

MAREES TERRESTRES

BULLETIN D'INFORMATIONS

N° 59

1 octobre 1970

Association Internationale de Géodésie

Commission Permanente des Marées Terrestres

**Editeur Prof. Paul MELCHIOR
Observatoire Royal de Belgique
3. Avenue Circulaire
Bruxelles 18**

TABLE DES MATIERES N° 59

	p.
W. JAKS' Marée Gravimétrique à Borowiec	2838
L.A. LATININA, E. la STARKOVA, V.A. PODGORNII, R.M. KARMALEIVA (Traducation) Sur les Déformations de l'Ecorce Terrestre à la Station de Kondara au Tadjikistan	2839
M.M. SCHNEIDER Methodische Fragen und Erfahrungen bei Erdgezeitenmessungen an der Sowjetischen Überwinterungsstation Wostok in der Zentralen Antarktis	2853
M. CAPUTO, G.F. PANZA Geophysical Classification of Earth Tilt	2869
D. SIMON Aufbau Einer Neuen Erdgezeitenstation im Salzbergwerk Tiefenort	2874
C. QUEILLE, G. CLERC Thermostat de Précision au Millième de Degré Centigrade pour Gravimètre d'Enregistrement de la Marée Terrestre	2882

MAREE GRAVIMETRIQUE A BOROWIEC

Waldemar JAKS'

L'enregistrement des marées gravimétriques a été poursuivi au cours des années 1961-1964 à la Station Astronomique de Latitude à Borowiec, à l'aide du gravimètre ASKANIA Gs 11 n° 110 pourvu d'un enregistreur Lange.

Au début on a recherché les sources de perturbations de l'enregistrement. On a établi que le blindage de tout l'appareillage permettait d'éliminer les perturbations causées par la ligne de la haute tension.

Le fonctionnement défectueux des lampes intérieures du gravimètre fut un obstacle à la permanence de l'enregistrement car il entraînait des changements de sensibilité.

L'analyse des données a été faite par la méthode de Lecolazet en utilisant au préalable la méthode de Pertsev pour la détermination de la dérive.

Les calculs ont été faits sur ordinateur.

Le tableau ci-dessous renferme les résultats définitifs.

Epoque	M ₂		S ₂		N ₂		K ₁		Q ₁		Q ₁	
	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ	δ	κ
60 11 15	1.15	0.0	0.92	0.6	1.82	9.5	1.12	4.4	1.10	-0.1	1.19	-17.8
61 11 07	1.12	-6.2	1.02	-14.1	0.65	-19.8	1.02	-1.3	0.95	-0.2	1.72	11.2
62 04 14	1.25	-3.6	1.22	4.4	1.20	7.4	1.07	-0.4	1.15	1.8	1.12	7.9
62 05 15	1.23	-4.1	1.04	-5.9	1.15	-8.7	1.22	-1.5	1.24	-2.3	0.92	-7.3
62 09 15	1.18	-5.3	1.01	-9.8	1.02	6.9	1.13	1.0	1.16	-3.2	1.06	5.4
62 10 20	1.22	0.7	0.88	5.1	1.83	10.1	1.25	-0.3	1.43	4.4	0.50	9.0
62 11 17	1.21	-0.6	1.11	-1.7	1.08	0.8	1.13	-1.4	1.19	-0.1	1.03	11.6
63 01 27	1.22	-2.9	1.06	-5.4	1.15	-1.0	1.22	-6.8	1.26	-4.2	1.02	-1.6
63 02 21	1.23	-1.8	1.09	-9.4	1.33	4.7	1.19	-8.2	1.18	-0.1	1.15	13.6
63 03 17	1.21	-3.0	1.08	-6.6	1.29	-1.0	1.15	-9.8	1.19	-0.8	1.28	10.3
63 04 21	1.04	9.6	0.88	-26.3	1.84	-27.7	1.04	2.5	1.21	-9.7	1.06	14.6
64 01 21	1.04	-2.1	1.11	7.2	1.40	16.3	1.01	4.5	1.10	-2.9	1.67	24.7
64 02 15	1.02	3.4	0.92	-2.6	0.86	21.6	1.03	-1.5	1.04	1.9	0.92	-16.9
64 03 20	1.00	4.5	0.83	-4.4	1.54	-18.6	1.25	-1.8	1.33	2.1	1.45	-11.4
Moyenne	1.151	-0.8	1.012	-4.9	1.297	0.0	1.131	-1.5	1.181	-1.0	1.149	3.8
e.q.m.	24	1.1	46	2.1	97	3.8	23	1.1	32	0.9	84	2.2

Traduction.

SUR LES DEFORMATIONS DE L'ECORCE TERRESTRE A LA STATION DE KONDARA AU
TADJIKISTAN

L.A. Latinina, E.Ia Starkova, V.A. Podgornii, R.M. Karmaleiva

Fisica Zemli 3 pp. 75-84 1968.

О ДЕФОРМАЦИЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА СТАНЦИИ
КОНДАРА ТАДЖИКСКОЙ ССР.

Л.А. Латынина, Э.Я. Старкова, В.А. Подгорных, Р.М. Кармалеева.

Физика Земли 3 Стр. 75-84 1968

Dans les observations des mouvements lents horizontaux de l'écorce terrestre, les appareils appelés déformographes ou extensomètres trouvent une large application. Ils sont destinés à la mesure des déplacements relatifs des points de l'écorce se trouvant à une distance de dizaines de mètres l'un de l'autre. L'appareil est constitué d'une tige rigide et d'un système enregistreur. La tige est attachée par un bout à la roche, la seconde extrémité est libre et se déplace par rapport à la roche lors de sa dilatation ou de sa contraction.

Au Japon, des dizaines de stations sont équipées de déformographes et leur tâche principale est de relever les mouvements lents d'origine tectonique et en fin de compte les mouvements en relation avec la déformation des tremblements de Terre [4]. Cette dernière tâche est extrêmement compliquée.

Le fait est que la déformation d'origine tectonique est masquée par la déformation des couches supérieures de l'écorce terrestre sous l'influence de la variation des conditions météorologiques. Et bien que cette dernière diminue dans les excavations profondes souterraines, elle reste comparable à la valeur étudiée. C'est pourquoi, pour l'éliminer, il faut effectuer des recherches méthodiques spéciales en chaque point choisi pour la mesure.

Ensuite, au mouvement de caractère régional, s'ajoutent des mouvements locaux aux endroits où sont installés les appareils provenant de l'érosion des roches, des fentes etc ... on ne peut différencier l'un l'autre que par l'exécution d'observations nombreuses.

Enfin, dans l'enregistrement des mouvements lents, la dérive propre de l'appareil présente un sérieux danger dont il est en principe impossible de se libérer complètement.

Les observations à la station de Kondara, ont pour but l'étude des mouvements tectoniques. Ce travail a en fait un caractère méthodique et résoud deux problèmes.

En premier lieu, il montre par l'exécution de mesures par des déformographes parallèles placés côte à côte que le mouvement lent décrit par les appareils du type choisi constitue en fait le mouvement des points de la roche et non la conséquence de la dérive de l'appareil.

En second lieu, on effectue l'étape initiale de l'étude de la parcelle choisie de la surface terrestre, c'est-à-dire qu'on examine la carte générale du mouvement, on dégage les particularités du mouvement relatives à la structure de cette parcelle, on dégage et on évalue les mouvements provoqués par l'un ou l'autre facteur extérieur.

DESCRIPTION DE LA STATION.

La station de Kondara est située à une distance de 30 km de Douchanbe sur les pentes Sud de la crête Hissar. L'emplacement souterrain de la station est une mine qui passe dans la zone de la fracture de Kondara. Cette importante fracture tectonique a une étendue de plus de 10 km. La zone de la fracture d'une largeur de quelques dizaines de mètres est de granit quartzeux morcelé. Dans les limites de la mine se trouve la partie la plus active de la fracture qui est une crevasse d'une largeur de 1 à 15 cm.

Le puits de mine est parallèle à la ligne de la fracture, les galeries de mine transversales la coupent. Le plan de la mine est donné sur la fig. 1. Le puits de la mine a la direction E 15° S, sa longueur est de 110 m, les galeries ont la direction S 15° W, la longueur de chacune d'elles est de 20 m. La température dans la mine à n'importe quel moment de l'année reste constante, voisine de 15°, les oscillations journalières de la température sont de moins de 0,01°. L'humidité relative à l'intérieur de la mine est voisine de 100 %, au printemps et pendant les périodes de grandes pluies, l'eau pénètre dans la mine.

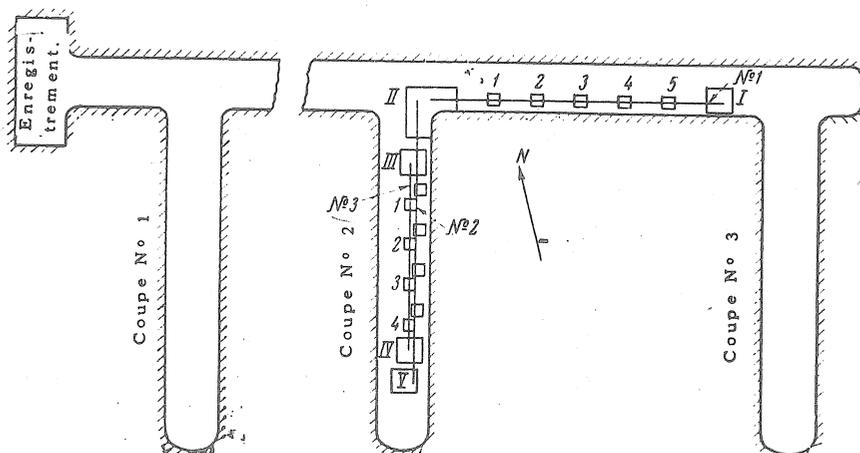


Fig. 1. Plan de la mine et plan d'installation des déformographes.

Trois déformographes sont installés dans la seconde galerie de mine et son puits (fig. 1). La distance des appareils à l'orifice de la mine est de 70 m., la distance depuis la surface libre est de 40 à 50 m.

Un appareil est placé le long du puits de mine (n° 1) d'une longueur de 18,5 m et les deux autres le long de la galerie transversale d'une longueur de 19 m (n° 2) et 15,5 m (n° 3) (fig. 1). Les bouts des tiges sont murés dans des socles de béton I, IV, V. Les générateurs enregistrant le déplacement du bout de la tige par rapport à la roche sont placés sur les socles II et III. Chaque tige, en s'appuyant sur les balanciers placés à une distance de 2,5 m l'un de l'autre sur des piliers en béton 1, 2 ..., est logée dans le canal de béton. Nous donnons à la figure 2 la photo de deux appareils parallèles. La tige de l'un d'eux passe plus haut que l'autre. Les socles pour les bouts des tiges sont faits séparément pour chacun des appareils, c'est la même chose pour ce qui concerne les piliers pour les suspensions. Les appareils sont isolés l'un de l'autre. Nous donnons sur la figure 3 la photographie du socle II avec les générateurs des déformographes n° 1 et n° 2. L'enregistrement à distance s'effectue dans un local se trouvant dans une dépendance près de l'entrée de la mine.

DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

La tige du déformographe est un tube en quartz d'un diamètre de 40 mm avec une épaisseur de parois de 2 à 3 mm. La tige est assemblée par morceaux de tubes de 3 mètres chacun réunis par soudure.

Le mouvement de chacune des tiges s'enregistre simultanément par deux générateurs : le générateur d'enregistrement direct P et le générateur photoélectrique F. Le premier est une tablette plate se déplaçant sur un traîneau sur lequel s'appuie la tige. Entre la tige et la tablette se trouve une bille d'un diamètre de 0,5 mm qui tourne lors du déplacement de la tige. L'angle de rotation de la bille est enregistré photo-optiquement.

Le générateur photoélectrique est constitué par un transformateur qui transforme le déplacement de la tige en rotation du rayon lumineux et d'un photo-amplificateur. Le transformateur de l'appareil N° 3 est constitué d'un miroir avec un axe de rotation en forme de joint élastique qui est relié par un système de leviers avec la tige de l'appareil. Le transformateur des appareils n° 2 et n° 1 consiste en un équipement à bille analogue à celui décrit plus haut.

La tache lumineuse en se réfléchissant depuis le miroir mobile, se divise en deux parties qui se dirigent sur deux photo-éléments reliés selon un schéma différentiel. Cet équipement est analogue à celui appliqué aux clinomètres du système d'Ostrovskii [5]. L'enregistrement est galvanométrique.

La sensibilité des appareils est déterminée à l'aide de générateurs calibreurs. Le générateur calibreur est un cylindre agissant par magnétostriction c'est-à-dire qui change de longueur à l'application du champ magnétique. Le cylindre est fixé entre les parties des tubes de quartz près du bout attaché au tube. Sur une bande s'enregistre deux fois par jour le déplacement donné par le générateur. La précision de la détermination de la sensibilité est de 10 à 20 %.

La sensibilité des appareils est donnée dans la table

Numéro du déformographe	Générateur	Sensibilité en déplacement μ/mm	Sensibilité en déformation $10^{-8}.1/mm$
1	Enregistrement direct	0,13	0,7
	Photoélectrique	0,02	0,1
2	Enregistrement direct	0,15	0,8
	Photoélectrique	0,04	0,2
3	Enregistrement direct	0,25	1,6
	Photoélectrique	0,05	0,3

Pour les appareils à enregistrement direct nous donnons la valeur maximale de la sensibilité; pour les appareils photoélectriques, la valeur moyenne.

SUR LE DEGRE D'IDENTITE DES INDICATIONS DES APPAREILS PARALLELES.

On peut juger du degré d'objectivité des indications des appareils en comparant l'enregistrement du mouvement obtenu par quelques appareils parallèles. La concordance des indications des appareils témoigne de l'absence de la dérive des appareils.

A la station de Kondara, l'enregistrement dans la direction S 15° W est effectué par deux déformographes parallèles, dont chacun est alimenté par deux générateurs. Sur les figures 4 et 5 nous donnons la marche des déplacements d'après les données des quatre générateurs. Les graphiques sont construits pour les déplacements relatifs des points de la roche et non pour la déformation, même si la longueur des appareils est différente. Le fait est que la déformation de la roche n'est pas homogène et apparemment le déplacement enregistré par l'appareil se concentre sur une bande étroite de la fracture qui est coupée par les deux appareils.

L'enregistrement des différents appareils n'est pas tout à fait identique. Nous donnons sur la figure 4 l'allure des déplacements pour avril 1965. Le mouvement oscillatoire est dû aux ondes de marée luni solaire de périodes voisines de 12 et 24 heures.

Nous examinerons l'importance des divergences des indications des appareils selon les données de la figure 4.

Au cours de la première décade on a enregistré une contraction et la valeur des déplacements d'après les données des différents appareils est la suivante :

N° 2 F	N° 2 P	N° 3 F	N° 3 P	moyenne
6,2 μ	7,0 μ	5,5 μ	n'est pas faite	6,2 \pm 0,5 μ

En période de pluies du 14 au 20 avril, il se produit une dilatation de la roche et les déplacements sont égaux à :

N° 2 P	N° 2 F	N° 3 P	N° 3 F	moyenne
1,5 μ	1,6 μ	1,5 μ	3,0 μ	1,9 \pm 0,5 μ

Il y a eu le 22 avril 50 mm de précipitations et les indications des appareils étaient différentes. Apparemment l'irrigation des roches lors de la pénétration de l'eau dans la mine crée des conditions de glissement des socles.

Dans la période du 23 au 30 avril se produit une contraction de la roche. On a enregistré un déplacement :

N° 2 P	N° 2 F	N° 3 P	N° 3 F	moyenne
6,5 μ	7,5 μ	5,0 μ	7,5 μ	6,6 \pm 0,7 μ

Ainsi, les divergences des indications des appareils constituent en moyenne 20 % de la valeur du déplacement enregistré.

Nous évaluerons le degré de concordance des indications des appareils pour le laps de temps le plus long. Nous donnons sur la figure 5 l'allure des déplacements de décembre 1964 à décembre 1965. L'allure des déplacements dans la direction S 15° W est construite pour la première moitié de l'année d'après les données de quatre générateurs, pour la seconde moitié de l'année, d'après les données des générateurs du déformographe n° 2. L'allure des déplacements dans la direction E 15° S est construite d'après les données des deux générateurs du déformographe N° 1 pour une partie de la période et d'après les données du générateur F pour l'autre laps de temps.

En périodes d'averse quand les indications des appareils sont différentes, nous ne donnons pas ces différences graphiquement afin de ne pas compliquer la comparaison des courbes dans la période suivante, mais nous notons le déplacement en microns par des chiffres.

Si on a une interruption dans l'enregistrement d'un seul appareil, alors au moment de la reprise de l'enregistrement, la distance entre les courbes des déplacements de cet appareil et de l'appareil fonctionnant sans interruption reste la même qu'elle était avant l'interruption.

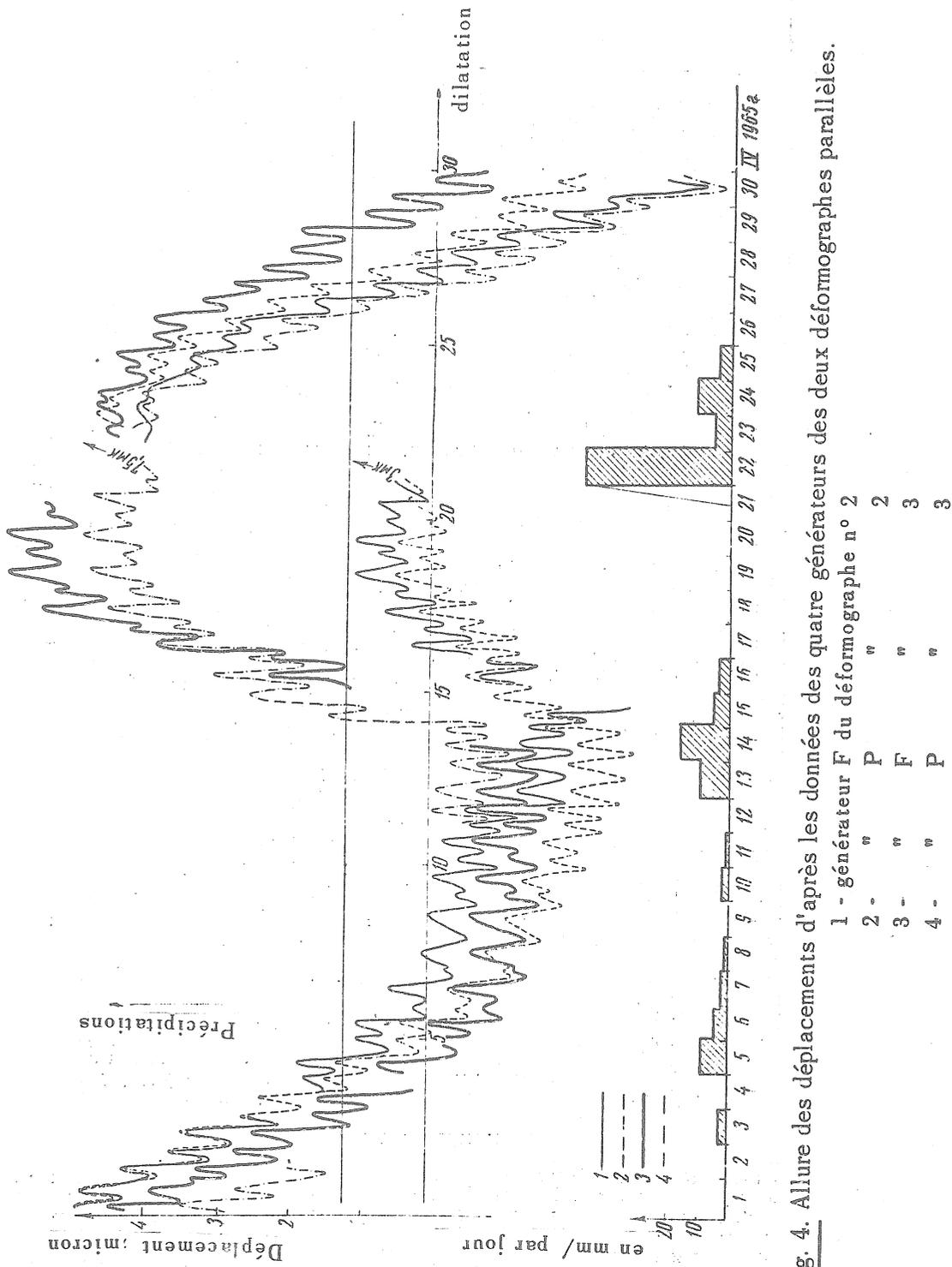


Fig. 4. Allure des déplacements d'après les données des quatre générateurs des deux déformographe parallèles.

De décembre 1964 à mars 1965, l'allure des déplacements dans la direction S 15° W d'après les données de quatre générateurs correspond bien. La divergence maximale se note à la fin de janvier et atteint 2 μ . En mars on a enregistré un déplacement de 14 μ et la valeur de la divergence est de 4 μ .

Dans la période d'avril à juillet, trois des quatre générateurs ont enregistré des déplacements à peu près les mêmes en valeur : le déplacement pour avril à mai est égal à 15 μ . et la valeur des divergences est de 1,5 μ le déplacement pour juin à juillet est égal à 20 μ , et la valeur des divergences est de 2 à 3 μ . Le quatrième générateur donne des indications différentes des indications des autres appareils.

Pour la période d'août à décembre, l'allure des déplacements est donnée d'après les indications des deux générateurs du déformographe N° 2. Le déformographe N° 3 a enregistré une intense dilatation d'après les données de ses deux générateurs. Apparemment, cette dérive d'appareil peut trouver sa cause dans l'évolution d'une crevasse, découverte plus tard sur la tige. La divergence des indications des générateurs du déformographe N° 2 pour la période de août à décembre est égale à 1,5 μ pour une valeur de déplacement de 8 μ . L'allure des déplacements dans la direction E 15° S pour les périodes de janvier à juin et de novembre à décembre correspond avec une précision allant jusqu'à 30 % .

Il est intéressant que la différence des indications des appareils n'est pas une fonction monotone du temps : elle croît ou elle diminue. Si on considère cette différence comme une erreur de mesure (nous ne discutons pas ici la question de savoir si cette erreur est instrumentale ou un effet de mouvements locaux) alors elle contient des erreurs de caractère accidentel. Les valeurs des déplacements enregistrés par les appareils parallèles pour des périodes d'une durée d'une semaine ou d'un mois, correspondent avec une précision allant jusqu'à 20 - 30 % .

ANALYSE DE L'ALLURE DE LA DEFORMATION, VARIATION SAISONNIERE.

Nous examinerons le caractère de la déformation de la roche pour une période égale à un an. Par déformations de la roche, nous entendrons le déplacement relatif des points de la roche rapportés à l'unité de longueur de la partie reliant ces points. Dans la direction E 15° S c'est la longueur de l'appareil N° 1, dans la direction S 15° W, nous prenons la longueur de l'appareil N° 2. Nous donnons à droite sur la figure 5 l'échelle de déformation.

De décembre 1964 à janvier 1965, il se produit une dilatation de la roche égale à $8,5 \cdot 10^{-7}$ dans la direction S 15° W et $4 \cdot 10^{-7}$ dans la direction E 15° S.

De février à mai 1965, se produit une contraction de la roche égale à $27 \cdot 10^{-7}$ dans la direction S 15° W. Dans la seconde direction, la contraction a duré jusqu'en août et était égale à $7 \cdot 10^{-7}$.

De mai à décembre, se produit dans la direction S 15° W une dilatation de la roche égale à 15.10^{-7} . La dilatation dans la seconde direction pour la période de septembre à décembre est égale à $1,5.10^{-7}$.

L'allure de la déformation est en corrélation avec l'allure de la température extérieure. La dilatation de la roche se produit en été et en automne, la contraction en hiver et au printemps. C'est apparemment une déformation de caractère saisonnier.

L'amplitude de l'onde saisonnière dans la direction S 15° W : 10^{-6} , dans la direction E 15° S l'onde saisonnière se détache moins sûrement, son amplitude est de l'ordre de $(2 - 3).10^{-7}$.

De quelle nature est l'allure saisonnière de la déformation ? La grande différence dans l'amplitude de l'onde saisonnière pour les deux directions montre que cette déformation n'est pas le résultat de la variation de température à l'intérieur de la mine. Il est possible que l'onde saisonnière soit provoquée par la pénétration des masses de l'air extérieur suivant les crevasses dans la roche et par le réchauffement des matériaux touchant aux crevasses.

Un autre mécanisme aussi est possible : la déformation est provoquée par des tensions thermo-élastiques surgissant dans le massif rocheux lors de son réchauffement depuis la surface. En utilisant l'expression pour les tensions thermo-élastiques dans le milieu pour son réchauffement hétérogène depuis la surface [6] et en y substituant les valeurs des paramètres : période de la variation de température - un an, dimensions de la partie de réchauffement hétérogène - 100 à 1000 m (correspond à la partie synclinale de la crête rocheuse) nous obtenons qu'à la profondeur de 50 m l'onde des tensions thermo-élastiques et des déformations se décale par rapport à l'onde de température d'un angle $\pi/4$ soit en temps de 1,5 mois. On obtient pour la direction S 15° W (fig. 5) à peu près ce même retard de la déformation par rapport à la variation de la température.

INFLUENCE DES PRECIPITATIONS

Nous donnons dans la partie inférieure de la figure 5 la quantité de précipitations tombant par jour. Quand cette quantité est de plus de 15 à 20 mm on voit de façon précise des sauts sur la courbe des déformations. Le mouvement commence 12 à 24 heures après la précipitation et continue pendant 2 à 3 jours. Dans tous les cas enregistrés, la déformation a un caractère de dilatation. Pour une précipitation de 35 à 60 mm, la déformation est égale dans la direction S 15° W à $(1 - 4).10^{-7}$, dans la direction E 15° S à $(- 1,5).10^{-7}$. La vitesse de la déformation atteint 3.10^{-7} par jour. La déformation a un caractère partiellement réversible. La contraction suivante, à cause de la dilatation, dure 5 à 10 jours.

Quel est le mécanisme du mouvement sous l'influence des précipitations ? Puisque le mouvement est partiellement réversible, l'une de ses causes est la déformation élastique de la roche. On ne peut considérer cette déformation comme le résultat de la charge de la crête

1- générateur F	du déformographe N° 1	
2- " " " " " "	" " " " " "	E 15° S
3- " " " " " "	" " " " " "	
4- " " " " " "	" " " " " "	
5- " " " " " "	" " " " " "	S 15° W
6- " " " " " "	" " " " " "	
7- interruptions dans l'enregistrement.		

Courbe supérieure -
allure de la température.

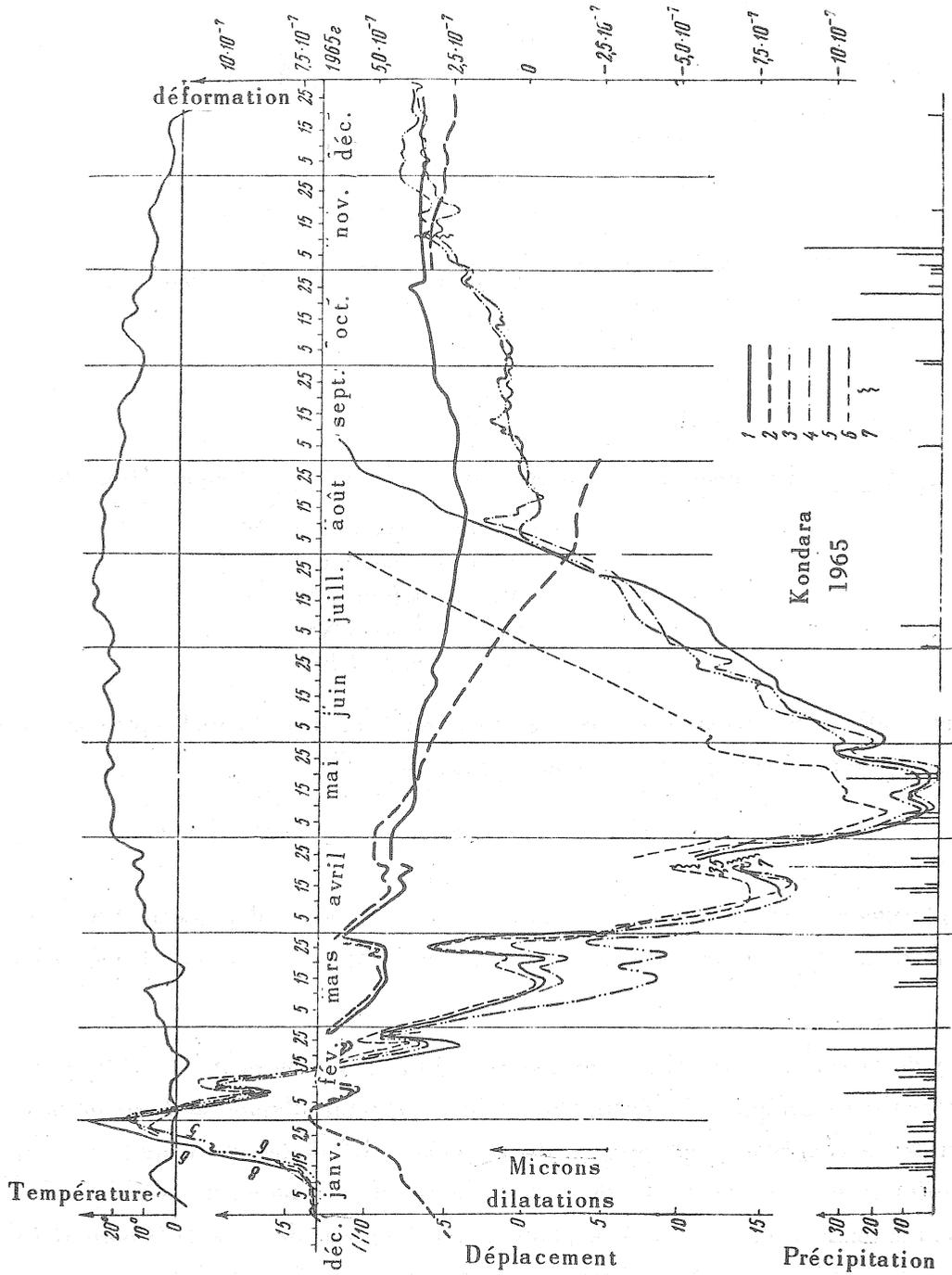


Fig. 5.- Allure des déplacements et des déformations pour 1965 à la station de Kondara

rocheuse par des masses d'eau puisque les périodes de précipitations et de la déformation sont décalées en temps l'une par rapport à l'autre. La déformation est apparemment provoquée par la pénétration de l'eau dans les crevasses et par sa pression sur les parois de la crevasse.

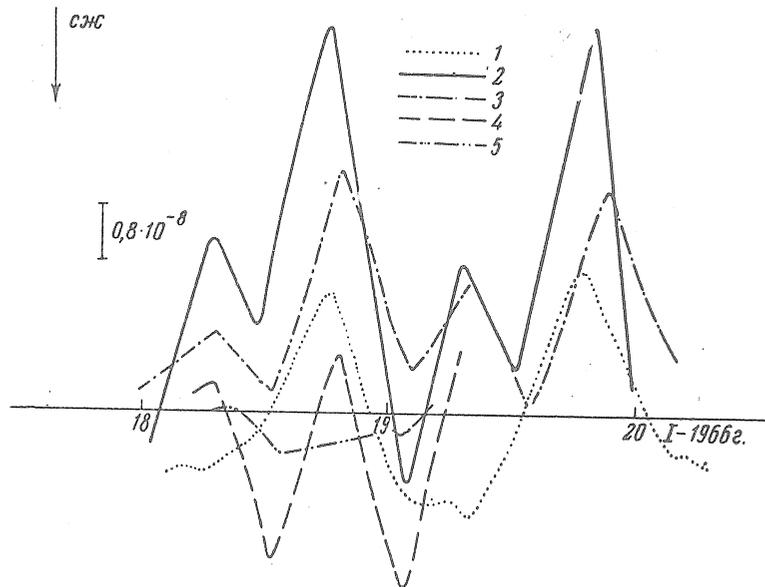


Fig. 6. Déformations de marées dans les stations de Talgar, Harm, Kondara :

- 1 - Kondara, appareil E 15° S
- 2 - Kondara, appareil S 15° W
- 3 - Talgar, appareil NS
- 4 - Harm, appareil NS
- 5 - Harm, appareil EW

Si on admet cette explication, les tensions qui surgissent dans la roche peuvent être évaluées comme suit. L'appareil enregistre le déplacement S , égal à

$$S = S - S_{\epsilon} \quad (1)$$

où S est le déplacement relatif des côtés de la crevasse, S_{ϵ} est le déplacement à cause de la contraction de la roche. Ce dernier est égal à $S_{\epsilon} = \epsilon L$, où ϵ est la contraction, L est la longueur de l'appareil.

La hauteur de la crevasse remplie d'eau est $H = 20$ à 30 m. On peut l'évaluer en temps de retard de la déformation par rapport à l'époque de la fin de la pluie d'après la durée de la période de dilatation et de la contraction successive de la roche. La distance jusqu'où la roche se déforme sous l'effet de la crevasse se dilatant est de l'ordre de la hauteur de la crevasse. Admettons cette distance égale à $(2 \text{ à } 3) H$. L'appareil d'une longueur de $(2 \text{ à } 3) H$ enregistrerait un déplacement S , égal à zéro. De (1) il s'ensuit qu'à la distance $(2 \text{ à } 3) H$, $S = S_{\epsilon}$ et par conséquent :

$$S = \epsilon \cdot (2 \text{ à } 3) H \quad (2)$$

En vertu de (1) et (2), nous trouverons :

$$\epsilon = \frac{\bar{S}}{(2-3)H-L}$$

et en y substituant les valeurs : $H = 25$ m, $S = 2 - 4 \mu$, $L = 20$ m, nous obtiendrons :

$$\epsilon = (0,4 - 1,3) \cdot 10^{-7}$$

En multipliant la valeur ϵ par le module de Young de la roche - $5 \cdot 10^{11}$ dn/cm², nous obtiendrons pour les tensions la valeur ; $(2 - 7) 10^4$ dn/cm². C'est une valeur assez grande. Pour comparer nous indiquerons que les forces génératrices de marées créent des tensions d'un ordre plus petit. Dans des conditions précises les sédiments peuvent jouer le rôle de mécanisme de détente dans l'origine des tremblements de Terre.

OSCILLATIONS DUES AUX MAREES.

Un travail spécial sera destiné à l'analyse des ondes de marée. Nous nous limiterons ici à certaines estimations qualitatives. Théoriquement la déformation linéaire de marée à la surface de la Terre dépend de la direction et de la latitude du lieu.

La figure 6 montre l'enregistrement de l'onde de marée au même moment dans les stations de Garm, Kondara et Talgar situées à peu près à la même latitude. On voit que l'amplitude de l'onde dans la direction EW et voisine de la direction E 15° S est nettement plus petite que dans la direction NS. Ceci découle de la forme du potentiel des forces génératrices de marées aux latitudes moyennes. Dans la direction voisine de NS, l'amplitude de l'onde à la station de Kondara est à peu près deux fois plus grande que dans les autres stations.

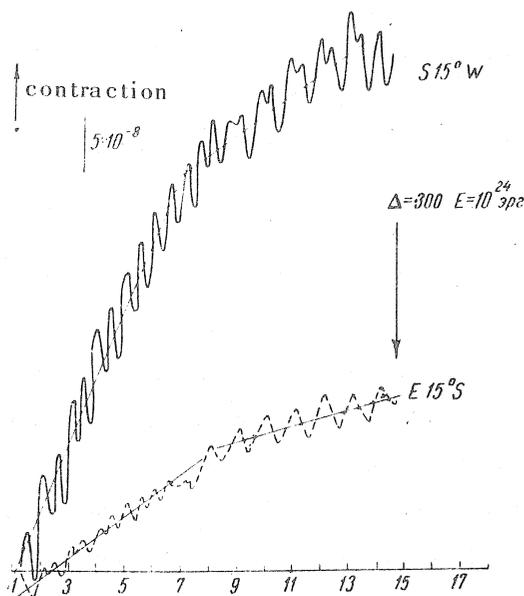


Fig. 7. Allure des déformations avant le tremblement de Terre du 14 mars 1965 dont l'épicentre est en Afghanistan.

INFLUENCE DE LA FRACTURE TECTONIQUE SUR LE CARACTERE DE LA DEFORMATION.

Lors de l'analyse de la déformation à la station de Kondara nous avons eu l'attention attirée sur le fait que le mouvement dans la galerie de mine transversale est sensiblement plus intense que dans son puits. L'amplitude de la variation saisonnière de la déformation dans la direction de la galerie (direction S 15° W) est 3 à 4 fois plus grande que dans la direction qui lui est perpendiculaire. Il convient alors de noter que l'allure saisonnière de la déformation à la station de Kondara est d'un ordre plus élevé que dans des conditions analogues dans une autre station comme Talgar. Le mouvement apparaissant sous l'influence des sédiments se caractérise par la même particularité c'est-à-dire que le long de la galerie les déplacements relatifs des points sont de 1,5 à 3 fois plus grands que dans le puits de la mine. Enfin, le mouvement oscillatoire provoqué par les forces génératrices de marées dans la direction de la galerie est deux fois plus intense que dans n'importe quelle autre station.

La cause de l'augmentation du mouvement dans la direction de la galerie est assez évidente. Comme nous l'avons déjà dit, le puits de mine coupe la ligne de la fracture précisément dans la partie la plus active de la zone de fracture. Dans les environs de la fracture comme dans les environs de chaque crevasse, on relève des tensions élastiques. C'est pourquoi, le déplacement relatif des points se trouvant sur les ailes opposées de la fracture est plus grand que le déplacement relatif des points se trouvant à la même distance l'un de l'autre dans le milieu non perturbé.

On peut évaluer la largeur de la région où se relèvent les tensions comme le rapport du déplacement dans la fracture provoqué par l'effet des forces de marées à la déformation loin de la fracture. Le déplacement dans la fracture d'après les données des déformographes est égal à 1 à 2 μ .

Nous ne connaissons pas la déformation loin de la fracture mais nous pouvons supposer qu'elle est la même qu'à la station de Talgar où il n'y a pas de failles importantes, c'est-à-dire (1 à 1.5) $\cdot 10^{-8}$. Alors la largeur de la région de déformation dans les environs de la fracture est égale à 100 à 200 m.

SUR LES MOUVEMENTS EN RELATION AVEC LES TREMBLEMENTS DE TERRE.

La recherche des signes précurseurs des tremblements de Terre est la tâche principale de l'étude des mouvements lents dans les zones séismiques. Cependant cette tâche est difficile et pour examiner sérieusement la question des mouvements précédant le tremblement de Terre, il faut de nombreuses données obtenues non pas dans une seule station mais dans une série de points voisins. Pour l'intervalle de temps étudié il ne s'est pas produit de forts tremblements de Terre proches dans la région de la station. On a noté quelques tremblements de Terre de magnitude 4,5 à 5 à une distance épacentrale de 100 à 150 km. Le plus important tremblement de

Terre dans cette période est celui d'Afghanistan, le 14 mars 1965 dont l'énergie est égale à 10^{24} ergs et la distance épacentrale est de 300 km. Avant les tremblements de Terre de magnitude 4,5 à 5 on n'observe pas de variations précises dans l'allure des déformations. Nous donnons sur la figure 7 l'allure de la déformation avant le tremblement de Terre d'Afghanistan indiqué. La contraction de la roche du 1^{er} au 7 mars s'effectue avec une vitesse de $5 \cdot 10^{-3}$ dans une direction et $1,5 \cdot 10^{-8}$ dans l'autre. Le 8 mars la vitesse a diminué jusqu'aux valeurs de $1,5 \cdot 10^{-8}$ dans la première direction et $0,8 \cdot 10^{-8}$ dans la seconde. Cependant nous n'avons pas de bases pour affirmer que cette variation soit en relation avec le tremblement de Terre d'autant plus que l'allure des déformations dans la station est très compliquée.

CONCLUSION.

Les observations faites à la station de Kondara avec des déformographes en quartz sur une base d'environ 20 m ont montré que ces appareils conviennent pour l'enregistrement des mouvements lents. La concordance des indications des appareils témoigne de ce que les indications des appareils reflètent très bien dans ses grandes lignes l'allure de la déformation de la roche. L'erreur relative de mesure est de 10 à 30 %. Par ailleurs, le travail exécuté confirme la nécessité d'un enregistrement parallèle du mouvement par plusieurs appareils puisqu'on peut exclure des mouvements locaux des socles et d'autres perturbations provenant de la dérive de l'appareil.

L'allure de la déformation à la station de Kondara pendant un an présente une variation de caractère saisonnier. L'amplitude de la déformation dans la direction de la galerie est égale à 10^{-6} , dans la seconde direction $(2 - 3) \cdot 10^{-7}$. L'onde de déformation se décale de deux mois par rapport à l'onde de température à la surface. Une dilatation intense de la roche accompagne les précipitations. La déformation au cours de 2 à 3 jours suivant la chute d'une grande quantité de pluie, atteint les valeurs de $(1 \text{ à } 4) \cdot 10^{-7}$. Le mouvement périodique dû aux marées est plus intense dans la station donnée qu'à la même latitude en d'autres points.

Les processus de déformation s'effectuent le plus activement suivant la partie coupant la ligne de la fracture. La fracture renforce aussi les mouvements purement locaux provoqués par la pénétration de l'eau dans la mine, par le réchauffement du massif rocheux et les mouvements de marée. L'apparition de mouvements importants sous l'influence de la variation des conditions extérieures constitue un facteur défavorable pour le problème des mouvements tectoniques. Cependant dans le cas donné, la fracture tectonique provoque une intensification du mouvement. C'est pourquoi on n'exclut pas la possibilité que les déformations provoquées par des origines tectoniques intérieures et en relation avec les tremblements de Terre apparaîtront également dans ces conditions de façon plus évidente.

BIBLIOGRAPHIE.

1. M.W. MAJOR, G.H. SUTTON, I. OLIVER, R. METSGER
On elastic strain of the earth in the period range 5 seconds to 100 hours,
Bull. Seismol. Soc. America, 54, N 1, 1964.

2. I. OZAWA
On the observation of the earth tide by means of extensometers in horizontal components.
Disast. prev. Res. inst. Bull. 46, 1961.

3. L.A. LATININA, Pr. M. KARMALIEVA
Variation des déplacements horizontaux à la surface de la Terre par un extensomètre en quartz.
Publ. "Mouvements actuels de l'écorce terrestre" N° 2, 1965.

4. I. OZAWA
On the combined observation of the crustal deformation at some observatories in the short intervals.
Primeras, J. Chilenas de Sismologia e ingenieria Chile antisismica, 1, 1963.

5. A.E. OSTROVSKII
Clinomètre avec enregistreur photoélectrique.
Publ. "Etude des marées terrestres" N° 2, M. 1961.

6. V.V. POPOV
Sur les déformations de température de la surface de la Terre.
Izvest. Ac. des Sc. URSS. Série géophys. N° 7, 1960.

METHODISCHE FRAGEN UND ERFAHRUNGEN BEI ERDGEZEITENMESSUNGEN AN DER SOWJETISCHEN ÜBERWINTERUNGSSTATION WOSTOK IN DER ZENTRALEN ANTARKTIS

*M. Manfred SCHNEIDER**, Freiberg

1. PROBLEMSTELLUNG.

Die überwiegende Zahl der Erdgezeitenstationen befindet sich auf der Nordhalbkugel der Erde. Durch die Land-See-Verteilung verursacht liegen die wenigen Meßorte der Südhalbkugel in niederen und gemäßigten Breiten. In der Antarktis, die fast vollständig vom Polarkreis umschlossen ist, haben erstmalig LINDNER und WIRTH [4] 1965 an der sowjetischen Station Molodshnaja, an der Küste des Kontinentes im Enderby-Land gelegen, Messungen der gezeitenbedingten Schwerevariationen und Lotrichtungsänderungen ausgeführt. Die Interpretation der Ergebnisse im Sinne der Erdgezeitenforschung wird durch den vorherrschenden indirekten Effekt des in unmittelbarer Nähe befindlichen Ozeans erschwert. 1967 begannen unter der Leitung von SLICHTER [8] an der US-amerikanischen Station Amundsen-Scott am Südpol Versuche zur Messung der langperiodischen Komponente der Schweregezeiten. Erste Ergebnisse wurden 1969 mitgeteilt [9].

Einer Verdichtung des Beobachtungsnetzes im Gebiet der Antarktis steht die geringe Auswahl geeigneter Orte im Wege. An den dauernd besetzten Küstenstationen beeinträchtigen die Einflüsse der Meeresgezeiten von vornherein eine hinreichend genaue Messung der Erdgezeiten. Der indirekte Effekt nimmt bekanntlich mit wachsender Entfernung vom Ozean ab, so daß Orte im Inneren des Kontinentes für die Erdgezeitenbeobachtungen in Betracht gezogen werden müssen.

Von den innerkontinentalen Überwinterungsstationen, die im Zusammenhang mit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr geschaffen worden sind, werden gegenwärtig nur drei, Amundsen-Scott, Byrd und Wostok, aufrechterhalten. Eine neuere vierte Station, Plateau, war vom Januar 1966 bis Februar 1969 besetzt. Die wichtigsten Daten dieser Stationen sind in Tab. I nach DUBRONIN und PETROV [3] zusammengestellt.

* Dr. rer. nat. habil. M. Manfred Schneider, DDR-92 Freiberg Gabelsbergerstraße 1

Tab. 1.

Innerkontinentale antarktische Überwinterungsstationen

Stationsbezeichnung	Staat	geogr. Koordinaten	Höhe	geringste Meeresentfernung
Amundsen-Scott	USA	90° S	2800 m	1300 km (600 km)
Byrd	USA	80°01'S 119°32'W	1530 m	700 km
Plateau	USA	79°15'S 40°30'E	3624 m	1100 km
Wostok	SU	78°28'S 106°59'E	3488 m	1300 km (1100 km)

Anmerkung : in Klammern sind die Entfernungen bis zum Rande der vom Eisschelf bedeckten Ross-See angegeben.

Die küstenferne Lage dieser Stationen läßt nicht nur den indirekten Effekt der Meereszeiten klein werden. Man kann auch erwarten, daß Verfälschungen der Gezeitenerscheinungen, die durch Luftdruckschwankungen mit tagesperiodischem Anteil verursacht werden können (vgl. SIMON [7]), in geringerem Maße als z. B. in West- und Mitteleuropa auftreten; denn in der zentralen Antarktis herrschen beständige Wetterlagen ohne nennenswerte Zyklonentätigkeit vor (s. AVER' JANOV [1]). Darüber hinaus ist der tagesperiodische Anteil der Temperaturänderungen während der Polarnacht, die in 80° Breite vier Monate dauert, sehr klein, so daß auch thermisch verursachte Verfälschungen der halb- und ganztägigen Partialtiden weitgehend ausgeschaltet sind. Bei der Messung der langperiodischen Tiden können Einflüsse der Luftdruck- und Temperaturänderungen in Betracht zu ziehen sein, wie die Erfahrungen am Südpol zeigen (vgl. [9]).

Seitens der Theorie bieten die Polargebiete besonders gute Bedingungen für die Messung der Vertikalkomponente der langperiodischen Tiden der Gezeitenbeschleunigung sowie der Horizontalkomponenten der Ganztagstiden, weil die Amplituden an den Polen absolute Maxima erreichen. Dagegen verschwinden dort die Vertikalkomponente der Ganz- und Halbtagstiden sowie die Horizontalkomponenten der halbtägigen und langperiodischen Glieder ganz. Zur Übersicht sind die theoretisch für eine feste Erde zu erwartenden Amplituden der gezeitenbedingten Schwereänderungen und Lotschwankungen für polare Breiten in Abb. 1 dargestellt (berechnet nach BARTELS [2]).

Die praktische Durchführung von Erdgezeitenmessungen im Inneren der Antarktis stößt durch die ungewöhnlichen Umweltbedingungen auf besondere Schwierigkeiten. Diese entstehen durch die tiefen Temperaturen, die die Betriebsfähigkeit der Instrumente in Frage stellen und die Bedienung erschweren, durch die elektrostatischen Aufladungserscheinungen und durch das Fehlen eines festen Fundamentes, das die Aufstellung der Geräte auf dem porösen Firn oder plastischen Eis notwendig macht.

Es ist der letztgenannte Umstand, der Versuchen zur Messung der Schwerezeiten mit Gravimetern mehr Aussichten auf Erfolg einräumt als denen von Lotschwankungsbeobachtungen mit Klinometern.

Von den vorstehenden Erwägungen ausgehend erhielt der Vf. vom Nationalkomitee für Geodäsie und Geophysik der DDR den Auftrag, während der 14. Sowjetischen Antarktisexpedition an der Überwinterungsstation Wostok mit Gravimetern die zeitenbedingten Schwerevariationen zu messen. Darüber hinaus wurden während der Überwinterung Versuche unternommen, mit Horizontalpendeln die Lotschwankungen zu registrieren.

2. MESSUNGEN DER SCHWEREGEZEITEN

Für die Wahl des Meßortes innerhalb des Stationsgeländes war ausschlaggebend, daß er auch während der Polarnacht bei ungünstiger Witterung jederzeit erreicht werden konnte sowie daß Erschütterungen durch die Dieselelektroaggregate und durch schwere Raupenfahrzeuge die Sicherheit der Geräteaufstellung nicht beeinträchtigten. Ferner sollten Schwankungen der Luft- bzw. Schneetemperatur möglichst unwirksam sein. Nach den Ergebnissen kontinuierlicher Beobachtungen in einem 40 m tiefen Bohrloch ist an der Station Wostok die tägliche Temperaturamplitude in 5 m Tiefe kleiner als $\pm 0,1^\circ \text{C}$, die jährliche Temperaturamplitude in 10 m Tiefe kleiner als $\pm 1^\circ \text{C}$.

Etwa 100 m vom Wohngebäude entfernt wurde eine Meßhütte mit der Grundfläche $3,2 \times 3,2 \text{ m}^2$ und der Höhe 2 m unter einer Schneebedeckung von 2 m auf einem Pfahlfundament aufgestellt. Die Hütte wurde aus Fertigteilen montiert, die aus 10 cm starkem Schaumpolystyrol mit Sperrholzverkleidung bestanden. Ein eingelegtes Kupferdrahtnetz diente als allseitige Abschirmung gegen elektrostatische Aufladungen, da unter den gegebenen Bedingungen deren Ableitung durch Erdung nicht möglich war. Die Temperatur des umgebenden Firmes betrug etwa -55°C .

Die Abb. 2 zeigt den Grundriß der Hütte. In ihrem Inneren befinden sich eine Luftschleuse am Eingang, ein Bedienungsgang, ein Registrierraum und zwei durch Türen verschließbare Meßräume für die Aufstellung von zwei Gravimetern. Der Zugang von der Schneeoberfläche aus erfolgte durch einen 7 m langen schrägen Stollen.

Um die Meßeinrichtungen unter Verhältnissen betreiben zu können, die mit normalen Bedingungen vergleichbar waren, wurde die Hütte mit großflächigen Wärmeplatten elektrisch beheizt. Mit Hilfe von Quecksilber-Kontaktthermometern wurde die Temperatur in den einzelnen Räumen getrennt geregelt. Wegen der geringen Wärmekonvektion stellte sich eine stabile Temperaturschichtung ein. Eine Dauerheizleistung von 525 Watt und weiteren 400 Watt, die durch die Regelungseinrichtung etwa in Stundenabständen ein- und ausgeschaltet wurden, war ausreichend, die

Luft am Boden auf einen mittleren Wert von $- 8^{\circ} \text{C}$ zu erwärmen. Die Regelungsamplitude war kleiner als $\pm 0,5^{\circ} \text{C}$.

Für die Gezeitenbeobachtungen wurden die Gravimeter Askania Gs 11 Nr. 140 und 188 verwendet. Die äußeren Bedienungselemente waren vorsorglich mit Tieftemperaturfett abgeschmiert worden. Die Geräte wurden in den Meßräumen auf je einer runden Holzplatte aufgestellt, die ohne Berührung mit dem Boden der Hütte auf je drei Pfählen von 1,25 m Länge gegründet waren. Jedes Gravimeter war von einer Schaumpolystyrolumhüllung umgeben, die als zusätzliche thermische Abschirmung diente und mit einer Piacrylglasscheibe abgedeckt war. Bei Verwendung der Thermostatentemperatur 25°C und der Heizstufe 2 des inneren und äußeren Thermostaten stellte sich an den Kopfplatten der Gravimeter eine mittlere Temperatur von $+ 6^{\circ} \text{C}$ ein. Alle wichtigen Bedienungselemente der Gravimeter waren mit Hilfe von Spindeln aus wärmeisolierendem Material und Kugelgelenkmechanismen von außen zugänglich.

Die Gewährleistung optimaler Betriebsbedingungen und geringer Störanfälligkeit waren ausschlaggebend für die gewählte Zusammenstellung der Meßanordnung. Der Heizstrom der Gravimeter und der Lampenstrom wurden dem Energienetz der Station über Pufferakkumulatoren entnommen. Der Lampenstrom wurde außerdem mit einer zweistufigen Zenerdiodenschaltung auf $\pm < 0,1 \%$ stabilisiert. Die Meßspannung wurde über abgeschirmte Hochfrequenz-Meßleitungen hochempfindlichen Spiegelgalvanometern, Typ SPG 2 st und SPG 3 der Akademiewerkstätten für Forschungsbedarf der DAW, Berlin-Adlershof, zugeführt und direkt fotografisch registriert. Eine elektronische Verarbeitung der Meßspannung wurde vermieden, um mögliche Störeinflüsse durch künstliche und natürliche Wechselfelder sowie durch elektrostatische Störpotentiale zu unterdrücken.

Die Galvanometer wurden auf einem verkleideten, thermisch isolierten Metallgestell übereinander aufgestellt. Da sie auch auf kleinste Temperaturschwankungen empfindlich reagierten, wurden der Meßplatz zusätzlich mit einem Sperrholzverschlag umgeben und die Lichtdurchtrittsöffnungen mit Planglasscheiben verschlossen. Dieser abgetrennte Raum wurde nicht beheizt. Die stationäre Betriebstemperatur der Galvanometer lag unter $- 20^{\circ} \text{C}$.

Die Daten der verwendeten Galvanometer waren : Innenwiderstand 1100 Ohm (für beide Typen), Eigenperiode 13,5 bzw. 9 s und Stromempfindlichkeit 13 bzw. 17 pA/mrad. Zur Regelung der Empfindlichkeit und zur aperiodischen Bedämpfung der Galvanometer wurden diesen Widerstandssiebglieder vorgeschaltet. Mit 2 m Lichtweg wurde bequem ein mittlerer Skalenwert von $4 \mu\text{gal}/\text{mm}$ Registrierausschlag erreicht. Die Trommeln der Registriergeräte wurden durch Federaufzug angetrieben. Die Umlaufzeit betrug 3,5 Tage, der Papiervorschub 6 mm/Stunde, die Breite des Registrierpapiers 200 mm.

Die Gravimeter wurden nach dem Eintreffen an der Station Wostok sofort auf den neuen Schwerewert eingestellt und entarretiert, damit sich die durch den langen Transport verursachten mechanischen Spannungen im Meßsystem ausgleichen konnten. An der Meßanordnung des Gravimeters Nr. 140 traten während der mehr als viermonatigen Messungen keine Störungen auf. Dagegen fiel das am Gravimeter Nr. 188 angeschlossene Galvanometer aus. Ein Eingriff in den Meßplatz hätte wegen der Störung des Wärmegleichgewichtes eine Unterbrechung der laufenden Registrierung des Gravimeters Nr. 140 auf unbestimmte Zeit zur Folge gehabt. Das defekte Galvanometer wurde daher erst dann gegen ein gleichartiges Reserveinstrument ausgetauscht, als eine Bestimmung der Nichtlinearität der Galvanometeranzeige erfolgte. Jedoch konnten die Registrierungen wegen Einstellunsicherheiten am Gravimeter Nr. 188 nur zur qualitativen Kontrolle fortgesetzt werden. Auf Grund dieser gemachten Erfahrung ist zu fordern, daß bei ähnlichen Untersuchungen nicht nur die Gravimeter, sondern auch die zugehörigen Registrierteile thermisch voneinander zu trennen sind, um die unabhängige Bedienung zu ermöglichen.

Die zu erwartenden Einflüsse von Setzungen des Firmes und Erschütterungen des Untergrundes auf die Registrierqualität waren vor Beginn der Messungen mit Besorgnis betrachtet worden. Doch stellte sich diese als völlig unbegründet heraus. Die Neigung des Aufstellungsortes war stetig und im wesentlichen monoton, Sie erreichte maximal 1 Bogenminute pro Monat, so daß Nachhorizontierungen der Gravimeter höchstens einmal monatlich, solche der Galvanometer überhaupt nicht erforderlich waren. Stoßartige Erschütterungen durch die Kontraktion des Firmes in Zeiten starker Abkühlung, vor allem in den Monaten April/Mai und Juli, führten zu keinen Sprüngen in den Aufzeichnungen. Durch die hohe Eigenperiode und die aperiodische Bedämpfung der Galvanometer traten keinerlei Resonanzschwingungen der Systeme auf. Die Vibrationen der Dieselmotoren waren aus dem gleichen Grunde unwirksam, Der Fahrverkehr störte nur, wenn er in etwa 50 bis 100 m Abstand vom Meßort erfolgte. Er verursachte keine sichtbaren Nachwirkungen.

Viel größere Schwierigkeiten als ursprünglich angenommen bereiteten dagegen elektrische Störungen. Trotz der allseitigen Abschirmung der Meßhütte traten in ihrem Inneren wegen der hohen Lufttrockenheit besonders während heftigen Schneetreibens durch Reibungselektrizität erhebliche Potentialunterschiede auf. In den Registrierungen traten dann vorzugsweise einseitige unregelmäßige Auslenkungen auf. Als in der benachbarten Ionosphärenstation Senderöhren ausgetauscht worden waren, hielten Störungen der Aufzeichnungen, nachweislich dadurch ausgelöst, stundenlang an.

In einer Reihe von Fällen war eindeutig festzustellen, daß elektrische Störungen durch das Netzkabel einstreuten. Jedoch konnte der Übertragungsmechanismus nicht aufgeklärt werden. Vermutlich ließen sich derartige Effekte durch die Einschaltung eines Trenntransformators vor

dem Verbraucherstromkreis der gesamten Meßanlage, durch die ausschließliche Verwendung abgeschirmter Kabel, auch für die Netzzuleitung, sowie durch den Betrieb der Gravimeter mit Batteriespannung unter Verzicht auf Pufferung reduzieren.

Die kontinuierliche Stromversorgung der Meßanlage ist als unabdingbare Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der Messungen anzusehen. Unter den gegebenen Betriebsbedingungen für die Dieselaggregate sind Unterbrechungen jedoch fast unvermeidbar. Sind sie von kurzer Dauer, wirken sie sich nicht schädlich auf die Messungen aus. Ausfälle der Netzspannung über einige Stunden, z. B. durch Kabelbrüche, führen dagegen zu tagelang anhaltenden Störungen des thermischen Gleichgewichtes in den beheizten Meßräumen, zum Absinken der Temperatur auf Werte, bei denen die Geräte versagen, und dadurch zu tagelangen Registrierausfällen und nachfolgenden Einlaufvorgängen.

Das Energienetz der Station besitzt aus ökonomischen Gründen nur eine geringe Reserve. Daher führen Belastungsänderungen zu Spannungs- und Frequenzschwankungen, die durch eine Stabilisierung nicht vollständig beseitigt werden konnten. Kehren diese Spannungsschwankungen periodisch wieder, liegt die Gefahr nahe, daß die Meßergebnisse verfälschend beeinflußt werden. Es ist deshalb bei Wiederholungsmessungen eine unabhängige Stromversorgung für den Betrieb der Meßeinrichtung zu erwägen.

3. MESSUNGEN VON NEIGUNGEN UND LOTSCHWANKUNGEN

Mit den in der Erdzeitenforschung üblichen Klinometern kann ohne weiteres die Empfindlichkeit erreicht werden, die nötig ist, um die in hohen Breiten auftretenden Lotschwankungen (vgl. Abb. 1) mit hinreichendem Auflösungsvermögen aufzuzeichnen. Schwierigkeiten bei der praktischen Durchführung der Messungen sind dadurch zu erwarten, daß für die quantitative Bearbeitung die Eichfaktoren genau ermittelt und kontinuierliche Registrierungen gewonnen werden müssen, deren Dauer vom angewendeten Verfahren der harmonischen Analyse abhängt.

Die Forderung nach genauer Kenntnis der Eichfaktoren der Klinometer ist zunächst nur zu erfüllen, wenn die Neigungsempfindlichkeit am Meßort selbst bestimmt werden kann. Eine Übertragung von Gerätekonstanten, die im Laboratorium oder an andere Stelle ermittelt worden sind, bedarf besonderer Untersuchungen, wenn - wie im gegebenen Falle - am Meßort Betriebstemperaturen unter -50° C auftreten. Zudem ist die Möglichkeit der ständigen Kontrolle der Eichfaktoren zu fordern. Nach dem Gesagten sind für Lotschwankungsmessungen im Inneren des antarktischen Kontinentes fürs erste nur die klassischen Horizontalpendel als geeignet anzusehen, deren Neigungsempfindlichkeit aus der Eigenperiode und den geometrischen Abmessungen der Anordnung theoretisch am Meßort selbst bestimmt werden kann; welche Erschwernisse dabei praktisch auftreten, ist eine andere Frage. Neuere Ausführungen von Horizontalpendeln und Vertikalpendel, deren Empfindlichkeitswerte aus Parametern zu erschließen sind, die

Im Laboratorium bestimmt werden, sowie auch Niveauvariometer kommen beim gegenwärtigen meßtechnischen Entwicklungsstand für die genannten Untersuchungen nicht in Betracht.

Die Forderung nach kontinuierlicher Aufzeichnung hinreichender Dauer ist schwer zu verwirklichen. Fortlaufende Registrierungen können nur gewährleistet werden, wenn der Nullpunktgang der Klinometer stetig und klein genug ist. Der instrumentell bedingte Gang spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Ausschlaggebend für das Nullpunktverhalten ist die Stabilität des Untergrundes. Diese ist wegen der bekannten Setzungs- und Fließerscheinungen an der Oberfläche der firmbedeckten Eiskappe Antarktikas von vornherein zweifelhaft. Diese Frage kann darum nur experimentell entschieden werden.

LINDNER und WIRTH untersuchten mit Hilfe von Sekundenlibellen die Standfestigkeit des Eisuntergrundes in der Nähe der Station Molodoshnaja ([4], S. 55/56). Die Beobachtungen führten zu dem Schluß, " daß klinometrische Messungen von Erdgezeitenerscheinungen auf Eisgrund wohl kaum durchführbar sein werden. Die ungleichförmigen Neigungsänderungen der Eisoberfläche übertreffen die gezeitenbedingten um mindestens zwei Zehnerpotenzen. "Damit schien die Unmöglichkeit von Lotschwankungsmessungen an einer innerkontinentalen Station der Antarktis besiegelt; denn Felsuntergrund tritt nur in den küstennahen Gebieten zutage.

Die Überwinterung an der Station Wostok bot die Gelegenheit, die Versuche zur Standfestigkeit des Untergrundes wiederaufzunehmen. Dies wurde insbesondere dadurch nahegelegt, daß die Untersuchungen von LINDNER und WIRTH auf Eisuntergrund ausgeführt worden waren. Die Beobachtungsorte lagen in der Nähe des Eishanges; die Mächtigkeit betrug nur einige Meter; das Eis lag auf Geröll; die Oberfläche hatte ein Gefälle von 5 bis 10 %. Die Aufstellungsorte waren für das Innere der Antarktis nicht repräsentativ, denn in Wostok wurden völlig verschiedene Bedingungen vorgefunden.

Im Bereich der Station Wostok beträgt die Mächtigkeit der Eiskappe nahezu 4 km. Nach den Ergebnissen seismischer Messungen trägt sie eine Firmschicht von mehr als 100 m Dicke, die sich allmählich zu kompaktem Eis verdichtet. Bereits in drei bis vier Metern Tiefe ist die oberflächennahe feinkörnige Schneedecke in klingend harten Firm verwandelt, der elastisch-fest und sägbar ist. Er hat eine homogene Struktur wie leicht gefrittete Glassplitter, ähnlich derjeniger sehr grobkörnigen gepreßten Zuckers.

Neben der Meßhütte, 4 m unter der Schneeoberfläche, wurden vier Flüssigkeitslibellen mit 10" Angabe auf einer Sperrholzplatte von 65 x 65 cm² Grundfläche und 2 cm Dicke aufgestellt. Diese Platte wurde lediglich auf den eingeebneten Firm gelegt. Die Libellen waren in zwei senkrechten Richtungen zur gegenseitigen Kontrolle paarweise parallel angeordnet. Der Stand der Libellenblasen wurde 36 Tage lang täglich einmal auf etwa $\pm 1''$ abgelesen. Die Ergebnisse

sind in Abb. 2 dargestellt. Obwohl die gewählte Aufstellungsart alles andere als ideal ist, setzte in der einen Komponente bereits nach zwei Wochen eine Stabilisierung ein. Weitere Änderungen überschritten nicht den Bereich der Ableseunsicherheit. In der dazu senkrechten Richtung verminderten sich die Neigungen allmählich und verliefen bis zum Abbruch des Versuches monoton.

Daraus ist zu schließen, daß - zumindest für einen begrenzten Zeitraum - die Setzungerscheinungen in der Firnschicht vorzugsweise in einer Richtung verlaufen bzw. daß eine - dazu senkrechte - Richtung existiert, in der die Neigungen des Untergrundes im Mittel verschwinden. Dieses Ergebnis kann zufällig und lokal verursacht sein. Es bedarf vor einer Verallgemeinerung unbedingt der Überprüfung. (Wie die ständigen Kontrollablesungen des Libellenstandes des in der benachbarten Meßhütte stehenden Gravimeters Nr. 140 und später die Registrierungen mit Horizontalpendeln bestätigt haben, waren die Neigungen etwa nach Südwesten gerichtet).

Dieses Ergebnis ermutigte zum Versuch von Lotschwankungsmessungen. Es wurde ein 10 m langer Stollen gegraben und an dessen Ende ein ebenerdiger Sockel aus dem Firn herausgesägt. Die Sohle des Stollens liegt 6 m unter der Schneeoberfläche. Auf dem Sockel wurden nebeneinander zwei Sperrholzplatten der oben beschriebenen Art gelegt und darauf zwei Horizontalpendel nach Tomaschek/Ellenberger in nahezu senkrechten Azimuten aufgestellt. Die Holzplatten wurden später mit Wasser vergossen, ohne daß sich das Nullpunktverhalten der Pendel geändert hätte.

Den Klinometern in 5 m Abstand gegenüber wurde ein Gerät für die fotografische Registrierung aufgestellt. Um seine Betriebssicherheit bei der herrschenden tiefen Umgebungstemperatur zu gewährleisten, wurde es in einer elektrisch heizbaren Holzkiste untergebracht, die mit einem Glasfenster versehen war. Die Heizleistung von 90 Watt reichte aus, das Registriergerät auf etwa 30° C zu erwärmen, so daß die kurzzeitige Bedienung mit Seidenhandschuhen möglich war.

Da Klinometer auf Änderungen der Umgebungstemperatur empfindlich reagieren, ist eine Beheizung trotz der ungünstigen Betriebsbedingungen ausgeschlossen gewesen. Eine Fernbedienung der Horizontalpendel war unmöglich. Die manuelle Justierung gestaltete sich recht schwierig, weil der stationäre Temperaturzustand am Aufstellungsort durch die Körperwärme des Beobachters gestört wurde. Da das Betreten des Meßstollens bereits thermische Störungen verursachte, unterblieben die sonst üblichen regelmäßigen Kontrollen. Bei Annäherung an die Pendel selbst wurde die Umgebung durch die Last des Körpers deformiert, so daß längere Nachwirkungserscheinungen auftraten. Besondere Schwierigkeiten entstanden bei der Abbildung der Lichtmarken durch die ungleichmäßige Deformation der Linsen und Spiegel infolge der tiefen Temperatur. Durch Zusatzlinsen wurden die Verzeichnungen zum Teil beseitigt. Während der Justierarbeiten beschlugen sich alle optischen und Metallteile rasch im Hauch der Atemluft. Auch sonst setzte sich mit der Zeit Reif auf Glasfenstern und Linsen ab.

Erwartungsgemäß war der Nullpunktgang der Pendel infolge der ständigen Neigung des Untergrundes beträchtlich. Jedoch konnte durch Berücksichtigung der Ergebnisse der Libellenstandsbeobachtungen bei der Wahl der Azimute erreicht werden, daß der mittlere tägliche Gang des einen Gerätes $0,5''$ nicht überschritt. Die Eigenperiode wurde auf den mittleren Wert 30 s eingestellt. Damit ergab sich ein mittlerer Skalenwert der Registrierungen von $6 \cdot 10^{-3}''/\text{mm}$. Infolgedessen war es möglich, eine Reihe ununterbrochener Aufzeichnungen von jeweils mehr als 48 Stunden Dauer zu erhalten. Diese Intervalle reichen aus, um die harmonischen Konstanten der wichtigsten Partialtiden nach dem Analysenverfahren von VENEDIKOV [10] zu ermitteln.

Das zweite Horizontalpendel hatte einen örtlich bedingten Nullpunktgang von 1 bis $2''/\text{Tag}$, so daß auswertbare Registrierungen nicht möglich waren. Die Meßversuche mit diesem Gerät wurden daraufhin eingestellt.

Nach jeder zweitägigen Registrierung mußte die Gleichgewichtslage des Pendels neu eingeregelt werden. Wegen der bestehenden Schwierigkeiten bei der manuellen Nachjustierung und den damit verbundenen thermischen und elastischen Nachwirkungserscheinungen waren zwischen den einzelnen Registrierintervallen unregelmäßige Unterbrechungen unvermeidbar. In der Regel wurden wöchentlich zwei zweitägige Registrierungen gewonnen.

Um die quantitative Auswertbarkeit der Registrierungen zu garantieren, wurde die Eigenperiode des Horizontalpendels vor und nach jeder neuen Justierung bestimmt. Obwohl wegen der offensichtlich vorhandenen Amplitudenabhängigkeit eine Registrierung der Eigenschwingungen zu fordern ist (s. SCHNEIDER [6]), mußte bei diesen ersten Lotschwankungsmessungen in Wostok darauf verzichtet und die Eigenperiode visuell mit Stoppuhren bestimmt werden. Die T_0 -Zeit wurde nach Beendigung der Registrierungen unmittelbar am Meßort bestimmt, um etwaige thermisch bedingte Verfälschungen bei der Messung unter anderen Temperaturbedingungen zu vermeiden. Das mittlere Azimut wurde, ebenfalls nach dem Abschluß der Messungen, durch eine magnetische Richtungsübertragung bestimmt; der Wert der erdmagnetischen Deklination ist aus den laufenden Registrierungen an der Station Wostok auf Zehntel Bogenminuten bekannt.

Um jederzeit die Möglichkeit der Schwingungszeitmessung ohne Eingriffe in das Pendel zu haben, wurde von der Verwendung einer Dämpfungseinrichtung abgesehen. Dadurch wirkte sich die Unruhe des Untergrundes als Folge unregelmäßiger Setzungen und Erschütterungen zeitweise qualitätsvermindernd auf die Registrierungen aus. Besonders intensive Störungen verursachte weithin der Fahrverkehr im Stationsgelände. Jedoch blieben die Kurvenzüge stetig und die Gezeitenamplituden qualitativ stets gut erkennbar. Die kurzperiodischen Schwingungen, die von den 100 m entfernt stehenden Dieselelektroaggregaten ausgingen, waren nicht wirksam.

Die besonderen Bedingungen am Meßort und die begrenzte für die Untersuchungen zur Verfügung stehende Zeit ermöglichten leider nur die Erfassung der etwa NW - SE gerichteten Lotschwankungskomponente. Durch die geeignete Festlegung der Azimute erscheint es möglich, unter Inkauf-

nahme gegensinniger Nullpunktgänge zur gleichen Zeit zwei schiefwinklige Komponenten zu registrieren und damit den gesamten Lotschwankungsvektor zu erhalten.

Bei der Installation der Horizontalpendel ist unbedingt anzustreben, daß sich die Gleichgewichtslage in der Mitte des Registrierbereiches befindet, um den instrumentenbedingten Nullpunktgang klein zu halten; die einfache Kontrolle besteht darin, daß eine Empfindlichkeitsänderung keine seitliche Abwanderung des Pendelsystems ergeben darf. Eine Fehljustierung des Azimutes ist aber durch die situationsbedingten Schwierigkeiten nahezu unvermeidbar, so daß instrumenten- und örtlich bedingter Nullpunktgang einander überlagert sind. Auch im Bestreben, das Azimut des Pendels mit dem der Neigung des Untergrundes in Deckung zu bringen, wird ein örtlich bedingter Anteil bestehen bleiben, weil das Azimut des Neigungsvektors am Aufstellungsort durch Voruntersuchungen nur schwer hinreichend genau festgelegt und nicht ausgeschlossen werden kann, daß es zeitlichen Veränderungen unterworfen ist.

Es hat sich unter den gegebenen Bedingungen nicht bewährt, zwei Klinometer nebeneinander aufzustellen, weil bei den notwendigen Justierarbeiten an dem einen das andere gestört wird. Eine Installation an getrennten Orten ist unbedingt vorzuziehen.

Es erscheint aussichtsreich, den lokalen aufstellungsbedingten Anteil des Nullpunktganges zu verringern, indem anstelle der probeweise verwendeten Sperrholzplatten ein Pfahlfundament verwendet wird, das den Bolzen bei der Installation von Horizontalpendeln nach Verbaandert/Melchior entspricht (s. MELCHIOR [5], S. 171-172). Nach den Erfahrungen bei der Aufstellung der Gravimeter sollten die Pfähle mindestens 1,5 bis 2 m lang sein. Sie lassen sich in den Firn ohne Schwierigkeiten einschlagen.

Ob eine Tieferlegung des Meßortes den örtlich bedingten Anteil des Nullpunktganges reduzieren würde, bedürfte weiterer Untersuchungen. Es läßt sich ebenfalls noch nicht abschließend beurteilen, ob die gewählte Tiefenlage von 6 m ausreicht, um tagesperiodische thermische Effekte in den Lotschwankungen auszuschließen. Die weithin ebene Oberfläche der Schneedecke und die homogene Schichtung des Firms berechtigen zu der Annahme, daß etwaige thermoelastische Verformungen unbedeutend sind. Die verwendete Tiefe des Meßortes war zufällig und durch die zeitlichen Möglichkeiten für die Anlegung des Stollens bestimmt.

4. SCHLUßBEMERKUNGEN.

Die während der Überwinterung 1969 an der Station Wostok durchgeführten Registrierungen der Schwerezeiten und der Lotschwankungen haben bewiesen, daß es meßtechnisch möglich ist, die sich solchen Untersuchungen im Inneren der Antarktis entgegenstellenden Schwierigkeiten durch eine besondere Vorbereitung der Instrumente und die Wahl einer geeigneten Beobachtungsmethodik zu überwinden.

Mit Gravimetern sind kontinuierliche Registrierungen möglich, wenn auch unter den gegebenen Verhältnissen die Wahrscheinlichkeit von Störungen und Unterbrechungen der Messungen gegenüber normalen Umweltsbedingungen erheblich gesteigert ist. Die Konstanz der Betriebsverhältnisse beeinflusst die Qualität der Aufzeichnungen wesentlich. Dabei ist die Versorgung mit Elektroenergie ein rein technisches Problem und prinzipiell in erforderlichem Maße zu garantieren. Die Auswirkungen wechselnder elektrostatischer Störpotentiale lassen sich durch meßtechnische Vorkehrungen zum großen Teil vermindern. Setzungen des Firnuntergrundes und die natürliche Bodenunruhe beeinträchtigen die Sicherheit der Geräteaufstellung nur wenig. Die Abb. 4 zeigt eine in Wostok gewonnene Registrierung der Schwerezeiten.

Mit einem Horizontalpendel ist die quantitative Messung einer Lotschwankungskomponente gelungen. Im Zeitraum von 3 Monaten wurden 28 zweitägige Registrierintervalle erhalten. Ein Beispiel ist in Abb. 5 dargestellt. Trotz zeitweise stark herabgesetzter Güte der Aufzeichnung läßt die systematische Weiterführung der Untersuchungen umfangreicheres Beobachtungsmaterial erwarten. Insbesondere hätte die Erfassung der totalen Lotschwankung durch die Messung einer zweiten, nichtorthogonalen Komponente Interesse. Die situationsbedingten physischen Anforderungen an den Beobachter bei der Durchführung der Messungen können nicht vermieden werden.

Die günstigsten Bedingungen für Erdzeitenmessungen an innerkontinentalen antarktischen Stationen sind während des Polarwinters gegeben. In dieser Zeit ruht der Fahrverkehr. Ferner ist der periodische, insbesondere der tagesperiodische Anteil der Lufttemperatur- und Luftdruckschwankungen und damit die Möglichkeit der Verfälschung der Gezeiteneffekte gering.

L I T E R A T U R

1. AVER'JANOV, V.G.
Central'naja Antarktida
Leningrad 1963, 147 S.
2. BARTELS, J.
Gezeitenkräfte
Handb. d. Physik, Bd. XLVIII Geophysik, II, 1957, S. 734 - 774.
3. DUBRONIN, L. I., PETROV, V.N.,
Naučnye stancil v Antarktike
Leningrad 1967, 282 S., 13 Anlagen
4. LINDNER, KI., WIRTH, H.,
Bericht der DDR-Teilnehmergruppe an der 10.
Sowjetischen Antarktisexpedition Überwinterung 1965
Geod. Geopn. Veroff., R: III, H. 7, Berlin 1968, S. 31 - 66.

5. MELCHIOR, P.
The Earth Tides
Pergamon Press, 1966, 458 S.
6. SCHNEIDER, M.,
Eine Bemerkung zur Bestimmung der Eigenperiode von Horizontalpendeln
Studia Geoph. et Geod., Praha, 6 (1962), H. 1, S. 86 - 94
7. SIMON, D.,
Über den Einfluß von Luftdruckänderungen und Meereszeiten auf die Ergebnisse der harmonischen Analyse von Horizontalpendelaufzeichnungen.
Marées Terr. Bull. Inf., Bruxelles, 1966, H. 44, S. 1720 - 1746.
8. SLICHTER, L.B.
Summary of Field Research August - December 1967
Antarctic J. Unit. States, Washington, 3 (1968), H. 2, S. 45
9. SLICHTER, L.B., HAGER, C.L., TAMBURRO, M.B., O'CONNELL, R.V.
The Long-Period Earth Tide at South Pole
Antarctic J. Unit. States, Washington, 4 (1969), H. 5, S. 214
10. VENEDIKOV, A.P.,
Une méthode pour l'analyse des marées terrestres à partir d'enregistrements de longueur arbitraire
Acad. Roy. Belg. Bull. Cl. Sc., LIII, fasc. 3, Bruxelles 1966, S. 463 - 485.

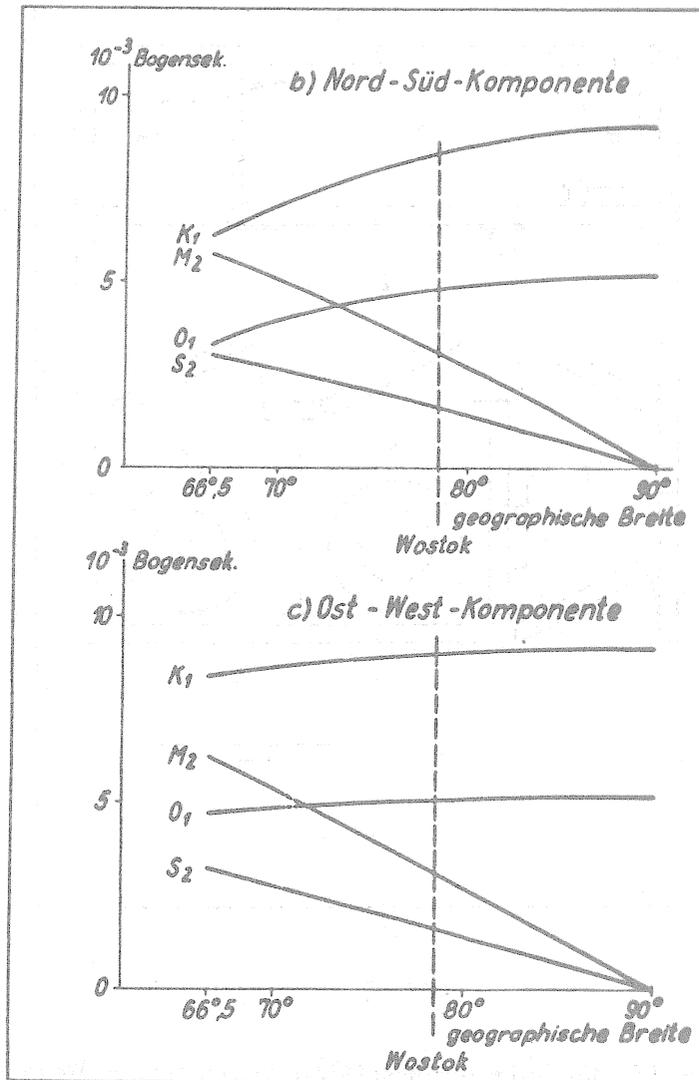
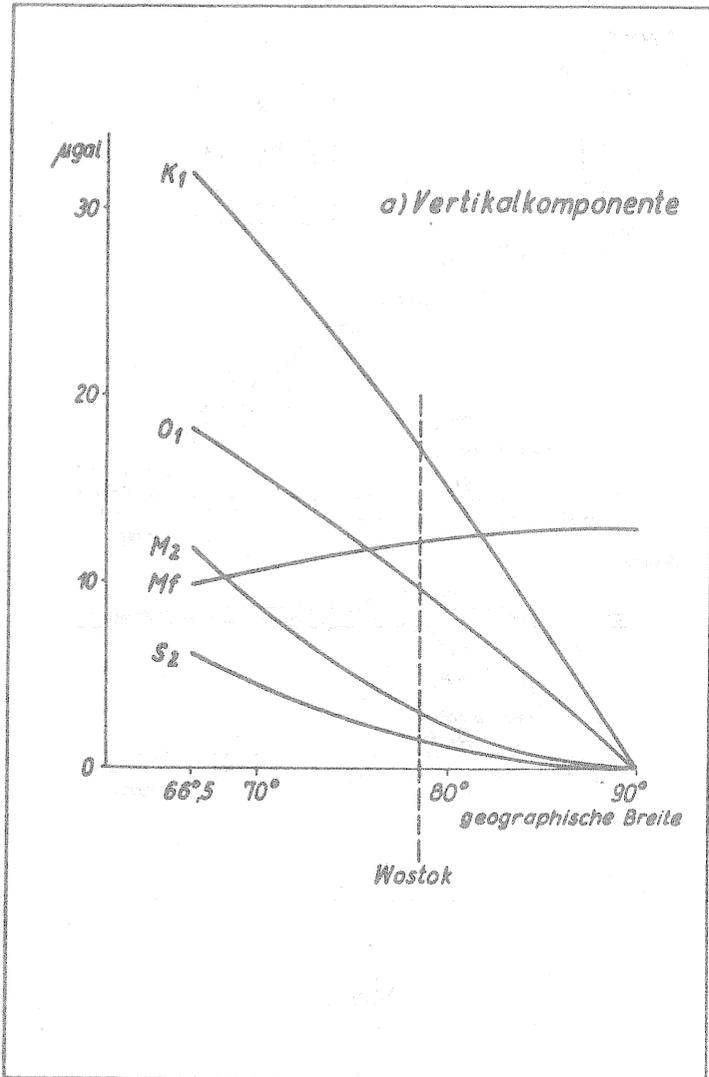


Abb. 1 Amplituden der wichtigsten Partialtiden der theoretischen Gezeitenbeschleunigung in hohen Breiten
 a) Vertikalkomponente
 b) Nord-Süd-Komponente
 c) Ost-West-Komponente

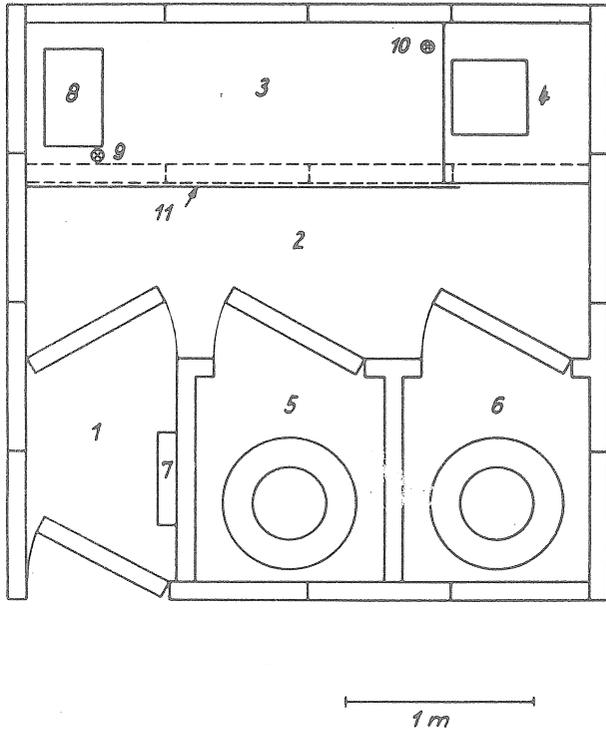


Abb. 2

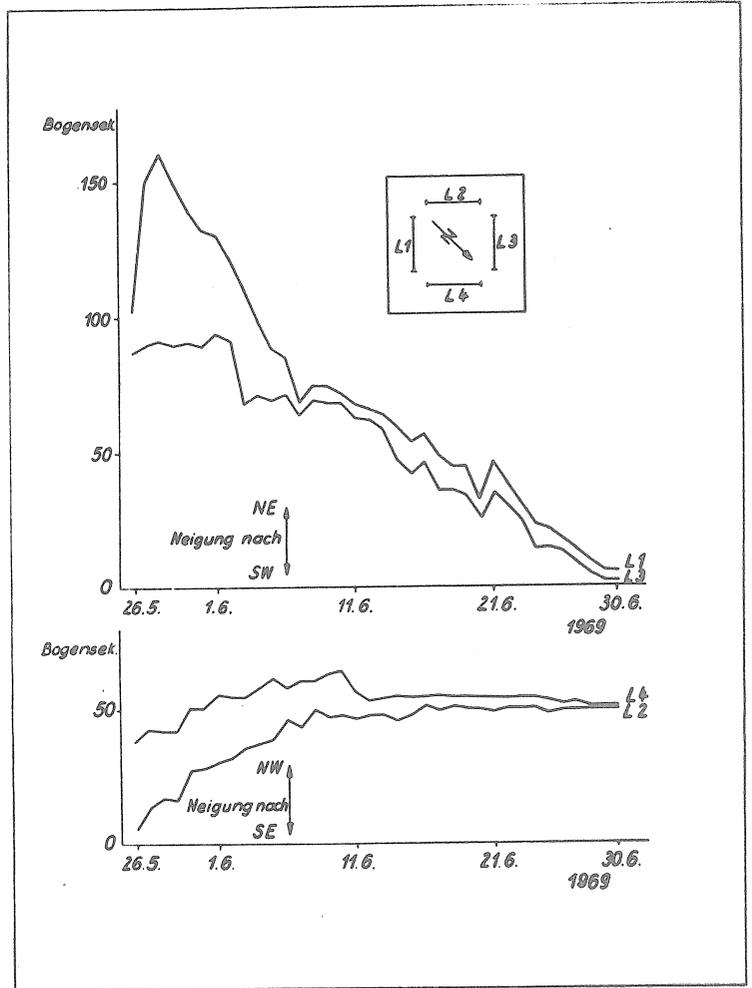


Abb. 3

- Grundriß der Erdzeitenmeßhütte an der Station Wostok
- Luftschleuse
- Bedienungsgang
- Registrierabteil
- Galvanometermeßplatz mit Metallgestell
- Meßraum 1 mit Gravimeter
- Meßraum 2 mit Gravimeter
- Akkumulatoren
- Zwei Registriergeräte übereinander auf einem Metallgestell
- Registrierbeleuchtung
- Zeitmarkenbeleuchtung
- Schwarzer Tuchverschlag

Aufstellungsschema der Flüssigkeitslibellen und Ergebnisse der ausgeführten Neigungsvoruntersuchungen

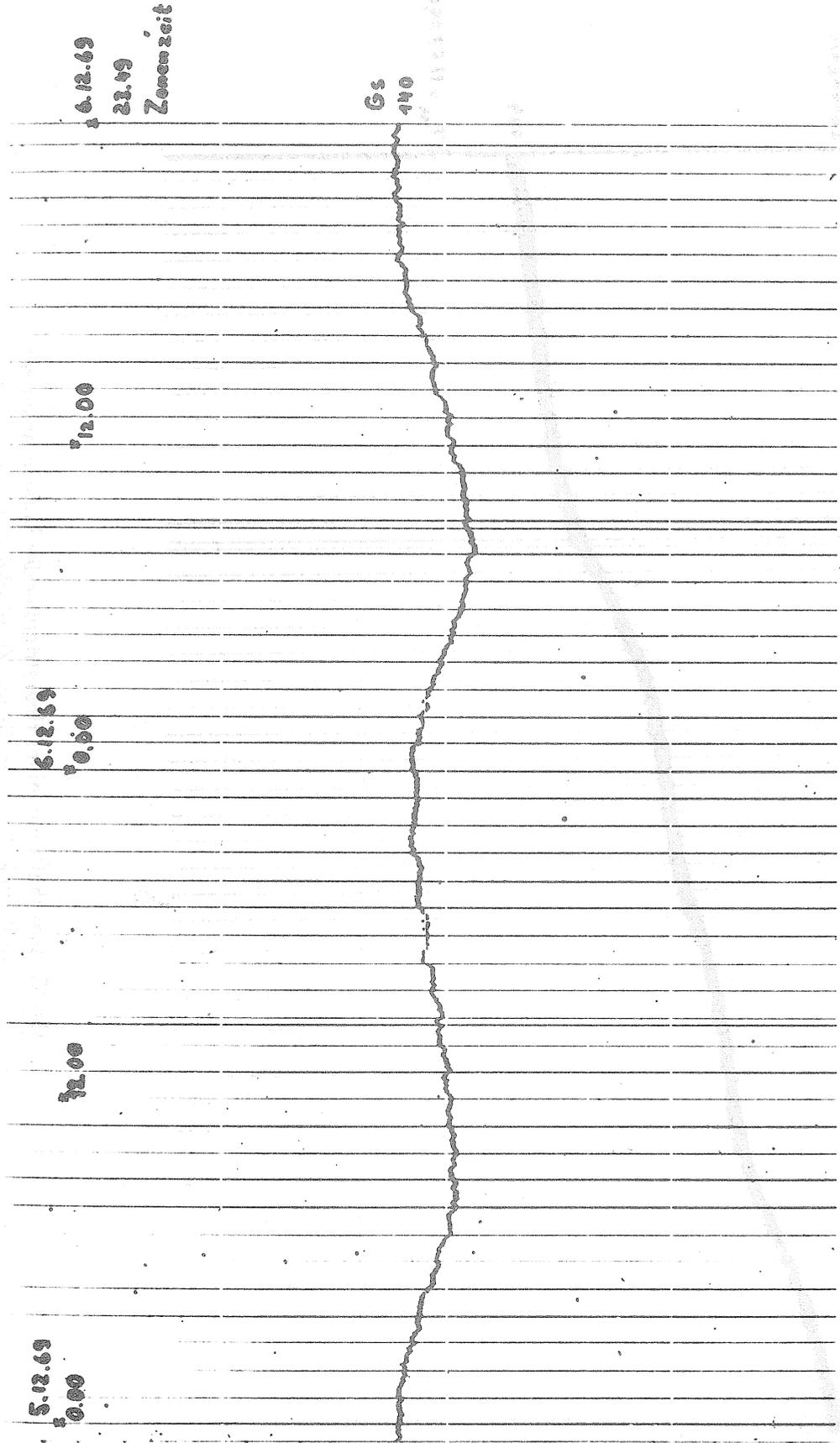


Abb. 4 Ausschnitt aus einer Registrierung der Schweregezeiten in Wostok. Die stündlichen Zeitmarken sind in 5 cm Abstand unterbrochen.

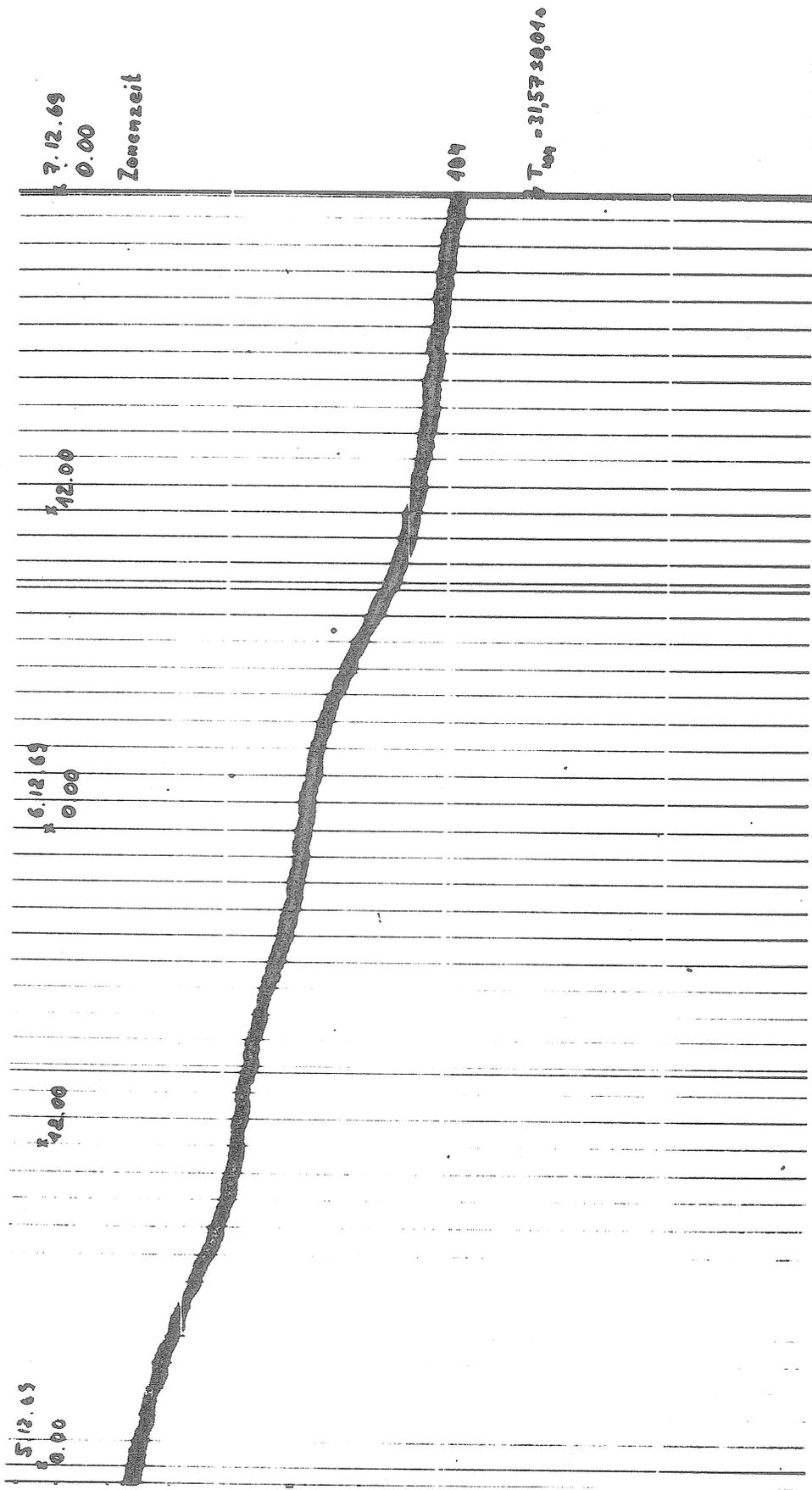


Abb. 5 Ausschnitt aus einer Registrierung der Lotschwankungen in Wostok. Die stündlichen Zeitmarken sind in 5 cm Abstand unterbrochen.

GEOPHYSICAL CLASSIFICATION OF EARTH TILT

M. CAPUTO - G.F. PANZA

Istituto di Fisica, Istituto di Geodesia - Bologna, ITALY.

INTRODUCTION

The observation of the Earth's crust tides is often affected by temperature and atmospheric pressure changes which are some time considerable.

The meteorological perturbations are transient phenomena and consequently are useful to give informations on the movements of certain parts of the Earth's crust which behave as rigid blocks.

In this paper we make a review of the research made in connection with these phenomena and we propose a research which should be made in collaboration by the tide stations of the world. This research should give a considerable contribution to a more detailed picture of the Earth's crust and Upper Mantle to complete that of global tectonic.

2. TILT OBSERVATIONS

Nishimura (1950) demonstrated the role of an active fault in the flexions of the upper crust. He, considering the movements of the active fault at Beppu ($\phi = 33^{\circ}16'$, $\lambda = 131^{\circ}30'$, Kiou Siou) and concluded that the fault acts as a boundary of an elastic plate to such an extent that certain points close to both the fault and the sea bend towards the fault rather than in the direction of the bay.

Kikkawa (1955-1956) on the contrary attributes the behaviour of the upper crust to compressive effect of the bed of water immediately below this region under the effect of oceanic tides. This statement is quite important, in fact experiences in Japan and Belgium showed that pumping from underground affects in the same way measurements with horizontal pendulums (Melchior, 1966).

In 1960 Decae published the results of measurements of ground movements in Geneva performed before the installation of 25 GeV photosynchrotron at CERN. He showed that the surface layers were subjected to periodical contractions and expansions (amplitude : 0,5 mm/500 m., period : half a lunar month) and vertical movements (amplitude : 7 mm./4Km., period : half a lunar month). The last movement was attributed to the influence of Atlantic sea, taking into account also the fact that the deformations are in the direction NE-SW.

Pariisky (1964), from an analysis of M_2 wave, suggested that tidal tilts depend more upon shallow and small scale heterogeneities than on heterogeneities of the mantle.

A big contribution in the analysis and interpretation of such kind of movements was given by Tomaschek. In 1953 he, analysing the records of two horizontal pendulums working in the Salt Mine at Winsford, Cheshire (143 m. deep), enunciated the theory of independent rigid blocks present in the Earth's crust, which tilt around an axis when there are variations in the meteorological pressure.

In 1955 the same author emphasized the correlations between tilt movements and the great Formosa earthquake of October 21, 1951. In fact in Japan were observed particular tilts 20 hr. before the earthquake, and at Winsford 5 hr. after the first arrival of the earthquake. To explain such and other analogous observations, the author suggested that, initiated by the Formosa earthquake, a large world wide readjustment of the Earth's crust must have taken place which was fairly rapid and strong in Japan and slower and later in Europe.

In 1961 Tomaschek and Groten made an analysis of the tilt measurements in several European and Russian stations calculating the so called residual ellipses, which are strongly connected with the direction of "rotation axis" (the "rotation axis" can be identified with the direction of the semi-minor axis of the ellipse). The two authors observed a good correlation between the residual tilting and some tectonic structure, besides the negative correlation between the major axis of residual ellipses and the distance from the sea.

In the same year Zadro, from the data of two horizontal pendulums of Trieste (Grotta Gigante), observed that the Earth's crust under various changes of pressure bends only in the direction perpendicular in the dynamic axis. The direction of such axis is also independent from the frequency of oscillation.

More recently Bossolasco et al. (1969) processing the data of three tide-stations (Genova, Toirano, Roburent) obtained the residual ellipses in the same way as obtained by Tomaschek and Groten (1961) and concluded that the "rotation axis" in the three stations has the same direction of the Apennines ridge of the Maritime Alps. The azimuths of semi-major axis are : Genova : $\theta = 2^\circ.2$, Toirano : $\theta = 124^\circ.3$, Roburent : $\theta = 123^\circ.1$.

This shows that Genova lies on a block different from the block of Toirano and Roburent. The authors suggest also the boundaries of the two blocks from seismic considerations. It seems to us very useful, for a better knowledge of these boundaries, to analyse the gravimetric measurements taking into account all exposed evidences.

We want also to quote a recent paper by Harrison (1969) which describes the results from measurements made with tiltmeter in the Poorman Mine. The records obtained from January 18, 1968, to May 8, 1969 show smooth tidal oscillations superposed on a background of long-period secular tilt which, except after exceptionally heavy rains, amounts to a very small fraction of the tidal amplitude in one day. Steps have occurred in the record usually connected with the disturbance of surface waves from earthquakes or nuclear explosions, but occasionally these steps were spontaneous.

Ratios of "amplitude of measured tilt to amplitude of computed tilt" and "phase of measured tilt phase of computed tilt" for O_1 ($T = 25.8$ h), P_1K_1 ($T = 24$ h), M_2 ($T = 12.4$ h), P_2K_2 ($T = 12$ h) were computed using a programme similar to that of Longman (1959).

In such a way Harrison pointed out the non elastic behaviour of the Earth observing a systematic difference between the tilt factors for the diurnal and semi-diurnal tides and the large phase lead at the M_2 frequency on the SE-NW component. He attributes this non elastic behaviour to the rock fractures which influence the response of the crust to tidal tilts.

A calculation of residual ellipses shows two important characteristics

- a) the direction of "rotation axis" is coincident with the direction of Maxwell fault ;
- b) the non elastic response of the Earth's crust appears to vary with time.

3. A REMARK ON THE TILTS OF THE NORTH ADRIATIC REGION.

The results of Tomashek and Zadro are very useful for the interpretation of tide gauge data of the Adriatic sea. In fact the vertical displacements on the coast of this sea can be analysed taking into account the presence of these "rotation axis". The vertical displacements observed in this region, are probably connected with the relative movements of African and Euroasiatic blocks, as we indicate in a previous paper (Caputo et al. 1970) and could be separated into the components along the two axis. A further evidence of this motion is given by the seismic activity in the dynamic region (Karnik, 1967). In this frame it would be useful to install other pendulums near Trieste and Berchtesgaden in order to determine more exactly the direction of the "rotation axis" and boundaries of the plates. An accurate location of "rotation axis" could be given by using gravimeters. In fact it will be possible to measure the vertical displacements in different places with these instruments and so we can obtain the null motion axis (rotation axis). Besides, from an analysis of tide gauge data, taking into account the "rotation axis", it would be possible to obtain the rate of vertical displacements on large time scale and for large regions and to foresee the further movements. The results so obtained could obviously be integrated with the data obtained by precision levelling.

4. THE SUGGESTION.

As mentioned before a world wide investigation of these phenomena could give a big contribution to the knowledge of the distribution of the tectonic plates and movements of the Earth's crust.

In fact by using first the existing records of the stations with horizontal pendulums, gravimetric stations and studying the correlation with transient barometric and coastal water pressure it should be possible to indicate some of the limits or the rotation axis of the blocks of the Earth's crust. In a subsequent time these Earth tide and gravimetric stations could be moved in locations more efficient for the study of these phenomena, and for obtaining a more accurate picture of the tectonic structure.

REFERENCES

BOSSOLASCO, M., PANEVA, A., CICONI, G. and EVA, C.

L'influenza delle maree oceaniche sulle maree terrestri nelle stazioni clinografiche di Genova, Roburent e Toirano.

Geofisica e Meteor. XVIII, 5-6, 117-134, 1969.

CAPUTO, M., PANZA, G.F., and POSTPISCHL, D.

Deep Structure of the Mediterranean Basin and Global Tectonic.

In press.

DECAE, A.

On some Movements of the Ground in Geneva.

Geophys. J.R.A.S., 3, 112-120, 1960.

HARRISON, C.

A Preliminary Report on Tilt and Gravity-Tide Measurements in the Poorman Mine near Boulder, Colorado.

ESSA Res. Lab. Tech. Mem. ERLTM-ESL 8, 1969.

KARNIK, V.

Crustal and Upper Mantle Seismic Activity in the European Area.

Stud. Geoph. et Geod. 11, 324-334, 1967.

KIKKAWA, K.

The Relation between the Cyclic Change in Ground Water Pressure and the Tilting Motion of the Ground.

The Japanese J. of Limnology, 17, 91-99, 1955.

KIKKAWA, K.

Hydrological Research in Ama-gun Aichi Prefecture II.

The relation between the sea water and the artesian ground water.

The Japanese J. of Limnology, 18, 67-78, 1956.

LE PICHON, X.

Sea Floor Spreading and Continental Drift.

J.G.R., 73, 3661-3697, 1968.

LONGMAN, I.M.

Formulas for Computing the Tidal Accelerations due to the Moon and the Sun.

J.G.R., 64, 2351, 1959.

NISHIMURA, E.

On Earth Tides.

Trans. Amer. Geoph. Union, 31, 357-376, 1950.

PARIISKY, N.N.

The Regional Heterogeneity of the Mantle as Revealed by Earth-Tide Observations.

SALVIONI, G.

I movimenti del suolo nell'Italia Centro Settentrionale.

Boll. Geod. e Sc. Affini, XVI, 325-366, 1957.

TOMASCHEK, R. and GROTEN, E.

The Problems of the Residual Ellipses of Tilt Measurements.

Quatrième Symp. Int. Marées Terr., Bruxelles, 1961.

Comm. Obs. Roy. Belg., 188, 78-92, 1961.

TOMASCHEK, R.

Non Elastic Tilt of the Earth's Crust due to Meteorological Pressure Distributions.

Geofis. Pura ed Applicata, 27, 17-25, 1953.

TOMASCHEK, R.

Earth Tilts in the British Isles Connected with Far Distant Earthquakes.

Nature, 176, 24-25, 1955.

ZADRO, M.

L'activité de la station de Trieste (Grotta Gigante) pendant la période de Juin à Mars 1961.

Quatrième Symp. Int. Marées Terr. Bruxelles 1961.

Comm. Obs. Roy. Belg., 188 ; 165-168, 1961.

ZADRO, M.

On the Frequency Dependence of the Loading Effects due to Ocean Tides and Seiches.

Cinquième Symposium Int. Marées Terr., Bruxelles, 1964.

Comm. Obs. Roy. Belg., 236, 372-380, 1964.

AUFBAU EINER NEUEN ERDGEZEITENSTATION IM SALZBERGWERK TIEFENORT

von D. Simon^{*}

Zusammenfassung.

Es wird eine neue klinometrische Station beschrieben, auf der die Neigungsmesser zur Vermeidung von barometrischen und thermischen Geräteeffekten in hermetisch abschließenden Meßkammern registrieren. Die Bedienung der Pendel erfolgt von außen. Mit dieser Maßnahme soll die Reproduzierbarkeit der Erdgezeitenresultate verbessert werden.

In einer Steinsalzstrecke der Grube Tiefenort unmittelbar neben der alten, inzwischen stillgelegten Erdgezeitenstation des Institutes für theoretische Physik und Geophysik der Bergakademie Freiberg (Abb. 1) - errichtet gegenwärtig das Zentralinstitut für Physik der Erde der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin eine neue geophysikalische Untertagestation. Ihre geographischen Koordinaten sind $\phi = 50^{\circ}49,2' N$; $\lambda = 10^{\circ}10,0' E$. Die Gesteinsüberdeckung beträgt 295 m. Auf dieser Station installiert man zur Zeit eine größere Zahl von Neigungsmessern unterschiedlicher Bauart zur Durchführung von Parallelregistrierungen. Es werden Untersuchungen zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Erdgezeitenresultate und zur Überprüfung der Repräsentativität der an einem Orte erhaltenen Beobachtungswerte für Gebiete verschiedener Größe angestellt. Bei der Errichtung der neuen Station berücksichtigte man eine Reihe von Erfahrungen, die in früheren Jahren an Ort und Stelle gewonnen wurden [1, 2]. Für die o.g. Untersuchungen wurde die Grube Tiefenort wegen ihrer besonders günstigen Beobachtungsbedingungen als Beobachtungsort ausgewählt. Langjährige Erdgezeitenregistrierungen an dieser Stelle hatten erbracht, daß hier Untergrunddeformationen infolge von Grundwasserpegelschwankungen, Niederschlagsbelastungen und wechselnden Gesteinstemperaturen wegen der großen Tiefe der Meßkammer fehlen [3]. Die Größe des Meßraumes - er ist 160 m lang, 22 m breit und 2,5 m hoch - erlaubt die Aufstellung beliebig vieler Klinometer. Darüberhinaus ist es möglich, zur Untersuchung der Repräsentativität der an ein und demselben Meßpunkte gewonnenen Beobachtungswerte für Gebiete verschiedener Größe Satellitenstationen in beliebiger Entfernung von der Basisstation unter gleich guten Beobachtungsbedingungen zu errichten. Die Nähe der alten Erdgezeitenstation der Bergakademie Freiberg, auf der seit 1958 fast ununterbrochen registriert wurde, ermöglicht einen Vergleich der neuen Beobachtungsergebnisse mit den Ergebnissen der früheren langjährigen Registrierungen.

^{*} Dr. rer. nat. Dietrich Simon, Zentralinstitut Physik der Erde der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 15 Potsdam, Telegraphenberg.

Der erste Schritt zur Verbesserung der Beobachtungsgenauigkeit ist die Anschaltung der barometrischen und thermischen Geräteeffekte. Derartige Störungen der Neigungsregistrierungen wurden bisher auf mehreren Erdzeitenstationen bemerkt [4,5]. Sie führen zu beträchtlichen Fehlern in den Beobachtungsergebnissen und erschweren dadurch ihre Interpretation. Aus diesem Grunde werden zum erstenmale in der Erdzeitenforschung die Neigungsmesser auf der neuen Untertagestation in hermetisch abgeschlossenen Meßkammern aufgestellt. Die Entwicklung und Erprobung dieser wärme- und luftdruckgeschützten Stahlkammern einschließlich der Einrichtungen zur Bedienung der Neigungsmesser von außen wurde im November 1969 erfolgreich abgeschlossen. Sie sollen im folgenden beschrieben werden :

Die Möglichkeit von Glaubersalzausblühungen in der Sohle wegen der Nähe des Kalilagers im Liegenden machte es erforderlich, die Druckbehälter in Nischen einige Zentimeter über der Streckensohle aufzustellen. Diese Nischen durften nicht wie üblich aus dem Stoß herausgeschossen oder mit dem Preßlufthammer hergestellt werden. Zur Vermeidung von Haarrissen wurden sie mit Großlochbohrern bzw. Fräsen in das anstehende Steinsalz gebohrt.

Abb. 2 :

In der auf diese Weise hergestellten Nische steht die stählerne Druckkammer auf drei Fußklötzen aus Messing, die oben eine kugelige Oberfläche haben. Die Auflageflächen der Fußklötze wurden vorher mit einer Gesteinsschleifmaschine plangeschliffen. Der Raum zwischen Stahlkammer und Nischenwandung ist mit einem wärmedämmenden Material (Isolierwatte) gefüllt ; die doppelwandige Verschußplatte der Nische aus Pertinax- und Hartfaserplatten enthält ebenfalls eine Wattefüllung.

Auf den Abbildungen 3 und 4 sind die verschlossene Nische und die geöffnete Druckkammer mit dem Horizontalpendel und dem Barometer zu erkennen. Wegen der Kleinheit der im Innern der Stahlkammer zu messenden Neigungsänderungen mußte die Grundplatte so dick bemessen werden, daß sie sich nicht merklich mehr unter dem Einfluß der Luftdruckschwankungen deformiert. Sie ist deshalb 100 mm dick, während die Wände der Kammer nur 10 mm stark sind. Im Innern des Druckkastens wurde die Grundplatte zusätzlich mit einer 10 mm tiefen Nut versehen (Abb. 2), mit der man die Übertragung von Oberflächenspannungen verhindern will. Zur Vermeidung von störenden Nullpunktgängen wurden die Stahlkästen nach dem Schweißen spannungsfrei gegläht. Druckdichte Durchführungen durch die Verschußplatte der Stahlkammer erlauben die Bedienung des Klinometers von außen (Nachstellung der Fußschraube, Erzeugung von Schwingungen zur Eichung). Wie üblich wurden hierbei die drehbaren Achsen durch zwei Simmeringe abgedichtet, zwischen denen sich eine Ölschicht befindet. Die Drehbewegungen werden mit einem abnehmbaren Handrad ausgeführt. Obwohl sich diese Durchführungen bei mehrtägigen Erprobungen als dicht erwiesen haben, verschließt man zur zusätzlichen Sicherung außerhalb

der Bedienungszeiten die Durchführungen mit einer Metallscheibe, die durch einen Bügel gegen einen Dichtungsring gepreßt wird (Abb. 2). Man hat die Bedienungseinrichtungen so konstruiert, daß nur während der Bedienungszeit eine feste Verbindung mit dem Pendel besteht. Um die Zahl der Durchführungen durch die Verschußplatte und damit die Zahl der möglichen Leckstellen der Druckkammer möglichst klein zu halten, wurde beim ersten Versuchsmuster nur die Bedienungsvorrichtung für eine Fußschraube eingebaut. Nachdem nun die Erprobung gezeigt hat, daß die Durchführungen hinsichtlich ihrer Abdichtung allen Anforderungen genügen, wird auch die zweite Fußschraube eine Bedienungsmöglichkeit erhalten. Damit kann die Neueinstellung des Klinometers wesentlich erleichtert werden.

Es wird photographisch durch ein dickwandiges Glasfenster registriert. Änderungen der Innentemperatur mißt man mit Thermistoren (Empfindlichkeit $3 \cdot 10^{-4}$ °C/mm Registrierbreite), während der Barometerstand im Innern der Meßkammer durch ein Glasfenster hindurch an einem handelsüblichen Barometer abgelesen werden kann. Für diese Zwecke erhalten die nächsten Druckkammern im Gegensatz zum ersten Versuchsmodell noch ein zweites Glasfenster. Da an jedem Sonntag durch die Abschaltung des etwa 3 km entfernten Hauptgrubenlüfters im Stationsbereich eine Druckänderung von 4 - 5mbar entsteht und dadurch eine adiabatische Temperaturänderung von 0,2 °C erzeugt wird, kann die Druck- und Temperaturkonstanz im Innern der Meßkammer fortlaufend kontrolliert werden. Die Hauptdichtung der Stahlkammer besitz aus 2 übereinandergelegten Dichtungsscheiben, die man aus Platten von weichem Gummi (Stärke : 8 mm ; Weichheitsgrad : 50 Shore) herausgeschnitten hat. Sie wird durch eine große Zahl von kräftigen Schrauben auf etwa 10 mm zusammengepreßt.

Abb. 5 zeigt ein Registrierbeispiel aus der Druckkammer, das mit einem Tomaschek-Ellenbergerpendel bei konstantem Innendruck gewonnen wurde. Während der erste Teil der Registrierung aus der nur etwa 30 Tage alten Nische demonstriert, daß der Nullpunktgang des Klinometers schon einen Monat nach dem Bohren weitgehend abgeklungen ist, zeigt der zweite Teil der Registrierung die Wirkung einer Untergrunddeformation, welche durch das Bohren einer weiteren Nische in 4 m Abstand von der ersten am 21.2.1970 in der Zeit von 7^o-12^o GMT verursacht wurde. Das Horizontalpendel bewegte sich nach der der Nische entgegengesetzten Richtung, was wohl einem Quellen der Sohle auf der der neuen Nische zugewandten Seite entsprechen könnte. Während der ganzen Zeit vom 21. bis 23.2 wurde die Druckkammer bzw. das Horizontalpendel nicht berührt, um keine zusätzlichen Störungen des Nullpunktganges zu verursachen. Ein Abwandern der Lichtmarke in der gleichen Richtung um etwa 6 cm (etwa 1/3 der Breite des Registrierstreifens) während der Zeit des Bohrens, als nicht registriert werden konnte, wurde durch eine Verschiebung der Registrierlampe ausgeglichen.

Das schnelle Abklingen des Nullpunktganges des Horizontalpendels beweist übrigens auch den guten Erfolg des Spannungsfreigühlens der Druckkammer. Damit wird die weitere Benutzung der Natursteingrundplatte unnötig, die in Abb. 4 noch zu sehen ist. Die Steinplatte lag auf einer dünnen Sandschicht im Innern der Druckkammer und hatte die Aufgabe, mögliche Deformationen der stählernen Grundplatte der Kammer zu integrieren und auszugleichen.

Zur Azimutbestimmung wurden auf einer übertägigen markscheiderischen Basislinie Sterndurchgangsbeobachtungen durchgeführt und die erhaltenen Werte mittels eines Kreiseltheodoliten auf das Stationsnetz übertragen. Die von Mitarbeitern des Institutes für Markscheidekunde der Bergakademie Freiberg ausgeführten Messungen ergaben im Bereich der Erdzeitenstation Tiefenort Totalabweichungen der neuen Azimutwerte von den Richtungsangaben des markscheiderischen Festpunktnetzes von weniger als 1° . Damit wurden nachträglich auch die nur auf markscheiderischen Angaben beruhenden Azimutwerte der benachbarten alten Erdzeitenstation bestätigt.

Mit der Aufstellung der Pendel in hermetisch abschließenden Meßkammern wurden die Voraussetzungen für genauere Untersuchungen der luftdruckbedingten Bodenbewegungen sowie weiterer Effekte, wie z. B. der freien Schwingungen der Erde [6,7], geschaffen. Darüberhinaus ist eine bessere Erfassung der anderen Instrumentenfehler möglich, so z.B. derjenigen, die die Eichungenauigkeiten verursachen und sonst von den obengenannten Geräteeffekten überdeckt werden.

L I T E R A T U R

1. W. BUCHHEIM, W. PALLAS, und M. SCHNEIDER :
Ausführlicher Abschlußbericht zum Forschungsauftrag "Krustenfeinbewegungen" 1956-1961.
unveröffentl. Forschungsbericht beim Institut für theoretische Physik und Geophysik der Bergakademie Freiberg (1961) 60 Seiten ;
2. D. SIMON :
Beiträge zur Korrektur von klinometrischen und gravimetrischen Gezeitenregistrierungen,
Geod. und Geophys. Veröff. des NKG der DDR bei der Deutschen Akademie der Wiss. zu Berlin, Reihe III, Heft 13 (1969) ;
3. D. SIMON :
Methoden der Störpegelanalyse und ihre Bedeutung für die Erdzeitenforschung,
Vortrag auf dem Erdzeiteinsymposium der KAPG in Leningrad 1968, herausgeg. v. Sowjetischen Geophys. Komitee (1969), S. 95 - 131 ;

4. L. SKALSKY, J. PICHA :

Einige Probleme der Gezeitenbeobachtungen und ihre Genauigkeit,

Vortrag auf dem Erdgezeitensymposium der KAPG in Leningrad 1968, herausgeg. v. Sowjetischen Geophys. Komitee (1969), S. 11-35 ;

5. D. SIMON :

Über den Einfluß von Luftdruckänderungen und Meeresgezeiten auf die Ergebnisse der harmonischen Analyse von Horizontalpendelaufzeichnungen.

Marées terr. Bull. Inf. Bruxelles (1966) 44, P. 1720 - 1746.

6 H. WIRTH, W. BUCHHEIM, und M. SCHNEIDER :

Zur Anregung von Eigenschwingungen des Erdkörpers durch das Erdbeben in Alaska am 28.3. 1964.

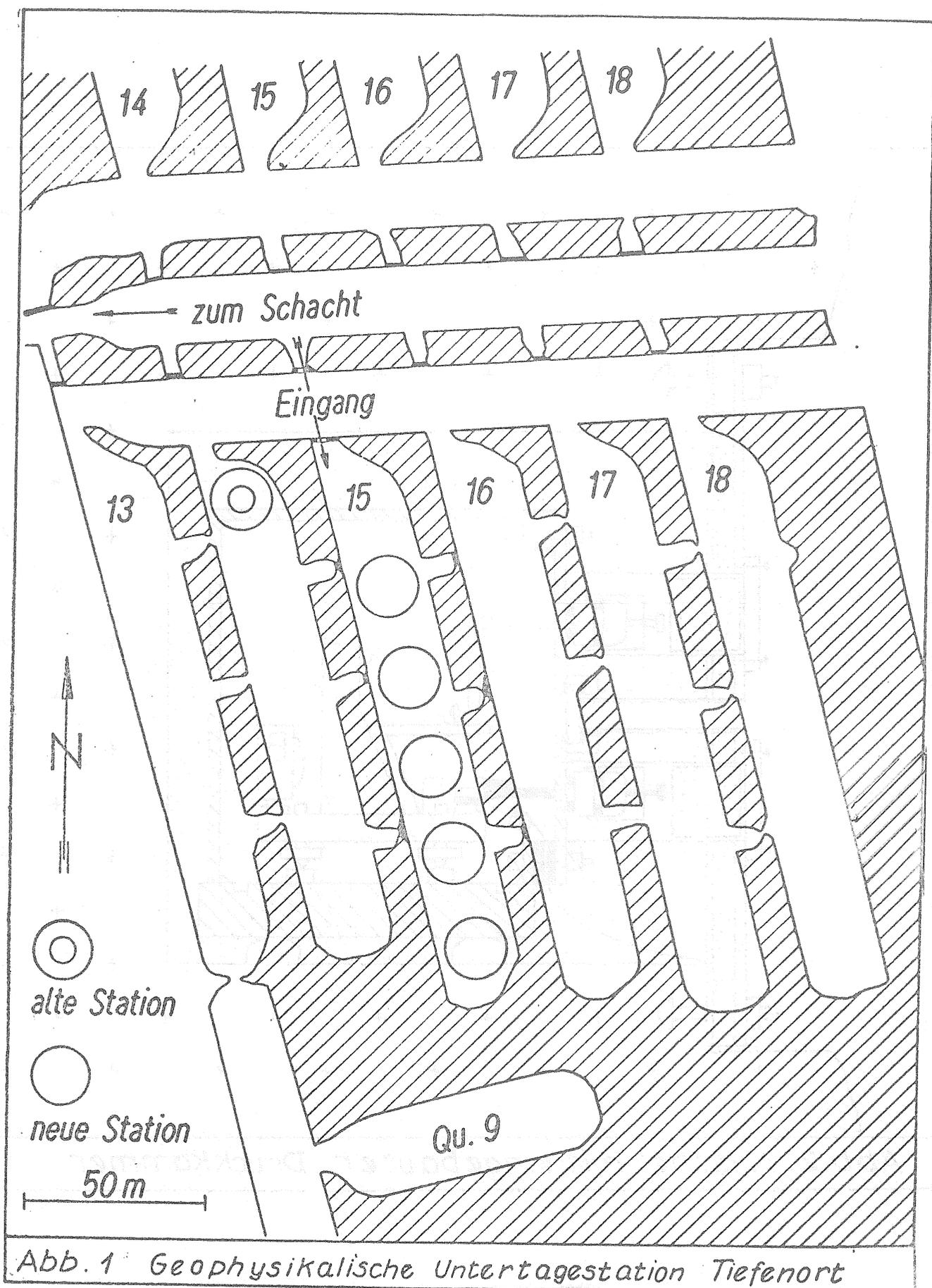
Gerl. Beitr. z. Geophys. 74 Heft 5 (1965) 408-412 Leipzig.

7: T. TANAKA :

On the Effect of Atmospheric Pressure upon Ground Tilt.

Bull. of the Disaster Prevention Research Inst., Kyoto University, Vol. 18 (1968) Part. 2, No 136, 23-36.

Veröffentlichung des ZIPE Nr. 60.



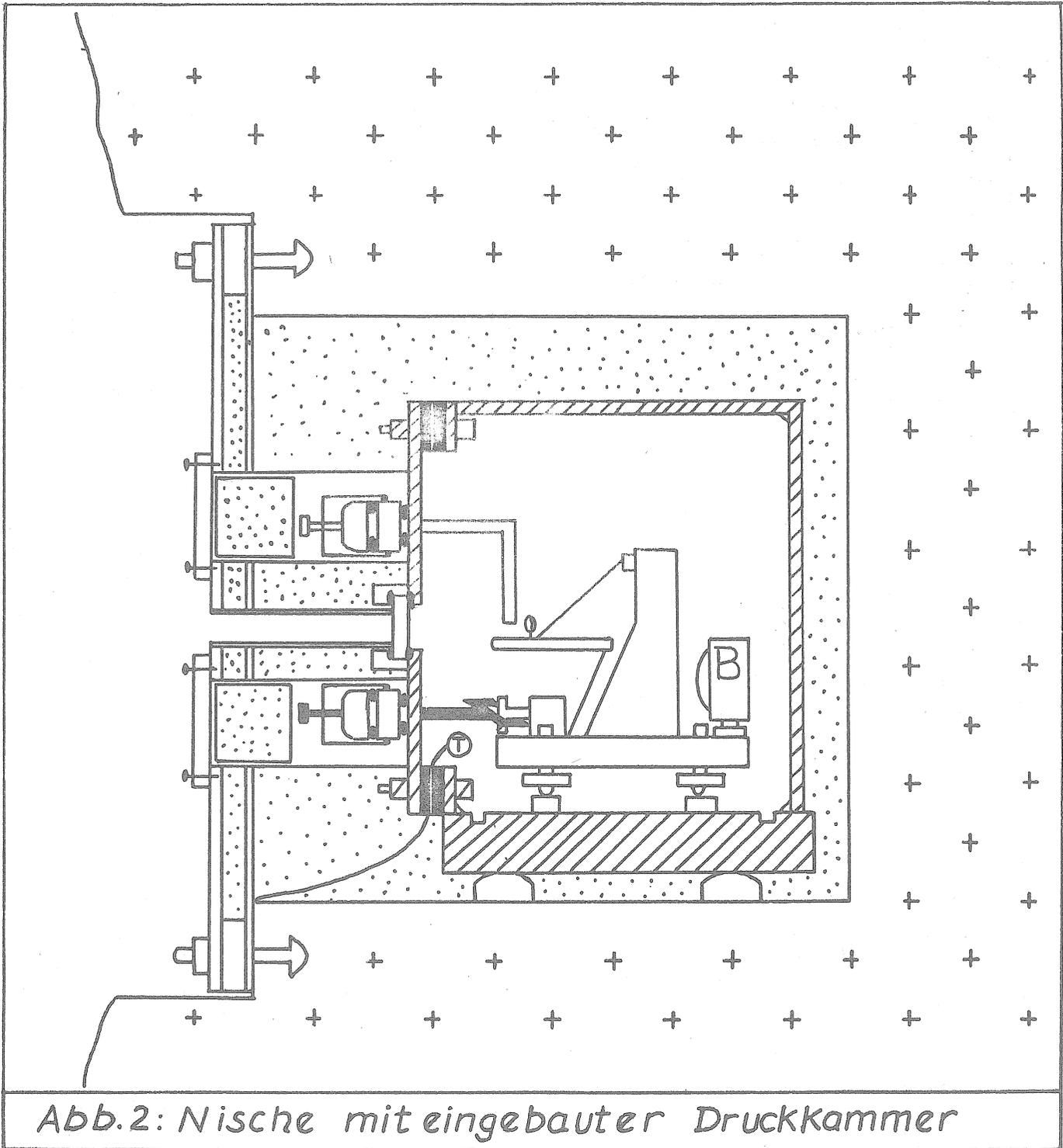
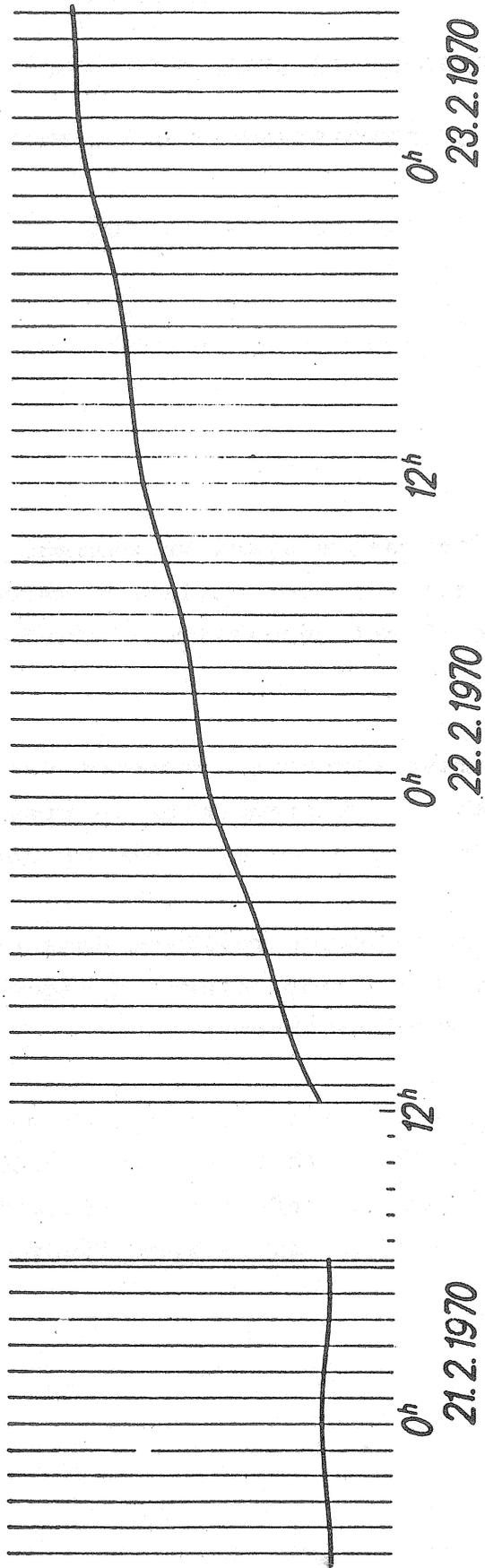


Abb.2: Nische mit eingebauter Druckkammer



Station Tiefenort Pendel TE 4 (NS) $T \approx 30s$

THERMOSTAT DE PRECISION
AU MILLIEME DE DEGRE CENTIGRADE
POUR GRAVIMETRE D'ENREGISTREMENT DE LA MAREE TERRESTRE
(C. QUEILLE - G. CLERC)

RESUME

La marée terrestre ayant au maximum une amplitude de 300 microgals, pour comparer utilement marée théorique et marée expérimentale il est nécessaire d'atteindre une précision du microgal.

Nous y sommes parvenus largement mais il a été absolument indispensable de thermostatier le gravimètre avec une extrême précision de l'ordre du millième de degré.

La cuve thermostatée réalisée dans ce but est décrite et la régulation de température expliquée en faisant appel aux analogies électro-thermiques.

La stabilité (au sens de Nyquist) de cette réalisation, délicate à obtenir vu la très grande précision exigée, fait l'objet d'une étude approfondie, la fonction de transfert des différentes parties du montage étant étudiée en détail.

Les variations résiduelles de la température à court terme (jusqu'à 24h) restent inférieures au millième de degré centigrade au niveau du détecteur de température : les plus rapides sont sûrement moindres au niveau du gravimètre. Les variations à long terme (de l'ordre du mois) ne semblent pas dépasser quelque trois millièmes de degré, mais pourraient certainement être réduites par une meilleure protection contre les différences de potentiel de contact parasites, variables avec la température ambiante. Quoi qu'il en soit, le thermostat fonctionne ainsi de façon quasi permanente depuis 1964 et permet d'obtenir des enregistrements satisfaisants dont la dérive est extrêmement réduite.

Les résultats d'analyse ont montré que le but poursuivi était pleinement atteint puisque la comparaison des variations observées de g et des variations calculées peut se faire au 1/10 de micro gal (10^{-7} gal).

I - INTRODUCTION

L'étude comparée de la marée terrestre expérimentale, et de la marée terrestre théorique calculée pour une terre rigide, avec une précision de l'ordre 10^{-7} gal, exige que le gravimètre utilisé soit soustrait aux variations de la température ambiante.

Il est pratiquement impossible par construction de rendre un gravimètre totalement insensible aux variations de température sinon par thermostatisation.

C'est ainsi que nous disposions d'un gravimètre Askania, de type Graf II, équipé d'une régulation de température par plus ou moins au 1/100 °C. Le thermomètre à contacts, détecteur de la température, permettait de choisir entre quatre valeurs de consigne.

Dès 1953, B. Stanudin avait montré [1]

- d'une part, que cette régulation était trop grossière pour permettre l'enregistrement des marées terrestres avec une sensibilité convenable, la courbe étant dentelée au rythme de l'ouverture et de la fermeture du circuit de chauffage ;

- d'autre part, que l'amplitude des dentelures dépendait de la température de consigne choisie.

En conséquence, le thermostat d'origine a été complètement abandonné et un nouveau thermostat a été conçu permettant :

- d'une part une régulation continue et progressive de la puissance de chauffage en fonction de l'écart de température constaté.

- d'autre part un choix précis de la température de consigne dans la gamme où se trouvaient réparties les quatre valeurs correspondant aux contacts du thermomètre primitif.

Ce projet a fait l'objet de communications aux Congrès de l'AFAS de 1956 [2] et de 1959 [3] .

II - PRINCIPE DE LA SOLUTION RETENUE

Il est illustré par le schéma de la figure 1. La température dans l'enceinte du gravimètre est comparée à la température de consigne par un pont de Wheatstone dont deux résistances M_1 et M_2 sont en manganin et les deux autres N_1 et N_2 en nickel. Les premières ont un coefficient de température très faible ($\approx 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$) vis à vis de celui des secondes ($6. 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$). L'exigence du choix précis de la température de consigne est satisfaite par la prévision de nombreuses prises sur une fraction de M_1 .

La tension de déséquilibre du pont est appliquée à un préamplificateur galvanométrique comportant un galvanomètre à miroir G et une cellule photoélectrique différentielle Cph montée dans un pont de Wheatstone. Ce deuxième pont, alimenté en courant alternatif, à la fréquence du secteur, sert en même temps de modulateur.

L'intérêt d'un tel préamplificateur est d'avoir un gain important et un seuil de sensibilité extrêmement bas. Par contre il exige une bonne protection du câblage au pont thermosensible contre les ddp. d'origine thermique puisque ce pont est alimenté en courant continu.

Un amplificateur de puissance permet au signal d'actionner le moteur diphasé M en contrôlant l'amplitude et la phase ($\pm 90^\circ$ par rapport à la phase fixe) du courant dans son enroulement de commande en fonction de la valeur et du sens de l'écart de température détecté par le premier pont.

Ce moteur entraîne par l'intermédiaire d'un réducteur le curseur d'un alternostat qui fournit à la résistance R_{ch} la puissance de chauffage nécessaire au maintien de la température de consigne.

La présence d'un moteur dans la chaîne de réglage est un élément important de la précision obtenue : en effet, il ne s'arrête que quand le signal d'entrée est nul, c'est-à-dire lorsque la température atteinte est effectivement égale à celle de consigne, même si la tension d'alimentation du pont thermométrique, le gain des amplificateurs ou la température ambiante fluctuent. Dans le cas où la résistance chauffante serait alimentée directement par la sortie de l'amplificateur de puissance, il faudrait au contraire qu'il subsistât une légère tension d'erreur aux bornes du pont thermométrique pour entretenir le chauffage : cette tension correspondrait à un écart de température variable avec les fluctuations éventuelles de la tension d'alimentation du pont, du gain des amplificateurs ou de la température ambiante.

C'est une application du principe de l'annulation de l'erreur statique par l'introduction d'un élément intégrateur (le moteur) dans l'asservissement.

L'examen des performances montrera que c'est valable pratiquement, malgré le seuil de démarrage du moteur.

III - REALISATION PRATIQUE

1/ La cuve thermostatée

Le dessin de la figure 2 et sa légende sont très explicites. Quelques cotes précisent les dimensions de l'ensemble. On voit que le gravimètre 1 est entouré de 3 enceintes ; de l'intérieur vers l'extérieur :

- 2 enceintes en cuivre rouge d'épaisseur 1 mm (3 et 4) qui emmagasinent la chaleur, tel un volant thermique, et uniformisent la température.
- une troisième en fonte (5) qui constitue le caisson à vide : sa face interne est polie et revêtue d'une couche de peinture argentée pour limiter les pertes de chaleur par rayonnement,

il ne s'agit pas à proprement parler de vide, mais plutôt de pression constante, le gravimètre étant sensible aussi aux variations de pression. La valeur adoptée (de l'ordre de 1cm Hg) contribue à réduire la convection dans l'enceinte : pour la supprimer totalement autour du gravimètre, l'espace (2) a été rempli d'isolant thermique "Klégécell". Cet isolant amortit les petites fluctuations de température qui subsistent forcément au niveau du pont pendant les périodes de recherche d'équilibre.

Les éléments du pont (7) et la résistance chauffante (8) sont isolés et collés à l'araldite respectivement sur les faces interne et externe de la plus grande des deux enceintes

en cuivre. Seule la fraction de M 1 comportant les prises dont dépend la température de consigne est placée sur le couvercle de cette enceinte.

Des essais ayant montré qu'il fallait une soixantaine de watts pour maintenir la température interne à environ 20°C au dessus de la température ambiante, la résistance chauffante a une valeur de 135 ohms. (Tension de chauffage maximale : 120 volts). Quant aux résistances du pont thermométrique, chacune est d'environ 1 200 ohms.

Si la température de l'enceinte est maintenue aussi constante que possible par la régulation, à plus forte raison le sera-t-elle au coeur de l'ensemble où se trouve le gravimètre. En effet, les échanges directs entre celui-ci et l'extérieur sont très limités ;

Sans entrer dans le détail des différents dispositifs relatifs au gravimètre proprement dit et à sa commande, disons seulement que le "Klégécell" et les couvercles des deux cuves de cuivre sont percés pour laisser passer :

- la lumière d'une lanterne située à l'extérieur, sur le couvercle du caisson à vide,
- deux axes de commande actionnés par des moteurs placés sur le couvercle de l'enceinte de cuivre la plus grande (4),
- les fils de sortie des cellules photoélectriques du gravimètre,

La traversée du couvercle du caisson à vide se fait par une lentille pour la lumière et par des connecteurs étanches pour le câblage.

Il est intéressant de se reporter à un schéma électrique équivalent à une telle enceinte pour bien apprécier l'influence des différents éléments ; c'est ce que montre la figure 3, moyennant la correspondance suivante :

résistance thermique	→	résistance électrique
capacité calorifique	→	capacité électrostatique
température	→	tension électrique
puissance de chauffage	→	courant électrique

En fait tous les éléments entrant dans la constitution de l'enceinte thermostatée sont à constantes réparties puisque la conductibilité thermique et la capacité calorifique sont distribuées dans toute la masse des matériaux.

Cela signifie en particulier qu'un flux de chaleur périodique appliqué à la surface d'un matériau épais entraîne une variation de température dont l'amplitude dans le matériau décroît exponentiellement avec la profondeur et dont la phase retarde proportionnellement à cette profondeur ; il s'agit d'un "effet de peau thermique" caractérisé par une profondeur de pénétration d pour laquelle la variation de température est e fois plus petite qu'à la surface ($e = 2,71828$) et le retard de phase de 1 radian.

$$d(\text{cm}) = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi C_s m_s}}$$

- avec λ : conductibilité thermique (cal. cm/cm². sec. °C)
 T : période (sec.)
 C_s : chaleur spécifique (cal/g. °C)
 m_s : masse spécifique (g/cm³)

Pour fixer les idées et justifier les équivalences de la figure 3, calculons cette profondeur de pénétration dans le cuivre, dans une matière plastique isolante telle que le chlorure de polyvinyle, et dans le "Klégécell", pour des périodes de 1 sec., 1 min. et 1 h.

Le tableau de la figure 4 donne les éléments et le résultat du calcul.

	λ	C_s	m_s	d (cm)		
				1 sec.	1 min.	1 h.
Cuivre	0,92	0,092	8,9	0,6	4,6	36
C P V	$4 \cdot 10^{-4}$	0,35	1,4	0,016	0,125	0,96
Klégécell	$0,72 \cdot 10^{-4}$	0,35	0,040	0,04	0,31	2,4

Fig. 4 : "Profondeur de pénétration thermique" dans différents matériaux du thermostat.

Les valeurs obtenues montrent par exemple que jusqu'aux périodes les plus courtes de la bande passante de l'asservissement (quelques secondes), l'effet de peau dans les parois de 1 mm des enceintes de cuivre est négligeable et l'on peut se contenter de représenter chacune d'entre elles par une cellule passe-bas en T dont la capacité calorifique du cuivre, et dont les résistances sont telles que la constante de temps électrique du circuit soit la même que la constante du temps thermique de l'enceinte (soumise à un échelon de température).

Par contre, cette simplification est impossible pour le "Klégécell" qui entoure le gravimètre, mais on peut lui faire correspondre un filtre-passe bas à cellules multiples : il en est de même pour les autres isolants dès qu'ils ne sont plus en feuilles minces (ex : cales en céloron).

C'est suivant ces principes qu'ont été établies les équivalences de la figure 3 : cela ne concernant que la conduction, les échanges par rayonnement et par convection sont représentés par d'autres résistances dont l'équivalence est donnée en légende.

Un tel schéma permet une bonne compréhension du fonctionnement qualitatif du thermostat, mais il est pratiquement impossible d'en calculer tous les éléments ; on verra d'ailleurs à propos de l'étude de la stabilité de l'asservissement que tous n'interviennent pas dans la boucle de réaction et que nous avons seulement relevé expérimentalement la fonction de transfert de la partie intervenant.

2/ La partie électronique et électromécanique :

Vu les coefficients de température des résistivités du nickel et du manganin, le signal délivré par le pont thermométrique est d'environ 3 mV par degré et par volt d'alimentation. Pour la tension d'alimentation de 10 volts normalement prévue, le signal d'erreur est donc de 30 μ V par milliègne de degré.

C'est ce signal, disponible sous une impédance d'environ 1 200 ohms qui est appliqué à l'amplificateur galvanométrique.

a) - Amplificateur galvanométrique

Il est constitué d'une "boîte noire" contenant

- la lanterne (6 V, 1 A) légèrement sous-voltée
- le galvanomètre immergé antivibratoire (sensibilité : 10^{-9} A/mm à 1 m)
- une cellule photorésistante différentielle au sulfure de cadmium.

Une partie du spot réfléchi apparaît dans une fenêtre graduée, ce qui facilite les contrôles en cours de mise en route ou de réglage.

La courbe de réponse de l'amplificateur galvanométrique est représentée figure 5 ; c'est pratiquement celle du galvanomètre lui-même (à un coefficient près en amplitude) : ce sont en effet l'inertie et l'amortissement de ce dernier qui limitent la réponse aux fréquences rapides.

Le signal de sortie est alternatif : il est pris sur le potentiomètre d'équilibrage du pont de cellules situé dans l'amplificateur de puissance (figure 6).

b) - Amplificateur de puissance

Réalisé il y a plus de dix ans maintenant, il est à tubes, comme le montre le schéma de la figure 6. C'est un amplificateur alternatif, n'ayant à amplifier qu'une faible

bande autour du 50 Hz considéré comme porteuse : son gain est donc constant dans toute la bande passante de l'asservissement ; sa valeur, en tension est 40.000 (soit 92 dB), le moteur étant branché.

La phase du signal de commande est ajustée à 90° par rapport à la phase fixe par un choix convenable des capacités C_e et C_s placées à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur.

c) - Bloc moteur / auto-transformateur

Comme on l'a vu, c'est le moteur qui introduit l'effet d'intégration favorable à la précision de l'équilibre. La fonction de transfert de l'ensemble est :

$$\frac{\Delta V \text{ (chauffage)}}{\Delta V \text{ (moteur)}} = 0,05 \text{ pour une période de 1 seconde,}$$

ce rapport étant proportionnel à la période et le déphasage correspondant étant de 90° (retard) tant que les constantes de temps du moteur et de sa charge n'interviennent pas.

La partie électromécanique introduit aussi des non-linéarités :

- un seuil de démarrage, de l'ordre de 1,5 volts, en charge.
- de l'hystérésis mécanique due au jeu du réducteur et du curseur de l'auto-transformateur.

L'étude de l'asservissement montrera comment l'effet de ces non-linéarités, théoriquement préjudiciables à la précision et à la stabilité de la régulation, est rendu négligeable.

L'amplificateur de puissance et le bloc moteur/auto-transformateur sont sur deux châssis montés en rack alors que l'amplificateur est dans un coffret à part pour ne pas subir le contre-coup des mouvements du bloc électromécanique ou des manoeuvres effectuées sur d'autres châssis du même rack.

IV - ETUDE PARTICULIERE DE LA STABILITE

Nous avons utilisé systématiquement pour cette étude le tracé des courbes de gain et de phase des éléments du montage, ainsi que l'abaque de Nichols (souvent appelé abaque de Black) : cet abaque permet de déduire graphiquement les valeurs du gain et de la phase en boucle fermée à partir de leurs valeurs en boucle ouverte [4] .

Lorsqu'on réunit les différentes parties du montage conformément au schéma de principe de la figure 1, on observe que le système est instable : en effet, vu l'amplification importante du signal d'erreur, dès qu'un léger refroidissement, par exemple, est constaté, la puissance de chauffage est accrue et continue à croître (effet d'intégration) jusqu'à ce que l'équilibre du pont soit à nouveau constaté ; le moteur s'arrête alors, mais la température du pont continue à augmenter à cause de l'inertie thermique importante du caisson et parce que la puissance de chauffage s'est fixée, de ce fait, au-delà du nécessaire.

Le processus s'inverse alors pour osciller à une période de plusieurs minutes entre le chauffage nul et le chauffage maximal.

Cela n'a rien d'étonnant quand on considère la fonction de transfert qui lie la tension de déséquilibre du pont thermométrique à la tension de chauffage du caisson. Les courbes de la figure 7 représentent cette fonction en amplitude et en phase. On remarque que des fluctuations de chauffage de période 3 heures ne sont pas transmises intégralement au pont thermométrique à cause des grandes constantes de temps thermiques en jeu (cellules h, b, i de la figure 3). Si cela est favorable à l'atténuation des fluctuations de la température ambiante, cela nuit à la rapidité de réponse de la régulation. En effet, on observe, que compte tenu du déphasage supplémentaire de 90° apporté par le moteur (intégrateur) les variations de 20 minutes de période sont déjà déphasées de 180° : il faut donc que le gain de boucle à cette période soit inférieur à l'unité pour éviter tout pompage de l'asservissement. Cette condition impose un amplificateur de gain faible et une réponse lente de la régulation. Les courbes de la figure 8 montrent le résultat que l'on pourrait obtenir ainsi en tolérant une certaine suroscillation (+ 9dB à 5 000 sec.) due à une marge de phase réduite (20°). Dans la mesure où le rythme des variations de la température ambiante est encore plus lent, cela serait admissible si le fait d'avoir un gain faible n'avait en outre l'inconvénient suivant : à cause du seuil, de démarrage du moteur et du jeu de la transmission mécanique déjà notés, la régulation ne réagirait que pour des écarts de température trop élevés.

On a donc choisi de corriger la fonction de transfert initiale du montage pour :

- réduire le temps de réponse de la régulation, ou, ce qui revient au même, en augmenter la bande passante.

- réduire le seuil et le jeu apparent de la partie électromécanique.

Ce résultat a été obtenu en complétant le schéma de la figure 1 par un réseau de correction placé en contre-réaction entre la sortie de l'auto-transformateur délivrant la tension de chauffage et l'entrée du préamplificateur galvanométrique, conformément au schéma fonctionnel de la figure 9.

La tension d'erreur v résulte de la comparaison par le pont thermométrique des produits $M_1 \times M_2$ (résistances en manganin) et $N_1 \times N_2$ (résistances en nickel).

Le courant d'erreur i_g dû à v est mélangé dans le galvanomètre du préamplificateur au courant de sortie i_s du réseau correcteur traduisant les tendances du chauffage. Cela revient à remplacer la fonction de transfert de la partie de la boucle principale comprise entre A et B (préampli, ampli, moteur et auto-transformateur) par la fonction de transfert de la boucle secondaire formée par ces éléments plus le réseau correcteur. Or, la théorie de la contre-réaction indique que dans toute la bande passante de cette boucle secondaire, cette fonction de transfert se réduit pratiquement à l'inverse de celle du réseau correcteur et ne dépend plus des éléments de la chaîne directe (la bande passante d'un système bouclé se définit comme la gamme de fréquences pour laquelle le gain en boucle ouverte est supérieur à 1 (0 dB)).

Si on se reporte à la figure 7, on voit que pour étendre la bande passante de la boucle principale, il faut que la partie de la boucle comprise entre A et B apporte une avance de phase pour les périodes supérieures à quelques m Hz (millihertz) de façon à augmenter la fréquence pour laquelle

le déphasage atteint 180° . Il faut en outre conserver aux périodes plus lentes l'effet d'intégration (et donc le retard de phase de 90° qui lui est associé) pour bénéficier de l'annulation de l'erreur statique. Le réseau correcteur étant en réaction doit donc avoir une impédance de transfert $Z_t = v_e / i_s$ ayant ces propriétés.

Cela conduit à un réseau du type représenté figure 10, comportant une cellule passe-bas et une cellule passe-haut combinées. Si l'on appelle t_1 et t_2 les constantes de temps de ce réseau, et p l'opérateur symbolique, l'impédance de transfert a pour expression :

$$Z_t(p) = \frac{1}{pC_2} (1+pt_1)(1+pt_2)$$

les valeurs de t_1 et t_2 sont liées aux éléments du réseau par l'équation suivante dont elles sont racines [5] :

$$t^2 - (R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2)t + R_1R_2C_1C_2 = 0$$

La figure 11 représente schématiquement en fonction de la fréquence les variations du module et de la phase de l'impédance de transfert.

Dans le cas présent, on a adopté :

$$R_1 = 3,3 \text{ M}\Omega$$

$$C_1 = 100 \mu\text{F}$$

$$R_2 = 3,3 \text{ M}\Omega$$

$$C_2 = 10 \mu\text{F}$$

ce qui donne

$$\frac{1}{2\pi t_1} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$$

$$\frac{1}{2\pi t_2} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ Hz.}$$

Le réseau correcteur réel, représenté figure 12, est en fait plus compliqué, et cela pour les raisons suivantes :

- a) - un diviseur potentiométrique permet d'ajuster le taux de contre-réaction de la boucle secondaire
- b) - ce réseau recevant la tension alternative de chauffage à 50 Hz comporte une cellule de redressement et de filtrage de cette tension considérée comme porteuse.
- c) - la boucle secondaire elle-même doit être stable : or au déphasage de 90° dû à l'intégration s'ajoutent ceux dus
 - au galvanomètre du préamplificateur (cf : figure 5)
 - à l'inertie du moteur
 - à la cellule passe-bas du réseau simplifié
 - aux non-linéarités de la partie mécanique

Sans entrer dans l'analyse détaillée de ces déphasages, disons qu'il convient, aux périodes plus rapides que la dizaine de secondes (qui n'intéressent plus la régulation de température)

- de supprimer l'effet du filtrage passe-bas du réseau correcteur (33 k Ω en série avec C 1)
- de compenser les autres retards de phase nuisibles à la stabilité de la boucle secondaire par des cellules d'avance de phase (0,1 μ F en parallèle avec 3,3 M Ω).

L'effet global du réseau correcteur apparaît sur les courbes de la figure 13 qui représentent la réponse de la boucle secondaire fermée, relevée expérimentalement (en amplitude et en phase). On remarque que l'effet d'intégration est bien

conservé aux fréquences très basses (amplitude croissant avec la période et retard de phase tendant vers 90°) mais qu'à partir de 1 mHz jusqu'à près de 0,1 Hz, on a au contraire une avance de phase qui va justement compenser partiellement les retards importants dus aux constantes de temps thermiques : c'est ce que montre la figure 14 représentant la fonction de transfert de la boucle principale ouverte corrigée.

La fonction de transfert de la boucle principale fermée - qui n'est autre que la bande passante de l'asservissement - se déduit de la précédente par l'intermédiaire de l'abaque de Nichols et est représentée figure 15. La suroscillation est très faible (environ 0,2 dB à 0,3 mHz) à cause des marges de gain et de phase relativement importantes (18 dB et 65°). La comparaison de ces courbes avec celles de la figure 8 montre la nette amélioration obtenue en ce qui concerne la bande passante, et donc le temps de réponse, de la régulation. Une vérification expérimentale de cette bande passante est délicate : elle supposerait en effet de faire varier sinusoïdalement - ou d'un échelon - soit la température ambiante, soit la température de consigne ; bien que la seconde solution soit simple en principe, elle est inapplicable dans le cas présent, la résistance en manganin à prises (M 1) se trouvant enfermée dans le caisson étanche. Nous nous sommes donc contentés d'observer qu'en augmentant progressivement le gain de la boucle principale ; il apparaissait une oscillation d'environ une minute de période, ce qui corrobore les résultats précédents.

Il a été dit plus haut que le réseau correcteur de la boucle secondaire avait aussi pour effet de réduire le seuil et le jeu apparent de la partie électromécanique : il est aisé de s'en rendre compte physiquement en se reportant au schéma

de la figure 9. Tant que le moteur n'a pas démarré ou que le curseur de l'autotransformateur n'a pas changé de spire, le réseau de correction ne délivre aucun courant de contre-réaction i_s pour réduire l'effet du courant i_g émanant du pont thermométrique de sorte que, compte-tenu des grands gains du préampli ($26 \text{ V}/\mu\text{A}$) et de l'ampli (40 000), le seuil de démarrage du moteur (1,5 V à ses bornes) puis du curseur est atteint pour un écart de température très faible aisément calculable d'après les chiffres ci-dessus et la valeur de la résistance (100 k Ω) placée entre le pont et le galvanomètre du préamplificateur. Cet écart serait de l'ordre de $5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ (le pont donnant 30 mV/ $^\circ\text{C}$). En réalité, le bruit de fond électronique du circuit d'entrée suffit, après amplification, à maintenir la partie électromécanique dans une agitation permanente qui "balaie" erratiquement la zone de jeu à une allure limitée par la bande passante de la chaîne directe de la boucle secondaire.

Une remarque importante s'impose encore au sujet du réseau correcteur : la résistance d'isolement de C_2 doit être considérable (cf. fig. 12), car elle conduit le réseau correcteur à devenir purement résistif aux périodes extrêmement lentes et l'effet d'intégration disparaît. Cela doit se produire à une période suffisamment basse pour que le gain en continu de la boucle principale (ouverte) soit assez élevé et donne lieu à une erreur statique négligeable vis-à-vis de la précision requise.

Une amélioration non négligeable en ce sens serait obtenue par l'adjonction d'une autre capacité en série dans le réseau de correction (au point P de la figure 12). Son rôle serait double :

1/- réduire les fuites en courant continu du réseau.

2/- augmenter le rythme d'accroissement du gain de la boucle principale ouverte avec la période (sans modifier l'effet de correction exposé précédemment).

Ces deux effets concourraient à réduire encore l'erreur statique. Cette amélioration, envisagée récemment, serait plus théorique que pratique, le fonctionnement de la régulation, depuis plusieurs années, s'étant avéré satisfaisant.

V - PERFORMANCES

Les résultats donnés ci-après correspondent au fonctionnement de l'équipement dans une cave où la variation annuelle de température n'excède pas une huitaine de degrés.

La température, accessible par l'intermédiaire de la d.d.p. disponible aux bornes du pont thermométrique n'a pas été enregistrée de façon continue, mais on peut dire que ses variations à court terme (jusqu'à 24 heures) restent inférieures au millième de degré centigrade au niveau du pont : les plus rapides sont encore moindres au niveau du gravimètre lui-même.

Quant à la stabilité à long terme, l'absence d'enregistrement permanent ne permet pas de conclure formellement, mais la dérive lente ne semble pas excéder quelque trois millièmes de degré centigrade par mois ; cela est encore beaucoup, eu égard aux possibilités de la régulation en ce qui concerne la précision.

Il y a lieu de penser que, malgré les précautions prises, des d.d.p. de contact résiduelles, variables avec la température ambiante, s'ajoutent dans le circuit d'entrée à la tension de déséquilibre du pont ; la présence de gradients thermiques (traversée du caisson étanche, ampoule de l'amplificateur galvanométrique) tend à les favoriser. Quoi qu'il en soit, l'enregistrement du signal gravimétrique n'en paraît pas affecté.

Le meilleur remède, dans une version plus moderne de l'équipement serait d'utiliser comme préamplificateur un amplificateur opérationnel, de bruit, d'origine, encombrement et consommation faibles, ce qui est maintenant courant, et de le placer à l'intérieur du caisson thermostaté.

VI - SECURITE

Les dispositions suivantes permettent de limiter la portée d'éventuels incidents :

- un relais à bilame réglé à quelques degrés au-dessus de la température de consigne coupe le chauffage en cas de dépassement.

- l'ampoule d'éclairage de l'amplificateur galvanométrique est sous-voltée, mais en cas de rupture du filament, l'alimentation de l'amplificateur de puissance est coupée et la tension de chauffage se maintient à la valeur qu'elle avait à l'instant de la coupure; la tension d'alimentation du pont thermométrique est coupée en même temps pour éviter la surcharge du galvanomètre lors de la dérive de température qui va s'ensuivre.

- en cas d'interruption momentanée de l'alimentation par le réseau, la haute tension de l'amplificateur de puissance demeure coupée au rétablissement de l'alimentation de sorte que la tension de chauffage reprend la valeur qu'elle avait au moment de la panne : en effet, cet asservissement ne peut être bouclé qu'à gain réduit et lorsque la température n'est pas trop éloignée de la valeur de consigne, faute de quoi le spot quitte les cellules du préamplificateur galvanométrique. La mise en route se fait d'ailleurs de la même façon, après une période de chauffage fixe.

VII - CONCLUSION

Ce thermostat fonctionne de façon quasi-permanente depuis 1964.

Bien qu'il donne satisfaction et permette d'obtenir de bons enregistrements de marées terrestres, à dérive extrêmement faible, sa fiabilité pourrait être améliorée en remplaçant le préamplificateur et l'amplificateur, de conception ancienne, par des dispositifs à semi-conducteurs qui simplifieraient encore la maintenance et supprimeraient pratiquement tous risques de panne.

Si l'ensemble n'était alimenté par le réseau permanent du Centre de Recherches Géophysiques, une autre amélioration pourrait consister à adjoindre au thermostat un programmateur de remise en route automatique.

Il convient aussi de noter qu'un thermostat de précision de ce genre peut être adapté à bien d'autres appareils qu'à un gravimètre.

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

- [1] STANUDIN B. - "Enregistrement de la marée gravimétrique"
Diplôme d'études supérieures. Fac. des Sci.
Paris (1953).
- [2] QUEILLE C. - "Perfectionnement aux techniques d'enregist-
rement de la marée gravimétrique"
Communication au Congrès de l'A.F.A.S. (1956).
- [3] QUEILLE C., ALBERTINOLI
- "Thermostatisation d'un gravimètre d'enre-
gistrement de la marée terrestre"
Communication au Congrès de l'A.F.A.S. (1959).
- [4] NASLIN P. - "Technologie et calcul pratique des systèmes
asservis"
2ème éd. Dunod. Paris (1958).
- [5] RAMAIN P. - "Technique des amplificateurs basse fréquen-
ce de qualité"
p. 449. Chiron. Paris (1962)

Nous tenons à rendre hommage à M. MONNEAU, décédé depuis, pour la part importante qu'il a prise dans l'élaboration de ce projet et à remercier M. GIRARD pour celle qu'il a prise dans sa réalisation.

Laboratoire de Géophysique Appliquée
Faculté des Sciences de Paris
et
Centre de Recherches Géophysiques Garchy
(C.N.R.S.)

THERMOSTAT DU GRAVIMETRE

Légende des figures

Fig. 1. Schéma de principe du thermostat du gravimètre

Fig. 2. Réalisation de la cuve thermostatée (cotes en mm)

- 1 - Gravimètre
- 2 - Isolant thermique (chlorure de vinyle expansé "Klégécell")
- 3 - Enceinte interne (cuivre rouge)
- 4 - Enceinte externe (cuivre rouge)
- 5 - Caisson à vide (fonte)
- 6 - Cales supports (céloron)
- 7 - Pont thermométrique
- 8 - Résistance chauffante

Fig. 3. Equivalent électrique de la "chaîne thermique" du thermostat

<p><u>Induction :</u></p> <ul style="list-style-type: none">(a) caisson à vide(b) enceinte externe en cuivre(c) " interne " "(d) "Klégécell"(e) gravimètre(f), (f') cales en céloron(g) lanterne du gravimètre(h) résistance chauffante(i) pont thermométrique(j) commandes mécaniques du gravimètre(k) cellules du gravimètre(1), (1'), (1''), (1''') connexions électriques à l'extérieur	<p><u>Rayonnement et convection :</u></p> <ul style="list-style-type: none">r_a : entre caisson à vide et lanterne et extérieurr_e : " lanterne et ensemble du gravimètrer_k : " " et cellules photovoltaïques du gravimètrer_h : " résistante chauffante et caisson à vide$r_{f'}$: " les deux enceintes de cuivre <p><u>variables :</u></p> <ul style="list-style-type: none">V_a : température ambiantei_l : puissance de la lanternei_{ch} : puissance de chauffage
--	--

La figure 4 est dans le texte

Fig. 5. Fonction de transfert de l'amplificateur galvanométrique

I : Amplitude
II : Phase
+ : Points expérimentaux

Fig. 6. Schéma de principe de l'amplificateur de puissance du thermostat du gravimètre

Fig. 7. Fonction de transfert $\frac{\Delta v \text{ (pont thermométrique)}}{\Delta V \text{ (chauffage)}}$

I : Amplitude
II : Phase
+ : Points expérimentaux

Fig. 8. Bande passante de la régulation de température

θ réglée (sans réseau correcteur)
 θ consigne

I : Amplitude
II : Phase

Fig. 9. Schéma fonctionnel du thermostat du gravimètre, avec réseau correcteur.

Fig. 10 Schéma de principe du réseau correcteur

Fig. 11. Impédance de transfert du réseau de la figure 10
(en trait plein : représentation asymptotique)

I : Module
II : Phase

Fig. 12. Schéma complet du réseau correcteur réel

Fig. 13. Fonction de transfert de la boucle secondaire fermée

I : Amplitude
II : Phase
+ : Points expérimentaux

Fig. 14. Fonction de transfert de la boucle principale ouverte
(corrigée)

I : Amplitude
II : Phase

Fig. 15. Bande passante de la régulation de température

θ réglée (avec réseau correcteur)

 θ consigne

I : Amplitude
II : Phase

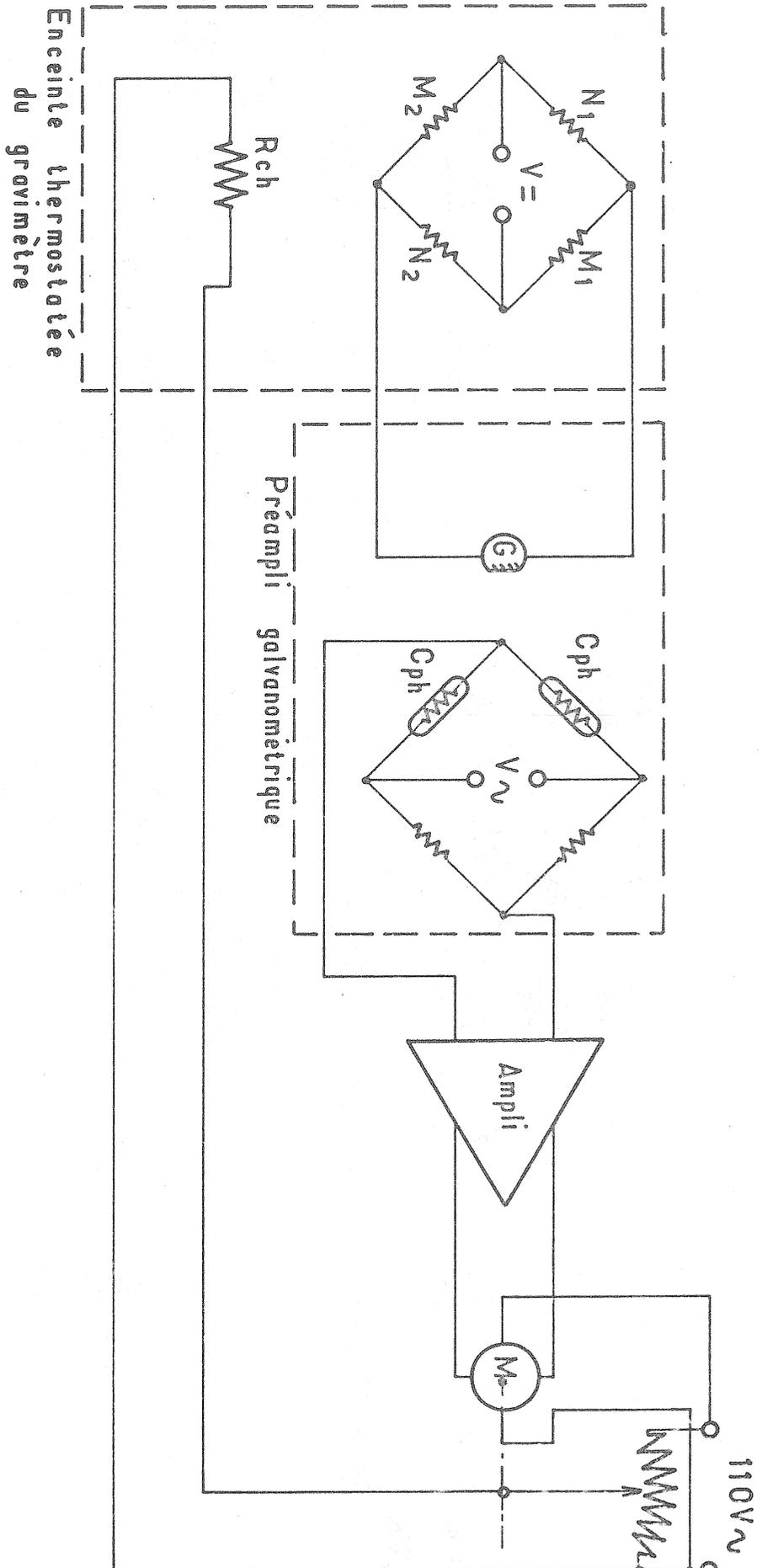


Fig. 1.

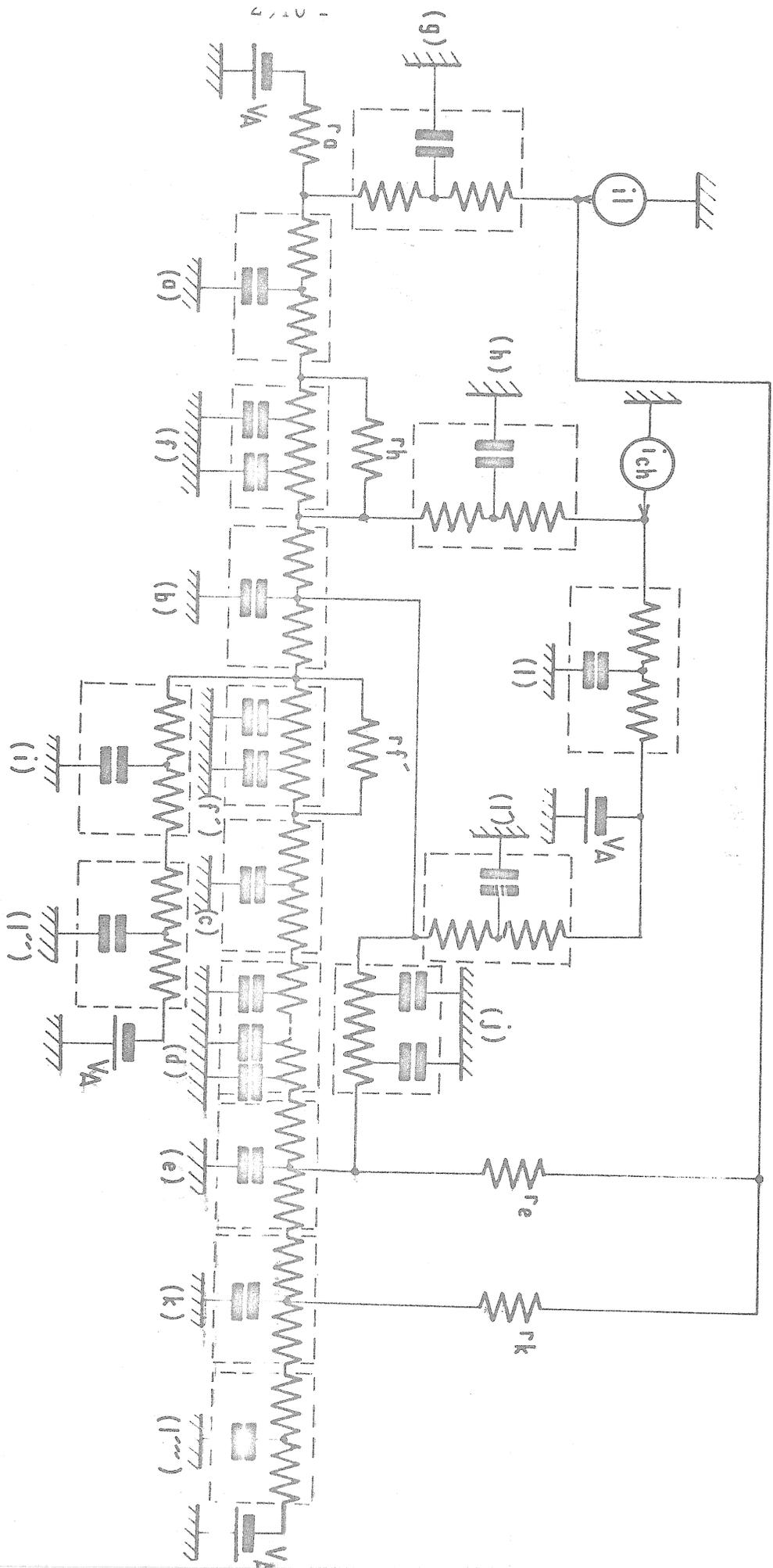


Fig. 3.

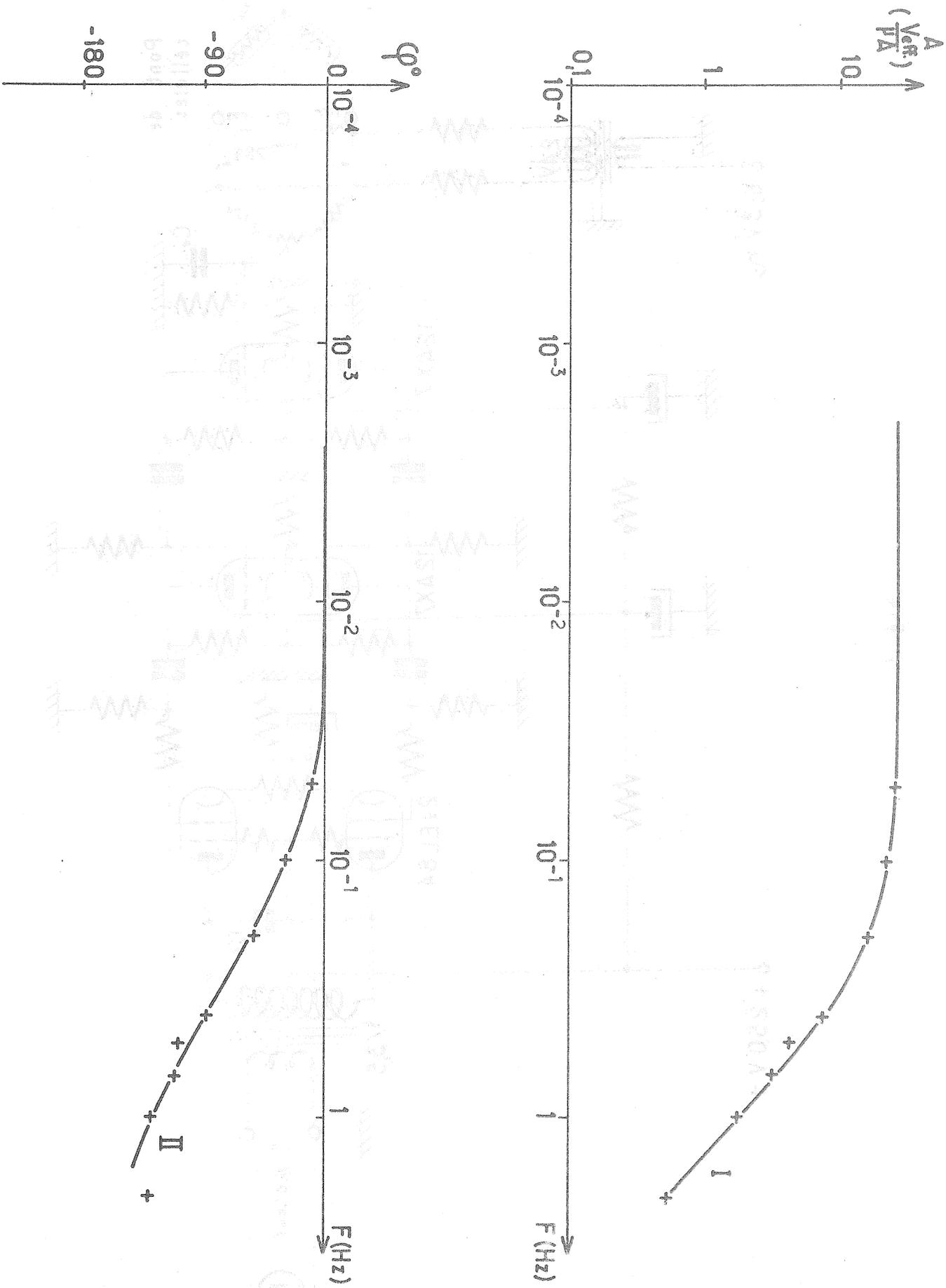


Fig. 5.

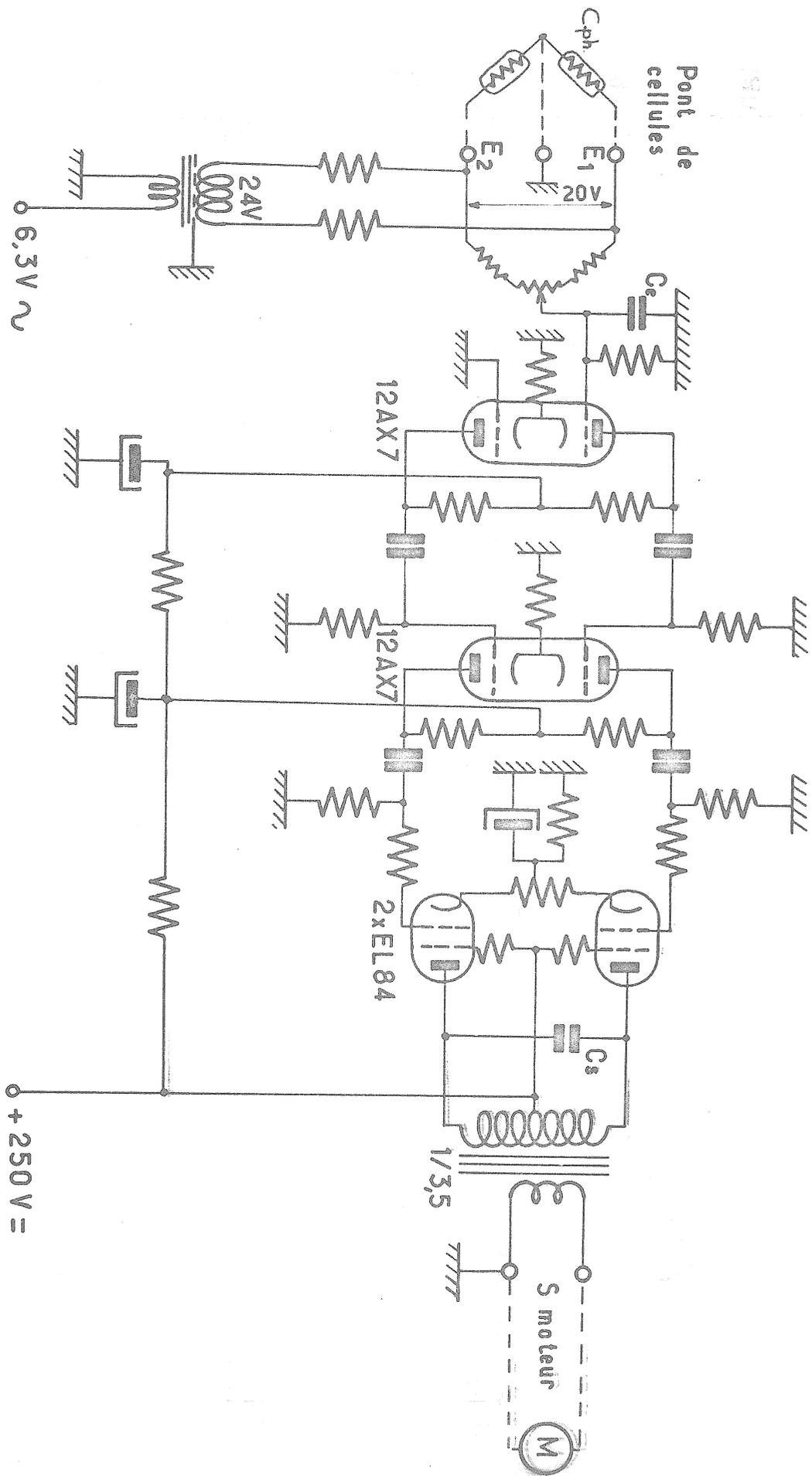


Fig. 6.

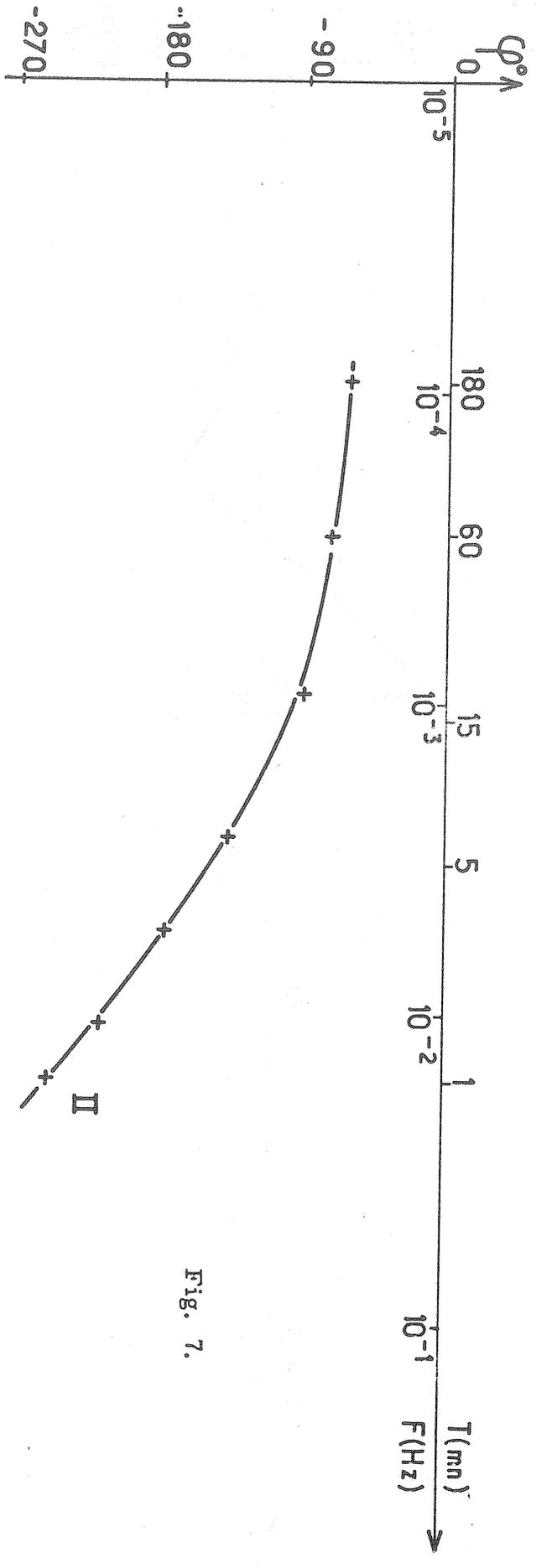
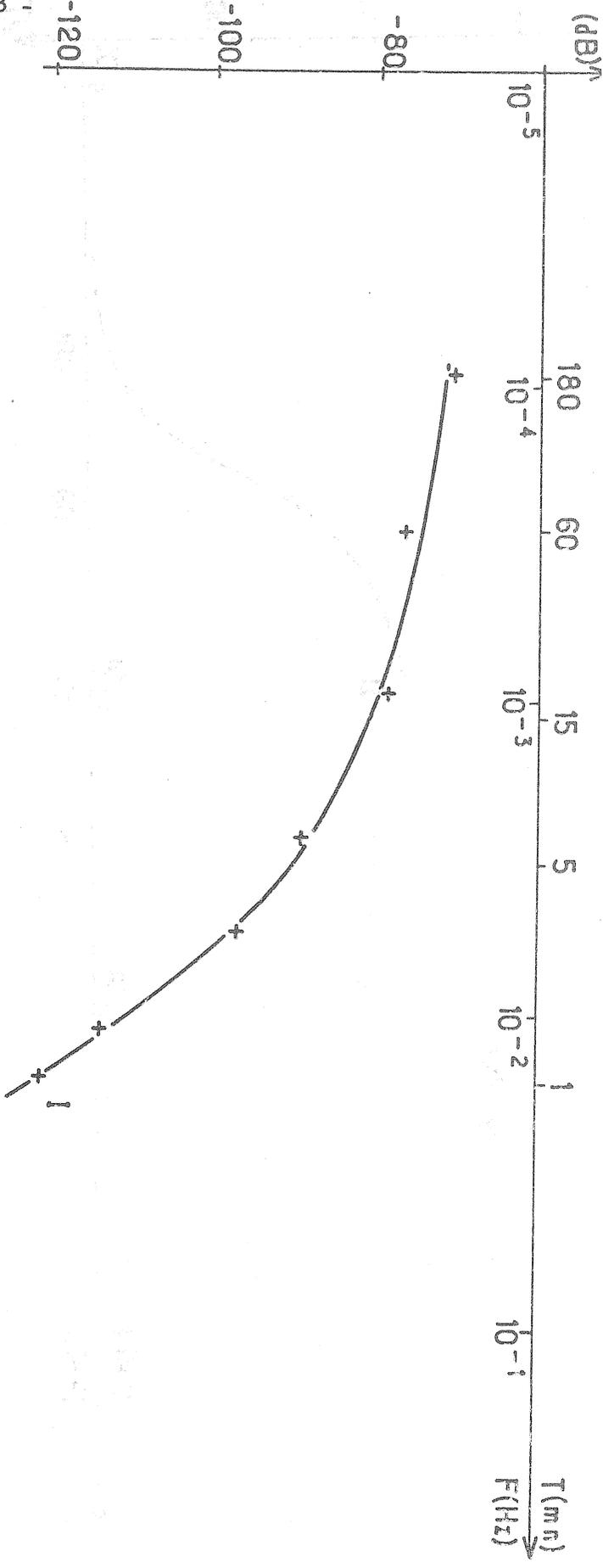


Fig. 7.

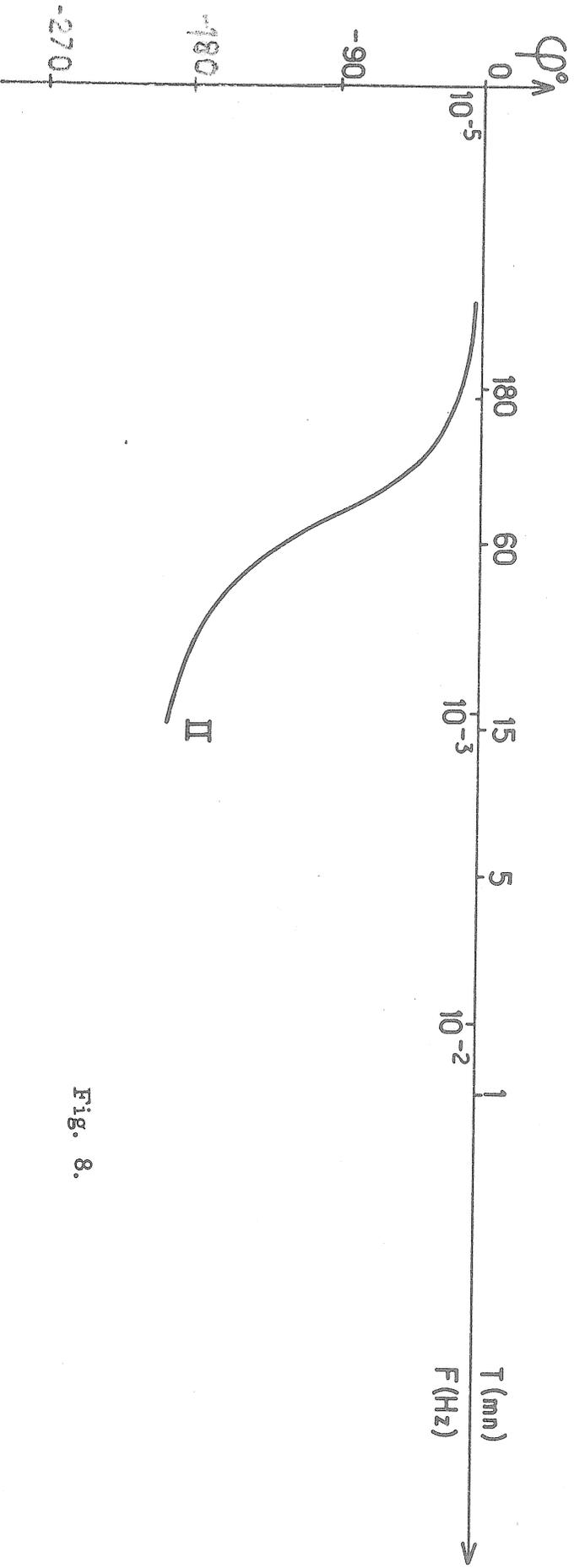
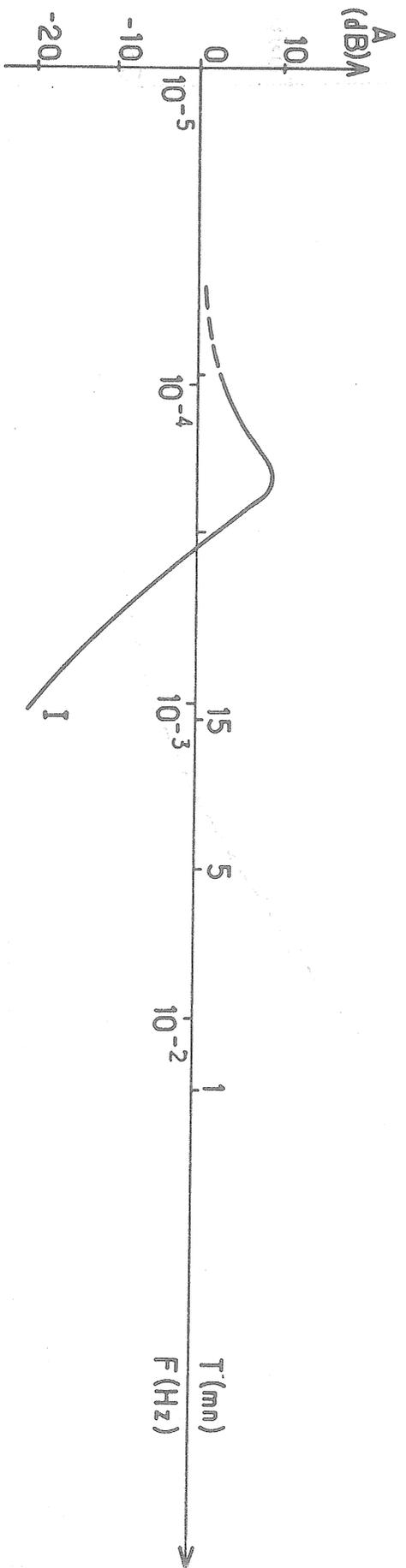


Fig. 8.

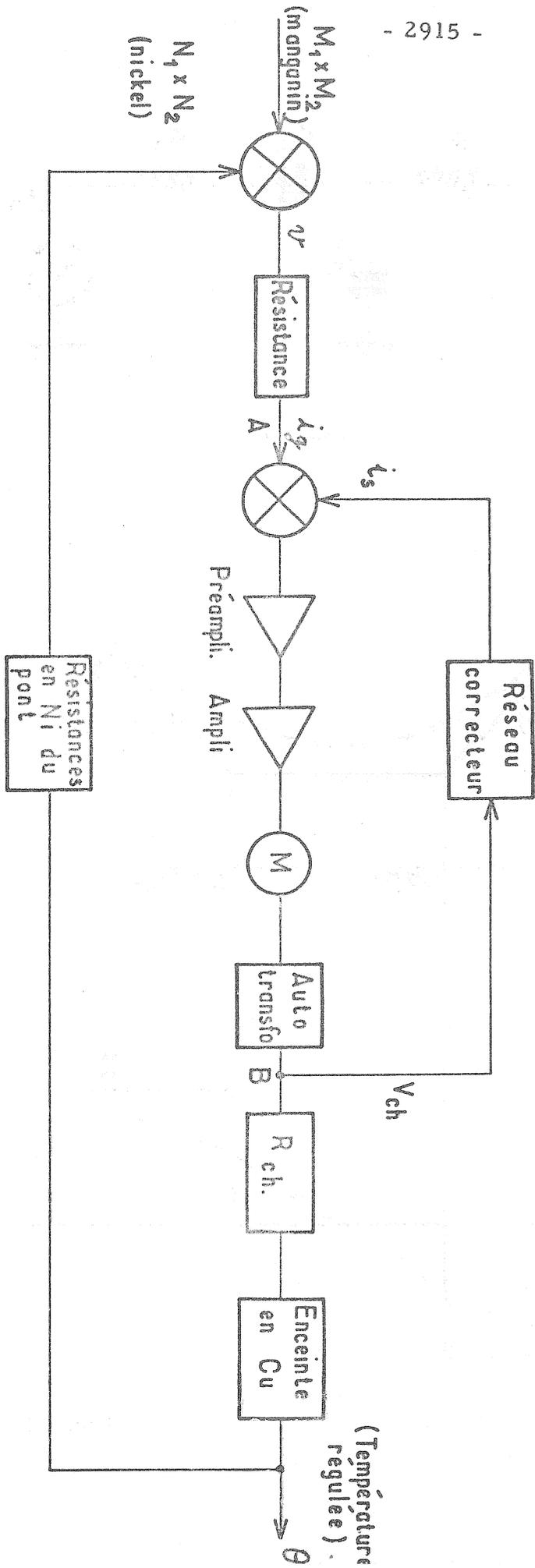


Fig. 9.

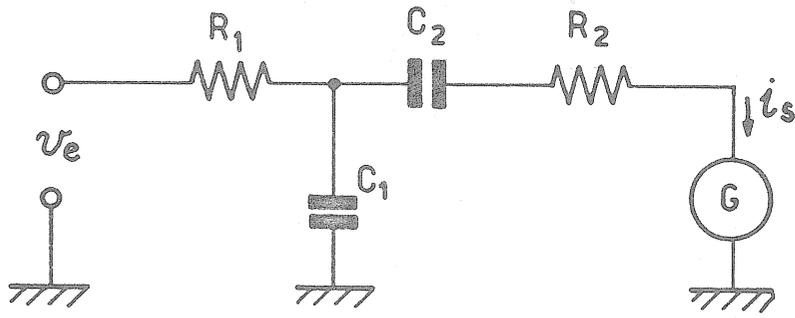


Fig. 10.

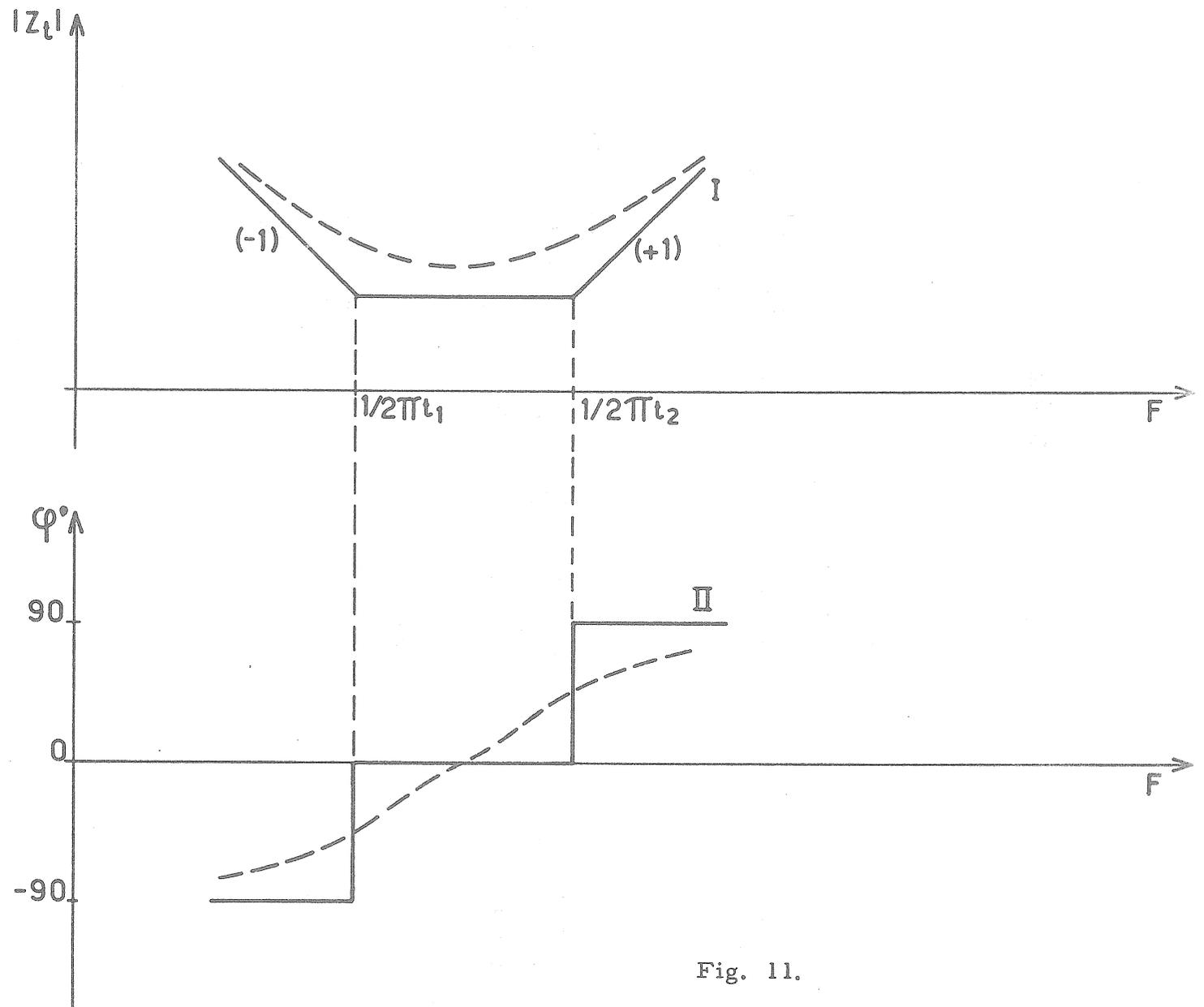


Fig. 11.

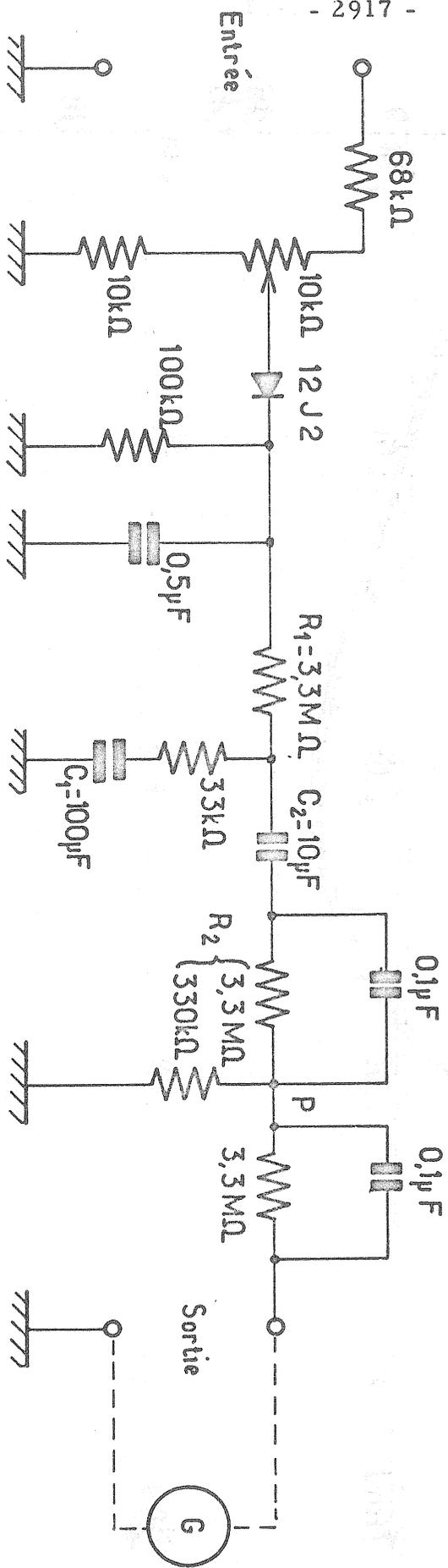


Fig. 12.

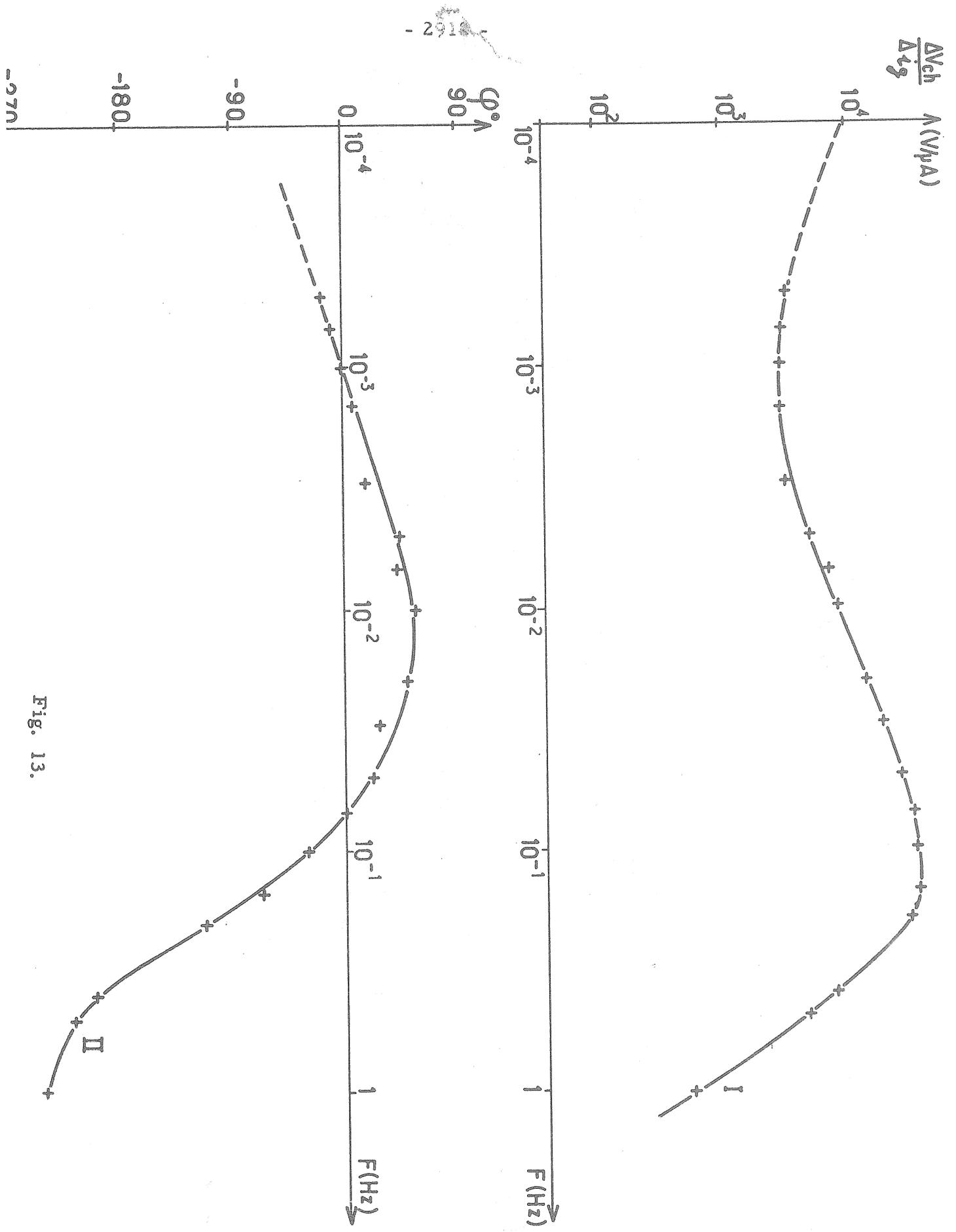


Fig. 13.

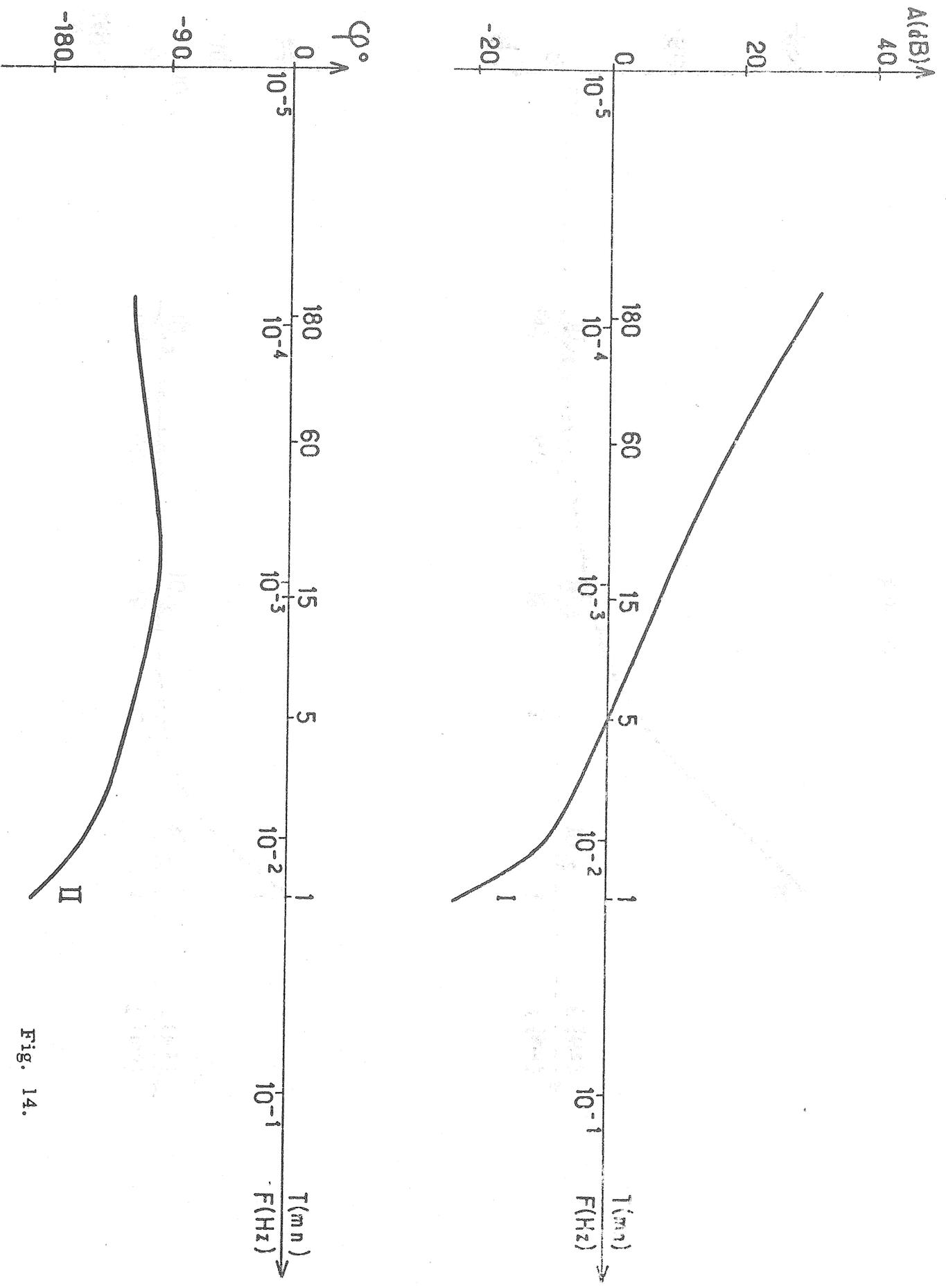


Fig. 14.

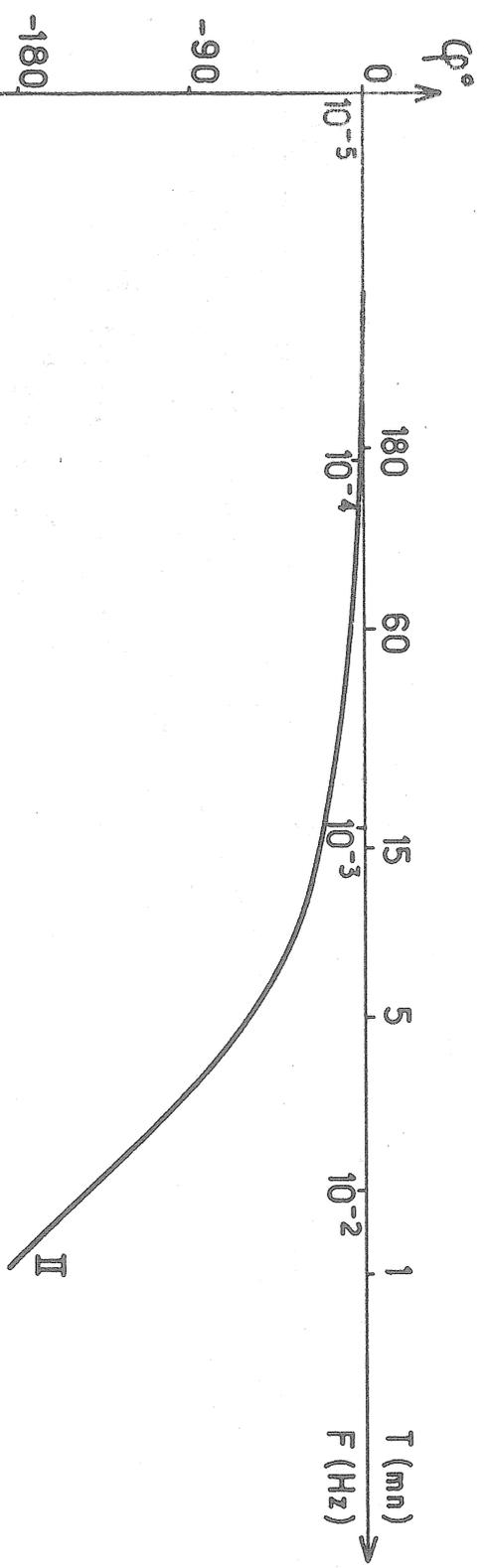
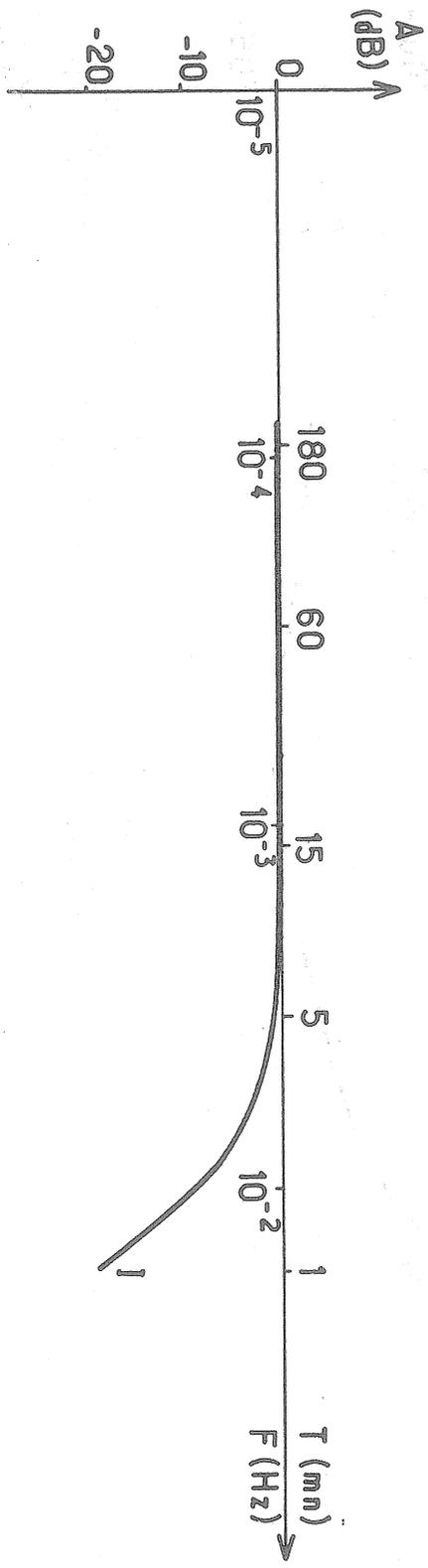


Fig. 15.