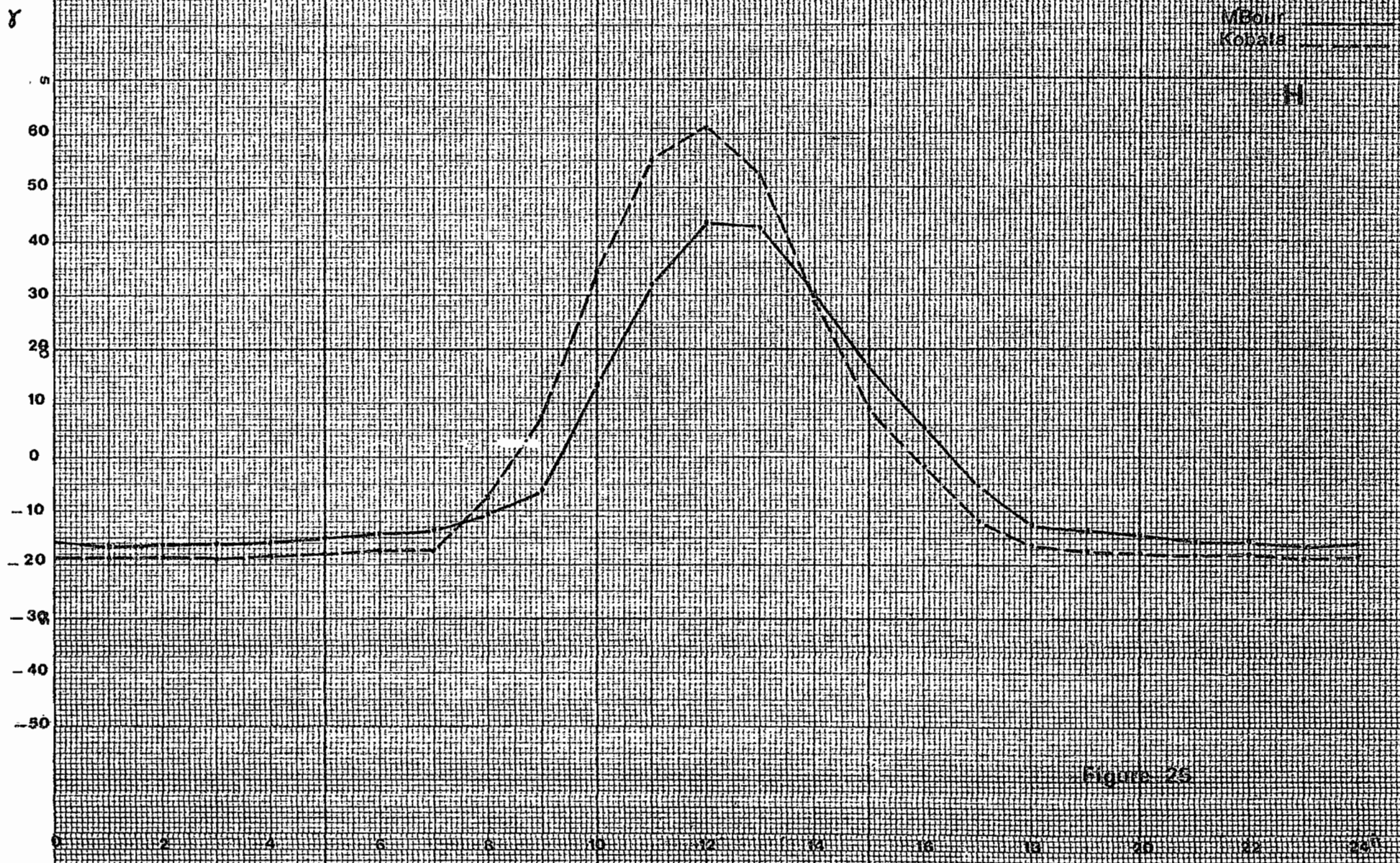


Figure 24

8



MBour
Kobala

Figure 25



Figure 25



Figure 27

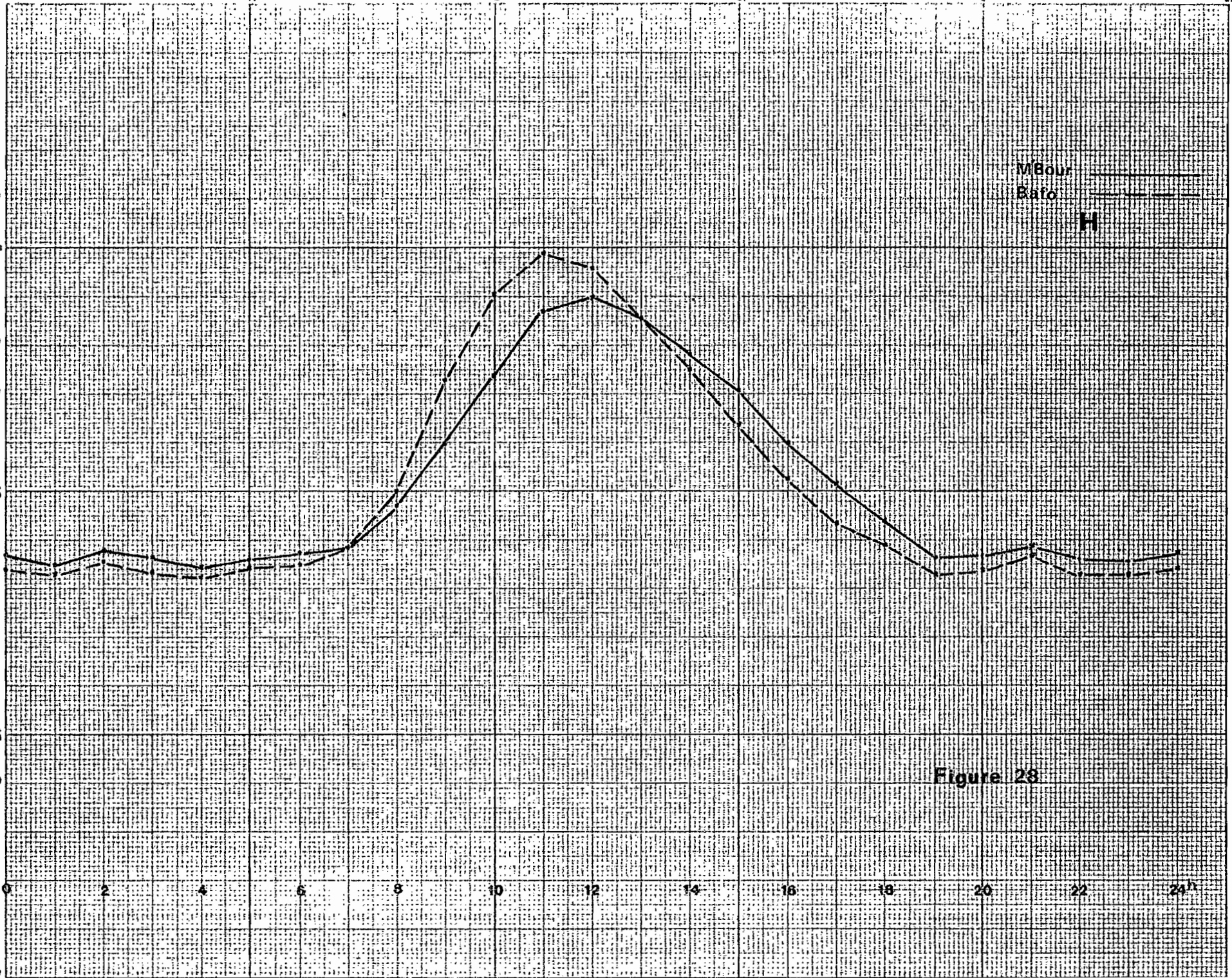
δ

60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

MBour
Bato

H

Figure 28



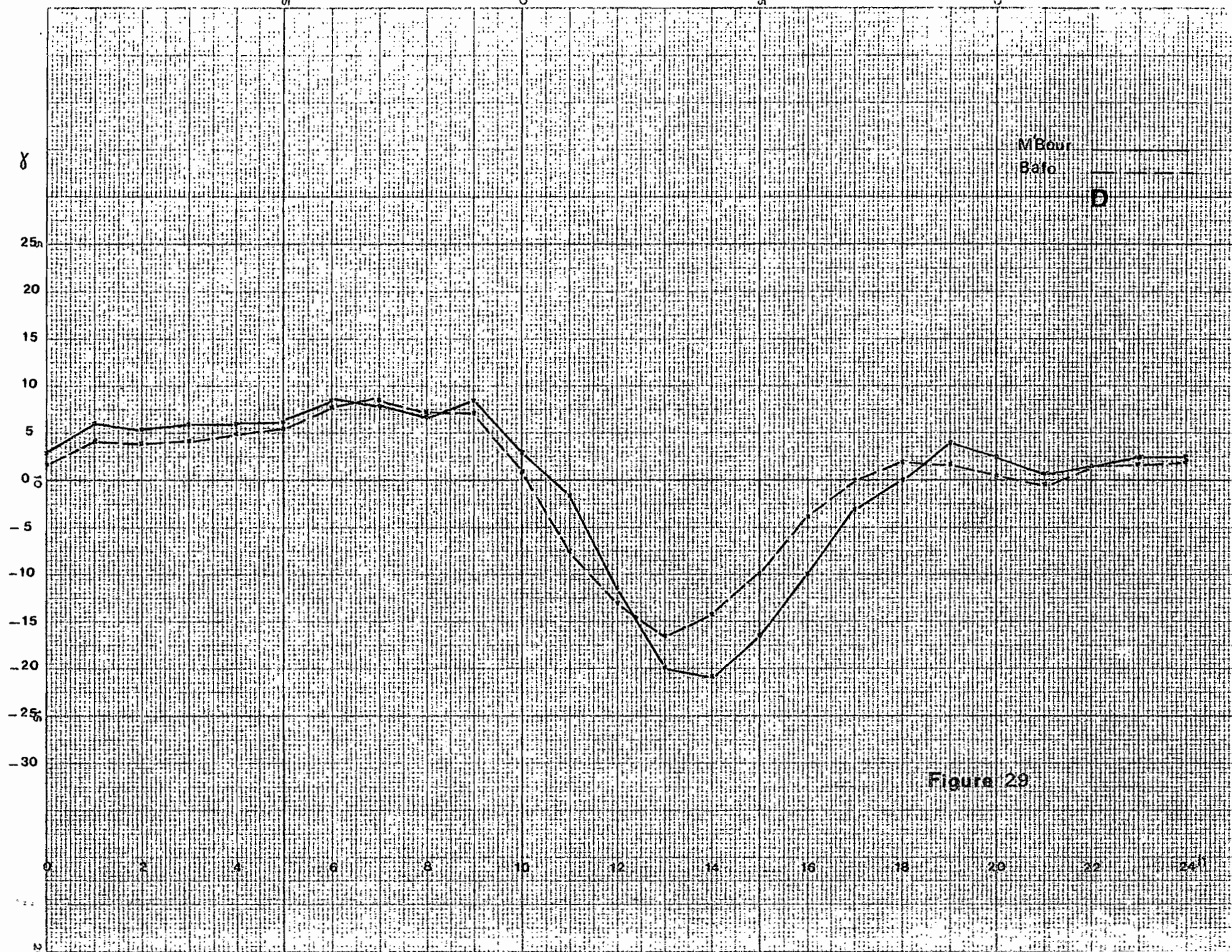


Figure 29

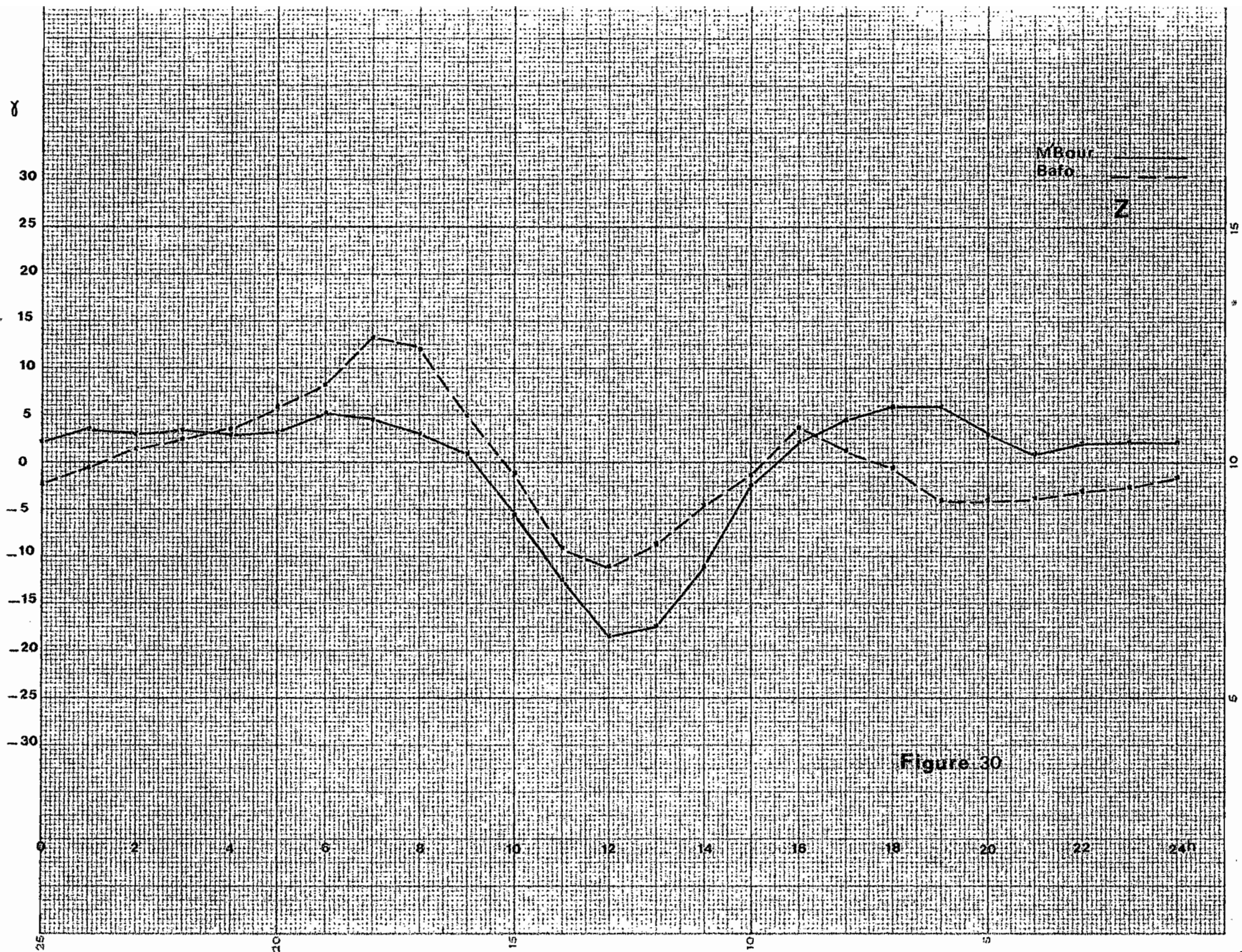


Figure 30

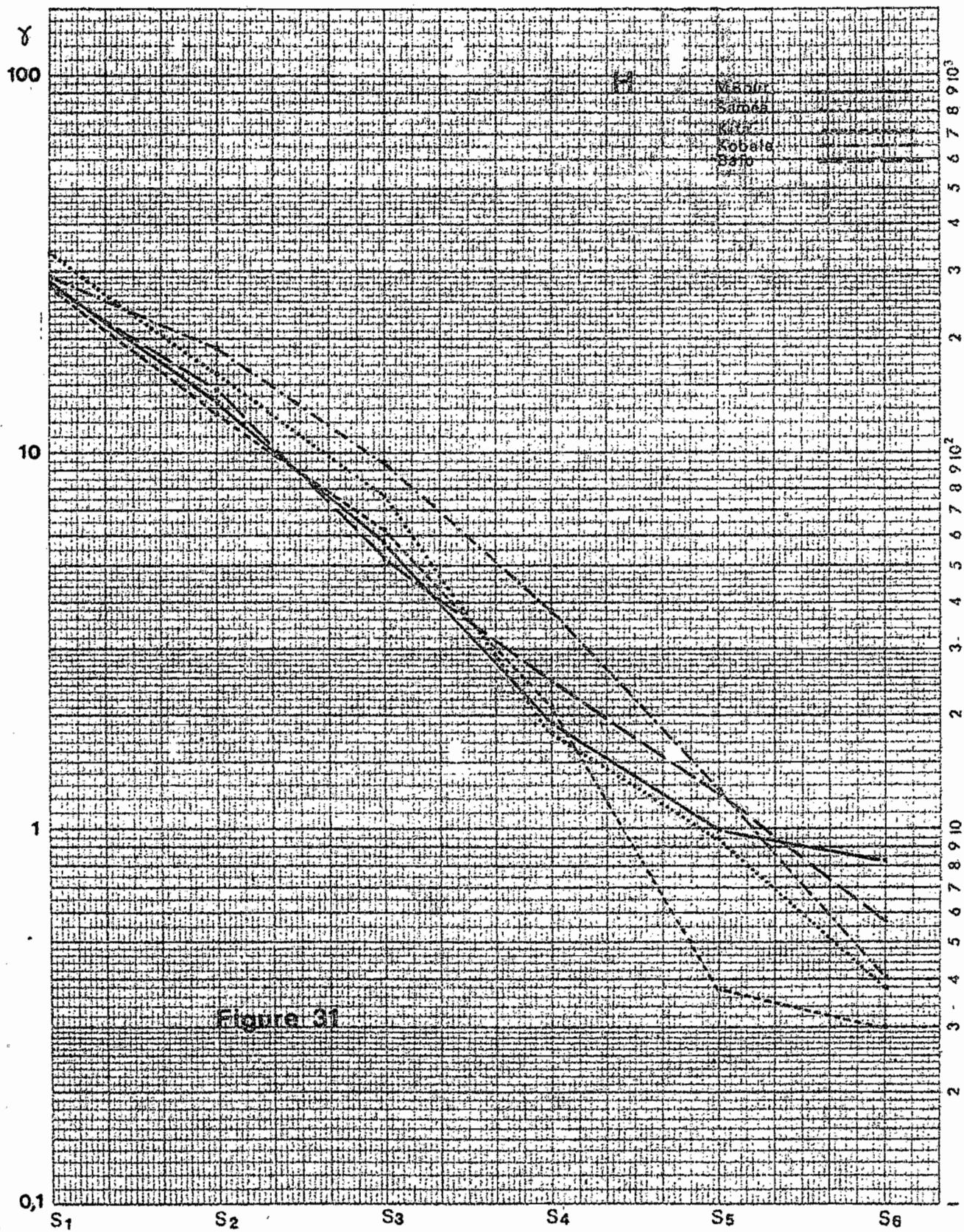
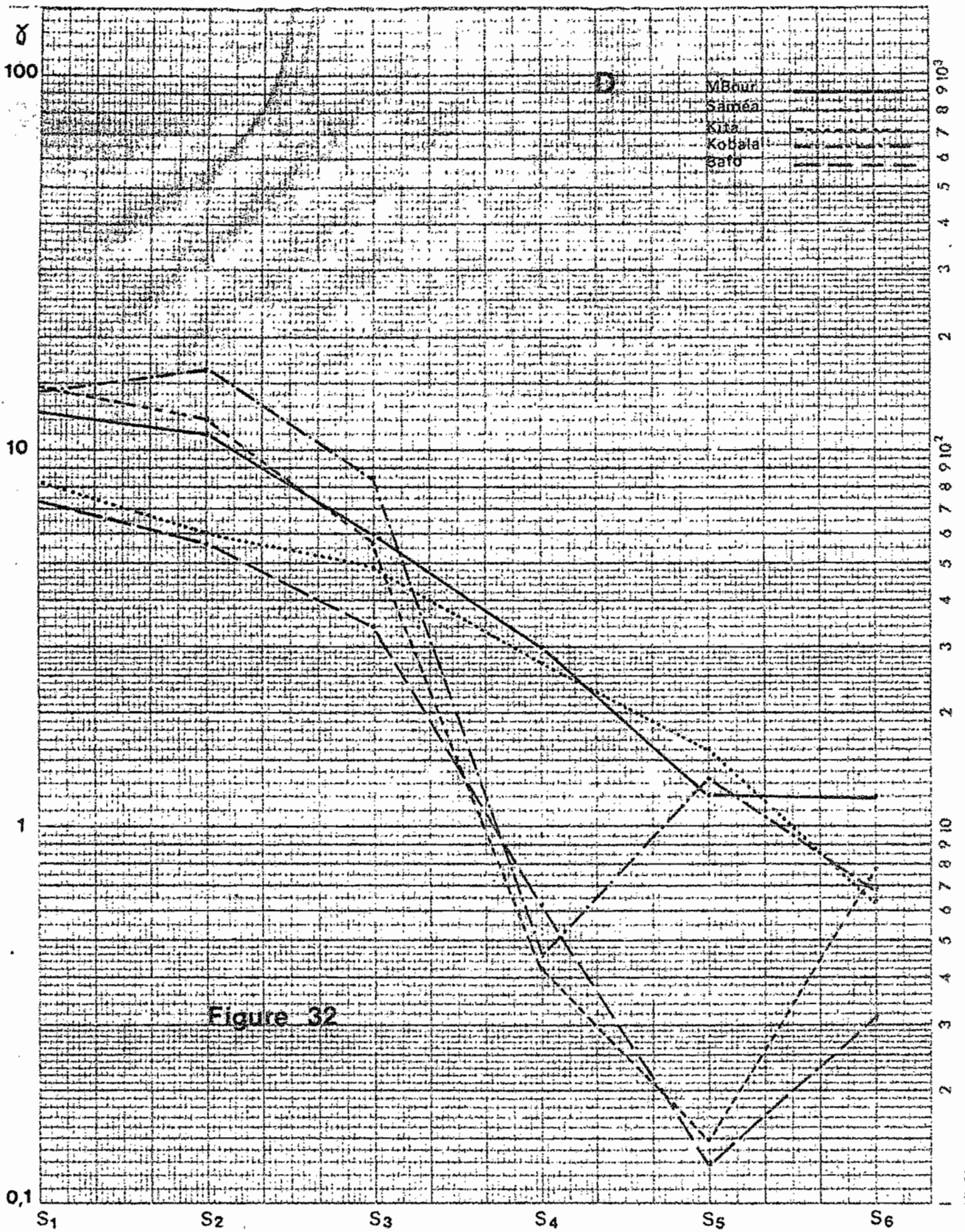


Figure 31



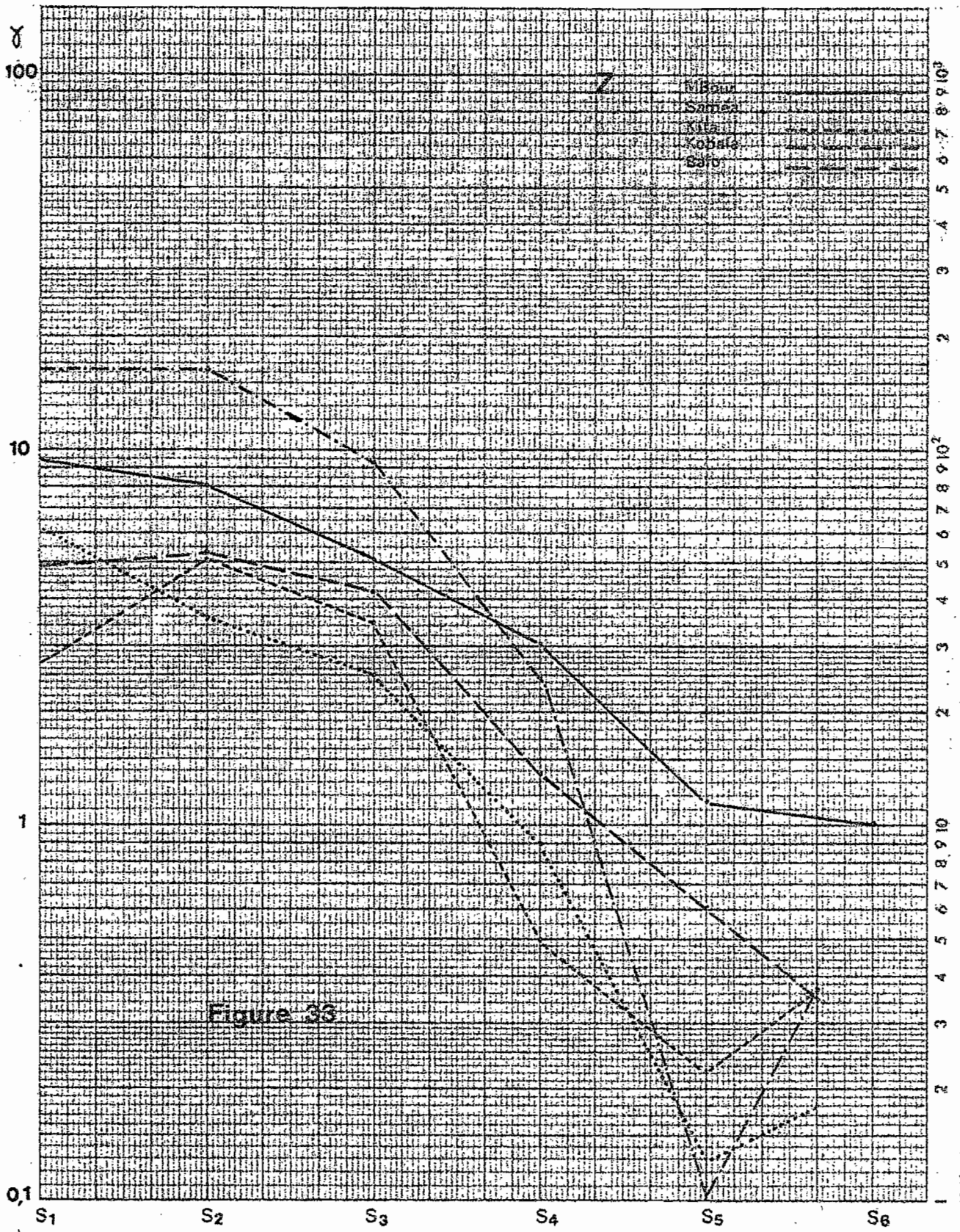
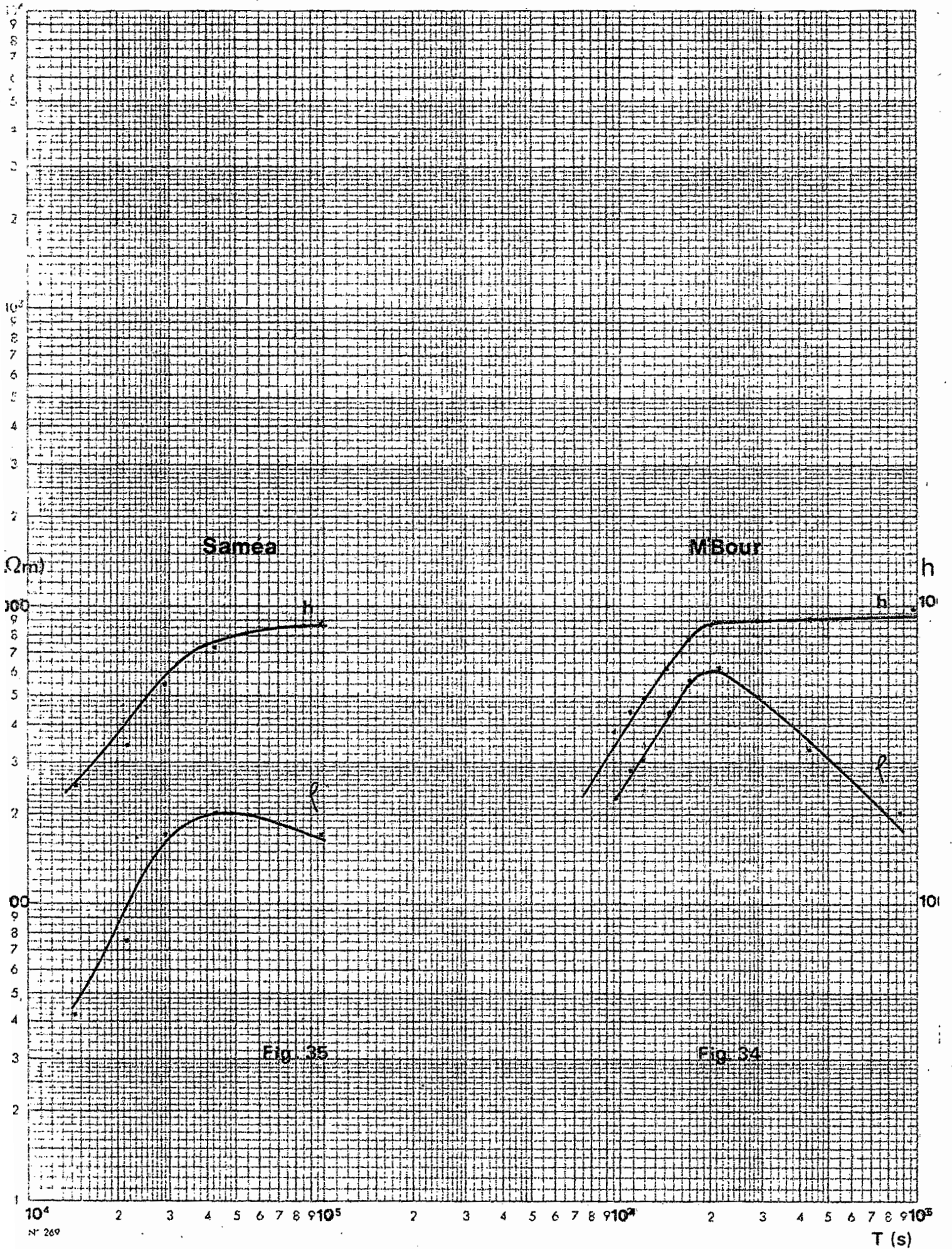


Figure 33



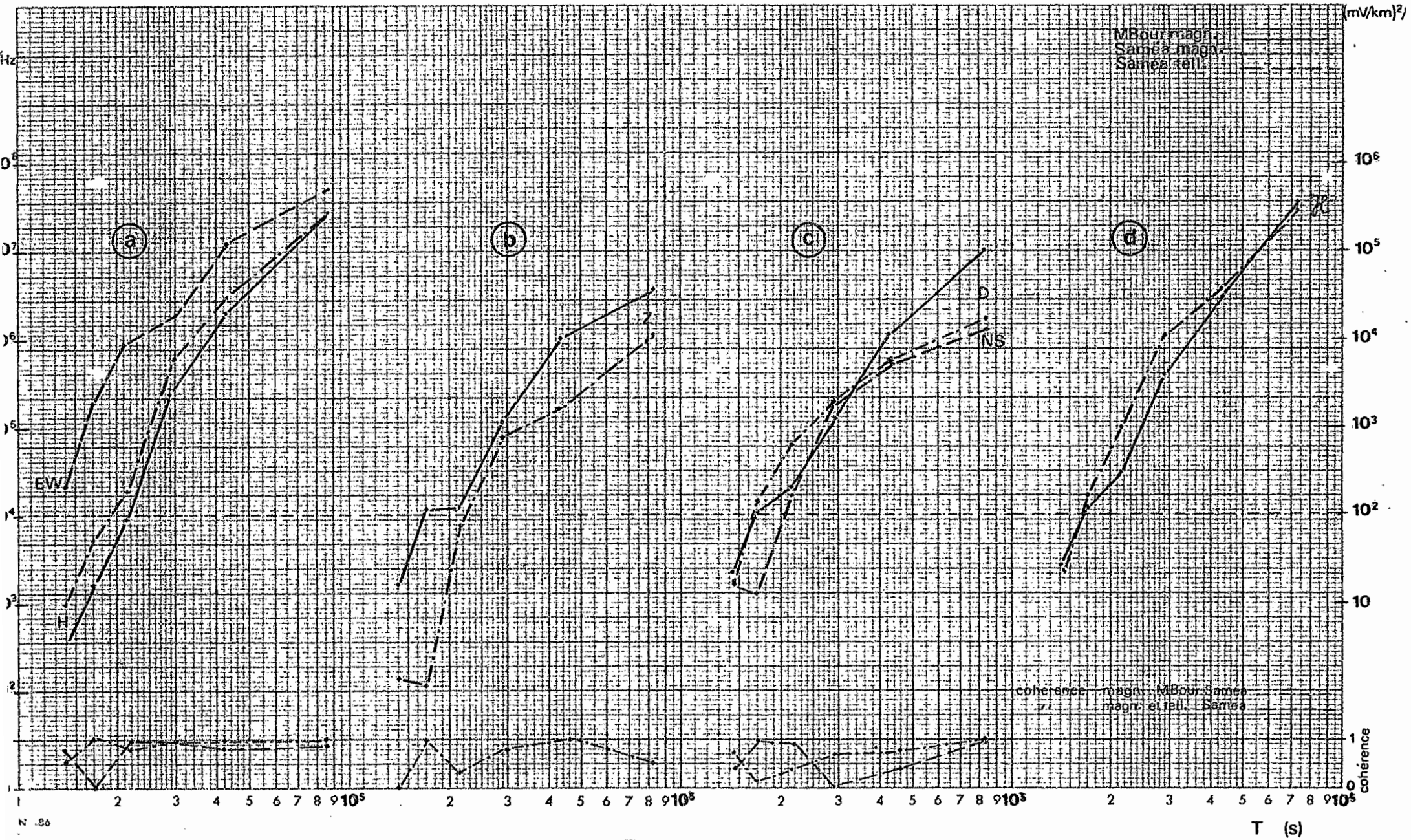


Figure 36

T (s)

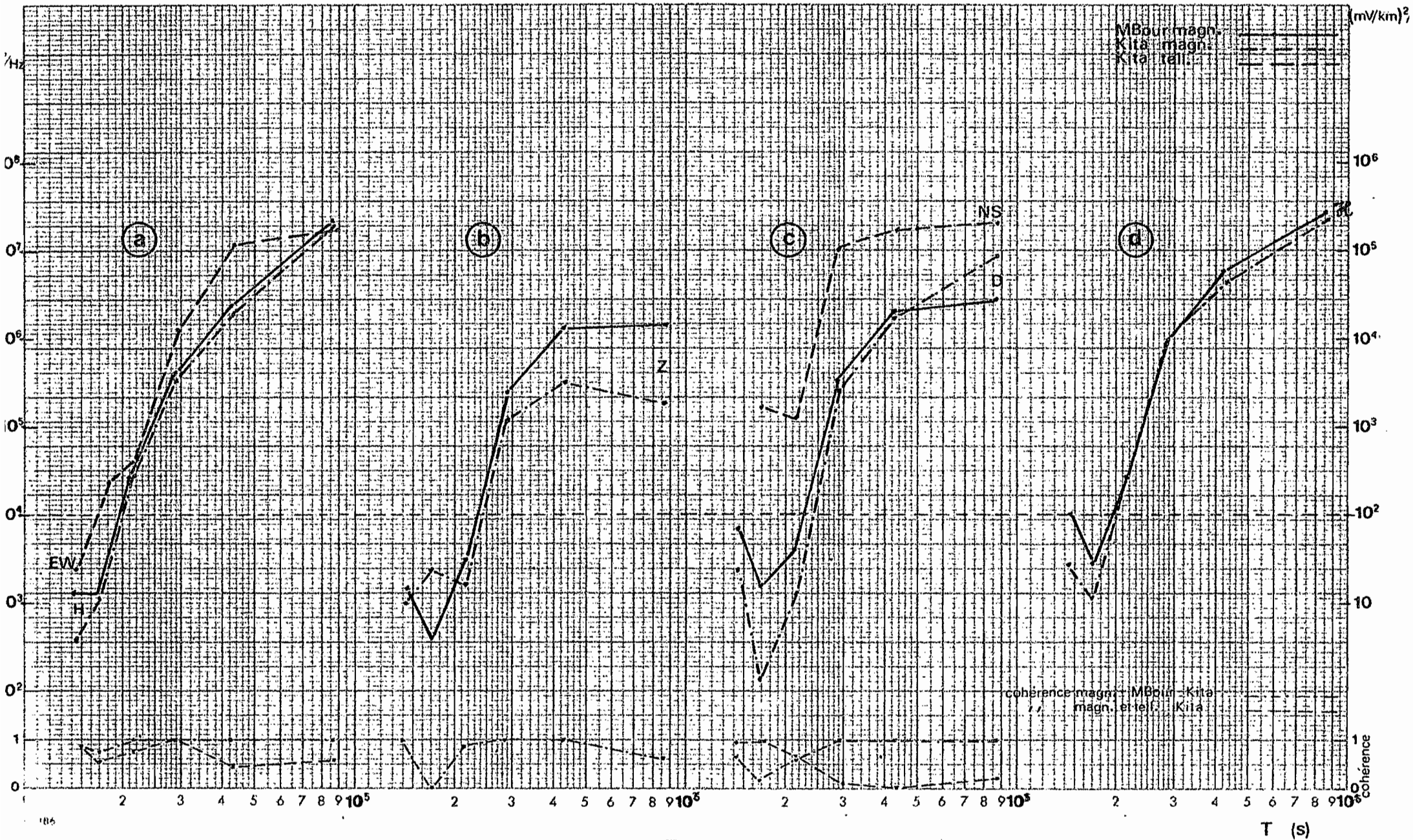


Figure 37

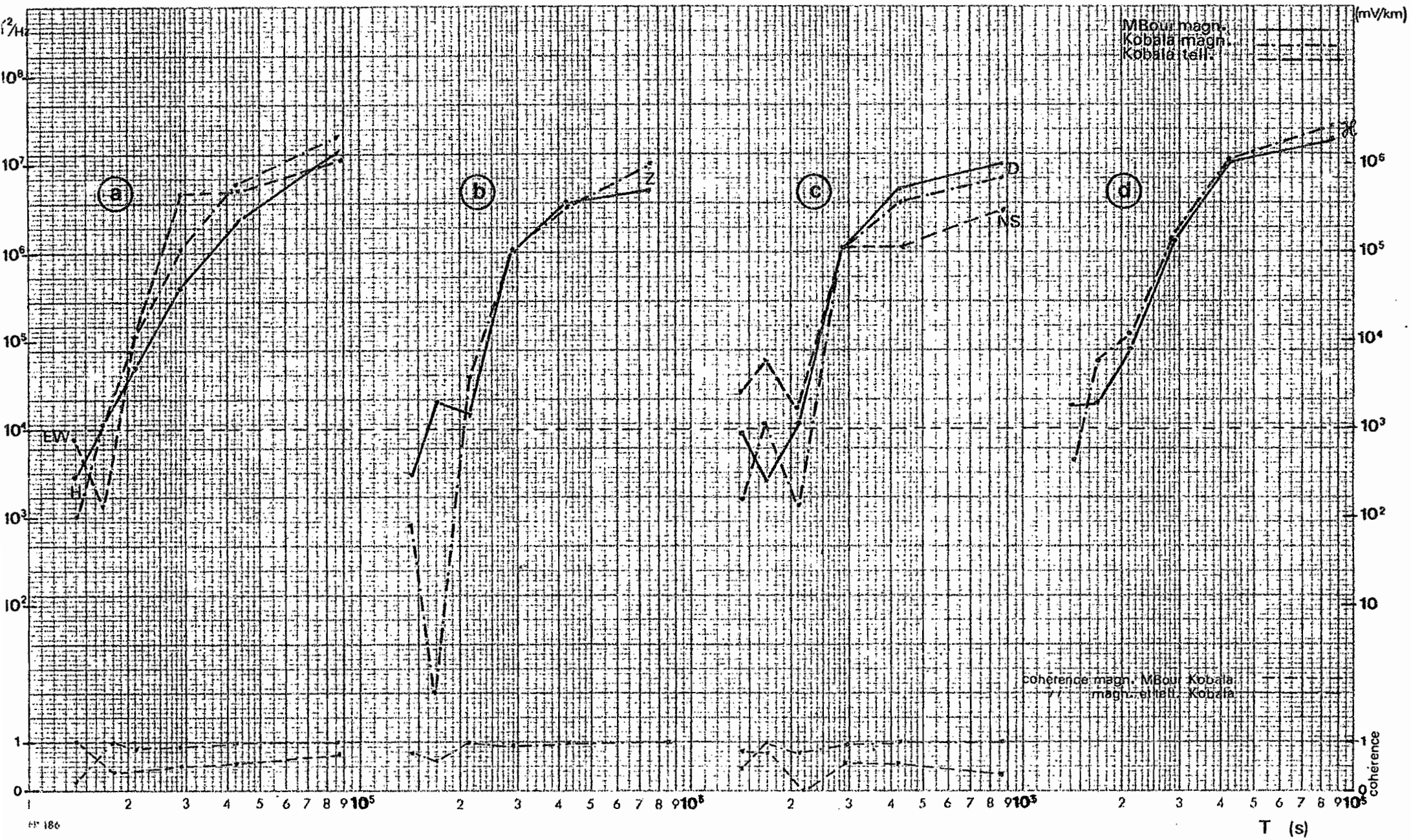


Figure 38

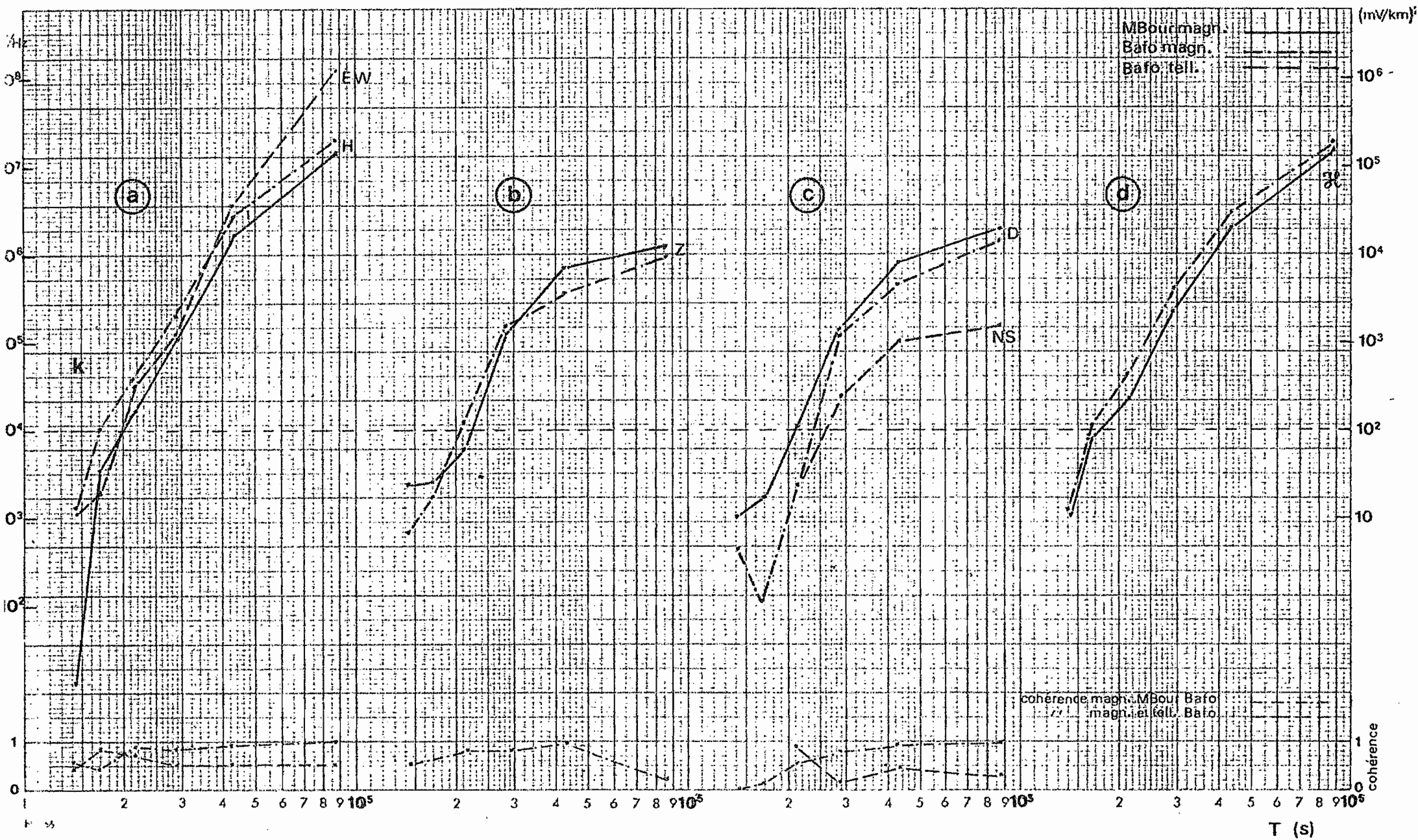
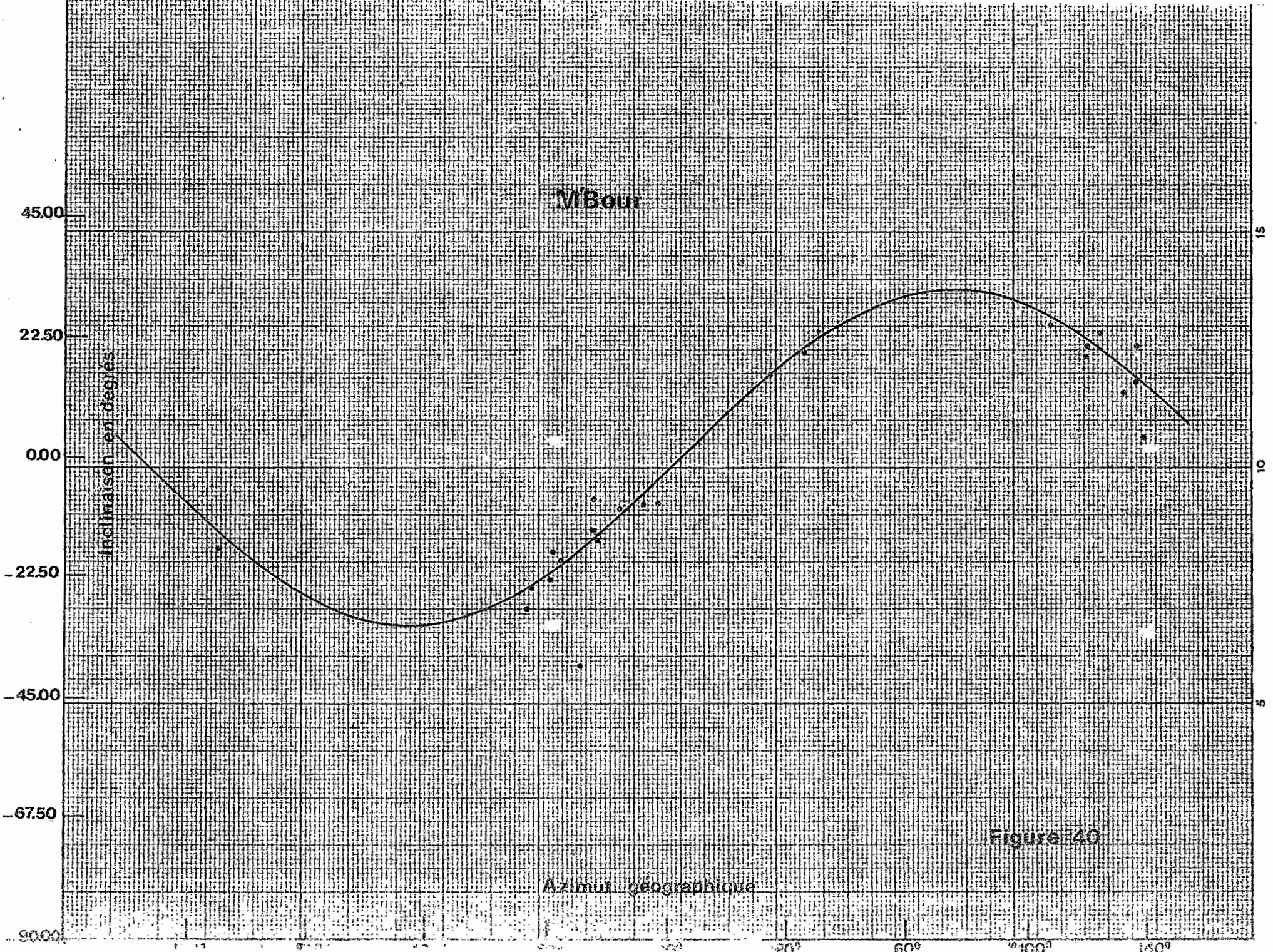


Figure 39

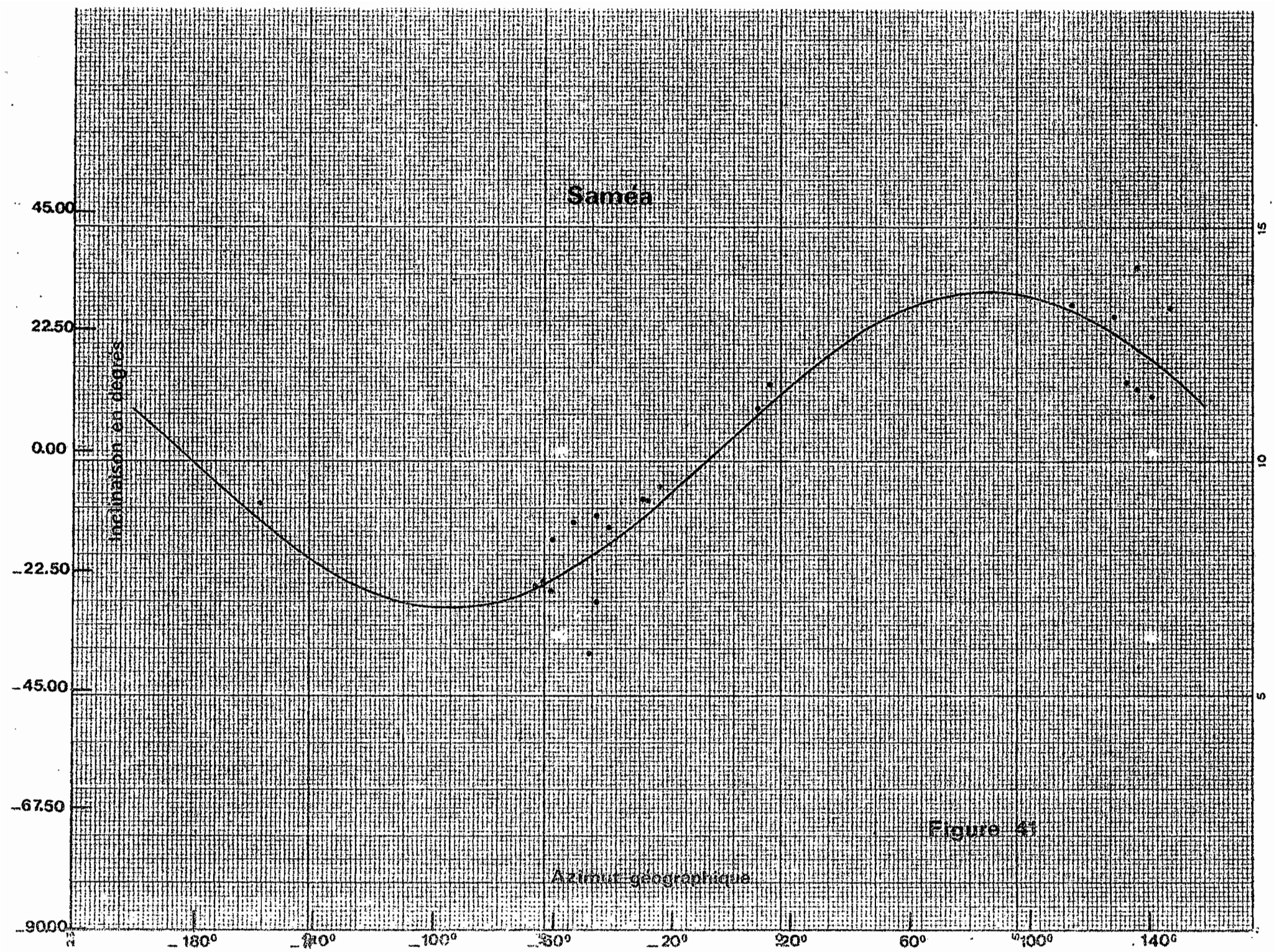


MBout

Figure 40

Azimut géographique

Inclinaison en degrés

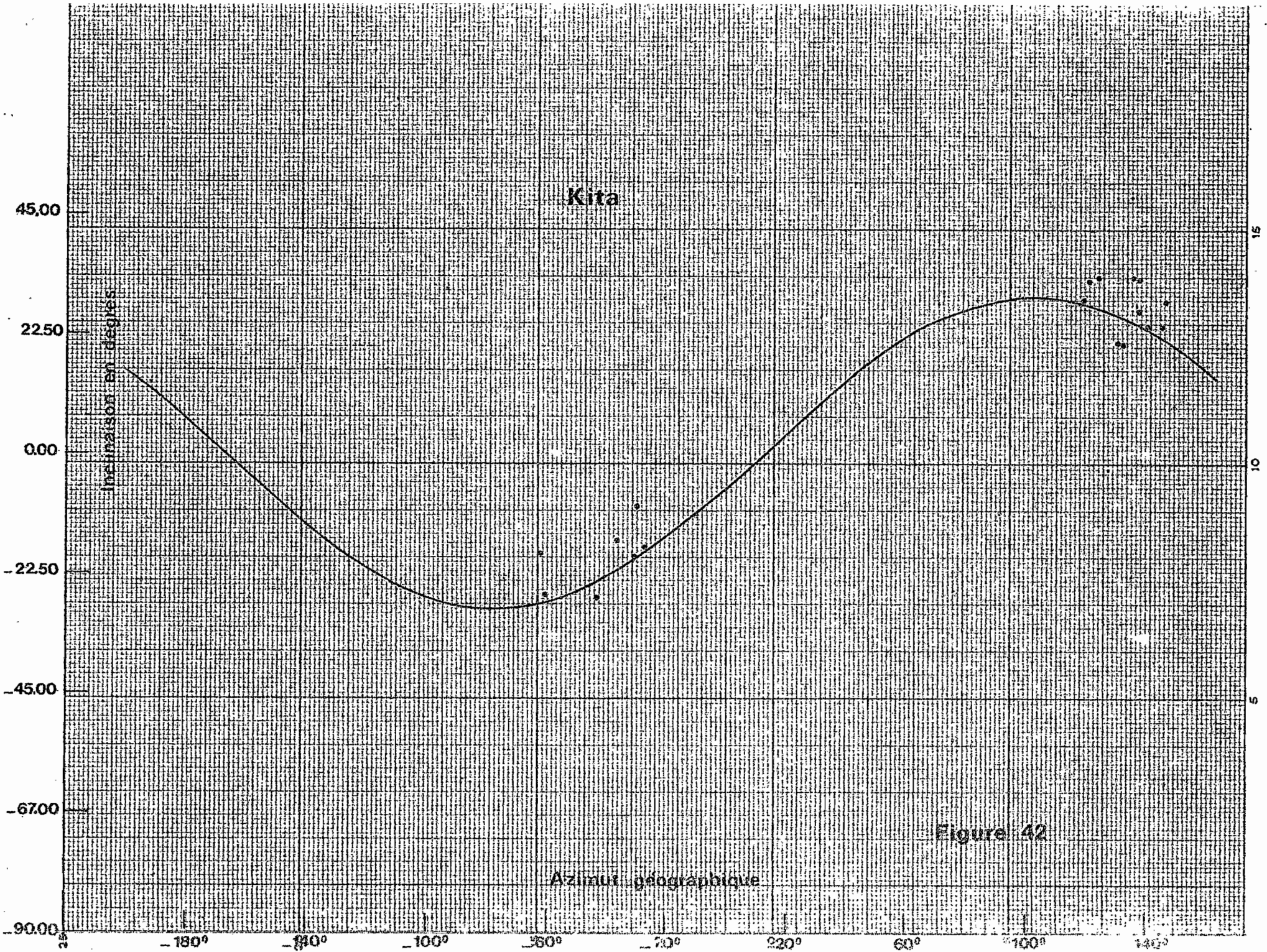


Samea

Inclinaison en degrés

Azimut géographique

Figure 41

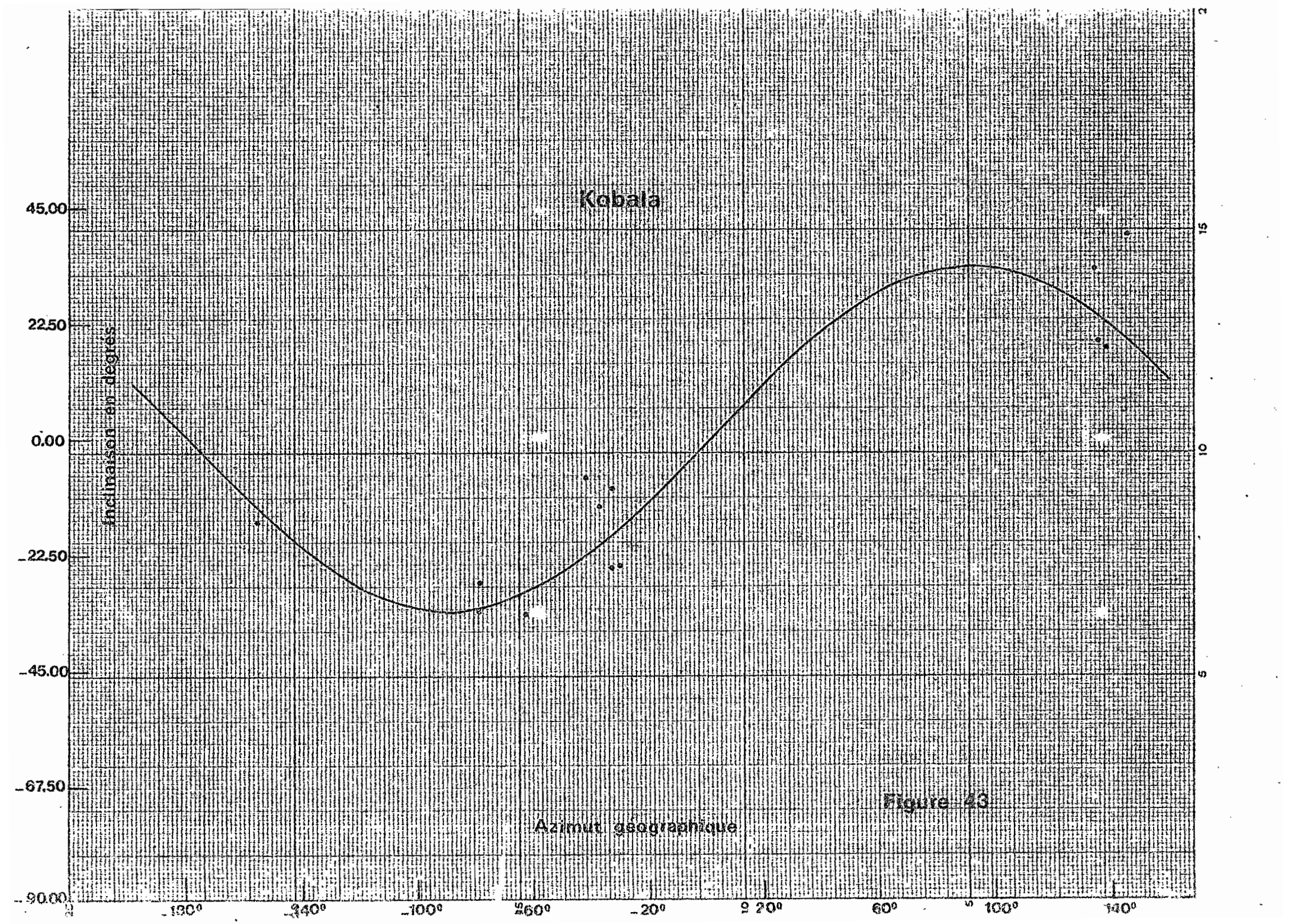


Kita

Figure 42

Azimut géographique

Inclinaison en degrés



Kobala

Figure 43

Azimut géographique

Inclinaison en degrés

