

M A R E E S T E R R E S T R E S

B U L L E T I N d' I N F O R M A T I O N S

N° 25

20 septembre 1961

Association Internationale de Géodésie

Commission Permanente des Marées Terrestres

Editeur : Dr. Paul MELCHIOR
Centre International des Marées Terrestres
c/o Observatoire Royal de Belgique
3, Avenue Circulaire
Bruxelles 18
Belgique.

Le Centre International s'est proposé d'assurer la traduction en français et la publication dans le B.I.M. de certains articles russes sur les marées terrestres. Il s'agira par priorité des articles dont aucun exposé au moins partiel n'a encore été fait dans l'une des langues occidentales.

Le récent volume publié par l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., Comité de l'Année Géophysique Internationale et intitulé :

Recherches sur les Marées Terrestres , Articles.

A. W. G. Groupe XIII du programme A.G.I. (Gravimétrie) Vol. 2 Moscou 1961, contient deux articles qui répondent à ces critères :

B.P. Pertsev : Analyse harmonique de séries de 50 jours d'observations de variations (pp. 20-30),

A.E. Ostrovsky: Le dinomètre à enregistrement photo-électrique (pp. 41-75)

Nous publions dans le présent B.I.M. la première partie de l'article de A.E. Ostrovsky en traduction française. Il ne nous est malheureusement pas possible de reproduire toutes les figures mais nous donnerons au moins celles qui sont absolument nécessaires à la compréhension du texte. Pour le reste nous renvoyons au mémoire original.

P. MELCHIOR.

Le clinomètre à enregistrement photo-électrique.

par

A.E. OSTROVSKY

Pendant l'Année Géophysique Internationale, les observations des inclinaisons de la croûte terrestre ont été effectuées avec le clinomètre à enregistrement photo-électrique. Cet appareil permet d'enregistrer à distance les inclinaisons. Son principe de fonctionnement a été décrit précédemment. Ces dernières années l'appareil a été amélioré; en outre on a mis au point un procédé pour la détermination et le contrôle de sa sensibilité.

Mécanisme du clinomètre.

Le clinomètre à enregistrement photo-électrique est composé d'un pendule horizontal avec un solénoïde, muni d'un amortissement magnétique, de deux photoéléments avec projecteur lumineux et d'un galvanomètre dont les indications s'enregistrent photographiquement.

Le pendule (4) (figure 1) est suspendu par un fil vertical (2) et par deux fils horizontaux (1 et 3). Le poids du pendule est de 1 kg. Le fil de suspension vertical est en acier, son diamètre est de 0,2 mm. Avec la charge d'un kg le coefficient de sécurité est 6. Les fils horizontaux sont en tungstène Wolfram, leur diamètre est égal à 0,1 mm; avec la charge de 0,5 kg qu'ils supportent, le coefficient de sécurité est 4.

Au pendule sont attachées des solénoïdes cylindriques (6), qui entrent dans des entrefers circulaires des 2 côtés du pendule (5). Les solénoïdes sont destinés à amortir les mouvements propres d'oscillation du pendule pendant la détermination et le contrôle de la sensibilité du clinomètre et aussi pour ramener le pendule au zéro par un courant réglé à partir de la salle d'enregistrement. Le clinomètre possède 3 vis (7) pour niveler la base qui est en acier inoxydable. Pour le travail dans les mines

ou dans d'autres endroits difficiles une des vis calantes d'appui possède un moteur avec réducteur à l'aide duquel on peut à distance ramener l'appareil à zéro.

Le pendule (3) est bloqué des 2 côtés grâce aux vis 1 et 6 (fig. 2). D'un côté la vis 1 commande trois tiges glissières 2, dont les bouts forment un triangle et butent sur le corps du pendule quand celui-ci se trouve en équilibre. De l'autre côté la vis bute sur le milieu du corps du pendule. Un tel système d'arrêt ne déplace pas la position zéro du pendule. Pendant le transport et réglages, le ressort du système de suspension du pendule se bloque avec deux vis supplémentaires 4, qui s'introduisent par les orifices 5 dans le corps du pendule. Le blocage s'effectue dans l'ordre suivant : d'abord on serre la vis (1), ensuite le pendule est bloqué avec la vis (6) et enfin on visse les vis (4) dans les orifices 5. La libération s'effectue dans l'ordre inverse.

L'aspect extérieur du clinomètre est représenté à la fig. 3. La cloche avec joint en caoutchouc se visse sur la base de l'appareil et le protège contre l'humidité. A l'intérieur de la cloche se trouve le dessécheur avec le chlorhydrate de calcium. La figure 4 montre le schéma optique et électrique de l'appareil. Le rayon lumineux en sortant de la source (1) passe à travers le système de lentilles du condenseur et tombe sur le miroir mobile (2) qui est fixé sur le pendule horizontal (3) près de son axe de rotation. Réfléchi par ce miroir, la lumière tombe sur le 2^{ème} miroir (4), fixé à la partie immobile du clinomètre. Plus loin le rayon tombe sur les prismes à réflexion totale intérieure (5). Ici le rayon lumineux se dédouble : la moitié pénètre sur le photoélément droit, l'autre moitié sur le photoélément gauche. Si le rayon lumineux se divise exactement en 2 parties, les forces électromotrices qui apparaissent sur la surface des photoéléments sont égales et possèdent le même signe. Les résistances des 2 photoéléments étant aussi égales, le courant dans la bobine du galvanomètre est annulé. Lors de l'inclinaison du rayon à droite ou à gauche, les forces électromotrices deviennent inégales et dans le galvanomètre (7) s'établira un courant dans une direction ou dans l'autre.

Il sera facile de démontrer, qu'avec les petits angles d'inclinaison du pendule le déplacement z de la tache lumineuse du galvanomètre sera proportionnel au déplacement y du spot lumineux sur les prismes, soit :

$$z = By.$$

Le coefficient de proportionnalité B caractérise le grandissement photo-électrique de l'appareil.

La fig. 5 montre le double prisme, sur lequel tombe le rayon lumineux réfléchi par le miroir du pendule. Supposons que le spot lumineux se déplace de la quantité y , si le spot a une largeur a et une longueur b , alors l'expression pour le flux lumineux ϕ sera :

$$\phi_0 = ab E \quad (1)$$

où E est la luminosité du spot lumineux.

Désignons par ϕ_1 le flux lumineux qui tombe sur le premier photoélément et par ϕ_2 le flux lumineux qui tombe sur le second photoélément. Lors du déplacement du spot sur les prismes le flux lumineux commun ne change pas au total :

$$\phi_0 = \phi_1 + \phi_2 = \text{const.}$$

Le déplacement y du spot lumineux entraînera un changement des flux ϕ_1 et ϕ_2 qui deviendront :

$$\phi_{1y} = \frac{1}{2} ab E + bEy$$

et

$$\phi_{2y} = \frac{1}{2} ab E - bEy$$

il s'ensuit que la différence des flux sera :

$$\phi_{1y} - \phi_{2y} = \Delta\phi = 2bEy \quad (2)$$

Le changement de flux lumineux $\Delta\phi$ crée dans le galvanomètre un courant d'autant plus grand, que la luminosité E et la longueur b du spot lumineux sont plus grands. Ainsi la sensibilité ne dépend pas de la largeur a du spot. En agrandissant la largeur du spot, on élargit seulement le diapason dynamique de l'appareil (cf. fig. 6).

La fig. 6 montre dans une échelle logarithmique la dépendance entre la force photoélectromotrice et l'intensité V_f du flux lumineux sur le photoélément. Cette dépendance garde sa forme linéaire dans un large intervalle (jusque 110 μm). Dans notre cas le flux lumineux ne dépasse pas 0,1 μm , on peut donc escompter que :

$$\Delta V_f = \eta_V \Delta\phi, \quad (3)$$

où η_V est la sensibilité intégrale du photoélément exprimée en tension.

Lors d'une variation du flux lumineux, la résistance interne du photoélément change peu, aussi dans le galvanomètre, I_g change principalement en fonction de la force électromotrice.

La fig. 7 montre le schéma d'équivalence du système galvanomètre et photoéléments : les photoéléments sont remplacés par les sources électromotrices de force e_1 et e_2 .

En appliquant les lois de Kirkhoff on peut écrire 3 équations :

$$\begin{aligned} - I_1 + I_2 + I_g &= 0, \\ e_1 - I_2 R_2 + e_2 - R_1 I_1 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$e_2 - I_g R_g + I_2 R_2 = 0$$

où I_g est le courant dans le galvanomètre, R_g - la résistance du galvanomètre, R_1 et R_2 les résistances du 1^{er} et du 2^{ème} photoélément.

De ces équations il est facile de déduire l'expression pour le courant du galvanomètre :

$$I_g = \frac{e_1 R_1 - e_2 R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_g + R_2 R_g} \quad (5)$$

Si $R_1 = R_2 = R_f$ on obtient l'expression simple pour le courant dans le galvanomètre

$$I_g = \frac{e_1 - e_2}{2R_g + R_f} \quad (6)$$

Substituons dans l'expression (6) la différence de tension sur les photoéléments d'après les formules (3) et (2), on obtient finalement pour le courant du galvanomètre :

$$I_g = \frac{2\eta_v bE}{2R_g + R_f} y \quad (7)$$

La déviation du spot lumineux du galvanomètre sur le papier photographique est proportionnelle au courant dans la bobine du galvanomètre :

$$z = S_i I_g \quad (8)$$

où S_i est la sensibilité du galvanomètre par rapport au courant.

Substituant l'expression I_g en fonction des équations (7) et (8) il vient :

$$z = \frac{2S_i \eta bE}{2R_g + R_f} y \quad (9)$$

Ainsi le déplacement du spot sur le papier photographique sera proportionnel au déplacement du spot lumineux dans le prisme

$$z = By$$

Le coefficient de proportionnalité - grandissement photo-électrique du clinomètre - sera :

$$B = \frac{2S_i \eta bE}{2R_g + R_f} \quad (10)$$

Le grandissement photoélectrique de l'appareil dépend de multiples paramètres. Il est d'autant plus grand, que la sensibilité du galvanomètre et des photoéléments est plus poussée et il est proportionnel à la longueur du spot sur le prisme et à sa luminescence. L'accroissement de la résistance dans les circuits photoéléments-galvanomètre, diminue le grandissement photoélectrique de l'appareil.

Les photoéléments au sulfure d'argent Ag_2S - Y 10 élaborés par les physiciens Ukrainiens [2, 3, 4], utilisés avec la lampe à incandescence 0,4 μm et avec le galvanomètre M21/2 permettent d'obtenir un grandissement photoélectrique atteignant 10.000 avec un appareil de dimensions 20 x 30 x 20 cm.

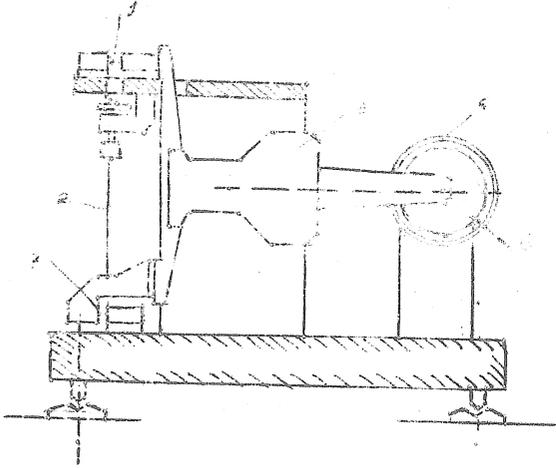


Fig. 1. Construction du pendule horizontal.

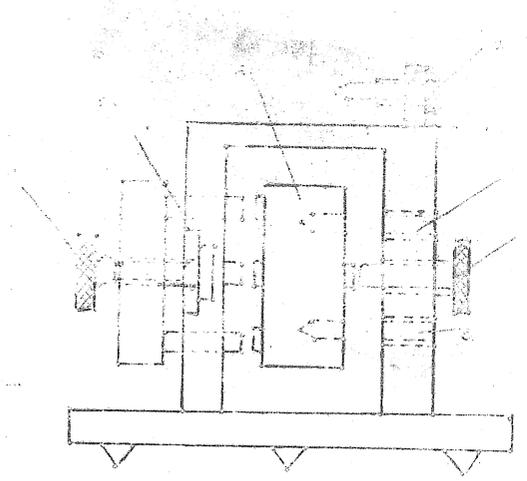


Fig. 2. Système d'arrêt du pendule horizontal.

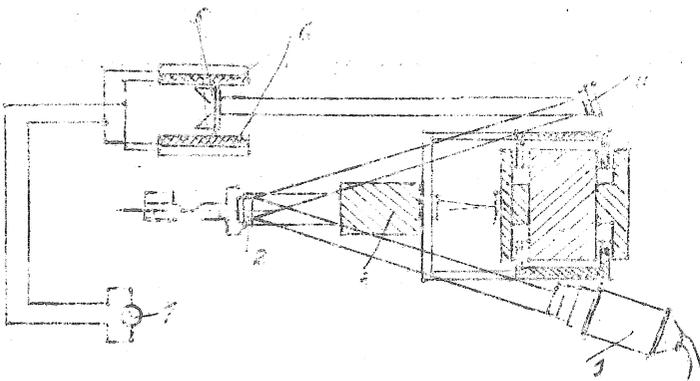


Fig. 4. Schéma optique et électrique du clinomètre.

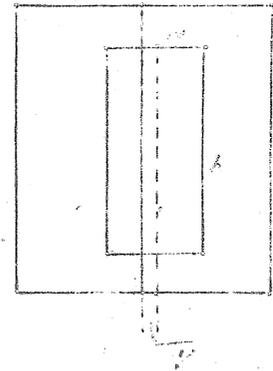


Fig. 5. Partage du rayon lumineux dans le prisme.

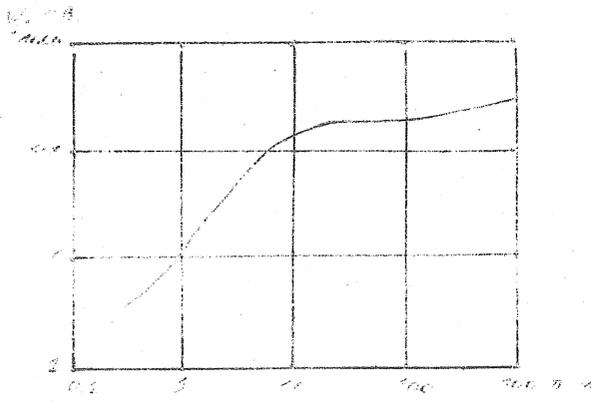


Fig. 6. Graphique de la dépendance entre la force électromotrice et le flux lumineux.

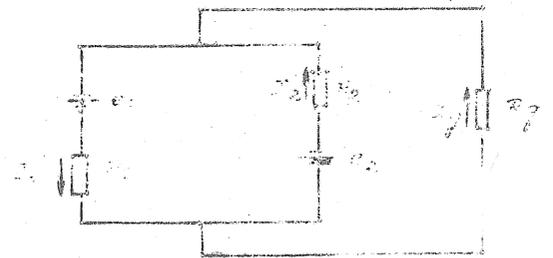


Fig. 7. Schéma d'équivalence de l'introduction des photoéléments.

2. La détermination de la sensibilité du clinomètre.

Pour l'étude des enregistrements des inclinaisons on mesure chaque heure des ordonnées y . Pour passer de l'ordonnée y à l'angle d'inclinaison ψ par des enregistrements optiques, on se sert de l'équation suivante qui lie la grandeur de l'ordonnée à l'enregistrement de l'angle d'inclinaison :

$$y = \frac{2 Ag \psi}{L_o n^2} \quad (1)$$

ou bien

$$y = C \psi \quad (2)$$

où la sensibilité de l'optique du clinomètre est

$$C = \frac{2 Ag}{L_o n^2} \quad (3)$$

A est ici le levier optique, L_o est la longueur réduite du pendule, g est l'accélération de la pesanteur et n est la fréquence d'oscillation du pendule.

Toutes les grandeurs dans le 2^{ème} membre de l'équation (3) se déterminent facilement. Toutefois elles ne demeurent pas toutes rigoureusement constantes pendant toute la durée des observations. Le pendule possède une période propre d'oscillation qu'on ne peut considérer comme une grandeur constante. A cause de l'emplacement du pendule et de l'imperfection de la suspension du balancier la période propre d'oscillation du balancier varie dans le temps. Cela est particulièrement sensible pour de grandes périodes c'est-à-dire pour de petits angles i d'inclinaison de l'axe de rotation du pendule par rapport à la verticale. C'est pourquoi on mesure régulièrement la période du pendule et la sensibilité du clinomètre peut ainsi être corrigée.

L'enregistrement photo-électrique apporte encore un paramètre supplémentaire d'instabilité dans la sensibilité du clinomètre. La sensibilité des photoéléments et l'intensité d'illumination de ces photoéléments varient dans le temps, quoique très peu, c'est pourquoi dans le cas d'enregistrements photo-électriques, la sensibilité de l'instrument est contrôlée plus souvent que dans le cas d'enregistrements

optiques. Pour le contrôle de la sensibilité du clinomètre au moyen d'enregistrements photo-électriques le pendule est pourvu de solénoïdes. En injectant dans le solénoïde pendant un instant un courant d'intensité connue, une impulsion s'inscrit sur la pellicule, car les branchements et débranchements de courant agissent sur le galvanomètre.

L'impulsion de courant ainsi enregistrée par le clinomètre, permet d'observer la régularité de fonctionnement de l'instrument. En mesurant la grandeur de l'impulsion enregistrée et connaissant l'intensité du courant, il est facile de déterminer la sensibilité du clinomètre, si on connaît le rapport de sensibilité instrumental du clinomètre à l'inclinaison et au courant.

La déviation du galvanomètre z dans le cas des enregistrements photo-électriques des clinomètres est, comme il a été montré plus haut proportionnelle au déplacement du spot lumineux sur les prismes placés devant les photoéléments c.à.d.

$$z = By \quad (4)$$

où B est le grandissement photo-électrique de l'instrument dépendant essentiellement des constantes des galvanomètres et des paramètres photo-électriques du schéma.

Des équations (2) et (4) il s'ensuit que

$$z = CB \psi \quad (5)$$

où

$$z = K \psi \quad (6)$$

La sensibilité du clinomètre K s'exprime en millimètres par seconde d'arc d'inclinaison et dépend des constantes du pendule horizontal, du levier optique, de la sensibilité et de la résistance des photoéléments et du galvanomètre. Déterminer ce coefficient, mesurer les constantes de l'instrument, est un problème assez ardu. Il est important de déterminer très exactement ce coefficient indirectement, à savoir : déterminer la sensibilité K_1 du clinomètre au courant, et ensuite

$$\frac{K}{K_1} = I_e$$

Connaissant K_1 et I_0 on peut trouver $K = I_0 K_1$. Pour cela il faut distinguer le fonctionnement séparé du clinomètre et du galvanomètre. L'équation du mouvement du pendule horizontal appliquée au pendule s'écrit comme suit :

$$\ddot{\theta} + 2 \xi \dot{\theta} + n^2 \theta = \frac{g}{L_0} \sin \psi \quad (7)$$

Nous écrivons d'autre part l'équation du mouvement du pendule sous l'influence du courant dans le solénoïde, attaché au pendule à la distance L de l'axe de rotation du pendule :

$$\ddot{\theta} + 2 \xi \dot{\theta} + n^2 \theta = \frac{2\pi r NHL}{ML_0} I \quad (8)$$

Ici r est le rayon du solénoïde, N est le nombre de spires, H est l'intensité du champ magnétique, M est la masse du pendule, L_0 la longueur réduite, I est le courant dans le solénoïde.

Les équations (7) et (8) diffèrent seulement par le second membre.

Supposons que la longueur d'une spire à l'intérieur des solénoïdes soit $a = 2\pi r$ et que les angles d'inclinaison ψ soient petits c.à.d. que $\sin \psi = \psi$, alors de la formule (7) dans le cas de phénomènes lents (cas où l'on peut poser $\ddot{\theta} = 0$ et $\dot{\theta} = 0$) nous obtiendrons

$$\theta = \frac{g}{L_0 n^2} \psi$$

tandis que de (8) nous obtenons l'angle de déviation du pendule θ_1 sous l'action du courant I :

$$\theta_1 = \frac{a NHL}{ML_0 n^2} I$$

Pour les enregistrements optiques de déviation du spot lumineux A est le levier optique, d'où

$$y = \frac{2 Ag}{L_0 n^2} \psi = C \psi \quad (9)$$

tandis que la déviation du pendule sous l'action du courant I est :

$$y_i = \frac{2Aa\text{NHL}}{\text{ML}_o^2 n^2} I = C_i I \quad (10)$$

A partir de là on détermine facilement le rapport de sensibilité du pendule à l'inclinaison et au courant en posant $y = y_i$

$$\frac{C}{C_i} = \frac{I}{\psi} = \frac{g\text{ML}_o}{a\text{NHL}} \quad (11)$$

Dans le cas des enregistrements photo-électriques le second membre des équations (9) et (10) contiendra le facteur B de grandissement photo-électrique.

Le déplacement du spot lumineux du galvanomètre sur le papier sera :

$$z = \frac{2 Ag}{L_o n^2} B \psi = CB \psi \quad (12)$$

mais le déplacement dû au courant I est :

$$z_i = \frac{2Aa\text{NHL}}{\text{ML}_o^2 n^2} BI = C_i BI \quad (13)$$

Pour les égalités de z et z_i on peut écrire :

$$\frac{K}{K_i} = \frac{I}{\psi} = I_o = \frac{g\text{ML}_o}{a\text{NHL}} \quad (14)$$

De cette façon, connaissant I_o , on détermine facilement les coefficients C et K. Ils seront :

$$C = C_i I_o, \quad (15)$$

$$K = K_i I_o \quad (16)$$

Nous appelons I_o constante électrodynamique du clinomètre. Comme on l'a montré plus haut :

$$I_o = \frac{g\text{ML}_o}{a\text{NHL}} \quad (17)$$

On constate aussitôt que dans le dénominateur du second membre de cette égalité se trouve la grandeur $C_i = aNHL$, qui dans les séismomètres se nomme constante électrodynamique du séismographe. Ainsi, la constante électrodynamique du clinomètre se manifeste par le rapport du moment de la pesanteur $M_g = gML_0$ à un moment de force électromagnétique : $C_i = aNHL$.

La constante électrodynamique du clinomètre est une constante fondamentale. Elle dépend de grandeurs qui varient peu dans le temps. L'accélération de la pesanteur ne varie pratiquement pas dans le temps. Dans le cas de changement d'endroit d'observation, il est aisé d'introduire une correction au calcul des variations g . Le nombre de spires du solénoïde, leur longueur à l'intérieur de l'entrefer et le rayon du solénoïde sont aussi des grandeurs constantes. La tension du champ magnétique est la moins constante dans le temps. Ces derniers temps, pour la construction des appareils on s'accommode d'une aimantation à de hautes températures et aussi d'aimants vieux. Ceci permet d'obtenir des aimants qui ont des champs d'intensité très stable dans le temps.

Si la précision de la détermination de la calibration du coefficient doit être élevée (1 - 0,1 %), alors il est indispensable de déterminer de temps en temps la constante I_0 ou de contrôler l'intensité du champ magnétique.

3. Détermination de la constante électrodynamique du clinomètre.

L'égalité (14) démontre que la constante électrodynamique du clinomètre I_0 constitue le rapport des sensibilités du pendule horizontal par rapport à l'inclinaison et par rapport au courant. Cette constante peut être déterminée si on connaît I et ψ pour un même angle de déviation du pendule θ , ou pour un même déplacement y du spot lumineux du pendule, ou encore pour un même déplacement z du spot lumineux du galvanomètre.

Etant donné que dans la mesure d'inclinaisons on a affaire à de petits angles il est plus facile d'exprimer I_0 , non pas dans les unités habituelles d'ampère par radian (a/rad) mais en microampères par seconde d'arc ($\mu\text{a}/\text{sec. arc}$).

Pour déterminer

$$I_0 = \frac{I}{\psi} \quad (18)$$

il est indispensable de pouvoir mesurer un courant s'élevant à plusieurs microampères et un angle ψ s'élevant à plusieurs dizaines de secondes d'arc. La mesure du courant à 0,1 % près ne présente pas de difficulté, par contre la mesure des petits angles avec une telle exactitude n'est pas un problème simple. Nous citons deux procédés de détermination de I_0 .

1. Pour mesurer de petits angles on peut se servir du pendule horizontal même : il faut donner au clinomètre un angle arbitraire ψ , mesurer la déviation y par un procédé optique et ensuite ramener le pendule, par le courant, à la position nulle.

Avec ce procédé, une erreur de mesure dépendrait non seulement de la détermination de y mais aussi de celle du coefficient :

$$C = \frac{2 Ag}{L_0 n^2}$$

L'erreur sur la mesure d'angle ψ provient des erreurs de mesure des quatre grandeurs : y , L_0 , n et A . En ce qui concerne la mesure de L_0 , on la détermine par la période propre du pendule pour divers angles d'inclinaison i de l'axe de rotation du pendule sur la verticale. De cette façon, les erreurs dans le cas de la détermination de ψ dépendent de la détermination de cinq grandeurs. Pour la précision de la détermination de ψ des marques caractérisant la déviation du pendule ont été inscrites sur la pellicule, et néanmoins la précision dans la détermination de I_0 ne permet pas d'obtenir mieux que 3 %.

Dans la table 1 on trouve les résultats de la détermination de I_0 pour deux appareils.

Les plus grands écarts sont en moyenne 5,6 et 4,7 %.

Table 1.

Détermination de la constante électrodynamique I_0 à partir d'un angle arbitraire ψ
d'inclinaison du pendule.
 (μ /sec. arc)

N° de la mesure	Clinomètre N° 11196	Clinomètre N° 11195
1	9,88	7,8
2	10,7	7,8
3	10,1	8,4
4	10,0	8,3
5	10,0	8,5
Moyenne	10,14	8,18
Ecart par rapport à la moyenne	5,6 %	4,7 %

Table 2.

Détermination de la constante électrodynamique I_0 à l'aide d'une plate-forme.
 (μ /sec. arc.)

N° de la mesure	Clinomètre N° 3067	Clinomètre N° 3060	Clinomètre N° 3069
1	2,763	2,132	3,063
2	2,711	2,133	3,078
3	2,757	2,146	0,068
4	2,760	2,132	3,084
5	2,711	2,132	3,096
6	2,767	2,146	3,072
7	2,764	2,129	3,088
8	2,768	2,129	3,088
9	-	2,144	3,096
Moyenne	2,765	2,136	3,078
Ecart maximum par rapport à la moyenne	0,2 %	0,5 %	0,6 %

2. Dans le but d'avoir une extrême précision de mesure de la constante électrodynamique du clinomètre on a aménagé des plate-formes spéciales qui seront décrites dans le paragraphe suivant.

Nous indiquons ici les résultats de la mesure de I_0 sur plate-forme pour trois appareils (Table 2). Comme on le voit dans la table, les écarts maxima par rapport à la moyenne de la valeur de I_0 ne dépassent pas 0,6 %. L'erreur quadratique moyenne sera encore moindre. La comparaison des deux plate-formes a donné une divergence de I_0 de 0,2 %. Ainsi, on peut dire avec certitude que l'erreur systématique, pour le calcul des rapports enregistré ne dépasse pas 1 %.

4. Contrôle de la sensibilité du clinomètre.

I_0 étant déterminé, il est facile de contrôler la sensibilité du clinomètre. Si avant ou après le remplacement de la pellicule on lance dans la bobine du clinomètre, à un instant donné le courant I d'intensité connue. Alors une impulsion s'inscrira sur la pellicule et d'après cette impulsion il est facile de calculer Y_i , déplacement du spot lumineux dans le cas de l'enregistrement optique, ou Z_i , déplacement du spot lumineux sur la pellicule dans le cas de l'enregistrement photo-électrique. La mesure des impulsions sur la pellicule permet de déterminer la sensibilité de l'appareil au courant :

$$C_i = \frac{Y_i}{I}$$

dans le cas d'enregistrements optiques et

$$K_i = \frac{Z_i}{I}$$

dans le cas d'enregistrements photo-électriques.

En introduisant la grandeur connue I_0 dans les expressions (11) et (14), nous obtenons la sensibilité du clinomètre optique

$$C = Y_i \frac{I_o}{I} \quad (19)$$

et la sensibilité du clinomètre photo-électrique :

$$K = Z_i \frac{I_o}{I} \quad (20)$$

Il est préférable de choisir à l'avance pour le rapport I_o/I un chiffre rond, par exemple 10 ou 50, en fonction de la sensibilité du clinomètre.

La figure 8 montre l'enregistrement des inclinaisons effectué avec le clinomètre équipé d'enregistrement photo-électrique. Les impulsions sont données d'abord par l'observateur à la mise en marche et ensuite à l'arrêt de l'enregistrement.

A.V. Horomskii proposa de donner des impulsions automatiques sur la pellicule à partir de l'horloge. Le contact se fixe sur l'aiguille des heures et il coupe le courant dans la bobine du clinomètre deux fois en vingt-quatre heures. La figure 8 montre un enregistrement réalisé par ce moyen automatique de donner l'impulsion.

Les impulsions de courant permettent non seulement de contrôler la sensibilité de l'appareil mais de surveiller l'état de la batterie qui sert à l'éclairage des photoéléments, la sensibilité des photoéléments et d'autres défauts du clinomètre qui pourraient surgir pendant le travail. Ce procédé de détermination et de contrôle de la sensibilité est particulièrement indispensable pendant la mesure des inclinaisons dues aux marées terrestres, quand on cherche une grande précision dans la mesure des petites inclinaisons de l'écorce terrestre.

5. Caractéristique de fréquence de l'appareil.

Le pendule horizontal s'emploie aussi bien pour les enregistrements séismiques (séismographe) que pour les enregistrements d'inclinaisons (clinomètre). Dans le séismographe on emploie la force d'inertie de la masse propre mais dans le clinomètre ce sont ses propres forces de gravitation. Le plan sur lequel est installé le pendule se déplace au moment du passage d'une onde séismique non seulement selon les trois coordonnées mais encore opère des rotations autour des trois axes de coordonnées.

La rotation autour des axes horizontaux provoque des inclinaisons des pendules, habituellement disposés dans deux azimuts : Nord-Sud et Est-Ouest. Au moment des enregistrements d'ondes séismiques de période de 20 secondes et moins, les inclinaisons du plan horizontal produisent sur le pendule un effet si faible qu'on n'a pas à le prendre en considération.

Pour les enregistrements d'ondes séismiques à longue période, de l'ordre de 3 heures on ne peut pas considérer séparément le pendule horizontal en tant que séismographe et en tant que clinomètre.

Pour distinguer le séismographe, où les inclinaisons du sol ne sont pas prises en considération, du clinomètre où l'on néglige les forces d'inertie de la masse du pendule, on enregistre simultanément ici l'effet du déplacement et des inclinaisons du sol sur le pendule.

L'équation du mouvement du pendule sans enregistrement de l'inclinaison du plan sur lequel il est installé est :

$$\ddot{y} + 2\epsilon \dot{y} + n^2 y = -V\ddot{x}, \quad (1)$$

où x est le mouvement du sol, y est le déplacement du spot lumineux sur le papier photographique, ϵ est la constante d'amortissement, n est la pulsation (relative à la fréquence propre) et V est le grandissement normal du séismographe.

Le grandissement du séismographe U_s , dépendant de la fréquence (dans le cas d'ondes harmoniques) aura une expression simple :

$$U_s = \frac{V\omega^2}{\sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4\epsilon^2\omega^2}} \quad (2)$$

L'équation du mouvement du pendule sous l'effet de la force provenant des inclinaisons du plan (pour les cas d'ondes harmoniques) a un second membre différent de celui de (1)

$$\ddot{y} + 2\epsilon \dot{y} + n^2 y = -V(\ddot{x} + g\psi),$$

où ψ est l'angle d'inclinaison du plan horizontal dans le cas du passage d'une onde, g est l'accélération de la pesanteur à l'endroit de l'observation.

Pour le déplacement vertical provoqué Z, on peut écrire :

$$Z = Z_0 \sin \left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi \right),$$

où λ est la longueur d'onde, φ est la différence de phase.

De ceci il est facile d'obtenir l'expression de l'angle d'inclinaison :

$$\psi = \frac{dz}{dx} = \frac{Z_0 \omega}{v} \cos (\omega t + \varphi),$$

où v est la vitesse de propagation de l'onde.

Nous écrivons $Z_0 = Kg$. Alors l'équation du mouvement du séismoclinomètre sera

$$\ddot{y} + 2\varepsilon \dot{y} + n^2 y = -v \left[-\omega^2 x_0 \cos(\omega t + \varphi) + Kg \frac{\omega}{v} \cos(\omega t + \varphi) \right],$$

il s'ensuit que la caractéristique de fréquence du séismoclinomètre U_{sc} sera la suivante :

$$U_{sc} = \frac{-v(\omega^2 + \frac{Kg\omega}{v})}{\sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega^2}}$$

La caractéristique de fréquence du séismoclinomètre se distingue de la caractéristique de fréquence du séismographe en ce que dans le numérateur se trouve la somme de deux membres, dépendant de la fréquence.

Il n'est pas difficile de remarquer que les termes dans le numérateur sont égaux pour les longues périodes forcées d'oscillation T_p , à savoir :

$$T_p = \frac{2\pi v}{Kg}$$

Pour les ondes superficielles, se propageant avec la vitesse $v = 4.500$ m/sec, et $K = 1,5$, nous aurons $T_p = 1800$ sec. c'est-à-dire que dans le cas des ondes superficielles de période d'une demi-heure, le pendule travaillera comme clinomètre et comme séismographe en même temps. Le grandissement du pendule sur ces fréquences sera deux fois plus grand que le grandissement déterminé par la caractéristique de fréquence du séismographe.

A la fig. 9 est porté en graphique un tableau de fréquence de la caractéristique de l'appareil.

Selon l'axe des abscisses on a porté les périodes de l'onde exprimée en secondes dans une échelle logarithmique et selon l'axe des ordonnées de grandissement de l'appareil dans une échelle logarithmique.

La courbe 1 représente la caractéristique de fréquence du séismographe par des enregistrements optiques pour lequel la période du pendule est de 5 secondes et le grandissement normal 10.000. La caractéristique est calculée pour ce cas, quand la constante d'amortissement $\xi = n$.

Dans le cas du passage d'ondes séismiques pour peu que le pendule réagisse sur l'inclinaison, son grandissement se présenterait suivant la courbe 2. Dans le cas de l'emploi de l'enregistrement photo-électrique avec le galvanomètre M 21/2, ayant une période d'oscillation propre $T_g = 20$ sec et $\xi_g = n_g$, la courbe 2 se change en 2' - 2.

Dans le cas général de l'enregistrement d'inclinaison et de déplacement du pendule, la courbe de grandissement sera 1 - 3'.

Avec l'emploi du galvanomètre de période de 23 sec. dans une échelle de périodes d'ondes séismiques de l'ordre de moins de 20 sec., le grandissement diminue fortement comme le montre la courbe 3' - 3.

La comparaison des courbes 1, 2 et 3 montre que pour les ondes séismiques de période de 100 secondes et moins on peut ne pas tenir compte de l'inclinaison. L'erreur dans les calculs de grandissement sera moins de 5 %. Dans l'échelle de fréquence de 100 secondes jusqu'à 3 heures, il est indispensable de considérer le pendule horizontal comme un séismoclinomètre et enfin, pour de plus longues périodes le pendule horizontal se comporte comme un clinomètre.

Considérons maintenant le grandissement du pendule avec des enregistrements photo-électriques dans le cas de la variation des angles d'inclinaison que soit l'origine de ces inclinaisons : élastique, thermique ou dues à des déformations locales du sol.

Admettons que les inclinaisons soient données à l'appareil d'après la loi harmonique :

$$\psi = \psi_0 \sin (\omega t + \varphi).$$

L'équation du mouvement du pendule dans ce cas sera :

$$\ddot{y} + 2\xi_s \dot{y} + n_s^2 y = Vg \psi_0 \sin (\omega t + \varphi).$$

L'équation de la caractéristique de fréquence U_c sera :

$$U_c = \frac{Vg}{\sqrt{(n_s^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_s \omega^2}}$$

Si l'enregistrement s'effectue au moyen du photoélément et du galvanomètre, alors la caractéristique de fréquence U_{cf} dépendra également des constantes du galvanomètre :

$$U_{cf} = \frac{Vg B}{\sqrt{(n_s^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_s \omega^2} \cdot \sqrt{(n_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g \omega^2}}$$

où B est le grandissement photo-électrique et n_g est la fréquence d'oscillations propres et ξ_g les amortissements du galvanomètre.

La caractéristique de fréquence de ce clinomètre est présentée sur la figure 10. Ici $T_s = 10$ secondes, $T_g = 20$ secondes, $\xi_s = n_s$ et $\xi_g = n_g$.

Dans le cas de périodes de 1 à 10 secondes le grandissement du clinomètre croît brusquement et ensuite reste constant. Les altérations dans le cas de périodes de 100 à 1.000 secondes, bien qu'elles subsistent, diminuent rapidement lorsqu'augmente la période des oscillations forcées.

6. Caractéristique de phase du clinomètre.

Dans le cas des observations d'inclinaisons de même que dans le cas des enregistrements de séismes, il est très important d'amortir les oscillations propres du pendule et du galvanomètre, sans quoi l'enregistrement sera perturbé par divers microséismes météorologiques et industriels. Par l'amortissement on écarte les phénomènes indésirables de résonance, mais on augmente les altérations de phase. Pour l'estimation des altérations de phase, considérons la caractéristique de phase de l'appareil. Les équations de la caractéristique de phase du pendule et du galvanomètre ont tout à fait le même aspect.

Le déphasage que donne le pendule, s'exprime en fonction des constantes du pendule comme suit :

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{-2 \epsilon_s \omega}{n_s^2 - \omega^2}, \quad (1)$$

supposant $\frac{\omega}{n_s} = U_s$ et $\epsilon_s = n_s$, nous obtenons

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{-2U_s}{1 - U_s^2} \quad (2)$$

L'expression pour l'angle de déphasage que donne le galvanomètre est analogue à la précédente :

$$\operatorname{tg} \alpha_g = \frac{-2 \epsilon_g \omega}{n_g^2 - \omega^2} \quad (3)$$

Supposant $\frac{\omega}{n_g} = U_g$ et $\epsilon_g = n_g$, nous obtenons

$$\operatorname{tg} \alpha_g = \frac{-2U_g}{1 - U_g^2} \quad (4)$$

Le déphasage commun s'exprimera comme la somme des déphasages introduits par le pendule et le galvanomètre :

$$\alpha_{s+g} = \alpha_s + \alpha_g \quad (5)$$

Calculons la caractéristique de phase pour l'appareil avec les constantes suivantes : $T_s = 5$ secondes, $\xi_s = n_s$, $T_g = 20$ secondes et $\xi_g = n_g$.

Dans la table 3 on donne les angles de déphasage en degrés, partant des basses fréquences des ondes diurnes et jusqu'à la fréquence de 1 sec. La seconde ligne correspond aux ondes semi-diurnes.

Table 3.

Déphasages α_s , α_g et α_{s+g} (en secondes) pour les constantes de l'appareil $T_s = 5$ secondes, $T_g = 20$ secondes, $\xi_s = n_s$ et $\xi_g = n_g$ (T_p est la période d'oscillations forcées).

T_p	U_s	U_g	α_s	α_g	α_{s+g}
80000	16000	4000	0,009	0,03	0,039
40000	8000	2000	0,018	0,06	0,078
20000	4000	1000	0,036	0,12	0,156
10000	2000	500	0,072	0,24	0,296
5000	1000	250	0,144	0,48	0,524
2500	500	125	0,29	0,96	1,25
1000	200	50	0,78	1,92	2,70
500	100	25	0,58	5,00	5,56
250	50	12,5	3,00	10,0	13,0
100	20	5,0	6,00	23	29
50	10	2,5	11,0	44	55
40	8	2,0	14	50	64
30	6	1,5	18	70	88
25	5	1,25	22	80	102
20	4	1,00	28	90	118
15	3	0,75	37	103	140
10	2	0,5	53	137	190
8	1,6	0,4	64	146	210
6	1,2	0,3	80	156	236
5	1,0	0,25	90	163	253
4	0,8	0,2	103	167	270
3	0,6	0,15	107	173	280
2,5	0,5	0,12	127	176	303
1	0,2	0,05	167	184	...

Les altérations croissent avec l'augmentation de la fréquence, d'abord en proportion de celle-ci, ensuite la croissance se ralentit.

Dans le cas de mesure des déphasages des ondes de marées diurnes, les erreurs données par l'appareil, pour les phases de plus de 3° sont moins de 1 %, pour les phases de moins de 3° les erreurs sont supérieures à 1 %. Pour les ondes semi-diurnes, l'erreur de mesure à 1 % près s'obtient pour une mesure de déphasages de 6° . La dépendance des erreurs relatives à la mesure du déphasage des ondes de marées diurnes et semi-diurnes est représentée dans la table 4. Ici les erreurs données, s'obtiennent par des mesures de déphasages de 1° jusqu'à 10° pour des ondes diurnes et semi-diurnes.

T a b l e 4.

Erreurs relatives dans la détermination des phases d'ondes de marées.

Déphasage en degrés	Erreur relative, %	
	Ondes semi-diurnes	Ondes diurnes
1	6,8	3,4
2	3,4	1,7
3	2,3	1,1
4	1,7	0,85
5	1,3	0,7
6	1,0	0,6
7	0,9	0,5
8	0,85	0,42
9	0,7	0,3
10	0,6	0,2

Les altérations de phases s'accroissent avec l'augmentation de la fréquence pour les enregistrements des inclinaisons.

Dans le cas de fréquences d'oscillations forcées et de la fréquence d'oscillations propres elles-mêmes, les altérations atteignent 90° et pour les hautes fréquences 180° et plus.

En augmentant la sensibilité du clinomètre, l'appareil devient inévitablement sensible aux oscillations séismiques qui réduisent fortement la précision de la mesure et constituent un obstacle pour l'enregistrement des inclinaisons.

K.K. Zapolski a montré que la grandeur du déplacement du sol provenant des perturbations dues au vent ou aux vibrations industrielles s'accroît avec la période d'oscillation du sol suivant une loi linéaire.

Ainsi, la sensibilité du clinomètre étant accrue, il est indispensable de réduire en même temps sa sensibilité en tant que séismographe. On peut le faire par deux procédés : par l'accroissement de la période d'oscillation propre du galvanomètre ou par l'accroissement de l'amortissement du galvanomètre et du pendule. L'un et l'autre procédés amènent des altérations d'amplitude et de phases dans l'enregistrement des inclinaisons. Les caractéristiques de fréquence permettent non seulement d'évaluer les altérations mais en cas de besoin d'en tenir compte.

Dans le cas d'accroissement de la période du galvanomètre, la sensibilité du clinomètre, pour des microséismes de période moindre que celle du galvanomètre, diminue proportionnellement au carré de la période du galvanomètre. L'augmentation des altérations de phase croît pour celui-ci proportionnellement au premier degré de la période du galvanomètre pour des enregistrements d'ondes de marées. Ainsi, pour obtenir une grande sensibilité du clinomètre avec des altérations minima, il est préférable de prendre le galvanomètre à grande période et de le placer à la limite d'apériodicité, plutôt que d'accroître son amortissement et de réduire ainsi la sensibilité pour des perturbations de haute fréquence.

7. La plate-forme pour les étalonnages des clinomètres.

L'étalonnage des clinomètres consiste à déterminer la constante électrodynamique de l'appareil I_0 . Comme on l'a montré plus haut, pour la détermination de I_0 il est indispensable de mesurer les angles ψ et de ramener le pendule dans une position d'équilibre par un courant I .

Pour l'examen d'un clinomètre, la plate-forme usuellement appelée "examineur" est équipée de niveaux exacts. La plate-forme pour l'étalonnage des clinomètres est aménagée selon le principe d'un examinateur de niveau. La plaque métallique rigide est posée sur un couteau (fig. 11).

En soulevant l'extrémité B de la plate-forme par une vis micrométrique précise et en mesurant la grandeur du déplacement, à l'aide d'un microscope, nous

obtenons l'angle d'inclinaison ψ :

$$\psi = \frac{l}{L},$$

où l est la grandeur du déplacement de l'extrémité B et L est la distance de AB. Il est facile de mesurer avec la précision de 0,1 mm la distance AB. Ainsi, la base de la plate-forme ayant une longueur de 1 mètre on peut atteindre une précision de 0,01 %. La distance l , c'est-à-dire le déplacement de l'extrémité du pied de la plate-forme dans la verticale, se mesure au moyen d'un microscope. L'appareil employé pour exécuter les mesures est un micromètre optique. Le micromètre optique permet de mesurer les longueurs avec une précision jusqu'à 0,2 - 0,3 micron. Pour une base de plate-forme de 1.000 mm, l'erreur de mesure d'angle par cet appareil n'atteint pas plus de 0,04 secondes d'arc.

L'erreur relative des mesures pour un angle de 4 secondes d'arc ne dépasse pas 1 %, pour un angle de 40 secondes d'arcs l'erreur n'est pas plus de 0,1 % et pour un angle de 400 secondes d'arc pas plus de 0,01 %.

La précision du micromètre optique de 0,2 - 0,3 micron caractérise les mesures de longueur. Pour la mesure d'angles, le trait ne se place pas arbitrairement sur l'échelle mais coïncide avec la graduation de l'échelle, c'est pourquoi la précision escomptée de l'élévation s'accroît jusqu'à 0,1 micron.

La détermination de I_0 s'effectue dans l'ordre suivant : on place le clinomètre sur la plate-forme et par les vis calantes on amène le pendule à zéro. On observe le zéro de l'appareil au galvanomètre, en branchant le câble du photoélément. Ensuite à l'aide de la vis C on donne à la plate-forme l'angle ψ . On lance le courant I dans la bobine du clinomètre, ce courant ramène à nouveau le clinomètre à zéro. Le courant s'adapte à l'aide d'une boîte de résistances comportant six décades.

Connaissant les résistances de la boîte et de la bobine et mesurant la tension par un voltmètre précis, il est facile de déterminer le courant. Pour les étalonnages des clinomètres, on peut prendre des angles ψ atteignant jusqu'à 500 secondes.

Dans les limites de -500 jusqu'à + 500 secondes, la dépendance de I et de l'angle ψ reste linéaire avec une précision de 0,1 %. La figure 12 représente le schéma de la mesure du courant I pour les déterminations de I_0 . La tension V se

mesure par un voltmètre dont la classe de précision est 0,1. L'élément a une tension d'un peu moins de 1,5 volt. Le voltmètre a une échelle de 1,5 volt. Ainsi les mesures s'effectuent au bout de l'échelle. Le voltmètre a été fabriqué en 1936. En 1956, après vérification, la classe de précision a été maintenue c'est-à-dire que pendant 20 ans l'aimant s'est affaibli de moins de 0,1 %. Par conséquent, on peut admettre une précision dans la mesure du voltage de 0,1 %.

La résistance de la bobine du clinomètre R_s se mesure avec la précision de 0,02 ohm. Pour les déterminations répétées de I_0 , la résistance se mesure chaque fois. La résistance de R_k est employée pour le réglage du courant, par lequel le pendule est ramené à zéro. Cette résistance comporte une boîte comportant six décades. La résistance du magasin peut se mesurer de 0,1 à 100,000 ohm. La vérification de la boîte à l'aide d'un pont d'une précision de 0,02 %, a montré que, au courant de l'année, les résistances se mesurent à moins de 0,01 %. Par conséquent, la précision escomptée de la résistance est d'un ordre plus haut que la mesure du voltage.

La table 5 présente un exemple de détermination de la constante électrodynamique I_0 sur la plate-forme pour l'appareil N° 64. Dans la première colonne de la table sont donnés les nombres de mesure, dans la seconde la tension de l'élément V , dans la troisième la résistance R_k , par laquelle se compense l'inclinaison.

Table 5.

Exemple de détermination de la constante électrodynamique sur la plate-forme.

Appareil N° 64, 11 mai 1959. $R_s = 56,81$ ohm.

N° de mesure	V	R_k	Moyenne R_k	$R_k + R_s$	φ seconde d'arc	$\frac{I}{\varphi} = I_0$	ΔI_0
1	1,436	5184	5189,4	5246,4	100	2,737	-0,007
2	1,436	5184					
3	1,436	5199					
1	1,436	2561	2559,0	2615,8	200	2,745	+0,001
2	1,436	2552					
3	1,436	2564					
1	1,435	1685,9	1682,3	1739,2	300	2,750	+0,006
2	1,435	1685,3					
3	1,435	1673,9					
1	1,435	1248,2	1248,9	1305,7	400	2,747	+0,003
2	1,435	1249,5					
3	1,435	1249,1					
1	1,433	988,9	989,1	1045,9	500	2,740	-0,004
2	1,433	988,4					
3	1,433	989,0					
Moyenne						2,744	$\pm 0,0025$
Erreurs relatives						$\pm 0,1\%$	

De ces trois valeurs des résistances de R_k on prend la moyenne. Dans la sixième colonne est indiqué l'angle d'inclinaison de la plate-forme et enfin, dans les septième et huitième colonnes les valeurs de la constante électrodynamique de I_0 et l'erreur absolue de mesures qui est l'écart de la moyenne de cinq mesures. L'erreur quadratique moyenne pour les mesures sur la plate-forme n'est que de 0,1 %.

La mesure du courant I pour des déterminations de constantes électrodynamique peut se faire à l'aide d'un élément normal. Ainsi la précision des mesures de courant peut encore augmenter.

La base de la plate-forme se mesure aussi avec une grande précision. La plus grande erreur dans les mesures de I_0 se produit dans les déterminations du déplacement du levier de la plate-forme c'est-à-dire pour des mesures de longueur l . La mesure de l est basée sur la graduation de l'échelle du micromètre optique.

Une erreur systématique pour les déterminations de l peut s'introduire non seulement par le calcul mais aussi par l'imprécision de la graduation de l'échelle du micromètre optique.

Pour donner une grande assurance aux déterminations de l , on a fait une seconde plate-forme de petit gabarit avec un autre micromètre optique. La base de la petite plate-forme L_2 est moindre que celle de la plate-forme L , dans le rapport de 2,5 à 1 : $L_2 = 400$ mm.

Les résultats de la comparaison sont donnés dans la table 6. On donne ici, dans la quatrième colonne les valeurs de I_0 pour les mesures sur la petite plate-forme pour des angles $\psi = 100$ secondes d'arc. Dans la cinquième colonne on donne les valeurs de I_0 de ces mêmes appareils obtenus par les mesures de I_0 sur la grande plate-forme pour ces mêmes angles. Les moyennes de 11 mesures donnent une différence qui ne dépasse pas 0,2 %. Cette erreur systématique est provoquée soit par la mesure imprécise de la base de la petite plate-forme, soit par l'imprécision des graduations de l'échelle du micromètre optique, soit par la combinaison de l'une et l'autre de ces erreurs de mesure ensemble. Comme la base de la grande plate-forme est mesurée plus exactement, on a surtout tenu compte des valeurs des constantes électrodynamiques de I_0 déterminées sur cette plate-forme.

Table 6.

Détermination des constantes électrodynamiques I_0 du clinomètre sur diverses plate-formes et pour divers angles

En 1959 date de la détermination	N° de l'appareil	Résistance des bobines de R_s	Petite plate-forme $\Psi = 100$ secondes d'arc	Grande plate-forme		N° des sections
				$\Psi = 100$ secondes d'arc	$\Psi = 500$ secondes d'arc	
20 avril	4558	136,1	2,432	2,427	2,430	2
21 avril	4559	136,8	2,260	2,262	2,264	2
21 avril	4559	136,0	2,256	2,269	2,264	1
22 avril	4562	133,8	2,455	2,441	2,445	2
23 avril	4562	134,4	2,456	2,440	2,443	1
24 avril	4561	136,1	2,405	2,402	2,400	2
24 avril	4561	136,1	2,406	2,400	2,401	1
28 avril	4560	136,6	2,512	2,512	2,514	2
28 avril	4560	136,3	2,515	2,509	2,514	1
6 mai	4558	136,1	2,433	2,422	2,422	2
7 mai	4558	134,8	2,455	2,445	2,450	1
Moyenne pour 11 mesures			2,417	2,412	2,413	
Différence				0,2 %	0,04 %	

Dans la sixième colonne de la table 6 on donne les résultats des mesures I_0 pour de grands angles. On a proposé pour la plate-forme un angle d'inclinaison $\Psi = 500$ secondes d'arc. La différence de I_0 suivant que l'on emploie les grands ou les petits angles n'est que de 0,04 %.

L'impulsion du courant au moment des observations ne dépasse pas 0,02 secondes d'arc. La constante électrodynamique se détermine dans les angles de 20 à 500 secondes d'arc, c'est pourquoi il est intéressant de contrôler la linéarité de la dépendance de $I = f(\Psi)$. Pour l'examen de cette question on a prévu un essai de détermination de I_0 : les angles d'inclinaison Ψ étaient pris de 10 à 500 secondes d'arc au commencement dans une direction et ensuite ces mêmes angles étaient pris dans une autre direction. Pour ramener le pendule la direction du courant

est changée au retour. Dans la table 7 on donne les résultats de ces mesures. Ici les angles d'inclinaison de la plate-forme se calculent d'une part pour les valeurs positives et d'autre part au moyen des valeurs négatives.

Table 7.

Linéarité de la dépendance de $I = f(\psi)$.

1 ^{ère} section			2 ^{ème} section		
ψ , seconde d'arc	I_0 , $\mu\text{a}/\text{seconde d'arc}$	Ecart de la moyenne, en %	ψ , seconde d'arc	I_0 , $\mu\text{a}/\text{seconde d'arc}$	Ecart de la moyenne, en %
500	2,405	+ 0,21	500	2,407	+ 0,17
400	2,405	+ 0,21	400	2,407	+ 0,17
300	2,403	+ 0,13	300	2,407	+ 0,17
200	2,401	+ 0,042	200	2,403	0
100	2,391	- 0,38	100	2,400	- 0,06
0	2,398	- 0,09	40	2,399	- 0,17
0	2,402	- 0,09	20	2,400	- 0,13
- 20	2,404	+ 0,17	- 20	2,415	+ 0,50
- 40	2,396	- 0,17	- 40	2,392	- 0,46
-100	2,396	- 0,17	-100	2,394	- 0,38
-200	2,399	- 0,04	-200	2,401	- 0,08
-300	2,400	0	-300	2,407	+ 0,17
-400	2,400	0	-400	2,406	+ 0,13
-500	2,399	- 0,04	-500	2,404	+ 0,04
Moyenne	2,400			2,403	

La table 7 est décomposée en fonction des deux sections de bobine d'un appareil. Dans les troisième et sixième colonnes sont donnés les écarts de moyenne de la valeur en pourcent. En principe, ils ne sortent pas des limites de seulement dans des cas isolés, pour des angles de 100 secondes et moins, que les écarts dans les deux parties atteignent 0,5 %. Cette dispersion montre que les écarts de 0,5 % proviennent d'une précision moindre de la mesure de I_0 dans les petits angles d'inclinaison de la plate-forme. La table 6 le montre particulièrement avec évidence : on compare I_0 , déterminé par des angles de 100 et 500 secondes

d'arc. Ici la divergence n'est que de 0,04 %. Ainsi, on peut dire avec certitude, que l'écart du courant par rapport à une dépendance linéaire pour les mesures de $I_0 = f(\psi)$ ne dépasse pas $\pm 0,2$ %.

La figure 13 montre la dépendance du courant I en fonction de l'angle d'inclinaison de la plate-forme ψ . Pour cette échelle de représentation il est impossible de déceler les écarts de linéarité. Les tables 6 et 7 permettent d'évaluer plus exactement l'écart de la linéarité.

Pour étudier l'influence sur la précision de la détermination de I_0 , de l'installation de l'appareil sur la plate-forme, des déterminations répétées de I_0 ont été faites dans le cas d'installation de l'appareil à divers endroits de la plate-forme, dans le cas de déplacement de l'appareil parallèlement à lui-même et dans le cas de rotation de divers angles autour de l'axe vertical. Le déplacement parallèle ne produit aucun effet sur la précision des mesures de I_0 , mais la rotation autour de l'axe réduit I_0 proportionnellement au cosinus de l'angle de rotation, et c'était à prévoir. C'est pourquoi l'appareil est placé sous un angle de 90° avec l'axe de rotation de la plate-forme et le cosinus de l'angle, dans cette région, varie peu.

Dans ce cas il n'y a pas de nécessité de prendre quelque mesure que ce soit pour l'installation précise de l'appareil sur la plate-forme.

Ainsi, on peut à l'aide de la plate-forme déterminer la constante électrodynamique du clinomètre I_0 avec une précision de 1 %, mais par de fréquentes déterminations on peut réduire considérablement l'erreur.

Pour le contrôle de la sensibilité du clinomètre par le courant, la constance de l'impulsion de courant joue un rôle très important. Pour l'amenée de l'impulsion automatique du courant des horloges, on a mis au point un tableau spécial de contrôle; la description de celui-ci est donnée dans le paragraphe suivant.

8. Tableau de contrôle du clinomètre.

Le schéma du tableau pour l'amenée de l'impulsion du courant est donné sur la figure 14. Sur l'aiguille des heures est soudée une lame de contact en argent qui deux fois en 24 heures, lorsqu'elle passe à 2 heures 30 minutes, ferme d'abord le circuit sur un premier contact fixé sur le cadran des heures et ensuite sur un second. Les deux contacts sont isolés du boîtier des heures et ferment à tour de rôle pendant 5 minutes deux relais K_1 et K_2 .

L'interruption entre les deux branchements est de 10 minutes, ainsi du début du premier signal jusqu'à la fin du second il se passe 20 minutes. Les tops horaires de temps sont donnés par l'aiguille des minutes, qui ferme le contact du troisième relais K_3 . Le premier relais envoie dans les bobines des clinomètres le courant suivant une direction, et le second relais, suivant l'autre direction. Le troisième relais ouvre le circuit des collimateurs illuminant les miroirs des galvanomètres et fait une interruption de 2 minutes dans les observations. Cette interruption sert de marque de temps sur les observations photographiques. L'aiguille des heures deux fois en 24 heures passe sur les contacts et par conséquent, les impulsions se donnent deux fois par 24 heures.

L'intensité de l'impulsion du courant se détermine par la tension, qui est donnée par un élément spécial et par les résistances réparties des fils et des bobines du clinomètre.

Sur la figure 15, on montre le schéma principal de la tension divisée. Ici R_1 est une résistance de 20.000 ohms, R_2 une résistance de 20 ohms, R_3 et R_4 des résistances de 20.000 ohms, et R_{k1} , R_{k2} et R_{w1} sont les résistances réparties des fils et des bobines du clinomètre. R_{k1} et R_{k2} dépendent de la longueur et de la nature du fil, R_w et R_{w2} dépendent du nombre de spires et de la section du fil. Les valeurs de ces résistances ont été mesurées pour une variation de température, c'est pourquoi on prend les résistances R_3 et R_4 grandes si bien qu'une variation de température ne se manifesterait pas sur l'intensité de l'impulsion de courant.

Pour la facilité du calcul nous donnons le schéma sur la figure 15 d'après un schéma équivalent (fig. 16, 17). Ici la résistance R_3 est :

$$R_3 = R'_3 + R_{k1} + R_{w1},$$

et la résistance R_4 est :

$$R_4 = R'_4 + R_{k2} + R_{w2}$$

Nous servant de la loi de Kirkhoff, nous posons l'équation pour le courant et pour la tension dans les embranchements des circuits :

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4,$$

$$e = I_1 R_1 + I_2 R_2,$$

$$0 = I_3 R_3 - I_2 R_2,$$

$$0 = I_4 R_4 - I_3 R_3,$$

(1)

En résolvant ces équations par rapport à I_3 et I_4 , nous obtenons les formules suivantes pour le calcul du courant d'impulsion :

$$I_3 = \frac{e R_2 R_4}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4} \quad (2)$$

et

$$I_4 = \frac{e R_2 R_3}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4} \quad (3)$$

Dans ce cas, si $R_3 = R_4$, la formule pour le calcul du courant d'impulsion se simplifie :

$$I_3 = I_4 = I = \frac{e R_2}{2 R_1 R_2 + R_3 (R_1 + R_2)}, \quad (4)$$

Dans l'expression de la sensibilité du clinomètre entrent les trois grandeurs I_0 , I et z :

$$K = \frac{I_0}{I} Z_1$$

La constante multipliant Z_i montre combien de fois la constante électrodynamique I_0 est plus grande que celle du courant d'impulsion I c'est-à-dire :

$$m = \frac{I_0}{I} \quad (5)$$

Chaque changement systématique de ce facteur amène des erreurs systématiques dans les mesures d'inclinaisons. La valeur mise en évidence requiert une constance du multiplicateur m pour l'étude des inclinaisons dues aux marées, où on cherche une grande précision de mesures et où les mesures s'étendent sur des mois et des années.

La constance du multiplicateur m dépend de la stabilité de la constante électrodynamique I_0 qui, comme nous en avons déjà parlé plus haut, n'est pas contrôlée plus d'une fois par an et de l'intensité du courant de contrôle d'impulsion I . I dépend des résistances réparties du tableau de contrôle et de la tension de l'élément, qui sert comme source de courant d'impulsion.

On tient compte des erreurs systématiques qui peuvent s'introduire par suite de l'instabilité des résistances dans le tableau de contrôle et de l'imprécision de la mesure de la tension d'origine du tableau de courant.

Le tableau de contrôle pour l'amenée de l'impulsion du courant est monté sur un bloc de résistances en fils de fer comportant six décades. Les résistances en fils de fer, quoiqu'elles se présentent toutes comme stables, se modifient toutefois un peu avec le temps (jusqu'à 0,01 % par an). Cela s'explique, apparemment, par le changement de structure de l'alliage, dans lequel est fabriqué le fil.

Le tableau pour l'amenée de l'impulsion de courant est vérifié une fois par an. Les résistances du tableau se mesurent à l'aide d'un pont avec une précision de 0,02 %.

Par conséquent, pour le contrôle de la sensibilité du clinomètre, le changement des résistances aussi bien dans le temps qu'avec la variation de température n'amène pas d'erreurs de plus de 0,02 %.

Le manque de constance de la tension de l'élément présente un assez grand danger pour l'invariabilité du courant d'impulsion, cet élément de tension sert de source d'alimentation dans le tableau de contrôle. Pour éliminer l'erreur

systematique de mesure des inclinaisons en tenant compte de l'instabilité de la tension de base du courant d'impulsion, la tension de l'élément alimentant le diviseur, se mesure à l'aide du voltmètre de la classe 0,5 (M - 106) toutes les 24 heures au changement de la pellicule. Pour estimer l'erreur de mesure de la tension par le voltmètre M - 106, on a déterminé exactement les forces électromotrices des éléments par comparaison avec un élément normal, et ensuite les tensions ont été mesurées par le voltmètre (fig. 18).

On a confronté dans la table 8 les résultats obtenus. Ici, e_3 est la force électromotrice de l'élément, et e_2 est la tension mesurée de l'élément. Parmi huit cas, dans un seulement (N° 4) la différence dans les mesures par l'un ou l'autre procédé atteint un millième de volt, dans tous les autres cas elle est moindre.

L'erreur relative des mesures ne dépasse pas 0,07 %.

Table 8

Erreur dans les mesures de tension par le voltmètre M-106 (obtenue en janvier 1959).

N°	Nom des éléments	e_3	e_2	Date d'exécution
1	3 S - L - 30	1,54222	1,542	Octobre 1958
2	3 S - L - 30	1,52635	1,526	idem
3	3 s - L - 30	1,52224	1,522	"
4	Saturne - K	1,55702	1,556	"
5	Saturne - H	1,60093	1,600	"
6	Devise	1,38425	1,384	Mars 1958
7	Devise	1,43632	1,436	Octobre 1958
8	Devise	1,43630	1,436	id m.

Ainsi le tableau de contrôle au moyen du voltmètre M - 106 assure la mesure du courant d'impulsion avec une précision allant jusqu'à 0,1 %.

On a pu obtenir une très grande précision pour les mesures de tension, par l'emploi d'un élément normal. Cependant il ne convient pas de se servir d'éléments normaux, de même qu'on ne peut les expédier ni par la poste ni comme colis, car on peut seulement les transporter à la main. Le deuxième défaut de l'élément normal est qu'il a une grande résistance intérieure $R_B \geq 1.000$ ohms. Il n'est pas constant lorsqu'il débite et c'est pourquoi les éléments normaux s'emploient seulement dans les schémas compensateurs où le courant débité est pratiquement égal à zéro.

Ces derniers temps on a fabriqué des éléments à oxydes de mercure - OR. La résistance intérieure de ces éléments est seulement de 1 - 2 ohms c'est-à-dire qu'elle dépasse de peu la résistance intérieure des éléments Saturne, utilisé dans les ohmmètres et dans les ponts des résistances.

Le coefficient de température dans les éléments OR en usage est moindre que celui des éléments Saturne. Ces éléments ainsi que les éléments Saturne sont hermétiques.

Leur poids dans le calcul sur 1 amp. heure est 5 fois moindre et la dimension 20 fois moindre que le poids et le volume de l'élément Saturne. La baisse de tension des éléments OR dans le temps est de plusieurs fois moindre que pour les éléments Saturne de même catégorie.

Dans la table 9 on donne les mesures de la force électromotrice thermoélectrique (f.e.t.) des éléments OR à diverses époques. Dans la dernière colonne on montre la baisse de la force électromotrice thermoélectrique calculée pour la conservation des éléments sans rechargement au cours du mois. Pour les éléments téléphoniques la force électromotrice thermoélectrique varie de 0,5 %, pour les éléments Saturne de 0,3 % pour un mois tandis que la force électromotrice thermoélectrique des éléments OR n'a pas varié pour trois mois de plus de 0,04 %. Pour cette force électromotrice thermoélectrique des deux éléments, l'un a diminué et l'autre a augmenté. La moyenne a montré une variation égale à 0,0000. On montre que la différence de la première et de la seconde mesure de la force électromotrice thermoélectrique se trouve dans les limites de l'erreur de mesures, et sa variation est moindre de 0,01 %.

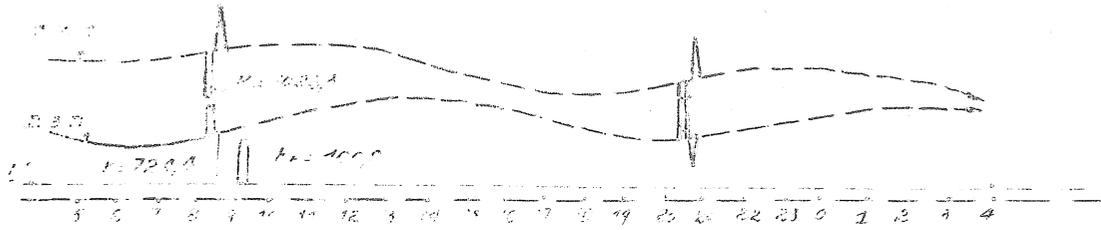


Fig. 8. Modèle d'enregistrement avec impulsions contrôlées.

Fig. 9. Les caractéristiques de fréquence du séismo-clinomètre.

Fig. 10. Caractéristique de fréquence du clinomètre.

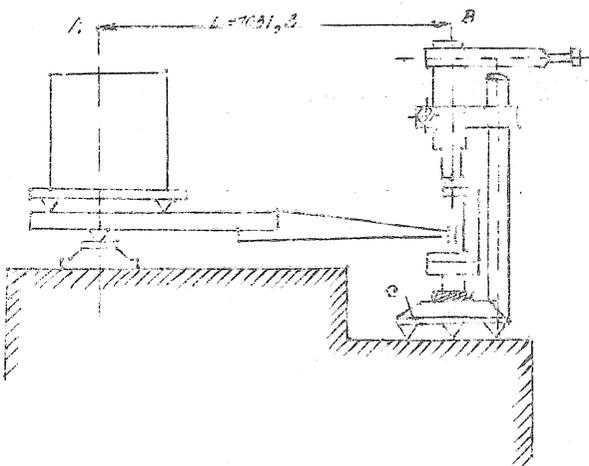
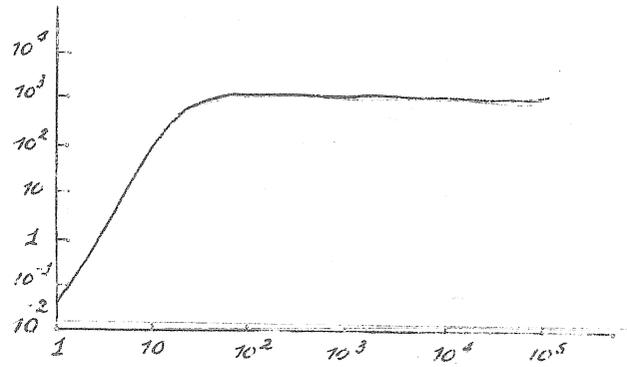
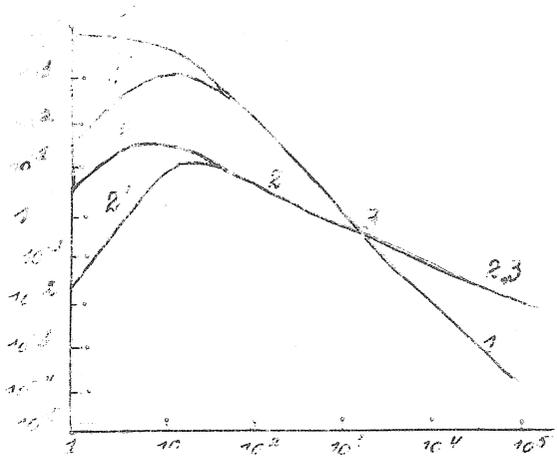


Fig. 11. Plate-forme pour les étalonnages des clinomètres.

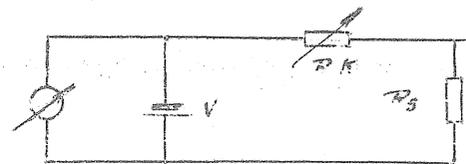


Fig. 12. Schéma de mesure du courant I pour la détermination de I_0 .

Dans la table 10 on donne les coefficients de température des éléments OR. Ils semblent différents. La valeur du coefficient de température au maximum est $a_e = 58.10^{-6}$, au minimum $a_e = 18.10^{-6}$.

Table 9.

Chute de tension des éléments OR avec le temps.

N° de l'élément	f.e.t. 28.VII.1959 t = 20,5° s.	f.e.t. 28.X.1959 t = 20,5 s	Différence des deux variations f.e.t.	Ecart %
1	1,35890	1,34835	- 0,00055	- 0,04
2	1,34686	1,34706	+ 0,00020	+ 0,02
3	1,34506	1,34494	- 0,00012	- 0,01
Moyenne pour trois mois			0,00029	- 0,03 %

Table 10.

Coefficients de température des éléments OR.

N° de l'élément	f.e.t. pour 25° s	f.e.t. pour 1° s.	Différence des varia- tions de f.e.t.	Coefficient de température
1	1,34884	1,34937	0,00053	22.10 ⁻⁶
2	1,34678	1,34817	0,00139	58.10 ⁻⁶
3	1,34999	1,35044	0,00045	18.10 ⁻⁶
4	1,34882	1,34946	0,00064	27.10 ⁻⁶
Coefficient moyen				31.10 ⁻⁶

Pour les enregistrements dans un local non chauffé, où la température varie dans les limites de 10°, la force électromotrice thermoélectrique de l'élément OR ne variera pas de plus de 0,04%. Par conséquent, on mesure la tension à l'aide du voltmètre avec une précision de 0,1 % et pour l'emploi de l'élément OR, la tension est conservée avec une précision de 0,04 % et on peut ne la contrôler qu'une fois par an. (à suivre).

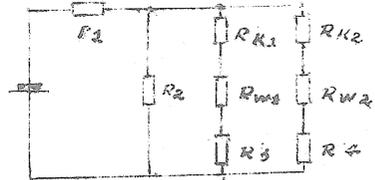
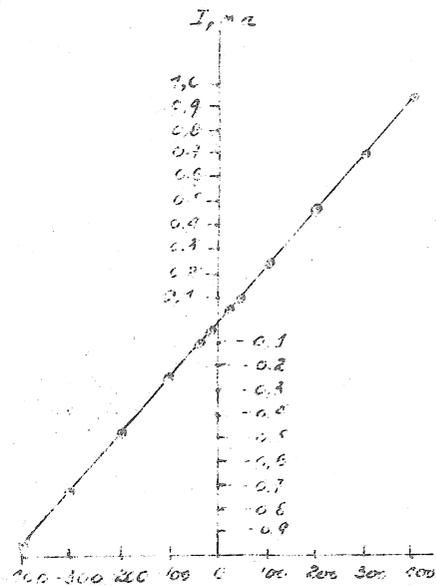


Fig. 15 Schéma de la tension répartie.

Fig. 13 Graphique de la dépendance de I en fonction de l'angle d'inclinaison de la plate-forme.

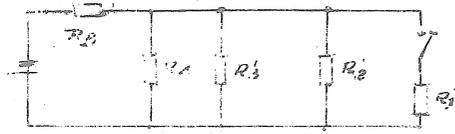
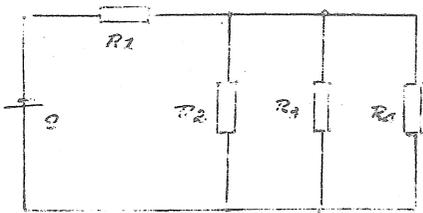


Fig. 16 Schéma équivalent de la tension répartie.

Fig. 17 Schéma de la mesure de la tension de l'élément.

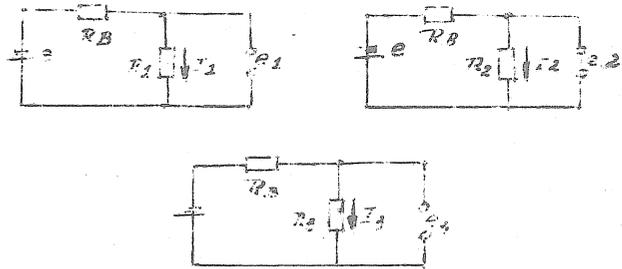


Fig. 18 Schémas équivalents de la mesure de la tension.

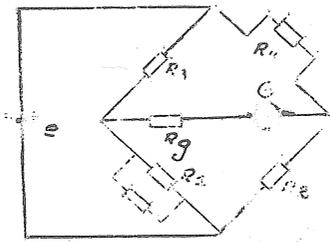


Fig. 19 Schéma du pont pour la mesure de la température.

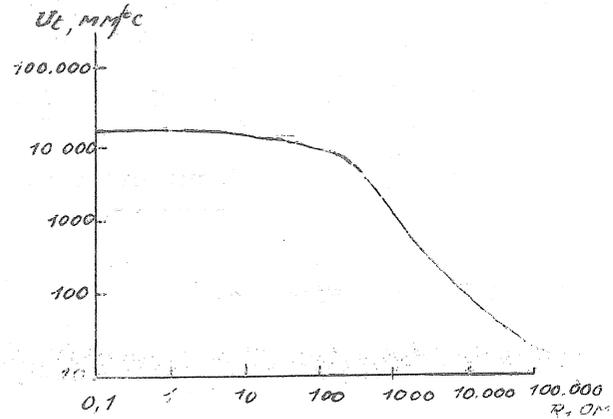


Fig. 20 Sensibilité du thermographe en fonction de la résistance du bras du pont.

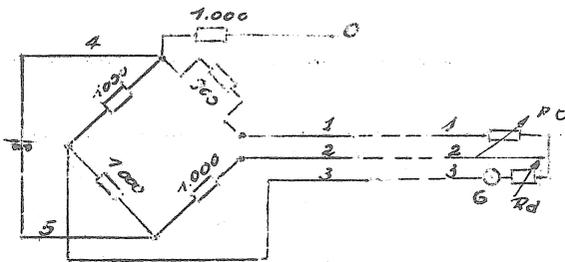


Fig. 22 Schéma des corrections de zéro du thermographe.

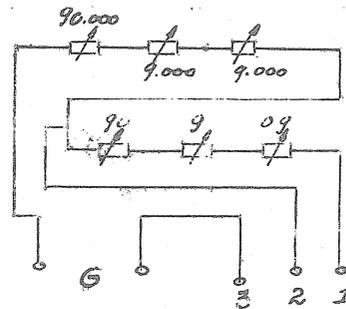


Fig. 23 Schéma du tableau de commande du thermographe.

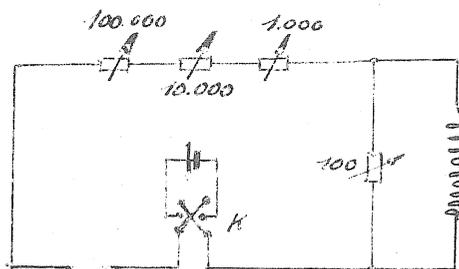


Fig. 24 Diviseur de la tension pour ramener le pendule à zéro.

Documents reçus au Centre International.

ANGLETERRE :	Winsford	PH (A 339°) { PH (A 72°) }	d'avril 1950 à décembre 1951 avec plusieurs interruptions
BELGIQUE :	Sclaigneaux	PH O.R.B.n°1 (EW) PH O.R.B.n°9 (NS)	du 16 avril au 15 septembre 1961 du 16 avril au 15 septembre 1961
	Uccle	G. Ask. 145 G. Ask. 160	du 16 avril au 1 août 1961 du 16 avril au 15 septembre 1961
	Warmifontaine	PH O.R.B.n°11 (EW) PH O.R.B. n°4 (NS)	du 16 avril au 5 mai du 5 juin au 11 juillet 1961 du 15 avril au 2 juin 1961
BULGARIE :	Sofia	G. Ask. 121	du 9 mars au 7 avril 1961
HONGRIE :	Tihany	G. Heil	du 1 au 31 janvier 1959 du 1 avril au 1 mai 1959
ITALIE :	Bari	PH O.R.B.n°2 (NS) PH O.R.B.n°3 (EW)	du 10 au 31 décembre 1960 du 10 au 31 décembre 1960
	Resina	G. Ask. 141	du 22 mai 1959 au 31 mai 1960 du 1 juillet au 7 novembre 1960 du 30 décembre 1960 au 27 avril 1961
	Trieste	G. Ask. 108	du 1 mai 1959 au 31 mai 1960
U.R.S.S. :	Alma Ata 2	PH. 66 (EW) PH. 65 (NS)	du 1 septembre au 30 septembre 1959 du 1 décembre au 20 décembre 1959 du 1 septembre au 30 septembre 1959 du 1 décembre au 31 décembre 1959
	Kondara	PH. 4558 (EW) PH. 4562 (NS)	du 1 juillet au 31 juillet 1959 du 1 septembre au 30 septembre 1959 du 13 juillet au 30 septembre 1959