

MAREES TERRESTRES

BULLETIN d'INFORMATIONS

N° 36

10 mai 1964 .

Association Internationale de Géodésie

Commissions Permanente des Marées Terrestres

Editeur : Dr. Paul M E L C H I O R
Observatoire Royal de Belgique
3, Avenue Circulaire
Bruxelles, 18.

RESULTATS DES OBSERVATIONS DES INCLINAISONS DE MAREES A LA STATION DE
KONDARA

par

A. B. Bakhroushin

Recherches sur les Marées Terrestres Art. N° 3, Publ. Acad. Sc. URSS Moscou, 1963.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПРИЛИВНЫМИ НАКЛОНАМИ НА СТАЦИИ КОНДАРА

А. Б. Бахрушин

ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ, СБОРНИК СТАТЕЙ N° 3, ИЗДАТ. АКАД. НАУК СССР Москва
1963

Les observations des inclinaisons de la surface de la Terre sont effectuées à Kondara depuis 1955. Elles ont commencé en relation avec les recherches de méthodes de prévision des forts tremblements de Terre. Pendant les quatre premières années on a travaillé la méthode d'observations et étudié l'appareillage. Le clinomètre photoélectrique d'A.E. Ostrovskii a permis d'effectuer avec une grande précision les mesures des inclinaisons dues aux marées. Depuis 1958 on a commencé des observations régulières ; des résultats précieux ont été obtenus dans la station de Kondara pendant l'A.G.I. Cela a servi d'impulsion au développement, dans l'Institut de construction et de séismologie de l'Académie des Sciences de la RSS du Tadjikistan, d'un nouveau département de recherches : l'étude des mouvements lents de l'écorce terrestre.

Nous exposons dans ce travail les résultats des observations sur les inclinaisons dues aux marées dans la station de Kondara au cours de l'AGI. Le matériel obtenu par l'auteur et par V.I. Starkov est le résultat d'un travail de plusieurs années. Les résultats préliminaires de la réduction des observations de 1958-1959 ont déjà été communiqués précédemment [1, 2]. Au cours de ces recherches, on a remarqué que les amplitudes des inclinaisons de marées en trois points d'une même galerie diffèrent l'une de l'autre d'une quantité plus grande que les erreurs introduites par l'appareil. Pour contrôler ce fait on a fait des sondages de contrôle et un travail réitératif du matériel. Outre cela on a introduit des coefficients de correction dans la détermination de la sensibilité des appareils. La station Kondara est "rattachée" aux points de triangulation de l'Etat.

Cela a donné la possibilité d'introduire des corrections aussi bien sur les azimuts d'installation des appareils que dans les résultats finaux. Nous nous arrêtons à la description de la galerie, de l'endroit d'installation des appareils et de la détermination des azimuts avec plus de détails que les autres auteurs puisque nous supposons que ces faits peuvent notamment expliquer la grande dispersion des coefficients γ aux différents points d'une galerie.

Conditions d'observation.

A 28 km au Nord de Douchambe se trouve la station clinométrique de Kondara, à une altitude de 1200 m. au dessus du niveau de la mer. La galerie dans laquelle s'effectuent les observations clinométriques est située sur une pente escarpée de la montagne, sur la rive gauche du fleuve Varzob, à 30-40 m du pied de la montagne.

A l'orifice de la galerie un bâtiment en béton a été construit pour l'enregistrement (fig.1). D'un côté il est contigü à la roche granitique à partir de laquelle s'ouvre la galerie. La salle d'enregistrement (d'une surface totale 20 m²) est partagée en deux parties inégales : dans la plus grande s'effectue l'enregistrement des inclinaisons sur papier photographique, dans la plus petite s'effectuent les mesures de tensions pour le contrôle de sensibilité de tous les complexes de clinomètres.

La galerie a été construite en 1952 mais jusqu'à présent elle est sans soutènement. Pour creuser cette galerie on a employé les méthodes habituelles de forage par explosions. La force des explosions dans le cas de travaux semblables et dans des conditions souterraines est grande, aussi les murs et le plafond de la galerie sont ils très accidentés et la section n'est pas régulière.

La galerie elle-même est située à peu près dans la direction Est-Ouest mais les sections latérales sont dirigées vers le sud (voir fig. 1). La longueur de la galerie est de 107 m, la section de 2 x 2 m, l'azimut S.W. est de 105°. L'azimut de toutes les sections S.E. est de 195°.

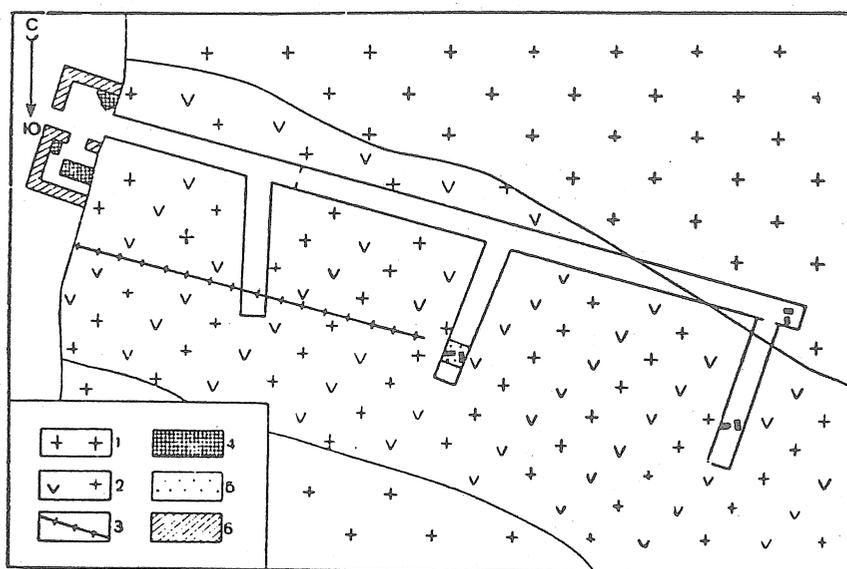


Fig. 1. - Plan de la galerie et de la salle d'enregistrement.

1. Granits porphyrique biotites.
2. Zone de rupture
3. Argile tectonique
4. Socles de béton
5. Surface cimentée
6. Murs de la salle d'enregistrement.

La première section se trouve à une profondeur de 15 m, la seconde à 45 m et la troisième à 70 m de la surface. L'entrée dans la galerie se fait par une porte métallique grillagée à partir de la salle d'enregistrement. Après la première section on a installé dans la galerie une porte métallique. Une porte analogue se trouve près de l'entrée, dans la troisième section. Les portes ont été installées pour conserver un régime de température constante dans la galerie (+9° C à n'importe quel moment de l'année). L'amplitude journalière de la variation de température de la galerie pendant l'été est inférieure à 0,01° alors que la variation de température de l'air extérieur a une amplitude de 10 à 15°. La température dans la galerie a été mesurée par un thermographe à résistance [3] pour enregistrement dans les salles isothermiques, l'erreur relative de mesure de l'appareil est de $\pm 1\%$. La température de l'air extérieur a été mesurée par un thermographe enregistreur M - 16 n avec une erreur moyenne absolue de $\pm 1^\circ$. L'humidité relative de l'air dans la galerie, d'après les mesures faites avec un hygromètre à cheveu MVK est de 100 % pour l'année. Les trois quarts de l'année les murs et les plafonds sont humides. Au printemps l'eau s'infiltré dans la galerie. Elle s'écoule en partie de la galerie et s'infiltré en partie dans les fissures en profondeur.

Dans la direction du N-W vers le S-E passe dans les granits une grande faille (fig. 2) d'une longueur de près de 10 km. L'azimut d'incidence de la faille N.W. est de 25 à 30°, l'angle d'incidence est de 80 à 85°. La faille s'accompagne de roches désagrégées (milonitisées) d'une épaisseur de 5 à 15 cm. La galerie est presque parallèle à la faille tectonique verticale mais les trois sections traversent la faille à différentes profondeurs.

D'après les observations dans les différentes sections sur le passage de la faille on peut conclure que la faille n'est pas une mince couche de quelques centimètres comme on l'a supposé [4] mais une zone de 30-40 mètres. Cette zone est remplie de roches désagrégées par lesquelles passe, dans les directions les plus différentes, le système des fissures tectoniques. Certaines fentes sont remplies d'argile tectonique. A première vue on peut remarquer dans la première section deux surfaces entre lesquelles se trouve une couche d'argile tectonique d'une épaisseur de 10 à 15 cm mais dans la seconde et la troisième sections il y a quelques surfaces et elles sont dans des directions très différentes dans toute la zone.

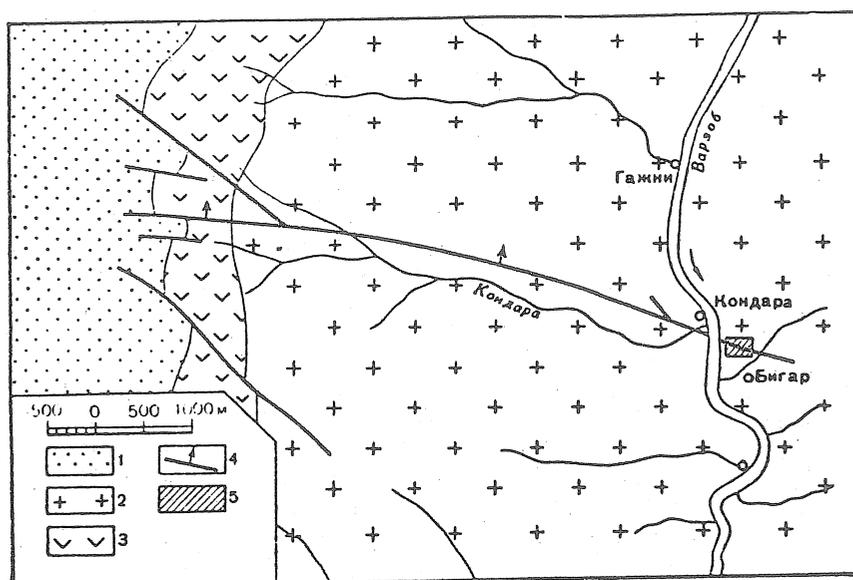


Fig. 2. - Carte géologique du terrain de Kondara

1. Conglomérats de craie inférieure et grès
2. Granits paléozoïques
3. Roches paléozoïques d'origine volcanique métamorphique
4. Failles tectoniques principales
5. Secteur de la galerie.

Plus au sud de la zone de la faille tectonique il y a des granits porphyriques à gros grains. Cela peut s'observer aussi bien directement en surface que d'après les résultats du forage, qui coupe la faille de Kondara sur une profondeur d'environ 300 m. De cette façon, cette faille présente une zone de granits fortement brisés, quartzeux, modifiés. Dans cette zone il y a dans le fond une galerie. Au nord et au dessus de la zone des granits brisés et quartzeux, il y a à nouveau des granits à gros grains de la fissure habituelle. Le bout de la galerie et le début de la troisième section dépassent la zone des granits brisés et quartzeux et atteignent les granits à gros grains de la fissure habituelle.

En 1958-1959, les observations d'inclinaisons ont été effectuées par trois complexes de clinomètres de différents modèles. Chaque complexe se composait de deux appareils, l'un a été installé dans l'azimut N.S. et l'autre dans l'azimut E.W.

Premier complexe-clinomètres	N° 61, N° 62	(construits en 1957)
Deuxième " "	N° 68, N° 69	(construits en 1958)
Troisième " "	N° 4558, N° 4562	(construits en 1959).

Tous les appareils ont un schéma de principe identique. Les complexes diffèrent l'un de l'autre par la précision de détermination des constantes et de petites améliorations de construction. La précision de mesure des inclinaisons de marées est la plus faible pour les appareils N° 61 et N° 62 (5 %) et la plus élevée pour les appareils N° 4558, N° 4562 (1 %). Le premier complexe a été installé dans la troisième section, directement sur la roche nettoyée. Le second complexe a été placé dans la deuxième section, sur une petite plate-forme en béton de 1 x 3 m et d'une épaisseur de 5 - 7 cm. Cette petite plate-forme joue le rôle d'une pierre. Elle se trouve sur une couche de 20 cm de débris graniteux et du sable. Ses extrémités s'appuient sur les murs de la galerie. Les deux complexes sont installés dans la zone de faille où les granits sont fortement fissurés et quartzeux.

Le troisième complexe est installé au bout de la galerie sur une base monolithe se composant de granits porphyriques biotites.

Installation des appareils.

En 1955-1957, au premier stade des travaux avec des clinomètres de haute sensibilité, on prêta peu d'attention à la précision d'installation des appareils dans un azimut déterminé. L'installation des appareils dans l'azimut 90° (N.S.) et 180° (E.W.) a été réalisée d'après une boussole avec une précision de $\pm 3^\circ$.

Les défauts de la boussole résident dans le fait que ses indications sont fortement faussées par les objets métalliques et les aimants. C'est pourquoi pour donner l'azimut, il convient de placer les appareils à quelques dizaines de mètres de l'endroit où est donné le sens de direction. Dans la galerie où l'on effectue les observations clinométriques il est souhaitable d'avoir toujours une direction fixée, donnée avec une précision de l'ordre de $\pm 1'$, particulièrement à présent que se pose le problème d'une précision de mesure des amplitudes des ondes de marées atteignant 0,1 %. La direction de départ, sur la base de laquelle on a réalisé l'installation des appareils en azimut, a été fixée dans la galerie deux fois en 1959 et en 1961.

Table 1.

	AZIMUTS		
	Du point 1 au 2	Du point 2 au 3	Du point 3 au 4
1958	105°45'41"	108°23'11"	108°45'41"
1961	105°46'05"	108°24'34"	108°47'39"

On donne dans la table 1 les azimuts du cheminement du théodolithe dans la galerie d'après les deux déterminations indépendantes en 1958 et en 1961 avec différentes données de départ. Dans le premier cas, on a employé des matériaux du levé topographique de 1952 avec un azimut de départ magnétique, dans le second cas, on s'est servi des ordonnées des points de la triangulation. Les azimuts varient de 1 à 2 min. Si on considère que la précision de détermination de l'azimut dans la galerie est de $\pm 3'$ par rapport à l'orientation du côté de la triangulation, on obtient une bonne concordance entre la première et la deuxième déterminations de l'azimut du cheminement du théodolithe dans la section de la galerie. Cela prouve évidemment à conclure que les azimuts d'installation des appareils, calculés d'après les azimuts du cheminement du théodolithe en 1958, ont la même valeur que les azimuts calculés sur la base de la direction donnée en 1961.

Table 2.

N° de l'appareil	Azimut d'après la boussole	Azimut d'après le théodolithe, en degrés	Erreur d'installation, en degrés
62	N-S	94	-4
4562	N-S	93	-3
58	N-S	88	+2
4558	E-W	183	-3
69	E-W	179	+1
61	E-W	175	+5

On a donné dans la table 2 les azimuts des clinomètres d'après la boussole et d'après la détermination à l'aide du théodolithe. La plus grande différence, dans les azimuts déterminés par la boussole et par le théodolithe, a été de 5°.

Résultats de l'analyse harmonique.

Pour la période allant de septembre 1958 à janvier 1960 on a réduit 60 séries mensuelles. L'élimination de la dérive et l'analyse harmonique de chaque série mensuelle ont été effectuées par la méthode de B.P. Pertsev sur ordinateur électronique "Oural -1", d'après le programme composé par M.V. Kramer (*).

(*) L'analyse harmonique a été effectuée par les chefs assistants G.P. Artamassova et K.M. Anochina.

Les résultats de l'analyse sont donnés dans la table 3 : valeurs du nombre γ , le rapport des amplitudes observées aux amplitudes calculées pour le cas de la Terre absolument rigide et incompressible et de $\Delta\phi$, écart de phase entre l'onde observée de la marée terrestre et l'onde calculée dans les mêmes conditions de la Terre absolument rigide. Un retard de l'onde observée est représenté ici par un nombre négatif.

Chaque série de 29 jours succède à la précédente sans recouvrement du matériel réduit et cela à partir du 16 de chaque mois pris comme date moyenne. La table 3 contient ces déterminations indépendantes des valeurs de γ au cours du temps. Des lacunes d'une durée de 1 à 4 heures dans les enregistrements ont été comblées par une interpolation linéaire. Les ordonnées des lacunes de 12 à 20 heures ont été calculées d'après les enregistrements des appareils installés en parallèle. Dans les cas où l'enregistrement a été interrompu pendant quelques jours, la réduction de la série de 29 jours a été décalée d'autant ou abandonnée. Dans chacune des tables réunies dans la table 3 on donne la série des nombres γ calculés d'après l'enregistrement d'un appareil. Les valeurs sont calculées pour cinq ondes de marées : M_2 , S_2 , N_2 , O_1 et K_1 . On a pris pour chaque onde la valeur moyenne de γ pour toute la période d'observations et on a calculé les erreurs quadratiques moyennes de mesure. On donne en tout dans la table 3 trois cents valeurs de γ parmi lesquelles 160 sont déterminées pour les appareils installés dans l'azimut voisin du N.S. et 140 pour l'azimut voisin de l'E.W.

Les recherches poursuivies en laboratoire avec le clinomètre montrent qu'il permet de mesurer les angles avec une erreur relative de $\pm 0,5 \%$ [3]. L'analyse harmonique effectuée d'après le schéma de B.P. Pertsev donne les amplitudes des ondes de marée avec une erreur relative de moins de 1 % et les phases avec une précision de $\pm 0^{\circ}1$ à $\pm 1^{\circ}$ en fonction du caractère de l'onde [5,6]. La comparaison des quelques méthodes d'analyse harmonique montre que toutes les méthodes sont pratiquement égales au point de vue précision [7,8]. Le même matériel, réduit d'après différents schémas, donne des γ qui diffèrent l'un de l'autre de 1 à 3 % [9]. Cependant il surgit des difficultés au moment de l'interprétation des résultats de la réduction. La haute précision des mesures et des calculs permet de trouver γ avec une erreur de $\pm 1 \%$ [3,5]. Dans ces conditions, la série des faits obtenus par le processus de mesure des amplitudes et des phases des ondes de marée devient incompréhensible :

1. Les observations de Kondara, effectuées par des appareils installés à divers endroits d'une galerie mais dans des azimuts voisins, donnent des valeurs de γ qui diffèrent l'une de l'autre de 20 - 30 % ;
2. Au sein de n'importe quelle série d'observations réalisée par un même appareil, les valeurs de γ présentent des fluctuations dans le temps atteignant jusqu'à 20 %.

Un phénomène semblable s'observe aussi dans l'analyse des déphasages mais le désaccord est encore plus grand.

Ces circonstances nous obligent de traiter les résultats obtenus par une première approximation assez grossière. On peut tirer les conclusions les plus sûres pour γ en considérant l'onde M_2 , car elle a une amplitude maximale et une période qui diffère sensiblement de celle des autres ondes. Pour expliquer les contradictions relevées plus haut, il reste à proposer que la valeur γ dépend des coordonnées de temps et d'azimut.

En outre, les possibilités d'étude de l'appareil en laboratoire sont très limitées. Il est nécessaire de faire un contrôle expérimental minutieux de l'identité des enregistrements des appareils installés parallèlement dans la galerie.

Pour n'importe quel complexe de clinomètres toutes les valeurs des nombres γ , calculés pour l'onde M_2 , sont subordonnées à l'inégalité $\gamma_{N-S} > \gamma_{E-W}$. Pour les autres ondes, S_2 , N_2 , O_1 et K_1 , on ne peut tirer de conclusion bien déterminée car nous les avons obtenues avec une moindre précision.

L'inégalité azimutale que l'on observe pour les données obtenues à Kondara n'est pas un fait accidentel. Il se manifeste en beaucoup de stations continentales où l'influence de la marée océanique est infiniment faible. On suppose que l'inégalité azimutale des valeurs de γ est liée, sur le continent, à une anisotropie élastique de l'écorce terrestre ou, comme on le dit parfois, à des particularités de la structure de l'écorce terrestre et du manteau. Cette hypothèse a été avancée par quelques auteurs [10, 11], elle exige une confirmation théorique et expérimentale.

On pourrait expliquer la différence dans les valeurs de γ d'une station à l'autre par des variations des propriétés élastiques de l'écorce terrestre. Des résultats semblables ont été obtenus dans la construction d'hodographes moyens pour les différentes régions du globe terrestre : les vitesses des ondes séismiques dans l'écorce terrestre en différents points varient aussi bien dans la direction du premier vertical que dans la direction du méridien et les coefficients élastiques de l'écorce terrestre varient en conformité puisqu'ils sont liés aux vitesses par des formules connues. Si la variation de γ d'une station à l'autre du globe terrestre est liée réellement à la variation des propriétés élastiques de l'écorce terrestre alors les trois complexes de clinomètres placés dans des azimuts voisins doivent donner dans une galerie des valeurs égales. A Kondara nous n'avons pas observé cela.

A partir de la table 3, on voit que la valeur γ , pour n'importe quelle composante, présente des fluctuations dans le temps qui atteignent 10 à 20 %. L'analyse minutieuse de tout le matériel a montré que ces fluctuations sont en relation avec l'existence de perturbations à courte période de la courbe d'inclinaison.

Nous n'expliquerons pas ici les causes de ces perturbations, elles peuvent être les plus diverses. Nous avons exclu de l'examen tout le matériel faussé par de telles perturbations. On a choisi, dans la table 3, les mois pour lesquels on a obtenu des valeurs non déformées γ^* . Les valeurs moyennes de γ^* diffèrent de 2 à 5 % des valeurs précédentes. Pour les valeurs de γ^* les fluctuations dans le temps ont diminué d'amplitude mais n'ont pas disparu. L'erreur relative de mesure des angles par l'appareil et l'erreur relative de calcul des amplitudes et des phases par l'analyse harmonique est beaucoup plus petite que ces fluctuations dans le rapport d'un à cent. Cette circonstance amène à la conclusion que, ou bien la valeur γ varie dans le temps d'après une certaine loi, ou bien l'estimation de la précision d'enregistrement des inclinaisons de marées a été faite incorrectement. Quoi qu'il en soit, l'étude de la fonction de $\gamma = f(t)$ présente un grand intérêt.

Conclusions

Sur la base de ce qui a été exposé on peut tirer les conclusions suivantes :

- 1 Pour Kondara les coefficients moyens de γ sont calculés d'après les enregistrements des appareils installés aux divers endroits et dans les divers azimuts.

$$\begin{array}{ll} \gamma^* = 0,609 \pm 0,013 \text{ (N}^\circ \text{ 69)} & \gamma^* = 0,657 \pm 0,016 \text{ (N}^\circ \text{ 68)} \\ \gamma^* = 0,639 \pm 0,006 \text{ (N}^\circ \text{ 4558)} & \gamma^* = 0,798 \pm 0,007 \text{ (N}^\circ \text{ 4562)} \\ \gamma^* = 0,587 \pm 0,007 \text{ (N}^\circ \text{ 61)} & \gamma^* = 0,962 \pm 0,011 \text{ (N}^\circ \text{ 62)} \end{array}$$

On peut partiellement expliquer la différence des coefficients γ^* par les différents azimuts d'installation des appareils. La valeur moyenne calculée d'après les enregistrements de tous les appareils est égale à $0,709 \pm 0,058$.

2. Pour tous les appareils, l'inégalité propre à beaucoup de stations continentales se conserve dans l'onde M_2 : $\gamma_{N.S.} > \gamma_{E.W.}$.

En conclusion, l'auteur exprime sa sincère reconnaissance au Directeur de l'Institut de construction et de Séismologie de l'Académie des Sciences Tadjik de l'U.R.S.S. V.N. Haiskii pour son intérêt et son concours à l'organisation des observations clinométriques.

ABSTRACT

The article discusses results of observations of tidal tilts on the station Kondara conducted with the three sets of photoelectric tiltmeters during the IGY period. The coefficient γ has been calculated for the 60 monthly series of observations ; its value characterises the tidal deformations of the globe.

Table 3.

Amplitudes et phases des ondes de marées dans les composantes N.S. (appareils Nos 62, 68, 4562)
 et E.W. (appareils Nos 61, 68, 4558)
 (appareil N° 62)

Epoque moyenne des observations	M ₂		S ₂		N ₂		O ₁		K ₁	
	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ
* 16. IX 1958 r.	0,904	13,2	1,036	1,4	0,611	30,3	2,011	-63,3	2,195	13,5
16. X	0,942	12,2	0,973	1,7	0,826	26,4	1,900	-32,4	1,899	-8,3
* 16. XI	0,949	9,2	1,058	-1,1	0,816	3,4	1,788	26,0	1,216	1,2
* 16. XII	0,982	7,2	1,009	4,3	0,792	5,2	1,396	12,8	1,461	5,8
16. I 1959 r.	0,854	11,7	0,878	6,0	1,542	4,6	1,154	-3,6	1,465	44,1
16. II	1,009	11,7	1,199	-1,0	2,148	20,0	1,016	1,7	1,105	-1,9
16. III	0,866	10,8	0,759	-0,6	0,783	17,9	1,817	-0,4	1,292	-39,0
16. IV	1,066	16,6	1,052	16,9	0,993	37,7	0,992	-3,0	1,731	38,4
16. V	0,917	15,6	0,787	0,6	1,408	11,0	1,988	-29,4	1,133	-61,7
* 16. VI	0,961	12,1	1,135	3,0	1,025	15,9	0,990	19,8	1,495	-13,5
* 16. VII	0,996	13,3	1,066	13,0	0,878	19,5	1,440	-6,0	1,201	10,9
* 16. VIII	0,972	10,2	1,055	7,6	1,026	5,8	1,809	-15,0	1,236	11,2
* 16. IX	0,972	37,4	1,047	2,4	0,826	40,5	1,476	-40,2	1,005	-43,8
16. X	0,980	10,0	1,052	1,4	1,071	6,4	1,440	-8,2	1,733	21,2
Valeur moyenne	0,955	13,6	1,008	4,0	1,054	17,4	1,518	-4,3	1,411	-1,6
Ecart quadratique moyen	0,015		0,033		0,107		0,096		0,092	
Valeur moyenne	0,962	14,7	1,058	4,3	0,853	17,2	1,559	2,1	1,410	-2,8
Ecart quadratique moyen	0,011		0,015		0,511		0,128		0,136	

Table 3 (suite)
(appareil N° 61)

Epoque moyenne des observations	M ₂		S ₂		N ₂		O ₁		K ₁	
	γ	Δφ								
* 16. IX 1958 r.	0,589	-17,2	0,583	-10,8	0,426	23,0	0,870	28,2	0,880	30,9
* 16. X	0,579	-13,3	0,661	-9,0	0,454	17,3	0,943	34,6	0,730	-31,4
* 16. XI	0,575	-9,0	0,723	-12,5	0,542	-11,6	0,952	31,0	0,714	-24,3
* 16. XII	0,559	-14,7	0,550	-10,9	0,298	13,3	0,808	5,5	0,471	-23,2
* 16. I	0,584	-9,4	0,731	-8,9	0,563	2,0	0,943	-26,5	0,633	-23,7
16. II 1959 r.	0,552	2,0	0,692	7,7	0,708	-30,0	0,946	3,7	0,852	-41,7
16. III	0,570	-7,3	0,633	-4,6	0,393	30,9	0,475	23,5	0,741	15,4
16. IV	0,578	-8,2	0,592	-13,6	0,251	24,0	1,100	44,2	1,243	27,0
16. V	0,604	-6,6	0,666	-11,3	0,667	-11,4	0,610	19,2	1,243	-33,8
* 16. VI	0,617	-4,4	0,554	-17,4	0,555	-8,3	0,761	-33,9	1,086	-30,3
* 16. VII	0,575	-2,0	0,572	-12,4	0,606	-19,6	0,741	42,9	0,893	-37,4
* 16. VIII	0,614	-4,0	0,670	-7,7	0,446	-24,9	0,584	46,2	0,825	41,0
16. IX	0,592	0,0	0,746	-9,6	1,105	-11,0	0,753	-33,0	1,524	31,2
16. X	0,550	-4,0	0,704	-4,0	0,691	-0,7	0,747	-13,4	0,754	11,9
Valeur moyenne	0,582	-7,0	0,648	-8,8	0,550	-0,7	0,802	12,3	0,899	-6,3
Ecart quadratique moyen	0,006		0,018		0,057		0,046		0,076	
Valeur moyenne	0,587	-9,3	0,640	-11,2	0,486	-1,0	0,825	16,0	0,779	12,3
Ecart quadratique moyen	0,007		0,028		0,035		0,045		0,065	

Table 3 (suite)
(appareil N° 68)

Epoque moyenne des observations	M ₂		S ₂		N ₂		O ₁		K ₁	
	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ
* 16. I 1959 r.	0,580	-1,7	0,650	-15,6	0,944	-5,6	0,983	9,3	0,864	-16,4
16. II	0,635	4,3	0,683	-9,0	0,885	-32,3	1,040	-4,5	1,180	14,2
16. III	0,605	-3,8	0,537	-37,8	0,592	39,9	4,908	-8,6	1,394	-42,2
16. IV	0,854	-3,5	0,886	-8,4	1,078	2,0	3,374	-25,5	3,126	-36,8
16. V	0,736	-5,6	0,986	-16,9	1,087	-9,8	2,090	-31,3	1,175	15,5
16. VI	0,624	-7,6	0,721	-16,8	1,117	-1,6	1,030	-45,7	1,186	20,6
* 16. VII	0,646	5,5	0,690	-3,3	0,708	12,0	1,706	6,2	1,061	31,3
* 16. VIII	0,696	2,1	0,745	-10,0	0,798	-20,0	1,759	-4,4	1,494	39,9
* 16. IX	0,676	2,9	0,719	-8,2	0,638	25,7	1,251	41,5	2,627	-32,0
* 16. X	0,632	1,9	0,655	-18,2	0,468	29,4	1,451	7,5	2,114	-7,3
* 16. XI	0,693	4,8	0,668	-4,4	0,568	12,6	1,569	0,5	1,350	11,0
* 16. XII	0,676	3,8	0,655	-3,7	0,628	1,9	1,562	-12,3	1,240	11,3
Valeur moyenne	0,671	0,3	0,716	-12,7	0,793	4,5	1,894	5,6	1,568	0,8
Ecart quadratique moyen	0,021		0,033		0,065		0,331		0,190	
Valeur moyenne	0,657	2,8	0,683	-9,0	0,679	8,0	1,469	6,9	1,536	5,4
Ecart quadratique moyen	0,016		0,013		0,059		0,103		0,235	

Table 3 (suite)
(appareil N° 4562)

Epoque moyenne des observations	M ₂		S ₂		N ₂		O ₁		K ₁	
	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ
* 28. VII 1959 r.*	0,779	-3,1	0,691	1,1	0,818	-6,7	0,400	-22,7	0,421	-14,9
* 16. VIII	0,822	-4,1	0,792	-5,6	0,604	3,6	0,629	-6,5	0,652	-38,6
* 16. IX	0,804	-4,5	0,784	0,8	0,590	-20,3	0,391	21,1	1,115	-60,0
16. X	0,895	-1,4	0,881	0,4	0,584	12,9	0,228	-20,6	1,115	-31,9
* 16. XI	0,790	-4,0	0,812	-0,3	0,770	7,2	0,277	-21,6	1,183	-11,8
* 16. XII	0,795	-0,3	0,808	5,5	0,676	4,4	0,147	-60,2	1,100	-7,8
Valeur moyenne	0,814	-2,9	0,795	0,3	0,674	0,2	0,345	-18,9	0,609	-28,2
Ecart quadratique moyen	0,017		0,024		0,041		0,069		0,161	
Valeur moyenne	0,798	-3,2	0,778	0,2	0,692	2,0	0,369	-18,6	0,500	-27,2
Ecart quadratique moyen	0,007		0,022		0,045		0,074		0,188	

Table 3 (suite)

(appareil N° 69)

Epoque moyenne des observations	M ₂		S ₂		N ₂		O ₁		K ₁	
	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ	γ	Δφ
	* 16. I 1959 r.	0,598	10,6	0,718	-19,3	0,813	5,8	1,220	15,6	0,542
16. II	0,586	1,7	0,613	0,7	0,702	29,0	0,760	20,3	0,775	19,9
16. III	0,590	-0,4	0,624	5,7	0,913	-4,8	0,751	12,5	1,129	3,2
16. IV	0,612	-1,7	0,736	-25,1	0,907	-42,4	0,784	15,6	2,216	42,6
16. V	0,743	-0,4	0,804	-6,7	0,678	-9,6	1,109	-23,7	1,523	30,6
16. VI	0,629	-10,0	0,490	-13,6	0,890	-20,3	0,609	45,8	1,334	10,4
* 16. VII	0,621	1,8	0,708	-19,5	0,338	-20,0	1,163	42,5	0,917	4,8
16. VIII	0,535	-2,2	0,595	-6,3	0,314	-39,6	0,940	26,0	1,025	-9,6
Valeur moyenne	0,614	0,0	0,661	-12,0	0,694	-8,8	0,981	26,1	1,183	18,6
Ecart quadratique moyen	0,021		0,035		0,086		0,083		0,187	
Valeur moyenne	0,609	6,2	0,713	-19,4	0,576	12,9	1,191	29,0	0,729	16,4
Ecart quadratique moyen	0,013		0,006		0,236		0,028		0,187	

Table 3 (suite)

(appareil N° 4558)

Epoque moyenne des observations	M ₂		S ₂		N ₂		O ₁		K ₁	
	γ	φΔ	γ	φΔ	γ	φΔ	γ	φΔ	γ	φΔ
	* 16. VII 1959 r.	0,620	-7,7	0,778	-14,4	0,723	-7,6	0,721	-43,9	1,058
* 16. VIII	0,648	-8,3	0,686	-9,7	0,778	-13,0	0,703	-26,6	0,948	-44,9
* 16. IX	0,653	-11,6	0,716	-16,2	0,476	-5,6	0,789	-30,9	0,813	-60,3
16. X	0,591	-4,3	0,679	-7,9	0,826	-16,9	0,649	-44,2	0,551	-42,0
* 16. XI	0,634	-9,6	0,698	-12,4	0,523	-3,7	0,694	-31,8	0,716	-25,6
* 16. XII	0,642	21,8	0,734	19,2	0,649	-19,8	0,813	-20,3	0,696	-10,0
Valeur moyenne	0,631	-3,3	0,715	-6,9	0,662	-11,0	0,728	-33,0	0,797	-36,7
Ecart quadratique moyen	0,009		0,015		0,054		0,025		0,064	
Valeur moyenne	0,639	-3,0	0,722	-6,7	0,630	-9,9	0,744	-30,7	0,846	-35,7
Ecart quadratique moyen	0,006		0,016		0,058		0,022		0,063	

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.E. OSTROVSKY, A.B. BAKHRUSHIN, L.I. MIRONOVA
Inclinaisons de marées de la Terre d'après les observations de Kondara en 1958.
Sb "Recherches gravimétriques" N° 1, Série "Résultats AGI" Izd. vo. Ac. des Sc. CCCP 1960.
- [2] A.E. OSTROVSKY, A.B. BAKHRUSHIN, L.I. MIRONOVA
Tidal tilts of the Earth according to the observations in 1958 in Kondara (Near Duchanbe).
Bull. Geophys. , Marz 1960, N 5, Trieste.
- [3] A.E. OSTROVSKY
Clinomètre avec enregistreur photoélectrique.
Sb. "Etude des marées terrestres", N° 2 sér. "Résultats de l'AGI" : Izd-vo Ac. des Sc. CCCP, 1961.
Traduction BIM Nos 25 et 26 pp. 500 et 540.
- [4] YOU.S.DOBROCKOTOV, A.E. OSTROVSKY, B.P. PERTSEV.
Stations gravimétriques et clinométriques pour les observations de marées terrestres.
Izd. vo Ac. des Sc. CCCP. 1961.
- [5] B.P. PERTSEV
Analyse harmonique des marées élastiques.
Izd. Ac. des Sc. Série Géophysique, 1958, N° 8.
- [6] B.P. PERTSEV
Sur le calcul de la dérive par les observations des marées élastiques.
Izd. Ac. des Sc. CCCP Série géophysique, 1959, N° 4.
- [7] V.G. BALENKO
Les méthodes d'analyse harmonique de Doodson et Lecolazet.
Trav. de l'Obs. grav. de Poltava, 1961, 9
Traduction BIM N° 30 p. 705.
- [8] B.P. PERTSEV, N.N. PARIISKII, H.V. KRAMER
Comparaison des différentes méthodes d'analyse harmonique des déformations de marées de la Terre
Izd. Ac. des Sc. CCCP Série géophysique, 1959, N° 2.
- [9] K. RINNER
Bericht über der Horizontal-pendelmessungen in Berchtersgaden
Communic. Observ. Royal Belgique, 1958, N° 142, Série Géophys. N° 47.
- [10] P.S. MATVEEV
Détermination des mar. terr. d'après les observ. clinométriques de Douchambe pour 1948-1950.
Travaux de l'Obs. grav. de Poltava, 1958, 7.
Traduction BIM
- [11] N. N. PARIISKII
Marées terrestres et structure interne de la Terre
Vestnik Ac. des Sc. CCCP. 1960, N° 6.

ERREURS DE DETERMINATION DU COEFFICIENT D'ETALONNAGE PENDANT
L'ENREGISTREMENT DES MAREES, DUES A LA DERIVE DU GRAVIMETRE

Ю. С. Доброхотов

Recherches sur les Marées Terrestres Art. N° 3 Publ. Acad. Sc. URSS, Moscou 1963.

ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЛИБРОВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ
ПРИЛИВОВ, ВЫЗВАННЫЕ СМЕЩЕНИЕМ НУЛЯ ГРАВИМЕТРА

Ю. С. Доброхотов

ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ, СБОРНИК СТАТЕЙ N° 3, ИЗДАТ. АКАД. НАУК СССР
1963.

Dans la méthode adoptée en URSS pour les mesures de variations de marée de g , l'échelle d'enregistrement des gravimètres GS-11 est déterminée par les déplacements de la plume de l'enregistreur¹. Pour cela on déplace la plume à deux reprises en opérant des rotations de la vis dans des directions opposées de telle sorte qu'après le second déplacement elle retourne à peu près dans sa position primitive. On obtient alors l'échelle par le rapport $[(Y_1 + Y_4) - (Y_2 + Y_3)] : (a + b)$, où a et b sont les lectures du micromètre et Y_i sont les ordonnées mesurées des quatre points d'enregistrement tels que les deuxième, troisième et quatrième points se trouvent respectivement à 24, 25 et 49 heures après le premier. Cette combinaison élimine pratiquement les ondes fondamentales de la marée. Habituellement, le second déplacement de la plume a lieu 25 heures après le premier ; on peut obtenir ainsi une série de 24 déterminations séparées de l'échelle [1].

En 1957 on a obtenu en URSS un grand nombre de séries de ce genre pour différents gravimètres. Habituellement les valeurs arithmétiques moyennes de l'échelle pour des séries séparées s'accordent assez bien pour les mêmes conditions d'observation et la dispersion des nombres à l'intérieur de chaque série présente un caractère accidentel.

Des cas se présentent où, tout en ayant une bonne concordance des nombres à l'intérieur des séries, les moyennes arithmétiques pour les différentes séries diffèrent fortement l'une de l'autre. Ces déviations excèdent fréquemment les erreurs limites qu'on peut attendre en raison de la concordance intérieure. On rencontre également des cas où les nombres à l'intérieur des séries séparées présentent une tendance clairement exprimée.

Les grandes divergences des valeurs moyennes de l'échelle provenant de séries séparées s'expliquent parfois par un désaccord évident entre les déplacements de la plume et les indications du micromètre.

¹ Lorsque l'on parle de la plume de l'enregistreur il faut comprendre soit l'aiguille pour l'enregistrement mécanique soit le spot du galvanomètre pour l'enregistrement photographique.

Dans des cas isolés ce désaccord a lieu quand la plume se déplace en deux fois, par exemple lorsqu'ayant provoqué un déplacement trop grand on craint que la plume ne sorte des limites de l'enregistreur et qu'on doit alors la faire revenir en arrière par un tour supplémentaire de la vis. Si la cause du grand écart réside dans ce fait il est facile de la décélérer en calculant la valeur approximative d'après la différence des ordonnées de deux points d'enregistrement voisins de l'instant du déplacement.

Il y a bien plus souvent des divergences importantes à cause du déplacement du zéro de l'appareil appelée dérive du gravimètre.

B.P. Pertsev a montré que la dérivée seconde de la fonction qui représente ce déplacement, intervient dans la combinaison des quatre ordonnées avec le coefficient 1,04 [2]. C'est pourquoi, si la courbe présente des déformations et une forme compliquée la valeur de l'échelle peut être faussée. En pratique, ces courbures se produisent souvent à cause de la variation de régime thermique du local où sont installés les appareils et parfois surviennent brusquement après la variation de tension du ressort de mesure au moment des déplacements.

Imaginons que les ondes de marées manquent sur l'enregistrement et que la courbe représente seulement la position des points de marée nulle à partir d'un niveau arbitraire ; cela peut toujours être admis pour un petit secteur d'enregistrement.

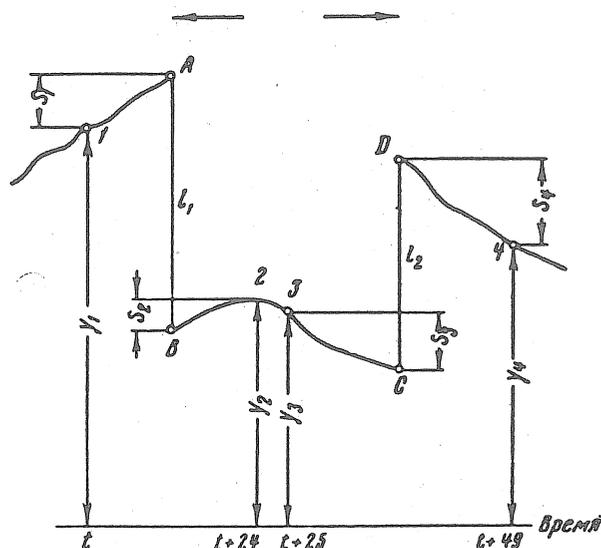


Fig. 1. Schéma de calcul de l'influence de la dérive sur le coefficient d'étalonnage.

Désignons par l_1 et l_2 les valeurs réelles des déplacements. Conformément à la fig. 1, on aura :

$$l_1 = (y_1 + s_1) - (y_2 - s_2), \quad l_2 = (y_4 + s_4) - (y_3 - s_3) \quad (1)$$

et

$$l_1 + l_2 = [(y_1 - y_2) + (y_4 - y_3)] + (s_1 + s_2 + s_3 + s_4). \quad (2)$$

la valeur de l'échelle est alors :

$$M = (l_1 + l_2) : (a + b). \quad (3)$$

Les ordonnées sont désignées ici par les lettres minuscules y afin de mettre en relief le fait qu'elles ne contiennent pas de marée.

Ainsi, l'échelle calculée d'après les ordonnées directement mesurées, renferme une erreur égale à la somme des segments s . Ces segments sont à proprement parler des écarts d'ordonnées des points réels à partir des ordonnées des points correspondant à leurs déplacements.

Le calcul des ordonnées de la dérive est une opération nécessaire dans l'analyse harmonique [2,3]. En se servant de ces ordonnées, il est facile de construire la courbe et d'après elle trouver aussi bien la valeur numérique des segments que leurs signes. Il n'est pas difficile de déterminer ces derniers en s'en tenant à cette règle simple : Si le déplacement est dirigé vers le bas alors les segments sont obtenus par la soustraction de droite à gauche, c'est-à-dire, $S_1 = y_A - y_1$ et $S_2 = y_2 - y_B$; s'il est dirigé vers le haut, on opérera alors de gauche à droite, c'est-à-dire, $S_3 = y_3 - y_C$ et $S_4 = y_D - y_4$. Les directions des effets sont indiquées sur la fig. 1 par de petites flèches. Par conséquent, aussi bien la valeur des segments que leurs signes dépendent de la forme de la courbe. C'est pourquoi il peut y avoir des combinaisons d'ordonnées pour lesquelles la somme S est égale à zéro : l'échelle calculée dans ce cas sera sûre. Comme la somme S n'est nulle part égale à zéro, toutes les valeurs de l'échelle sont erronées. La fig. 1 peut servir d'exemple : tous les segments y ont le même signe.

Avant d'exécuter l'analyse harmonique, les zones séparées de l'enregistrement sont déplacées graphiquement pour éliminer les décalages et obtenir une courbe continue. Par conséquent, les points A et B ainsi que C et D sont superposés et les segments S_1 et S_2 , S_3 et S_4 se comptent à partir des points superposés. Cette circonstance simplifie la détermination des corrections. Puisque l'ordonnée du point superposé entre deux fois en l et toujours avec des signes différents il n'est pas nécessaire de calculer chaque correction séparément : les différences des ordonnées $y_2 - y_1$ et $y_3 - y_4$ donnent du premier coup les sommes des corrections $S_1 + S_2$ et $S_3 + S_4$, ce qui réduit le calcul d'autant. La réalisation du graphique est ici aussi inutile : les corrections se trouvent directement d'après les ordonnées des points de la dérive calculés par la machine.

Pour uniformiser les calculs on peut calculer la correction totale dans le même ordre que l'échelle : on fait d'abord les sommes des ordonnées $y_1 + y_4$ et $y_2 + y_3$, ensuite la différence de ces sommes avec un signe opposé à la valeur corrigée de l'échelle. Ce procédé de calcul des corrections peut être utilisé aussi pour le calcul de l'échelle pour un seul déplacement, c'est-à-dire pour $M = l/a$. L'influence de la marée qui se calcule à la machine en même temps que la dérive doit être éliminée préalablement pour chaque point de l'enregistrement d'ordonnée y . On a supposé plus haut que la courbe de dérive était calculée tout à fait rigoureusement. Les ordonnées des points de cette courbe se calculent dans l'hypothèse que l'enregistrement du gravimètre est ininterrompu et ne présente pas de déformations qui ne puissent être représentées par la dérivée seconde [2]. Ces conditions ne sont pas toujours réalisées et c'est pourquoi la dérive s'en trouvera faussée. Les altérations sont particulièrement probables au moment des déplacements, c'est-à-dire justement là où leur influence sur l'échelle est particulièrement importante.

La continuité de la courbe d'enregistrement du gravimètre est obtenue comme on l'a déjà dit, par la réunion de ses secteurs séparés. Habituellement, on exécute cette opération à vue graphiquement en combinant l'allure générale de la courbe. Par conséquent, des erreurs atteignant quelques millimètres pourront facilement apparaître comme l'a montré l'expérience. Il faut considérer ces erreurs comme des déplacements non calculés dont la valeur et la direction sont inconnues.

La figure 2 en haut représente le cas où la dérive est provoquée par une cassure soudaine. S'il existait un procédé permettant de trouver le déplacement sans altérations, alors la ligne de déplacement se représenterait par deux segments de droites parallèles déplacées AB et CD. En effet, les ordonnées des points de la ligne se déterminent par combinaison des ordonnées des points répartis avant et après le déplacement.

En se servant des schémas de B.P.Pertsev [2] et en tenant compte d'après ces schémas de l'influence de la dérivée seconde, il n'est pas difficile de former l'allure de la dérive puisqu'elle s'obtient par le calcul. Comme on le voit par la fig. 2, la ligne en escalier remplace le déplacement effectif et coupe ce dernier au milieu. On peut, par le même moyen, construire une ligne calculée pour un déplacement d'inclinaison constante. Ce cas est représenté sur la figure 2 en bas [1]. Si on désigne la vitesse horaire de la dérive par k , l'altération au sommet de l'angle, la plus grande pour ce cas, sera égale à : $[(2 + 3 + 5 + 8 + 10 + 13 + 18)k : 15] - [24,5 - 0,5]k : 13 = 2,1 k$, c'est-à-dire qu'elle atteint à peu près le double de la valeur de k . En pratique on peut rencontrer n'importe quelles combinaisons de schémas proches de ceux qu'on vient d'examiner. Leurs altérations sont composées des altérations des éléments composants. La fig. 2 montre que les altérations se propagent sur les ordonnées qui se trouvent dans l'intervalle de $\pm 24,5$ heures, où s'arrête l'effet des corrections dans la dérivée seconde. La valeur de l'erreur dépend de la position du point réel sur la ligne de dérive. Strictement parlant, on aurait pu, d'après le caractère de la courbe construite, trouver cette position des points par rapport au déplacement pour lequel les altérations des corrections auraient pu être les plus petites. Ainsi pour le déplacement simple représenté sur la fig. 2 en haut, la position du point est la plus éloignée du déplacement ou au contraire est éventuellement proche de lui et donne la plus petite altération, à peu près égale à la moitié de l'erreur de déplacement.

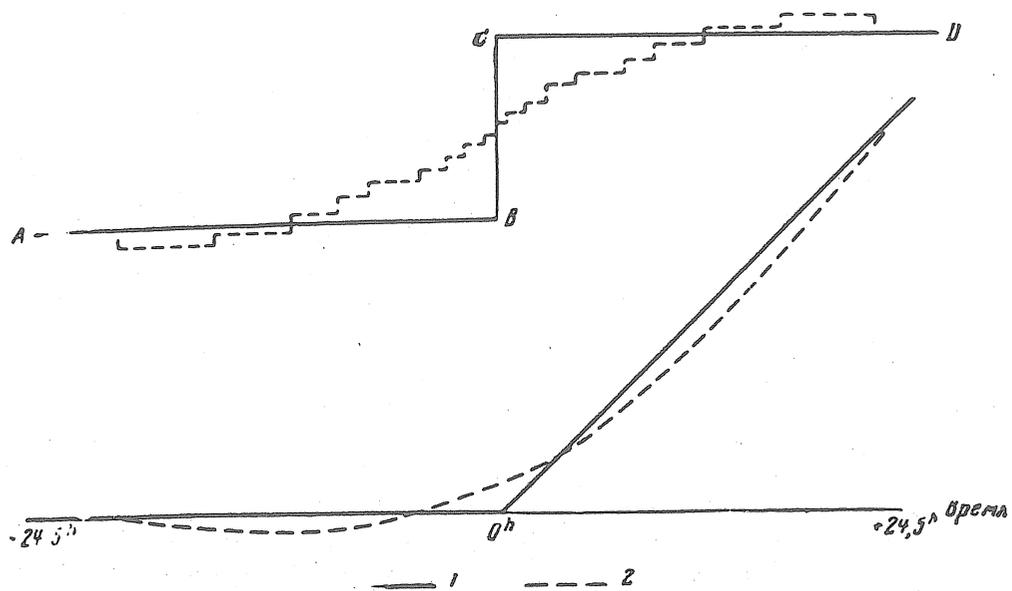


Fig. 2. Altérations de la dérive calculée :

1 - dérive réelle ; 2 - déplacement calculée.

1. L'altération de la ligne de dérive introduit des erreurs dans les ordonnées des points de la courbe de marée ce qui ne peut se refléter sur les résultats de l'analyse harmonique. Ce problème n'est pas envisagé ici car il doit constituer l'objet d'une recherche particulière.

Les altérations sont doublées pour les positions symétriques des points à partir du déplacement. Dans un cas plus compliqué, la position optimum des points dépend en outre de la direction de l'erreur de déplacement.

Ainsi une somme quelconque de corrections pour une combinaison de quatre ordonnées peut renfermer la plus grande erreur. Pour évaluer son importance nous envisagerons un des cas contraires.

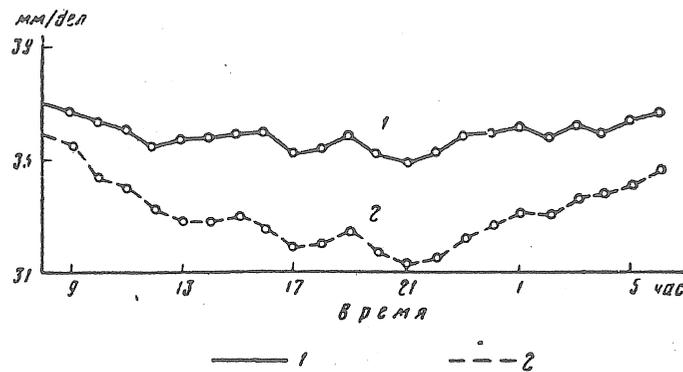


Fig. 3. Valeurs corrigées (1) et non-corrigées (2) du coefficient d'étalonnage à l'intérieur de la série d'après les mesures du 20 au 21 avril 1960.

Supposons une dérive représentée d'abord par une droite inclinée puis, après le déplacement, nulle et réapparaissant après le second déplacement avec une inclinaison de direction opposée. Dans certains cas l'inclinaison peut atteindre 15 à 20° ce qui représente 2 mm pour la vitesse horaire à l'échelle ordinaire d'enregistrement. Si on admet aussi que l'erreur dans le déplacement mesuré atteignait 5 mm alors l'erreur totale dans la correction, comme il n'est pas difficile de le calculer, atteint 10 à 13 mm. Dans le mouvement total moyen de la plume sur deux déplacements de 200 mm, l'erreur dans les corrections est de 5 - 6 % ; l'échelle trouvée sera affectée de la même erreur (*). Même dans ce cas peu vraisemblable, il est peu probable que la moyenne tirée de tous les nombres de la série contienne une erreur qui dépasse 2 à 3 %. Dans la plupart des cas les erreurs seront encore plus petites.

Généralement parlant, on aurait pu employer la courbe de dérive seulement pour trouver ces nombres dans la série pour lesquels la correction totale est égale à zéro.

Ces nombres déterminent la valeur non déformée de l'échelle et on n'en a pas besoin dans la correction. Cependant le calcul des corrections nulles, comme nous venons de le voir, n'est pas en soi impeccable. C'est pourquoi il est préférable de se servir ici non seulement des nombres pour lesquels les corrections calculées étaient égales à zéro, mais de former la moyenne de quelques nombres, par exemple des cinq nombres voisins de celles-ci. Dans ce domaine restreint les altérations et l'échelle ne doivent pas contenir d'erreurs considérables. On ne peut d'ailleurs perdre de vue qu'on ne peut employer ce procédé dans tous les cas où toutes corrections en série ne sont pas égales à zéro. C'est pourquoi, pour des raisons d'uniformité de réduction il est préférable de prendre pour l'échelle, la moyenne de tous les nombres corrigés de la série. On diminue ainsi l'influence des erreurs accidentelles.

(*) Il est possible que le cheminement systématique des nombres corrigés qui s'observe parfois s'explique par cette cause.

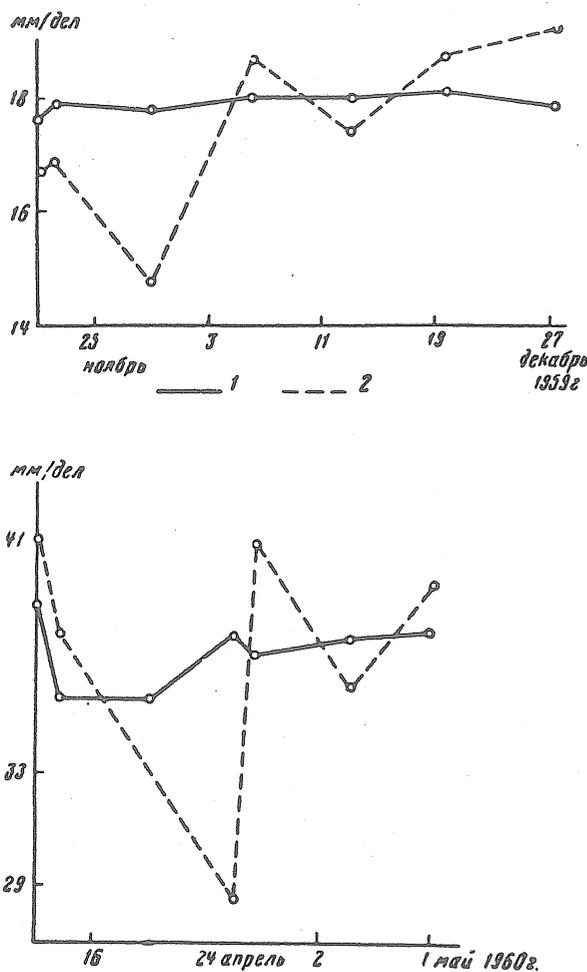


Fig. 4. Valeurs moyennes corrigées (1) et non-corrigées (2) du coefficient d'étalonnage d'après les séries. Mesures à Krasnaïa Pakhra (en haut) I. A. Sternberg (en bas).

Les procédés envisagés ici ont été appliqués à la réduction des observations de Krasnaïa Pakhra effectuées avec le gravimètre GS-11 N° 124, de décembre 1959 à mai 1960 et avec le gravimètre N° 135, de novembre 1959 à avril 1960, dans l'Institut Astronomique de l'Etat du nom de Sternberg à Moscou. Nous donnons à la figure 3 les résultats des nombres corrigés pour une série à Krasnaïa Pakhra. Pour les valeurs corrigées jointes par une ligne continue, le cheminement systématique est presque disparu et la moyenne arithmétique a augmenté de 33,0 à 35,6. Sur la figure 4 les lignes continues relient les valeurs corrigées des moyennes d'après les séries : en haut pour la dernière période d'observations de Krasnaïa Pakhra, en bas pour les observations à l'Institut Astronomique en octobre-novembre. La concordance des valeurs corrigées a été substantiellement améliorée.

Dans quelques séries l'échelle est obtenue d'après le second procédé, c'est-à-dire, d'après la moyenne des cinq nombres non corrigés. Les deux procédés ont donné des résultats voisins.

BIBLIOGRAPHIE

[1] B.P. PERTSEV

Expérience de détermination des coefficients d'échelle d'enregistrement pour les observations des variations de marées de la force de pesanteur.

Sh. "Recherches gravimétrique " N° 1 "Résultats A.G.Y." Yzd-vo. Ac. des Sc. URSS. 1960

[2] B.P. PERTSEV.

Sur le calcul des dérives pour les observations des marées élastiques.

Yzv. Ac. des Sc. URSS. Série Géophysique 1959 N° 4.

[3] B.P. PERTSEV.

Analyse harmonique des marées élastiques.

Yzv. Ac. des Sc. URSS. Série Géophysique, 1958 N° 8.

COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES POUR COMBLER LES LACUNES DANS
LES OBSERVATIONS DE MAREES TERRESTRES

M. V. Ivanova

Recherches sur les Marées Terrestres Art. N° 3 Publ. Acad. Sc. URSS, Moscou 1963

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ЗАПОЛНЕНИЯ ПРОПУСКОВ В НАБЛЮДЕНИЯХ
ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ

М. В. Иьанова

ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ, СБОРНИК СТАТЕЙ N° 3, ИЗДАТ. АКАД. НАУК СССР
Москва 1963.

Pour l'analyse harmonique d'une série mensuelle d'observations de marées de la force de pesanteur il faut disposer d'un enregistrement ininterrompu. Mais en pratique il survient souvent, pour différentes causes, des ruptures dans l'enregistrement allant de quelques heures à un jour (24 heures). Afin d'utiliser ces observations pour la réduction, il est nécessaire de combler les lacunes dans l'enregistrement.

R: Lecolazet [1] propose de prendre la combinaison suivante pour combler l'intervalle d'ordonnées manquantes :

$$Y_t = \frac{586(Y_{t+24} + Y_{t-24}) - 296(Y_{t+48} + Y_{t-48}) + 86(Y_{t+72} + Y_{t-72}) - 11(Y_{t+96} + Y_{t-96})}{730} \quad (\text{1er procédé})$$

où Y_t est l'ordonnée rétablie à l'heure t .

Comme le montre cette formule, cette méthode pour combler l'intervalle journalier exige l'utilisation d'ordonnées couvrant une durée de 8 jours (de 24 heures). Pour juger jusqu'à quel point il est utile de se servir de la méthode Lecolazet, nous avons pris également des combinaisons plus simples exigeant pour combler l'intervalle journalier respectivement 4 ou 2 jours (de 24 heures).

$$Y_t = \frac{4(Y_{t+24} + Y_{t-24}) - 48(Y_{t+48} + Y_{t-48})}{6} \quad (\text{2me procédé})$$

$$Y_t = \frac{Y_{t+24} + Y_{t-24}}{2} \quad (\text{3 способ})$$

En outre, nous avons examiné un 4me procédé pour combler les secteurs manquants de la courbe de marée consistant à utiliser les indications du second appareil puisque, d'après la méthode appliquée en URSS, l'enregistrement s'effectue par deux appareils simultanément. Cette méthode est la suivante.

Admettons qu'en un point il y ait un enregistrement de la courbe de marée par deux appareils A et B (fig. 1), que la courbe inscrite par l'appareil A présente une rupture entre les ordonnées Y_A et Y'_A , tandis que l'enregistrement de l'appareil B est ininterrompu. Pour combler la zone manquante, il faut d'abord éliminer la dérive des observations de l'appareil B puisque les deux appareils ont une dérive différente. Ensuite on calcule les plus grandes différences des ordonnées pour les deux appareils au voisinage de la rupture $\Delta Y_{Ai}, \Delta Y'_{Ai}, \Delta Y_{Bi}, \Delta Y'_{Bi}$, chaque différence des ordonnées se calculant en trois opérations. Ensuite on détermine le rapport des échelles d'enregistrement :

$$C_i = \frac{\Delta Y_{Ai}}{\Delta Y_{Bi}}, \quad C'_i = \frac{\Delta Y'_{Ai}}{\Delta Y'_{Bi}}, \quad C_{cp} = \frac{C_i + C'_i}{2}.$$

On calcule alors les différences des ordonnées pour l'appareil B sur le secteur $Y_B Y'_B$ entre Y_B et toutes les dernières ordonnées. En multipliant ces différences par le rapport moyen des échelles d'enregistrement C_{moyen} , nous obtenons les différences des ordonnées pour l'appareil A par rapport à l'ordonnée Y_A . Après le remplissage par ce procédé des ordonnées manquantes dans le secteur $Y_A Y'_A$ il peut arriver que la dernière ordonnée restituée ne coïncide pas avec l'ordonnée observée : cela traduit un calcul incomplet de la dérive pour l'appareil A. C'est pourquoi il faut déterminer la valeur de la différence entre l'ordonnée calculée et l'ordonnée observée et en supposant que le glissement sur le secteur $Y_A Y'_A$ est linéaire, on introduit proportionnellement les corrections dans toutes les ordonnées précédentes. Pour cette recherche on a pris une série d'enregistrements ininterrompus des variations de la force de pesanteur par les gravimètres GS - 11 ; on a supposé qu'en un secteur donné de la courbe on ait une rupture d'un jour entier. Cette rupture supposée a été comblée par les quatre procédés décrits plus haut. Toutes les ordonnées employées étaient préalablement corrigées de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre enregistreur.

Après avoir obtenu les ordonnées restituées (Y_B), on a calculé leur écart des ordonnées observées (Y_{obs}) :

$$\Delta_i = Y_{Hi} - Y_{Bi}$$

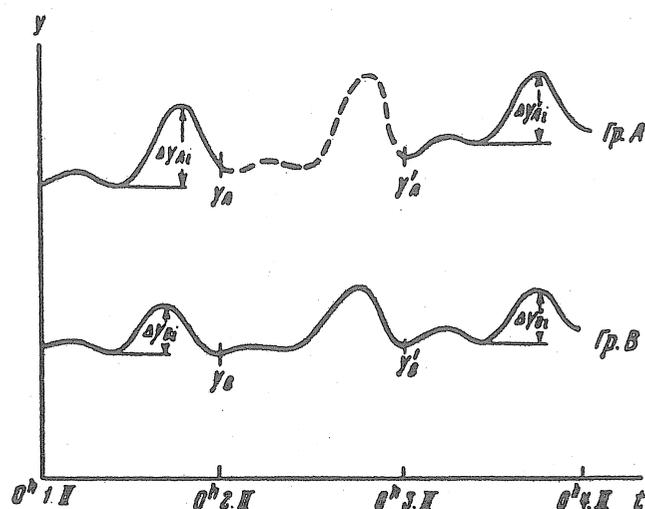


Fig. 1. Schéma d'enregistrement des variations de la force de pesanteur par deux gravimètres A et B en un point.

Par cette méthode on a comblé 8 intervalles journaliers différents dans des enregistrements obtenus à Tachkent (Gravimètres N° 126 et N° 134) et à Kiev (Gravimètre N° 135 et N° 124). Les résultats des calculs sont donnés à la table 1. Comme nous le voyons par les

tables, la valeur moyenne des écarts absolus $|\Delta|_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^{22} |\Delta_i|}{22}$ pour la méthode de Lecolazet

(1er procédé) est du même ordre que celle que donnent des combinaisons plus simples (2me et 3me procédés) et est plus grande que celle qui est obtenue par le calcul basé sur les indications du second appareil (4me procédé).

Toutes les parties restituées des courbes de marées observées à Kiev (gravimètre N° 124) ont été obtenues par déplacements par rapport à la courbe de marée observée (fig. 2). Ces courbes ont été raccordées aux points 0^h et 23^h avec les ordonnées observées correspondantes et déplacées proportionnellement pour les points intermédiaires (fig. 3). Les résultats obtenus

sont donnés dans la table 2. Comme nous le voyons par la table $|\Delta|_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^{24} |\Delta_i|}{24}$ est tout de

même grand pour les trois premiers procédés et est égal en moyenne à environ 5 mm au moment où la différence des amplitudes maximales et minimales l est égale à environ 40 mm (fig. 2,3) tandis que la valeur $|\Delta|_{moyen}$ d'après le 4me procédé est de 1,5 fois plus petite.

Table 1.

Écarts moyens absolus des ordonnées restituées à partir des ordonnées observées

Station	Date	N° du gravimètre	l, mm	1er procédé	2e procédé	3me procédé	4me procédé
				$ \Delta _{moyen}$	$ \Delta _{cp, M.M}$	$ \Delta _{moyen}$	$ \Delta _{moyen}$
Tachkent	5 février 1960	134	39,6	1,5	2,1	1,8	1,0
	6 »	134	44,5	1,8	2,1	1,9	0,9
	2 »	126	30,5	1,7	1,5	1,5	1,6
	3 »	126	27,6	1,2	1,4	1,7	1,3
Kiev	4 février 1961	135 °	43,3	11,0	6,2	4,2	4,4
	5 »	135	36,4	8,1	4,0	6,4	4,1
	25 mars	124	40,6	5,6	4,9	3,4	2,1
	26 »	124	37,2	9,9	10,7	12,3	5,6

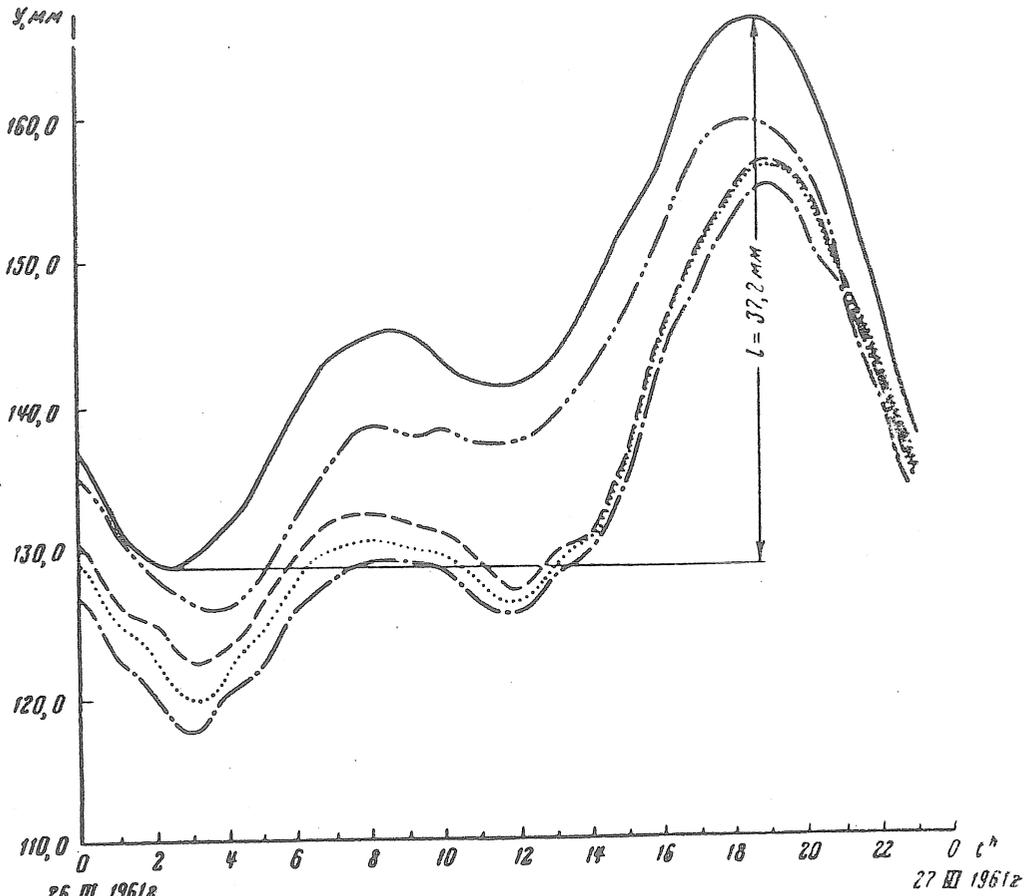


Fig. 2 - Graphique des variations de la force de pesanteur d'après les mesures du gravimètre N° 124 à Kiev. Ligne ininterrompue - courbe de marée observée (Y_{obs}); Pointillé par traits - courbe modale (1) calculée d'après le procédé 2; Pointillé avec un point - d'après le procédé 3; Pointillé avec deux points - d'après le procédé 4.

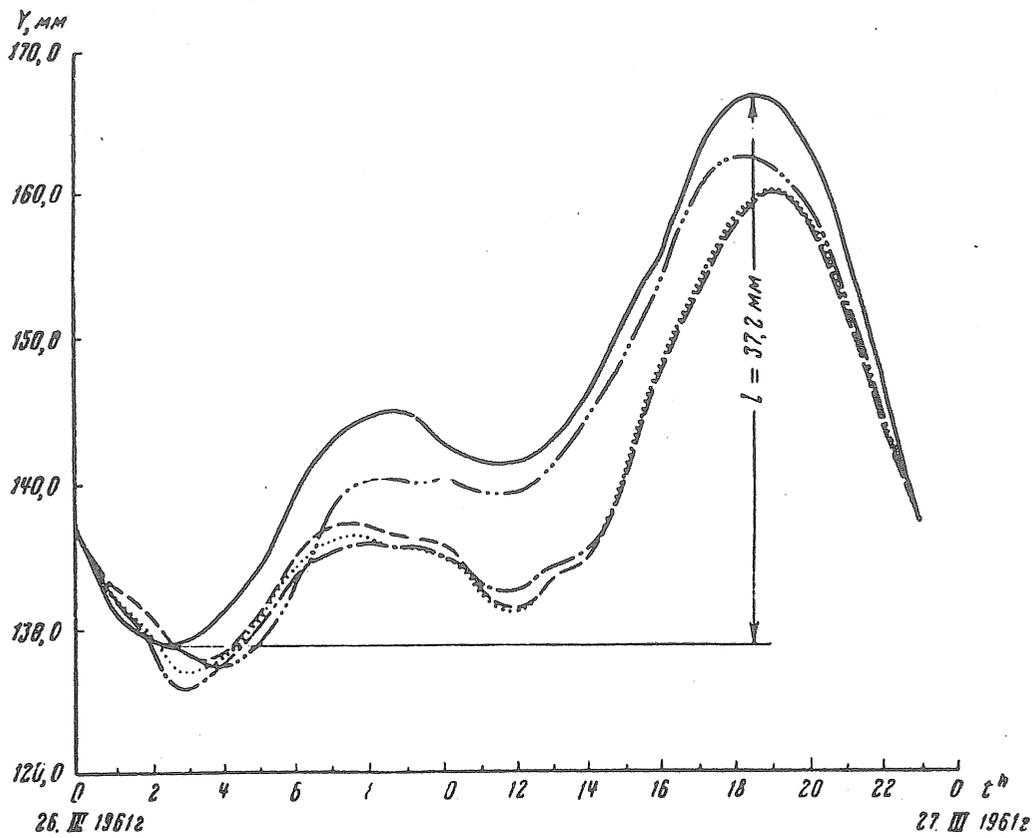


Fig. 3 - Graphique des variations de la force de pesanteur d'après les mesures faites par le gravimètre N° 124 à Kiev. Les courbes sont réunies aux points 0 et 23. Même représentations qu'à la figure 2.

Les courbes de marée observées prises pour les calculs montrent que l'allure générale de la dérive des appareils de Kiev a un caractère non-linéaire clairement exprimé tandis que la dérive à Tachkent est faible.

Pour éclaircir la cause des grandes erreurs dans les résultats obtenus pour Kiev on a pris, au lieu des ordonnées observées (Y_{ob}), les ordonnées corrigées de la dérive et on a fait les mêmes calculs.

En comparant les résultats obtenus, présentés à la table 3, avec les résultats de la table 2. on peut réellement dire que pour une dérive non-linéaire et grande des appareils on ne peut restituer les ordonnées manquantes dans un intervalle de jours entiers par les méthodes 1, 2 et 3 qu'avec des erreurs importantes.

Table 2.

Ecarts moyens absolus des ordonnées restituées à partir des ordonnées observées à la jonction de la courbe aux points 0^h et 23^h (station de Kiev).

Date	N° du gravimètre	l, mm	1er procédé Δ moyen	2e procédé Δ moyen	3me procédé Δ moyen	4me procédé Δ moyen
4 février 1961	135	43,3	5,3	3,4	4,2	4,3
5 »	135	36,4	6,1	5,0	4,9	4,3
25 mars	124	40,6	4,2	4,2	3,1	1,5
26 »	124	37,2	6,4	6,5	6,6	3,4

Table 3.

Ecarts moyens absolus des ordonnées restituées à partir des ordonnées observées corrigées de la dérive (station de Kiev)

Date	N° du gravimètre	l, mm	1er procédé Δ moyen	2e procédé Δ moyen	3me procédé Δ moyen
4 février 1961	135	43,3	1,8	1,5	1,6
5 »	135	36,4	1,7	1,6	1,6
25 mars	124	36,7	1,5	1,3	1,1
26 »	124	42,7	2,0	1,9	1,8

Par conséquent pour rétablir les ordonnées manquantes il est plus rationnel de se servir du 4me procédé qui est assez simple et donne la plus grande précision ou même par les procédés 2 et 3 qui exigent moins de travail que le 1er procédé mais qui donnent une précision du même ordre que le 1er procédé.

BIBLIOGRAPHIE

R. LECOLAZET

Sur la reconstitution des observations par interpolation.

Communic. Observ. Roy. Belgique, 1961, N° 188, série Géophys... N° 58.

L'INFLUENCE DE LA NON-LINEARITE DE L'ECHELLE DU GALVANOMETRE
ENREGISTREUR SUR LES RESULTATS DES OBSERVATIONS DE MAREES TERRESTRES

V.A. Volkov

Recherches sur les Marées Terrestres Article N° 3. Publ. Acad. Sc. URSS Moscou 1963

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ШКАЛЫ ГАЛВАНОМЕТРА РЕГИСТРИРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ
НАБЛЮДЕНИЙ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ

В. А. Волков

Изучение Земных приливов Сборник статей N° 3 Издат. Акад. Наук СССР Москва
1963

Pour l'enregistrement ininterrompu des variations de la force de pesanteur déterminées par l'effet de marée de la Lune et du Soleil, l'Institut de Physique de la Terre de l'Académie des Sciences de l'URSS se sert de 4 gravimètres GS-11 associés à des galvanomètres à miroir d'une sensibilité d'environ 1.10^{-11} a/mm.

Les premières observations [1, 2, 3, 4] ont montré que les galvanomètres présentent "une échelle non-linéaire". En d'autres termes il est apparu que leur sensibilité $C = \frac{\Delta\phi}{\Delta i}$ dépend de

l'angle ϕ d'orientation du cadre. Pour les trois échelles des galvanomètres (gravimètres N° 124, N° 126, N° 134) la non-linéarité était importante, si bien que les corrections V aux ordonnées mesurées, réduisant l'échelle non-linéaire effective du galvanomètre à une échelle linéaire, atteignaient pour quelques appareils 8-9 mm c'est-à-dire 5-7 % de l'amplitude de l'onde de marée. Nous exposons plus bas la méthode de détermination des corrections de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre et leur influence sur les résultats.

Les galvanomètres cités sont des appareils magnéto-électriques basés sur l'action réciproque de l'aimant constant et du cadre mobile par lequel passe le courant mesuré.

L'angle d'orientation ϕ du cadre du galvanomètre de haute sensibilité dû au passage du courant I est :

$$\phi = \frac{\Phi_m}{D} I = IC,$$

ou C est la sensibilité du galvanomètre, D est le coefficient du moment élastique créé par le fil enroulé, Φ_m est le flux de force magnétique maximum passant par le cadre.

La non-linéarité de l'échelle du galvanomètre peut être provoquée par les imprécisions de rectification des pôles de l'aimant, créant ainsi une inégalité dans la répartition de l'induction, et également par la dépendance de la valeur du coefficient D en fonction de l'angle ϕ d'orientation du cadre à cause d'une imprécision de suspension du cadre du galvanomètre.

Pour l'étude de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre on se sert d'un schéma potentiométrique où une résistance incorporée R_2 est proche de la valeur critique et diminue l'inertie du galvanomètre (fig. 1). En changeant la valeur de la résistance r à l'aide d'un magasin de résistances P-33, en valeurs strictement les mêmes (échelons) de l'ordre de 0,2, nous obtenons une variation presque proportionnelle de la valeur du courant i_1 exercé sur le galvanomètre et déterminé par l'expression :

$$i_1 = \frac{\nu}{\left(R_1 + R_2 + \frac{R_r \cdot r}{R_r + r}\right) \left(1 + \frac{R_r}{r}\right)}, \quad (1)$$

où ν est la tension de la source de courant.

En notant sur l'enregistrement la position du galvanomètre à chaque échelon, on peut obtenir la dépendance de la sensibilité du galvanomètre à partir de la valeur du courant c'est-à-dire la non-linéarité de l'échelle. Cette dépendance est donnée sur la figure 2 pour le gravimètre N° 124. Les courbes portées en graphique représentent les résultats de deux déterminations de non-linéarité à des températures de + 18° et + 23° C.

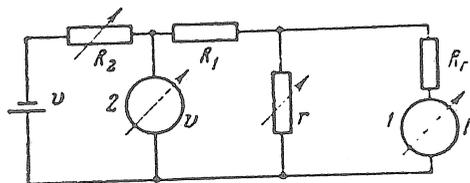


Fig. 1: Schéma électrique pour l'étude de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre.

1. galvanomètre étudié; 2. voltmètre à miroir de l'ordre de 0,2.

Les paramètres du schéma d'étude de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre dépendent des considérations suivantes. Le nombre de relevés sur l'enregistrement doit assurer l'harmonie de la courbe de non-linéarité pour toute l'échelle du galvanomètre. C'est pourquoi la valeur du déplacement du spot lumineux sur chaque échelon (ΔY) pour une largeur d'échelle de 280 mm n'est pas plus de 15-20 mm.

Ainsi, pour un écartement du spot de la position zéro à la limite de l'échelle, elle est de 6-8 degrés. Une plus petite valeur de ΔY augmenterait le nombre d'échelons et rendrait le processus de détermination de la non-linéarité par trop long et peu commode pour l'application pendant l'observation des marées terrestres. L'expression (1) montre que la valeur du courant i_1 n'est pas fonction linéaire de la résistance r et par conséquent que la différence entre l'augmentation de courant au premier échelon et l'augmentation au dernier échelon (pour une même valeur de Δr) est d'autant plus grande que l'est la valeur de r sur l'échelon final.

Les calculs montrent que la valeur choisie $\Delta r = 100$ ohms à huit échelons ne provoque pas une non-linéarité sensible de variation du courant. Ainsi, pour $r = 800$ ohms la non-linéarité du schéma atteint en tout 0,24 % de i_{800} ce qui correspond à 0,46 mm ($0,46 \cdot 10^{-1} \text{a}$) d'après l'échelle du galvanomètre. D'autre part, les échelons $\Delta r = 100$ ohms sont suffisamment grands pour que le changement de résistance sur les contacts dans le circuit de mesure ne puisse introduire des erreurs complémentaires, en particulier perturber la constance de Δr .

La résistance R_1 est déterminée en fonction de la sensibilité du galvanomètre afin d'assurer un déplacement du spot lumineux du galvanomètre de 15 à 20 mm pour une variation de

r de 100 ohms. Pour assurer la constance des intervalles de courant aux différentes déterminations de non-linéarité, la résistance de recharge R_2 se joint conséquemment à la résistance R_1 . La tension donnée sur le galvanomètre est contrôlée par un voltmètre à miroir de l'ordre de 0,2 avec une précision de 0,004 v. (0,34 %), ce qui assure la constance de l'étendue de variation du courant i_1 avec une précision de $0,64 \cdot 10^{-11}$ a. Au cours de la détermination de la non-linéarité il faut se servir du même schéma réservé au galvanomètre étudié afin d'éviter les variations des paramètres R_1 et R_r entre les déterminations voisines.

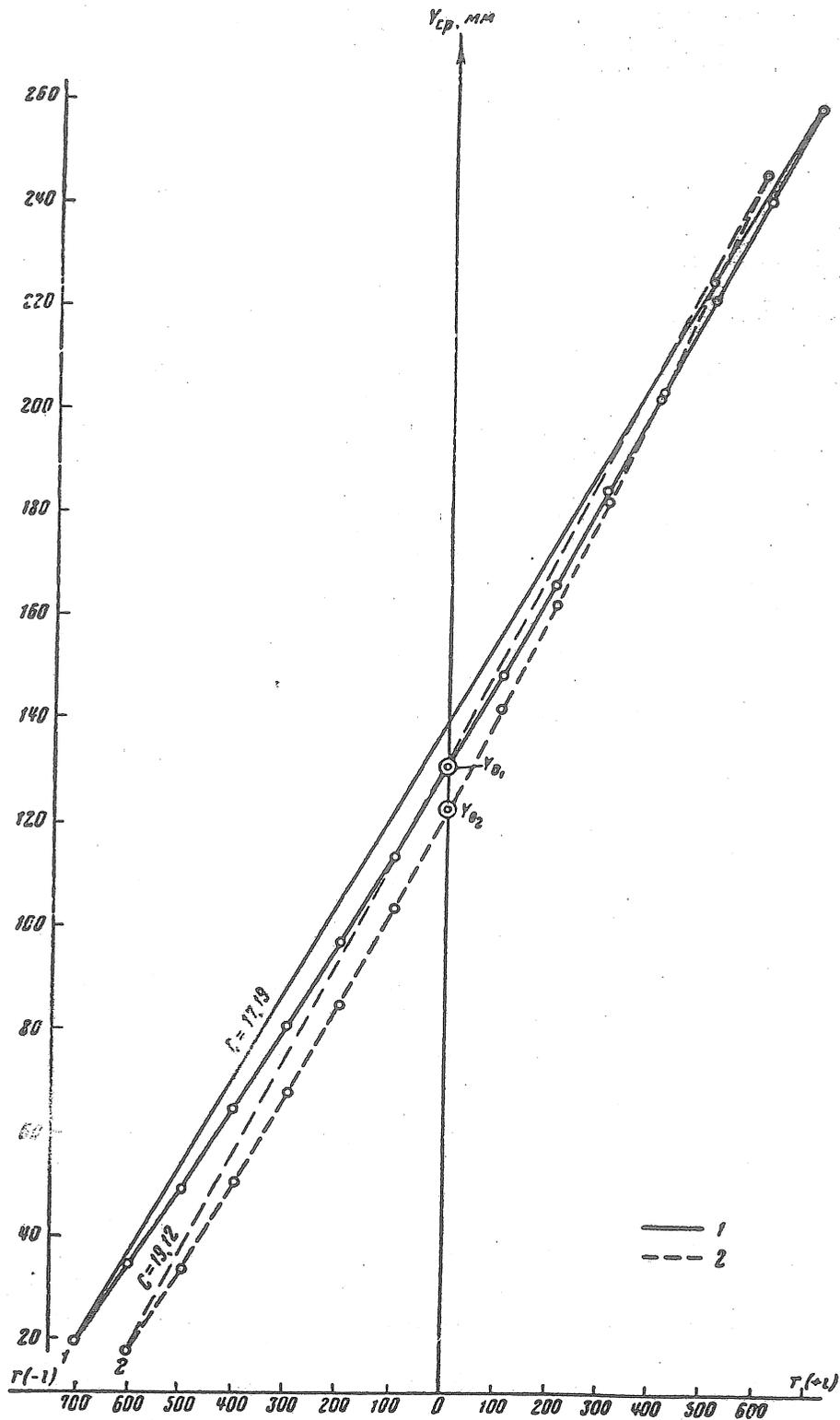


Fig. 2. Graphique de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre N° 124 à des températures de $+18^{\circ}\text{C}$ (1, $C_{\text{moy.}} = 17,19$) et $+23^{\circ}\text{C}$ (2, $C_{\text{moy.}} = 19,12$); Y_{01} - zéro du galvanomètre pour $t = +18^{\circ}\text{C}$; Y_{02} - zéro du galvanomètre pour $t = +23^{\circ}$. Les valeurs du courant i_1 sont reportées en unités conventionnelles d'après l'axe des abscisses (dans les divisions de l'échelle du magasin des résistances).

Ainsi, la détermination de la valeur de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre s'effectue en faisant varier la résistance r de zéro à 100 n ohms, où n est le nombre d'échelons de variation du courant provoquant la déviation maximum du spot lumineux du galvanomètre. A chaque échelon (0,100, 200 ohms, etc.) le spot se stabilise en 5 minutes. Sur cette durée, le cadre du galvanomètre a le temps de s'incliner de l'angle ϕ correspondant au courant donné.

La déviation du spot lumineux s'opère de la façon suivante : d'abord en partant du zéro du galvanomètre dans les deux sens, ensuite par variation de polarité du courant. On applique les deux procédés pour accroître la précision de détermination et on a ainsi pour chaque échelon les positions fixées du spot du galvanomètre. Les déviations du spot s'enregistrent sur le papier photographique (4)¹. Après la mesure sur l'enregistrement de la valeur de chaque déviation du spot (Y_k) pour chaque échelon de déviation, on calcule Y_k . Si on suppose que les corrections de non-linéarité de l'échelle du galvanomètre aux points extrêmes sont égales à zéro, alors le calcul des corrections de la non-linéarité par rapport à l'échelle linéaire choisie se réduit à ce qui suit (table 1).

Table 1.

Détermination de la non-linéarité de l'échelle (mm) du galvanomètre extérieur du gravimètre N° 134 (Station de Frounze - 21 décembre 1960)

$r, \text{ohm} (i_i)$	Y_k (ordonnée moyenne mesurée)	Y (ordonnée de l'échelle linéaire)	v_k (correction de non-linéarité)	Remarque.
500	254,48	254,51	+0,03	$Y_{\text{max.}}$
400	231,00	231,95	+0,95	
300	207,35	209,39	+2,02	
200	182,55	186,83	+4,28	
100	158,35	164,27	+5,92	
0	135,20	141,71	+6,51	
100	113,15	119,15	+6,00	
200	92,15	96,59	+4,44	
300	71,32	74,03	+2,71	
400	50,00	51,47	+1,47	
500	28,05	28,91	+0,86	$Y_{\text{min.}}$
600	6,35	6,35	0	
$\Delta Y_{\text{moy}} = 22,56$				

1. On calcule la différence des ordonnées des déviations extrêmes du spot

$$Y_{\text{max.}} - Y_{\text{min.}}$$

1. Si l'enregistrement des variations de marées de l'accélération de la pesanteur s'effectue sur un suiveur de spot Bruno-Lange avec un enregistrement visuel, alors la non-linéarité se détermine aussi sur le même appareil, puisque le suiveur de spot introduit dans l'enregistrement des altérations complémentaires.

2. On calcule le déplacement (linéaire) moyen du spot correspondant à la variation de courant de 100 unités conventionnelles

$$\Delta Y_{\text{moyen}} = \frac{Y_{\text{max.}} - Y_{\text{min.}}}{n}$$

où n est le nombre d'échelons correspondant à $Y_{\text{max.}} - Y_{\text{min.}}$.

3. On calcule les valeurs des ordonnées de l'échelle linéaire pour chaque échelon de mesure du courant

$$Y_{\Omega_k} = Y_{\text{min.}} + \frac{Y_{\text{max.}} - Y_{\text{min.}}}{n} \cdot \kappa$$

où κ est le numéro d'ordre de l'échelon.

4. On calcule les corrections V_k pour chaque ordonnée Y_k qui réduisent l'échelle non-linéaire réelle du galvanomètre à une échelle linéaire conventionnelle avec une sensibilité constante C_{moyen} .
5. D'après les valeurs V_k obtenues pour Y_k on construit le graphique des corrections sur lequel on porte les corrections V_k suivant l'axe des abscisses et les valeurs Y_k suivant l'axe des ordonnées (fig. 3,4).
6. Du graphique des corrections on élimine ce qui provient de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre pour n'importe quelle valeur de l'ordonnée Y_1 de l'onde de marée. Pour faciliter l'introduction des corrections dans les résultats d'observations on a constitué une table de corrections pour chaque millimètre d'ordonnées.

Pendant les observations des variations de marées de l'accélération de la force de pesantour à Poulkovo, Alma-Ata, Lantchou, Tachkent (1, 2, 3, 4) on a constaté que la valeur et le caractère de non-linéarité dépendent même d'une petite inclinaison du galvanomètre. C'est pourquoi, dans le processus d'observation, une attention particulière se porte sur la position constante des bulles des niveaux des galvanomètres. Pour cela, on a remplacé sur tous les galvanomètres (à l'exception du gravimètre N° 135) le niveau rond grossier par deux niveaux cylindriques plus sensibles, réciproquement perpendiculaires et ayant une valeur de division de 30 - 40 ".

Afin d'étudier plus soigneusement la dépendance de la non-linéarité de l'échelle des galvanomètres en fonction de l'inclinaison et mettre en évidence l'inclinaison pour laquelle la non-linéarité est minimale, You, S. Dobrochotov, V.V. Kopilov et l'auteur ont réalisé de nombreuses déterminations de la non-linéarité pour diverses positions des niveaux. Les figures 3 et 4 donnent les résultats de la détermination de la non-linéarité de l'échelle pour les galvanomètres N° 124 et N° 126. La ligne 1 représente la valeur minimale de non-linéarité de l'échelle du galvanomètre N° 124. L'inclinaison du galvanomètre dans le plan I du niveau provoque une variation de la non-linéarité désignée sur le graphique par des lignes fines ininterrompues. Les fines lignes pointillées représentent la dépendance de la non-linéarité du galvanomètre N° 124 en fonction de l'inclinaison dans le plan du niveau II. La courbe I représente la valeur minimale de la non-linéarité de l'échelle du gravimètre N° 126. Les recherches ont montré que

pour un meilleur ajustage des niveaux, le galvanomètre N° 126 a, dans la partie moyenne de l'échelle, la plus grande sensibilité diminuant aux extrémités, ce qui témoigne de la suspension correcte du cadre du galvanomètre. La valeur des corrections de non-linéarité de l'échelle oscille dans les limites de -1,5 mm à + 1,5 mm. La non-linéarité de l'échelle des galvanomètres N° 124 et N° 134 est du même type : la sensibilité croît d'un bout à l'autre du galvanomètre dans la direction croissante de l'échelle des ordonnées. Ce caractère de non-linéarité de l'échelle témoigne d'une suspension incorrecte du cadre du galvanomètre dont le résultat est qu'un certain angle de l'enroulement du fil correspond à la position zéro du spot lumineux. La valeur des corrections, selon l'ajustage des niveaux, atteint + 7 mm pour le galvanomètre N° 134 et + 9 mm pour le galvanomètre N° 124.

Le galvanomètre N° 135 a pratiquement une échelle linéaire. Les corrections dans les meilleures conditions ne dépassent pas 0,5 mm, ce qui est dans les limites de précision de toutes les observations.

Outre les variations du caractère de non-linéarité de l'échelle, sa sensibilité moyenne change avec l'inclinaison du galvanomètre. Ainsi, pour une inclinaison de 1 - 1,5 la variation de sensibilité atteint 5 % dans quelques cas (courbes 1 et 3, fig. 3). Pour déterminer la dépendance de la non linéarité de l'échelle du galvanomètre en fonction de la température, un même appareil est étudié à différentes températures. Nous donnons, à la figure 2, les résultats de la détermination de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre N° 124 à des températures de + 18° et + 23°, effectués avec la participation de G.S. Prochorovskii.

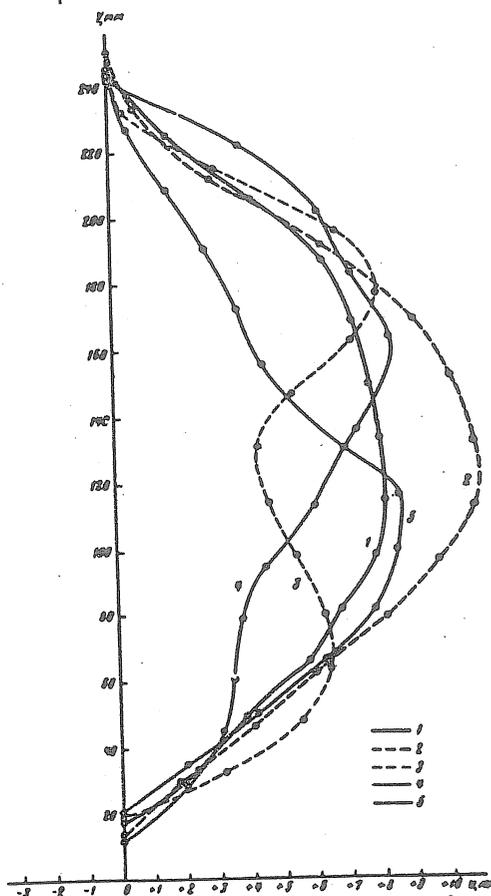


Fig. 3 - Graphique des corrections de non linéarité de l'échelle du galvanomètre N° 124 par différentes inclinaisons

1. Corrections au moment d'une déviation optimum du galvanomètre : niveau I = 2,0, niveau II = 2,0 ;
2. Corrections pour la position des niveaux I = 2,0, II = 0,0 ;
3. Corrections pour la position des niveaux I = 2,0, II = 4,0 ;
4. Corrections pour la position des niveaux I = 0,0, II = 2,0 ;
5. Corrections pour la position des niveaux I = 4,0, II = 2,0.

La courbe I représente la non-linéarité et la position du zéro de l'échelle du galvanomètre pour $t = + 18^\circ$. Après avoir chauffé l'endroit pendant 10 à 12 heures jusqu'à ce que $t = + 23^\circ$ pendant un jour (de 24 heures), on a fait une seconde détermination de la non-linéarité dont les résultats sont donnés par la courbe 2. Les observations ont été achevées par une température de départ de $t = + 18^\circ$.

Cette recherche a permis de constater qu'à une variation de température correspond une dérive propre au galvanomètre. En particulier, pour le galvanomètre N° 124, la variation de température en $\Delta t = + 5^\circ$ provoque une dérive de 8,5 mm, ce qui coïncide avec les données obtenues par les observations de Frounze (table 2). Au moment du retour à la température de départ, le zéro du galvanomètre retourne à la position initiale avec une précision atteignant 1 - 2 mm.

Outre cette dérive, il se produit aussi avec une variation de la température, une variation de la valeur de la non-linéarité de l'échelle et de la sensibilité moyenne du galvanomètre. Sur la figure 2, les droites reliant les points extrêmes de la courbe représentent la sensibilité moyenne du galvanomètre. En désignant conventionnellement la sensibilité par le déplacement du spot en millimètres, sur 1 degré nous avons pour $t = + 18^\circ$.

$$C_{18} = \frac{\Delta Y}{\Delta i_{100}} = 17,19 \text{ mm}$$

et pour $t = + 23^\circ$ $C_{23} = 19,12 \text{ mm}$, c'est-à-dire que la variation de sensibilité a atteint 11,8 %.

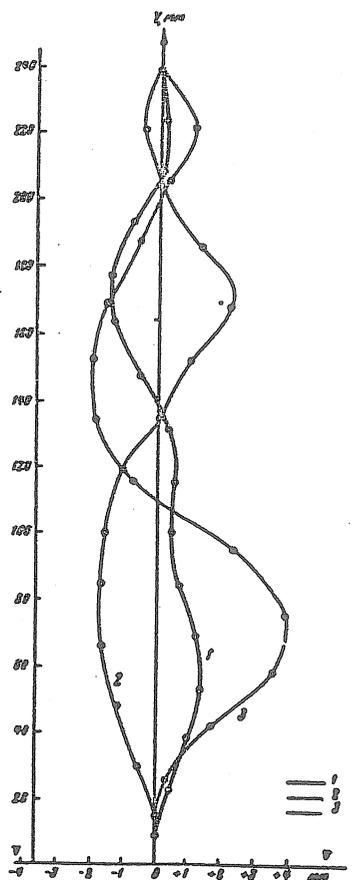


Fig. 4. - Graphique des corrections de non-linéarité de l'échelle du galvanomètre N° 126 pour différentes déviations (dans le plan du niveau II) :

1. Corrections pour une déviation optimum du galvanomètre : niveau I = 2,0 ; niveau II = 2,0 ;
2. Corrections à la position des niveaux : I = 2,0 , II = 1,0 ;
3. Corrections à la position des niveaux : I = 2,0 , II = 3,0.

Nous donnons dans la table 2 les valeurs du zéro des galvanomètres N° 134 et N° 136 tous les deux mois pour la période de décembre 1960 à juin 1961.

Pour le galvanomètre N° 134 ayant une suspension imprécise du cadre (température inférieure $t = + 16^{\circ}$, 21 février 1961), au moment d'une élévation de la température, le zéro se déplace à droite de l'échelle. Cette dérive n'étant pas proportionnelle à la variation de température, il est clair que celle-ci n'en est pas la seule cause. Pour le galvanomètre N° 126 présentant un caractère "normal" (forme d'un S) de non-linéarité de l'échelle, une dépendance de la dérive en fonction de la variation de température n'a pas été découverte.

Table 2.

Dérive de l'échelle du galvanomètre au moment des observations à la Station de Frounze

Gravimètre N° 134 .

Date	t, degré	Zéro du galvanom. en mm	Variation de la temp., en degrés.	Dérive en mm.
21 décembre 1960	17,5	135,18	+1,5	+2,04
21 février 1961	16,0	133,14		
30 avril 1961	19,0	139,02	+3,0	+5,78
13 juin 1961	21,8	136,88	+5,8	+3,74

Gravimètre N° 126

Date	t, degré	Zéro du galvanom. en mm.	Variation de la temp., en degrés	Dérive en mm.
20 décembre 1960	17,5	123,58	+1,5	-0,51
22 février 1961	16,0	124,09		
29 avril 1961	19,0	123,12	+3,0	-1,03
14 juin 1961	21,8	122,78	+5,8	-1,31

Remarque : Au départ on a pris une température inférieure, 21 - 22 février 1961.

Toutes les recherches effectuées ont montré que la non-linéarité de l'échelle dépend fortement aussi bien de la déviation du galvanomètre que de la température de l'air ambiant. C'est pourquoi, n'importe quelle variation de ces facteurs au cours des observations provoquera une variation du caractère de la non-linéarité de l'échelle et de la sensibilité moyenne du galvanomètre. En outre, il est probable que la non-linéarité de l'échelle puisse changer aussi à cause de variations des propriétés élastiques du fil au cours du temps. Aussi, les déterminations répétées de la non-linéarité de l'échelle au cours des observations sont nécessaires. Les observations effectuées par les collaborateurs de l'Institut de physique de la Terre de l'Académie des Sciences de l'URSS se poursuivent à présent tous les deux mois. Dans les ordonnées de l'onde de marée on introduit des corrections moyennes tirées de deux déterminations contiguës. Comme

il découle de la figure 2, le système choisi de détermination des corrections de la non-linéarité ne garantit pas la constance de la sensibilité de l'échelle linéaire. C'est pourquoi toutes les corrections de non-linéarité se rapportent à l'échelle linéaire avec la sensibilité obtenue par la première détermination.

Le changement de corrections peut s'expliquer par l'influence conjointe de trois causes :

- 1) la dérive de l'échelle du galvanomètre ,
- 2) la variation du caractère de non-linéarité de l'échelle ,
- 3) la variation de la valeur du courant maximum dans le galvanomètre et provoquant le déplacement des ordonnées des points extrêmes.

Puisque le schéma de recherche garantit la constance des intervalles de courant avec la précision pratiquement nécessaire, nous envisagerons l'influence des deux premières causes.

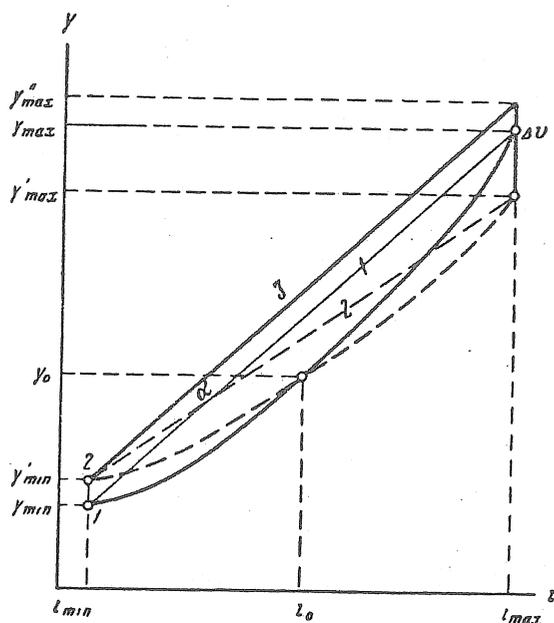


Fig. 5. Dépendance de la sensibilité provenant de la variation du caractère de non-linéarité du galvanomètre :

y_{min} , y_{max} sont les ordonnées des points extrêmes de la courbe de départ de non-linéarité 1, réduite à l'échelle linéaire 1 ;

y'_{min} , y'_{max} sont les ordonnées des points extrêmes de la courbe de non-linéarité 2 obtenues par la seconde détermination ;

i_{min} , i_{max} les valeurs du courant correspondant aux ordonnées des points extrêmes ;

3 est l'échelle linéaire par rapport à laquelle on calcule les corrections de la courbe 2.

La dérive du galvanomètre ne change pas la sensibilité du galvanomètre. Quant à la variation du caractère de non-linéarité de l'échelle (fig. 5) elle change la sensibilité de l'échelle linéaire conventionnelle, c'est pourquoi toutes les corrections calculées pour chaque détermination doivent être rectifiées afin de les rapporter à l'échelle linéaire conventionnelle avec la sensibilité obtenue par la première détermination.

Sur la figure 5 la courbe 1 est la première détermination de non-linéarité, les corrections V de la courbe 2 conduisent à l'échelle linéaire 1. On voit que pour obtenir les corrections de la courbe 2 à l'échelle linéaire 1, il suffit de les calculer par rapport à l'échelle 3, parallèle à l'échelle 1, c'est-à-dire qu'il est nécessaire de connaître encore les valeurs :

$$Y''_{\max} = Y'_{\min} + (Y_{\max} - Y_{\min}), \Delta U = Y''_{\max} - Y'_{\min}$$

En supposant la correction V au point extrême Y'_{\max} , égale à ΔV , on calcule les autres corrections V_k proportionnellement à la valeur $(Y'_k - Y'_{\min})$:

$$\Delta V_k = \frac{\Delta V}{Y'_{\max} - Y'_{\min}} \cdot (Y'_k - Y'_{\min})$$

La correction définitive est $V'_k = V_k + \Delta V_k$.

Par ce calcul on fait tourner l'échelle linéaire 2 d'un angle α . D'après les corrections obtenues V'_k , on construit le graphique des corrections de non-linéarité du type 4 et on compose la table des corrections.

Il faut remarquer que pour les résultats des observations faites à l'Institut de Physique Terrestre de l'Académie des Sciences de l'URSS, les valeurs des corrections ΔV_k sont petites, ce qui témoigne de la bonne stabilité du galvanomètre et de la variation insignifiante du caractère de non-linéarité de l'échelle,

Table 3.

Analyse harmonique d'une série mensuelle des corrections de non-linéarité de l'échelle (Frounze, jour-moyen 19 février 1962. Gravimètre N° 134).

Onde	$A_1, \mu\text{gal}$	$\varphi_1, \text{degré}$	$\Delta\varphi_1, \text{degré}$	$A_2, \mu\text{gal}$	$\varphi_2, \text{degré}$
M_2	47,27	+122,91	+4,42	2,95	+177,69
S_2	20,61	+233,44	+8,03	2,67	+349,40
N_2	9,01	+ 95,15	+3,55	2,76	+186,40
O_1	36,38	+ 57,99	+359,46	2,14	+36,63
K_1	49,26	+ 60,04	+2,25	3,15	+231,79

Onde	Pour $\varphi_1 = \varphi$			Pour $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$		
	$\delta A_{\max}, \mu\text{gal}$	$\delta A_{\max}, \% \text{ de } A_1$	$\delta\varphi_{\min}, \text{degré}$	$\delta A, \mu\text{gal}$	$\delta A, \% \text{ de } A_1$	$\delta\varphi_{\max}, \text{degré}$
M_2	2,95	6,2	0,0	0,09	0,2	3,5
S_2	2,67	12,9	0,0	0,17	0,8	7,3
N_2	2,76	30,6	0,0	0,42	4,2	17,0
O_1	2,14	5,9	0,0	0,06	0,2	3,4
K_1	3,15	6,4	0,0	0,10	0,2	3,6

Pour mettre en évidence l'influence de la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre sur les résultats définitifs des observations, on a soumis à l'analyse harmonique, par la méthode de B.P. Pertsev, une série d'un mois de corrections de non-linéarité du gravimètre N° 134 (Frounze, jour moyen 19 février 1951) pour lequel la valeur maximum des corrections est égale à $V = +7,0\text{mm}$. Le travail a été effectué d'après le schéma habituel (5), mais au lieu des ordonnées de la marée, on a introduit les corrections leur correspondant pour la non-linéarité. Les résultats de l'analyse sont donnés à la table 3 où se trouvent les amplitudes A_2 des cinq ondes fondamentales et leur phase ϕ_2 pour les corrections de non-linéarité de l'échelle, ainsi que les résultats de l'analyse de l'onde de marée observée avec le calcul des corrections de la non-linéarité (A_1, ϕ_1). Puisque l'altération de l'onde de marée par la non-linéarité dépend du rapport des phases ϕ_1 et ϕ_2 nous ne donnons dans la table 3 que ces erreurs ($\delta A, \delta \phi$) qui apparaissent pour $\phi_1 = \phi_2$ et $\phi_2 - \phi_1 = \frac{\pi}{2}$. Nous avons pris en considération les éléments suivants :

$$\begin{aligned} A \sin \varphi &= A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2, \\ A \cos \varphi &= A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2, \end{aligned} \quad (2)$$

où A est l'amplitude de l'onde de marée altérée par la non-linéarité de l'échelle ; A_1 est l'amplitude de l'onde de marée, obtenue par les observations avec le calcul de la non-linéarité ; A_2 est est l'amplitude déterminée par la non-linéarité de l'échelle pour l'onde donnée ; ϕ, ϕ_1, ϕ_2 sont les valeurs analogues des phases.

A partir des équations (2) nous obtenons les expressions connues :

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 + \frac{A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1}}{1 + \frac{A_2 \cos \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1}}. \quad (4)$$

Désignons par δA et $\delta \phi$ l'altération de l'amplitude et de la phase de l'onde de marée à cause de la non-linéarité, c'est-à-dire

$$\begin{aligned} A &= A_1 + \delta A; \\ \varphi &= \varphi_1 + \delta \varphi. \end{aligned}$$

Dans le cas où $\phi_1 = \phi_2$ nous aurons $A = A_1 + A_2$ et $\delta A = A_2, \delta \phi = 0$ (5)

Pour le cas $\phi_2 - \phi_1 = \frac{\pi}{2}$ à partir de (3) et (4), nous obtenons les relations évidentes

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = A_1 + \frac{A_2^2}{2A_1}, \delta A = \frac{A_2^2}{2A_1} \text{ et } \operatorname{tg} \delta \varphi = \frac{A_2}{A_1}. \quad (6)$$

De cette façon, au pis aller, l'altération de l'onde de marée due à la non-linéarité est égale à $\delta A = A_2$ pour l'amplitude, et est donnée par $\delta\phi = \frac{A_1}{A_2}$ pour la phase.

Puisque la valeur possible de ϕ_2 est, en considérant (4) :

$$A_2 = -2 A_1 \cos (\phi_2 - \phi_1),$$

il vient $\delta A = 0$,

$$\text{dans le cas général } 0 \leq \delta\phi \leq \arctg \frac{A_2}{A_1},$$

$$0 \leq \delta A \leq A_2.$$

On donne dans la table 4 les valeurs de δ et $\Delta\phi$ obtenues à partir d'une série mensuelle d'observations à Alma-Ata (1) avec et sans calcul de non-linéarité.

Les valeurs de δ et ϕ , obtenues avec et sans le calcul de la non-linéarité des échelles des galvanomètres à partir des séries de deux mois d'observations à Lantschou [2], ont le même ordre d'altérations que les valeurs données dans la table 4. Les résultats des altérations des ondes de marées dues à la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre à Alma-Ata et Lantschou sont dans les limites déterminées à la table 3.

Ainsi, la non-linéarité de l'échelle du galvanomètre exige un calcul au moment de la réduction des observations.

Table 4.

Résultats de l'analyse harmonique des observations, facteurs δ et $\Delta\phi$
(Alma-Ata, jour moyen 16 janvier 1959. Gravimètre N° 134).

Onde	δ			$\Delta\phi$, degré		
	avec le calcul de la non-linéarité	sans calcul de la non-linéarité	Altération %	avec le calcul de la non-linéarité	sans calcul de la non-linéarité	Altération (différence)
M_2	1,180	1,110	6,3	+4,4	+5,3	0,9
S_2	1,356	1,302	4,1	-3,0	-3,5	0,5
N_2	1,315	1,336	2,2	+6,7	+7,4	0,7
O_1	1,141	1,094	4,6	+0,1	+1,3	1,2
K_1	0,866	0,824	5,8	+4,5	+5,9	1,4

En conclusion, l'auteur exprime sa reconnaissance à N.N.Pariiskii, You S. Dobrochotov, B.P. Pertsev pour les conseils qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] N.N. PARIISKII, B.P. PERTSEV, D.G. GRIDNIEV, M.V. KRAMER, S.N. BARSENKOV.
Variations de marées de la force de pesanteur à Alma-Ata.
Sh. "Recherches gravimétriques" N° 1, sér. "Résultats AGI" Izd-vo Acad. des Sc. de l'URSS,
1960.
- [2] YOU S. DOBROCHOTOV, B.D. BELIKOV, IAN CHOUE-DZE, SIOU BIN-LIN.
Variations de marées de la force de pesanteur à Lantschou en 1959.
Sh. "Etude des marées terrestres" N° 2, sér. "Résultats AGI" Izd-vo Acad. des Sc. de l'URSS,
1961.
- [3] D.G. GRINDNIEV, N.N. PARIISKII, M.V. KRAMER, S.N. BARSENKOV, M.V. IVANOVA.
Variations de marées de la force de pesanteur à Tachkent.
Sh. "Etude des marées terrestres" N° 2, série "Résultats de l'AGI" Izd-vo Ac. des Sc. de l'URSS,
1961.
- [4] YOU. S. DOBROCHOTOV, B.D. BELIKOV, M.V. KRAMER, B.P. PERTSEV.
Observations des variations de marées de l'accélération de la force de pesanteur à Poulkovo en
1958.
Sh. "Recherches gravimétriques" N° 1, sér. "Résultats de l'AGI" Izd-vo Ac. des Sc. de l'URSS,
1960.
- [5] B.P. PERTSEV
Analyse harmonique des marées élastiques.
"Izd. - Ac. des Sc. de l'URSS, série géophysique, 1958, N° 8.
-

SUR L'ESTIMATION DE LA PRECISION DES OBSERVATIONS DES MAREES TERRESTRES.

A.P. Venedikov

Institut de Géophysique, Académie Bulgare des Sciences.

Lorsque l'on n'emploie pas la méthode des moindres carrés on peut calculer l'e.q.m. σ d'une lecture si l'on dispose d'une combinaison d'erreur [1, 2]. L'e.q.m. des résultats de l'analyse harmonique se trouve immédiatement par σ . Comme la précision de ces résultats nous intéresse, il est bien clair que l'on doit constituer la combinaison d'erreur d'une manière telle que σ soit une estimation non seulement des erreurs purement aléatoires, mais contienne aussi les erreurs de caractère plus ou moins systématique, que l'on n'élimine pas par l'analyse harmonique.

L'utilisation de la combinaison de Lecolazet $E = Z_{1/2}^5 Z_6(Y_3 + Y_0/2)$ est très répandue. Cette combinaison, comme le prévoit son auteur, doit donner une valeur trop basse pour σ , parce qu'elle filtre, en même temps que la marée et la dérive, presque toutes les erreurs systématiques. Sa composante $Z_{1/2}^5$ élimine un polynôme quelconque de degré 4 à partir de 6 lectures horaires consécutives et l'on sait que ces lectures peuvent être représentées précisément par un polynôme de degré 5.

Les résultats de la discussion de 9 mois d'enregistrement d'un gravimètre NA à Strasbourg [3] tendent à justifier cette appréhension. On a obtenu par la combinaison E : $\sigma = 1.17 \mu\text{gl}$, tandis que la combinaison $Z_{11,5} Z_{12} Z_{12,5} Z_{13}$ qui n'élimine qu'un polynôme de degré 3 sur un intervalle de 4 jours, a donné $\sigma = 15 \mu\text{gl}$.

Cette contradiction inattendue démontre nettement l'importance de l'élimination de la dérive pour la détermination de σ . Dans le cas idéal, la combinaison d'erreur doit laisser passer les mêmes portions de la dérivée que celles qui subsistent après les combinaisons éliminant la dérive dans l'analyse harmonique.

Nous aurons un test plus sévère en ce sens si l'on applique une combinaison d'erreur sur les valeurs qu'on obtient après l'élimination de la dérive par les combinaisons de l'analyse harmonique et non pas sur les lectures horaires. Nous allons exposer cette méthode d'estimation de la précision pour les méthodes de Lecolazet [4] et Pertzev [5].

La méthode de Lecolazet.

Désignons par L_1 et L_2 respectivement les combinaisons diurne et semi-diurne de Lecolazet que l'on applique aux lectures horaires par intervalles de 21 heures. Nous prendrons en considération la combinaison de Pertzev $P = \frac{14}{15} y_0 - \frac{1}{15} (Y_2 + \dots + Y_{18})$ que l'on emploie très souvent avant L_1 et L_2 .

On peut appliquer sur la série diurne, en tant que combinaison d'erreur, la combinaison d'interpolation [6] E : - 161, 646, - 1555, 2454, - 2883, 2454, - 1555, 646, - 161 et de même sur la série semi-diurne la combinaison d'interpolation [6] E₂ : 317, 562, 1497, 1675, 2359, 1675, 1497, 562, 317. Bien entendu dans le calcul de σ on devra tenir compte de la corrélation interne entre les valeurs dans chacune des deux séries.

Supposons que nous ayons obtenu, par application sans superposition de E₁ sur la série diurne, n valeurs indépendantes $\epsilon'_1 \dots \epsilon'_n$. Chacune d'entre-elles peut être considérée comme une combinaison linéaire des lectures horaires - c'est la combinaison produit E₁ L₁ P. Alors si [E₁L₁P] est la somme des carrés des coefficients de E₁L₁P, nous aurons pour l'e.q.m. d'une lecture, déduite par la série diurne.

$$\sigma_1^2 = \frac{\sum_i \epsilon'^2_i}{n [E_1 L_1 P]} \quad (1)$$

Par analogie, si $\epsilon''_1, \dots, \epsilon''_n$ sont des valeurs obtenues par E₂ à partir de la série semi-diurne et si [E₂L₂P] est la somme des carrés des coefficients de E₂L₂P, l'e.q.m. obtenue par la série semi-diurne sera :

$$\sigma_2^2 = \frac{\sum_i \epsilon''^2_i}{n [E_2 L_2 P]} \quad (2)$$

Bien entendu si l'on n'emploie pas la combinaison P on doit l'exclure des deux combinaisons produites.

On voit que nous aurons deux valeurs σ_1 et σ_2 pour l'e.q.m. d'une lecture. On ne doit pas s'attendre à ce qu'elles soient égales parce que l'influence de la dérive sur les combinaisons diurne et semi-diurne est essentiellement différente. C'est encore un avantage de cette méthode d'estimation qu'elle nous permette d'estimer séparément les éléments à partir des ondes diurnes et semi-diurnes.

On peut remarquer que nous envisageons ici les erreurs systématiques et l'influence de la dérive. En même temps les formules (1) et (2) sont établies en supposant que les erreurs des lectures horaires sont aléatoires et indépendantes. En fait σ_1 et σ_2 ont un sens de valeurs effectives si les lectures sont indépendantes et avec une e.q.m. égale à σ_1 ou à σ_2 , nous obtiendrons respectivement les mêmes valeurs pour ϵ'_i ou ϵ''_i .

Nous avons trouvé les valeurs numériques suivantes :

$$\begin{aligned} \sqrt{[E_1 L_1 P]} &= 21253, & \sqrt{[E_1 L_1]} &= 23520 \\ \sqrt{[E_2 L_2 P]} &= 18320, & \sqrt{[E_2 L_2]} &= 18700 \end{aligned}$$

Comme on le constate, la combinaison de Pertzév n'altère pas sensiblement ces résultats.

Nous avons déterminé σ_1 et σ_2 , en suivant cette méthode, pour 25 mois d'observations à Uccle [7], qui sont présentés dans le tableau 1. Dans les calculs on n'a pas observé les intervalles des analyses harmoniques.

La méthode d'analyse de Pertzev.

Dans cette méthode on élimine la dérive par P. Ensuite on additionne les ordonnées trois par trois, c'est-à-dire qu'on applique la combinaison $X = Y_0/2 + Y_1$. Sur ces sommes on applique quatre combinaisons X_m^k dont deux diurnes ($m = 1$ et $m = 2$) et deux semi-diurnes ($m = 3$ et $m = 4$). On écrit ces combinaisons en notation de Labrouste comme suit :

$$\begin{aligned} X_1^k &= -Z_3 Z_6 Y_{1,5}, & X_2^k &= Z_6 Y_{1,5} Y_3 \\ X_3^k &= Z_{1,5} Z_3 Y_6, & X_4^k &= -Z_3 Y_{1,5} Y_6 \end{aligned}$$

On voit que X_1^k et X_3^k éliminent une fonction linéaire, tandis que X_2^k et X_4^k éliminent une constante seulement. C'est pourquoi, pour avoir des estimations plus sévères, nous avons traité X_2^k et X_4^k seulement.

Suivant la méthode préconisée en [6] pour constituer les combinaisons d'interpolation E_1 et E_2 , nous avons trouvé les combinaisons d'erreurs suivantes :

$$\begin{aligned} F_1 &: -177, +949, -2222, +2898, -2222, +949, -177 \text{ (pour } X_2^k) \\ \text{et } F_2 &: -173, +935, -2197, +2870, -2197, +935, -173 \text{ (pour } X_4^k). \end{aligned}$$

Pour les sommes des carrés des coefficients des combinaisons $F_1 X_2^k XP$ et $F_2 X_4^k XP$ nous avons trouvé :

$$\sqrt{[F_1 X_2^k XP]} = 15520 \quad \text{et} \quad \sqrt{[F_2 X_4^k XP]} = 19140.$$

A l'aide de ces valeurs et de formules analogues aux formules (1) et (2), on peut calculer σ_1 et σ_2 .

Dans le tableau 2 nous avons donné les résultats obtenus de cette manière pour les données de la station d'Uccle [7]. Cette fois nous devons calculer les valeurs X_2^k et X_4^k , sur lesquelles nous avons porté les combinaisons F_1 et F_2 respectivement.

Analyse spectrale.

Comme on voit dans les tableaux 1 et 2, nous avons obtenu par cette méthode des valeurs surpassant plusieurs fois la valeur de σ déduite par E, et cela se marque particulièrement pour σ_1 . Ce résultat est confirmé par la valeur de σ déterminée en [3] par $Z_{11.5}$ Z_{12} $Z_{12.5}$ Z_{13} cité dans l'introduction. Nous avons trouvé encore une confirmation dans les résultats de l'analyse spectrale des observations de l'Institut géophysique de Californie faites avec le gravimètre LaCoste and Romberg dans 12 stations [8]. On y a déterminé le bruit de fond à partir du spectre de la puissance de l'enregistrement. On accepte le bruit à la fréquence de 1 cycle par heure (cph) comme bruit blanc sur l'intervalle des fréquences de 0 à 1 cph et on en déduit l'e.q.m. d'une ordonnée. On a obtenu ainsi des valeurs de σ variant de 0,75 à 3,6 $\mu g l$ pour les différentes stations. Ces valeurs sont en accord avec la valeur trouvée par Melchior [9] à l'aide de E.

Nous avons en [8] encore une estimation plus sévère. On détermine le bruit aux fréquences des ondes diurnes et semi-diurnes et on en estime la précision des résultats de l'analyse de Fourier.

Nous avons trouvé les valeurs σ_1 et σ_2 présentés dans le tableau 3 de la manière suivante. Nous considérons le bruit à une fréquence (diurne ou semi-diurne) comme bruit blanc sur tout l'intervalle de fréquence. Nous le multiplions alors par la longueur de cet intervalle (= 1 cph) et prenons la racine carrée. Nous acceptons le résultat comme étant l'e.q.m. σ_1 - déduite du bruit des ondes diurnes et σ_2 - du bruit des ondes semi-diurnes.

Conclusions.

Nous avons donné au tableau 4 les valeurs de σ obtenues par la combinaison E en comparaison avec d'autres estimations. On voit que σ_1 et σ_2 obtenues par les méthodes proposées ici dépassent considérablement σ . Il est encore à remarquer que σ_1 et σ_2 diffèrent sensiblement, σ_1 étant approximativement deux fois plus grand que σ_2 . Il s'ensuit que ces méthodes sont beaucoup plus sévères et aussi qu'elles fournissent plus d'information puisqu'elles nous procurent des estimations différentes pour les ondes diurnes et semi-diurnes. La comparaison avec l'estimation faite par $Z_{11,5}$ Z_{12} $Z_{12,5}$ Z_{13} [3] et par l'analyse spectrale [8] nous donne des raisons de croire que nos résultats possèdent un sens réel.

Il est très important de rechercher l'origine des grandes erreurs que nous avons obtenues. Ce sont évidemment des erreurs de caractère systématique. Ce ne sont pas des fluctuations de sensibilité parce que dans des intervalles de temps tellement courts ils sont de loin inférieurs à 1 %, tandis que σ_1 est de l'ordre de 10 % de la marée. Il ne reste à soupçonner que l'élimination imparfaite de la dérive et cela se confirme par le fait que l'on a toujours $\sigma_1 > \sigma_2$. De même, pour la méthode de Lecolazet où la dérive est un peu mieux éliminée que par la méthode de Pertzev, nous avons des erreurs un peu plus petites. Les erreurs dans le tableau 3 sont plus grandes que les autres et cela peut être expliqué par le fait qu'en [8] on a éliminé une dérive linéaire seulement.

On peut dire en conclusion qu'une étude plus approfondie de l'influence de la dérive sur l'analyse harmonique est nécessaire. Les combinaisons E_1 , E_2 et F_1 , F_2 peuvent être utiles. Il convient de rappeler à cet égard l'étude effectuée par Brein [10], qui a trouvé des anomalies essentielles dans certaines combinaisons diurnes et semi-diurnes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. LECOLAZET
Sur l'estimation des erreurs internes affectant les résultats d'une analyse harmonique mensuelle.
B.I.M. N° 17, 1959.
- [2] A.T. DOODSON, G.W. LENNON
A mesure of the accuracy of a single harmonic analysis.
Third Int. Symp. Trieste, p. 208 - 1959.
- [3] R. LECOLAZET
Rapport sur les observations de marée gravimétrique faites à Strasbourg en 1957, 1958 et 1959.
BIM N° 21, p. 391, 1960.
- [4] R. LECOLAZET
La méthode utilisée à Strasbourg pour l'analyse harmonique
BIM N° 10, 1958.
- [5] Б И. ПЕРИЕВ
Гармонический анализ упругих приливов
Изв. АН СССР, сер. Геоф № 8, 1958.
- [6] R. LECOLAZET
Sur la reconstitution des observations par interpolation.
Comm. Obs. R. Belgique, N° 188, Série Géoph. N° 58, p. 267, 1961.
- [7] P. MELCHIOR
Mesures faites avec le gravimètre Askania GS 11 N° 160 en 1960, 1961 et 1962.
Obs. R. Belgique, Bull. Obs. Marées terrestres Vol. 1 Fasc. 5, 1962.
- [8] J.C.HARRISON, N.F.NESS, I.M.LONGMAN, R.F.S.FORBES, E.A.KRAUT, L.B.SLICHTER.
Earth-Tide Observations made during the International Geophysical Year.
J. Geoph. Res., Vol. 68, N° 5, p. 1497, 1963.
- [9] P. MELCHIOR
Comportement de deux gravimètres.
Comm. Obs. R. Belgique, N° 188, S. géoph., N° 58, p. 314, tableau 2, 1961.
- [10] R. BREIN
Etude des Marées terrestres par des valeurs instantanées caractéristiques.
Comm. Obs. R. Belgique, N° 188, S. Géoph., N° 58, p. 257, 1961.

Tableau 1.

Uccle, gravimètre Askania 160, Méthode Lecolazet,
Erreurs q.m. σ_1 et σ_2 déterminées par E_1 et E_2 .

Mois testé	n	σ_2 $\mu\text{g/l}$	σ_1 $\mu\text{g/l}$	Mois testé	n	σ_2 μgal	σ_1 $\mu\text{g/l}$
1960, IV	4	± 7	± 6	1961, V	4	± 6	± 11
V	3	11	14	VI	4	6	13
VI	4	6	8	VII	4	8	11
VII	3	5	12	VIII	4	5	8
VIII	4	5	10	IX	4	5	11
IX	4	7	9	X	4	5	6
X	4	9	18	XI	4	8	7
XI	4	4	30	XII	4	4	25
XII	4	6	18	1962, I	3	4	10
1961, I	4	5	46	II	4	13	30
II	2 (1)	1	1	III	4	9	23
III	2	11	2	IV	4	17	11
IV	3	8		11 tous les mois	92 (91)	$\pm 6,0$	$\pm 20,9$

Tableau 2.

Uccle, gravimètre Askania 160, Méthode Pertzev,
Erreurs q.m. σ_1 et σ_2 trouvées par F_1 et F_2

1960, IV	4	± 14	± 15	1961, V	4	± 6	± 22
V	4	7	12	VI	4	3	8
VI	4	10	8	VII	4	6	10
VII	4	2	19	VIII	4	4	14
VIII	4	4	17	IX	4	8	10
IX	4	4	12	X	4	5	16
X	4	12	37	XI	4	8	12
XI	4	18	68	1961, XII	4	6	35
1960, XII	4	23	12	1962, I	4	2	14
1961, I	4	32	54	II	4	24	73
II	3 (2)	13	16	III	4	6	22
III	2	2	10	IV	4	7	11
IV	4	12		16 tous les mois	97 (96)	± 12	± 28

Tableau 3.

Gravimètre Lacoste and Romberg, Analyse spectrale,
Erreurs q.m. σ_1 et σ_2 .

Stations	σ_2 $\mu\text{g/l}$	σ_1 $\mu\text{g/l}$
Honolulu	± 20	± 39
Glendora	23	49
Wake Island	16	23
Manila	7	15
Saïgon	12	28
New Delhi	14	20
Bunia	9	17
Trieste	22	43
Bidston	14	35
Bermuda	14	28
Lwiro	16	24
Winsford	11	19
Toutes les stations	± 16	± 30

Tableau 4.

Station	Gravimètre	Durée des observ.	Méthode de détermination de l'e.q.m. d'une lecture	σ_2 $\mu\text{g/l}$	σ_1 $\mu\text{g/l}$	e.q.m. déterminée par E
Uccle	Ask. 160	25 mois	Analyse Lecolazet comb. d'erreurs E_1 et E_2	± 6	± 21	$\pm 2,20$
Uccle	Ask. 160	25 mois	Analyse de Pertzev comb. d'erreurs F_1 et F_2	± 12	± 28	$\pm 2,20$
World Wide Programme	L.C.R.2 et 4	22 mois	Analyse spectrale	± 16	± 30	$\pm 0,81$
Strasbourg	N.A., 138	9 mois	$Z_{11,5} Z_{12} Z_{12,5} Z_{13}$	± 15		$\pm 1,17$

CONSTRUCTION ET INSTALLATION DE CLINOMETRES A LA STATION DE KANNE
(PROVINCE DE LIMBOURG)

par

L. Bragard

(Université de Liège)

RESUME. Nouvelles méthodes de construction et d'installation de clinomètres de haute sensibilité dans une station souterraine en vue de l'étude des variations de la verticale. Premiers résultats.

INTRODUCTION. Un clinomètre ou pendule horizontal est constitué d'un support rigide auquel est attaché un bras mobile muni d'un miroir. Par suite des inclinaisons du sol, le bras se déplace jusqu'à occuper une position d'équilibre. Ces déplacements enregistrés optiquement permettent d'étudier les variations de la verticale locale.

La géométrie du support ou bati peut se présenter sous différentes formes : celles d'une potence reposant sur une embase, d'un prisme, d'un tétraèdre, chacune d'elles étant d'ailleurs susceptible de multiples variantes dont le but est d'assurer une excellente stabilité de l'instrument.

Le système de suspension du bras, le plus généralement adopté est celui de Hengler-Zöllner.

En ce qui concerne le choix du matériau, la silice fondue semble hautement préférable aux alliages métalliques.

Lors de la mise en station de tels instruments, on se trouve aux prises avec deux problèmes délicats : celui de la dérive et celui de l'amortissement. La possibilité de les mieux dominer dépendra pour une grande part du principe de construction et de la méthode d'installation.

A priori, les dérives peuvent provenir de causes instrumentales, géophysiques, voire tectoniques. Cependant certains auteurs ont tendance à les attribuer préférentiellement sinon uniquement à des causes géophysiques, tandis que d'autres en rendent responsables les instruments et plus spécialement l'intervention d'éléments métalliques tant dans la construction de l'instrument que dans celle de l'embase et des organes de réglage.

Ces opinions ont guidé le choix des méthodes de construction et d'installation, en imposant d'une part, par exemple, des conditions aussi strictes que le creusement de niches, leur étanchéisation complète, la réalisation d'un système de liaison clinomètre-écorce terrestre par cylindres-crapaudines scellées à la roche. D'autre part, elles ont conduit à proscrire dans la construction l'usage de métaux en vue de sauvegarder la permanence des dimensions nécessaires des instruments par l'emploi de silice fondue.

Leur mise en oeuvre a donné des résultats intéressants, les meilleures sensibilités atteintes étant inférieures de quelques dix-millièmes à $0^{\text{e}}001/\text{mm}$, sans pourtant que soit résolu le problème de l'origine des dérives.

Quant à l'amortissement réalisé jusqu'à présent sur un très petit nombre d'instruments, il présente certains inconvénients pour la mesure de la sensibilité, impliquant notamment la constance des propriétés élastiques du sol, si l'on n'a pas un dispositif permanent d'étalonnage tel que la crapaudine dilatable de J. Verbaandert [1, 49].

En vue d'aborder ces deux problèmes dans les meilleures conditions possibles de construction et de contrôle du fonctionnement, nous avons conçu et réalisé avec la collaboration de deux techniciens de l'Université de Liège, un clinomètre à suspension de type Hengler-Zöllner et à bâti simplifié, que nous avons installé dans une station souterraine à Kanne (Province de Limbourg), suivant une méthode nouvelle permettant de faire aisément et correctement les réglages et étalonnages nécessaires.

DESCRIPTION ET CONSTRUCTION DU CLINOMETRE I.A.G.U.L. TYPE I.

Le bâti de cet appareil en silice fondue de variété opaque est constitué d'un pont fait au moyen d'une tige creuse de 0,9 cm de diamètre pliée à angles droits, à la partie supérieure duquel est soudée près d'une des pliures une tige semblable pliée en équerre (fig. 1). A la partie supérieure de cette dernière sont soudées symétriquement par rapport à son centre et longitudinalement deux tiges pleines d'un diamètre de 0,3 cm dont les extrémités situées sur une même verticale servent à la suspension des deux fils d'attache du bras. Au milieu de cette même partie supérieure est soudée verticalement une petite tige creuse d'environ 3 cm de hauteur et 0,5 cm de diamètre, sur laquelle se pose le berceau en laiton destiné à caler le bras au moyen de crochets lors du transport de l'instrument. Ce type de bâti présente donc un *minimum de soudures*. Il diffère des variantes successives des bâtis construits par P.A. Blum [2].

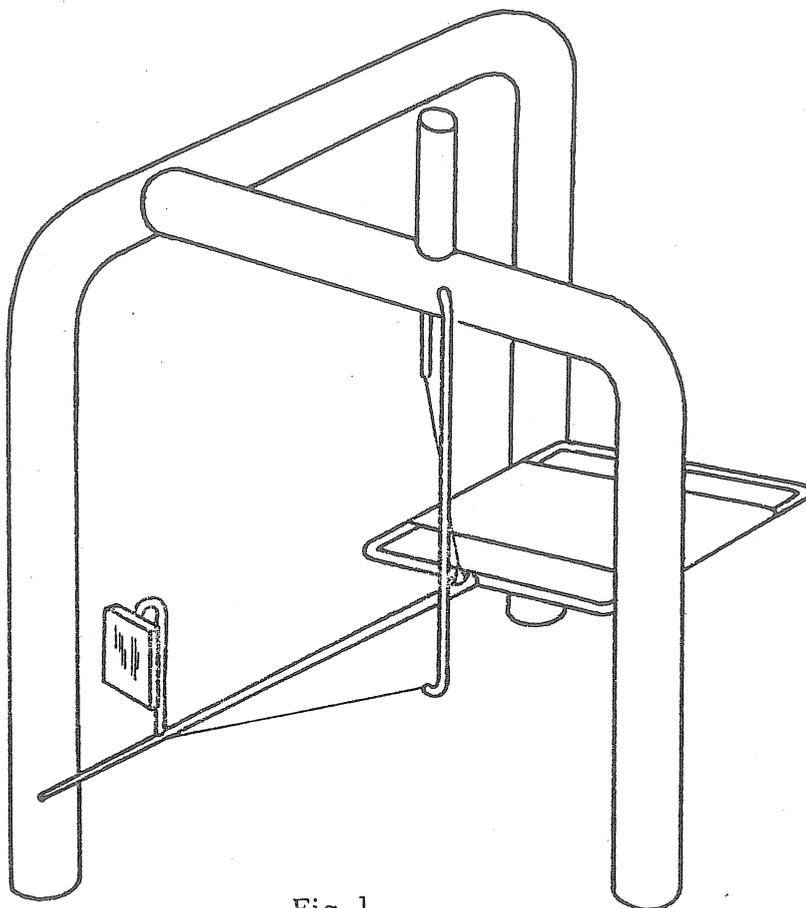


Fig. 1.

Le bras est constitué d'une tige à une extrémité de laquelle est fixé un miroir à faces non parallèles, l'autre étant soudée à un cadre rectangulaire sur deux côtés opposés duquel est placée une lame métallique (Ag) en vue de l'amortissement au moyen d'un aimant.

Le poids total de l'instrument peut être ramené à 35 gr. celui du bâti étant de 30 gr. Pour faciliter la construction de ce dernier, un gabarit métallique a été utilisé.

Avant le montage, bâti et bras (miroir et lame métallique exclus) subissent un recuit de 24 h afin d'éliminer les tensions internes. Le miroir est ensuite collé avec du baume du Canada.

La distance entre les points de suspension a été choisie de 6 cm, le plan des bras étant situé aux deux tiers de cette hauteur à partir du point supérieur, Le diamètre des fils est de l'ordre de 15 μ . Ceux-ci du type à perles ainsi que leurs soudures ont fait l'objet d'un soin tout particulier. Ils ont été obtenus de la manière suivante : après avoir chauffé à la flamme d'un chalumeau oxy-acétylénique une tige de silice de variété opaque de 0,3 cm de diamètre, on étire à la main un fil de 0,04 à 0,05 cm de diamètre. On pince ensuite une extrémité de ce fil sur une tige métallique réglable en hauteur pour obtenir un fil de longueur voulue, après avoir alourdi l'autre extrémité avec une petite rondelle de caoutchouc sur laquelle repose une masselotte. Approchant la flamme bleue du chalumeau tangentiellement au fil, on chauffe ce dernier jusqu'au moment où il s'étire verticalement par suite de la fusion et sous l'effet de la surcharge.

On écarte alors le bec et l'extrémité du fil munie de sa rondelle s'arrête dans un petit bac circulaire placé en dessous et rempli d'eau pour amortir la chute.

ORGANES DE REGLAGE ET METHODE D'INSTALLATION

Les réglages de période et les corrections de dérive sont effectués au moyen de leviers en laiton dont les mouvements sont commandés par une vis. Ces organes sont placés sous une embase en petit granit sur laquelle le clinomètre est simplement posé. Cette embase a la forme d'un triangle rectangle isocèle dont les côtés de l'angle droit ont 30 cm de longueur. Entre l'extrémité du levier de dérive et l'embase est intercalée une crapaudine dilatable de J. Verbaandert étalonnée au préalable par méthode interférométrique. Entre l'embase et l'extrémité de l'autre levier est intercalée une pièce en laiton ayant l'épaisseur de la crapaudine. A l'angle droit est placée une vis en laiton destinée à faciliter le nivellement de l'embase. Sur le rebord de cette dernière repose une coiffe en plexiglass pour la protection du clinomètre. Une lentille y est encadrée.

L'amortissement est réalisé en plaçant sous la lame d'Ag un petit aimant dont la hauteur peut être réglée au moyen d'un dispositif en laiton.

Les leviers et la vis d'équerre sont posés sur une pierre de taille dressée et nivelée avec le plus grand soin, de dimensions 6 cm x 40 cm x 50 cm que l'on placera sur un banc de roche (tendre) préalablement dressé et nivelé de manière à ce que la base de la pierre de taille y adhère sur toute sa surface. Si l'on a à faire à une roche dure on pourra, après l'avoir dressée et nivelée, y placer directement les leviers et la vis d'équerre.

MISE EN STATION.

Un tel ensemble clinométrique (avec pierre de taille) a été installé à Kanne (Province de Limbourg) à une profondeur de 45 m sous le niveau de la surface dans une galerie de l'ancienne carrière Avergat.

Cette galerie dont l'entrée a été obturée pour éviter les courants d'air a une longueur de 7 m, une largeur de 4 m et une hauteur de 8 m. La température y est de 13°2 C et ne varie que de 0°2 C par an. Placé sur un banc de tuffeau à 60 cm au dessus du sol de la galerie, il a été orienté de manière à permettre l'enregistrement de la composante Est-Ouest des variations de la verticale. Les coordonnées géographiques de cette station sont : latitude 50°48' N, longitude 5°40' E. Elle est située à une distance de 400 m du Canal Albert et 1500 m de la Meuse.

PREMIERS RESULTATS.

La période propre imposée au clinomètre I.A.G.U.L. type I, n° I a été de l'ordre de 75 secondes. Un étalonnage fait au moyen de la crapaudine dilatable n° 12 de J. Verbaandert par la méthode de l'échelle à crochets [I, 54] a donné les résultats exprimés dans le tableau I, pour une distance focale de 5m, la distance entre la vis d'équerre et l'extrémité du levier de dérive étant de 21,3 cm

T a b l e a u 1.

Etalonnage du clinomètre I.A.G.U.L. type I, N° 1.

Période en sec.	K	s_{75}
60,97	6,4590	0"001148
71,35	6,4656	0"001149
81,31	6,4045	0"001139
87,59	6,5153	0"001158
93,58	6,5381	0"001162
96,77	6,4764	0"001151
97,02	6,4506	0"001147
97,3	6,3374	0"001127

Nous avons adopté pour la constante d'étalonnage [I, 54]

$$K = 6,4559.$$

La sensibilité théorique pour une période $T = 75$ sec, est alors 0"001148/mm.

L'enregistreur photographique à défilement continu de vitesse 2,5 cm/heure étant placé à une distance focale de 4,123 m, nous aurons pour cette distance

$$K^* = 7,8291.$$

La sensibilité s^* ainsi réalisée pour la même période atte int 0"001392/mm sur le papier enregistreur.

L'amortissement ayant été réalisé après un mois de fonctionnement, nous avons constaté, à la suite de mesures régulières de la sensibilité, associées à des mesures de sensibilité libre dont un extrait est donné dans le tableau 2, d'une part, une diminution de la sensibilité en cas d'amortissement (même après nettoyage superficiel de l'aimant comme les 14 juin, 2 septembre, 12 novembre et 2 décembre) par rapport à la sensibilité libre et d'autre part une diminution de la sensibilité en cas d'amortissement au bout de cinq à six semaines.

T a b l e a u 2 .

Date	s*a	T (sec)	s*
14 juin 1963	0"001899	75,22	0"001383
25 juillet 1963	0"002617	74,15	0"001424
2 septembre 1963	0"001915	73,81	0"001437
10 octobre 1963	0"002559	75,57	0"001371
12 novembre 1963	0"001989	74,30	0"001418
2 décembre 1963	0"001722	78,85	0"001259
2 décembre 1963	0"001387	90	0"000967

La première est imputable à la lame d'Ag. La seconde peut incontestablement être attribuée à la présence de moisissures microscopiques dans l'atmosphère ambiante par suite de l'exploitation de champignonnières voisines. Pour remédier à cette dernière il convient donc de procéder au moins deux fois par mois à la rapide opération qui consiste en un retrait suivi d'un nettoyage superficiel de l'aimant.

ANALYSES HARMONIQUES.

Les premières analyses harmoniques effectuées par la méthode Lecolazet sur ordinateur I.B.M. 1620 au Centre International des Marées Terrestres à Uccle, a donné les résultats suivants pour le clinomètre I.A.G.U.L. type I, n° 1 :

Composante E-W. Azimut 4°30'

A) AVEC AMORTISSEMENT

Date	Sensibilité s*
1963 VI 14	0"001899
1963 VII 25	0"002617

Erreur quadratique moyenne sur une mesure

<i>Epoque</i>	<i>En millimètre sur l'enregistrement</i>	<i>En secondes d'arc.</i>
1963 juin	0,33	0"00063

Epoque T.U.

1963 juin 30 15 h.

	<i>Ondes semi-diurnes</i>			<i>Ondes diurnes</i>	
	<i>M₂</i>	<i>S₂</i>	<i>N₂</i>	<i>K₁</i>	<i>O₁</i>
<i>γ</i>	0,773	0,520	0,331	0,617	0,615
<i>α</i>	- 7°27	- 26°93	- 95°86	- 1°58	12°02

Les phases sont exprimées en centièmes de degré (+ = avance)

$$\gamma = \frac{\text{Amplitude observée}}{\text{Amplitude théorique}}$$

$$\alpha = \text{phase théorique} - \text{phase observée.}$$

On a représenté graphiquement (fig. 2 A et 2 B) les valeurs des amplitudes théoriques et calculées, pour les ondes M₂, S₂, N₂ et K₁, O₁. On y constate une réduction anormale de l'onde S₂ que le bruit de fond considérable a noyée partiellement tandis qu'il noyait presque totalement l'onde N₂.

Une réduction anormale de l'amplitude de l'onde S₂ a d'ailleurs été observée systématiquement par P.A. Blum [2,215] dans les stations françaises où sont installés des clinomètres amortis.

B) SANS AMORTISSEMENT.

On a compté sur les enregistrements obtenus depuis le 3 janvier 1964 jusqu'au 7 avril 1964, le nombre d'oscillations horaires toutes les douze heures. N'ayant constaté aucune variation systématique de plus d'un quart de période par rapport à la moyenne 36,5, cette dernière a été adaptée comme suffisamment représentative. Elle correspond à une période de 98,96 sec. et à une sensibilité s* = 0"000805.

Erreur quadratique moyenne sur une mesure

<i>Epoque</i>	<i>En millimètre sur l'enregistrement</i>	<i>En secondes d'arc</i>
1964 janvier	0,298	0"23
février	0,342	0"27
mars		

Epoque T.U.	M ₂		S ₂		N ₂	
	γ	α	γ	α	γ	α
1964 1 19 3h	0,856	2°16	0,883	- 7°48	0,978	- 3°69
1964 1 29 15h	0,869	0°68	0,864	- 3°20	1,114	8°52
1964 2 9 3h	0,858	- 0°12	0,837	- 1°50	1,000	8°72
1964 2 19 15h	0,829	3°19	0,783	6°30	0,824	3°89
1964 3 1 3h	0,823	3°49	0,755	5°58	0,809	3°31
1964 3 11 15h	0,825	3°72	0,765	3°45	0,820	5°32
1964 3 22 3h	0,821	3°31	0,786	3°09	0,860	3°44
Moyennes						
Vectorielles	0,839	2°31	0,807	0°63	0,912	4°34
Arithmétiques	0,840	2°34	0,810	0°89	0,915	4°21

$$\alpha_{S_2} - \alpha_{M_2} < 0 \quad (\text{retard de } S_2 \text{ sur } M_2)$$

$$\gamma_{S_2} < \gamma_{M_2} \quad (\text{marée } S_2 \text{ plus forte})$$

Epoque T.U.	K ₁		O ₁	
	γ	α	γ	α
1964 1 19 3h	0,541	4°06	0,831	- 15°29
1964 1 29 15h	0,556	3°86	0,745	- 2°77
1964 2 9 3h	0,611	- 2°90	0,673	14°57
1964 2 19 15h	0,584	4°65	0,540	5°76
1964 3 1 3h	0,543	0°43	0,523	- 3°03
1964 3 11 15h	0,480	11°15	0,601	1°55
1964 3 22 3h	0,417	21°95	0,634	8°76
Moyennes				
Vectorielles	0,528	4°19	0,640	0°91
Arithmétiques	0,533	5°07	0,649	1°65

Les phases sont exprimées en centièmes de degrés

(+ = avance)

La comparaison avec les résultats de l'analyse harmonique faite dans le cas de l'amortissement montre que les ondes semi-diurnes sont mieux amplifiées sans amortissement du clinomètre. En se reportant à la fig. 2 A, on voit notamment que les ondes S₂ et N₂ ne sont plus noyées comme dans le cas de l'amortissement.

La dérive moyenne journalière, de sens variable, ne dépasse pas 3 mm sur l'enregistrement, ce qui pour la période 98,96 sec. correspond à 0"0024.

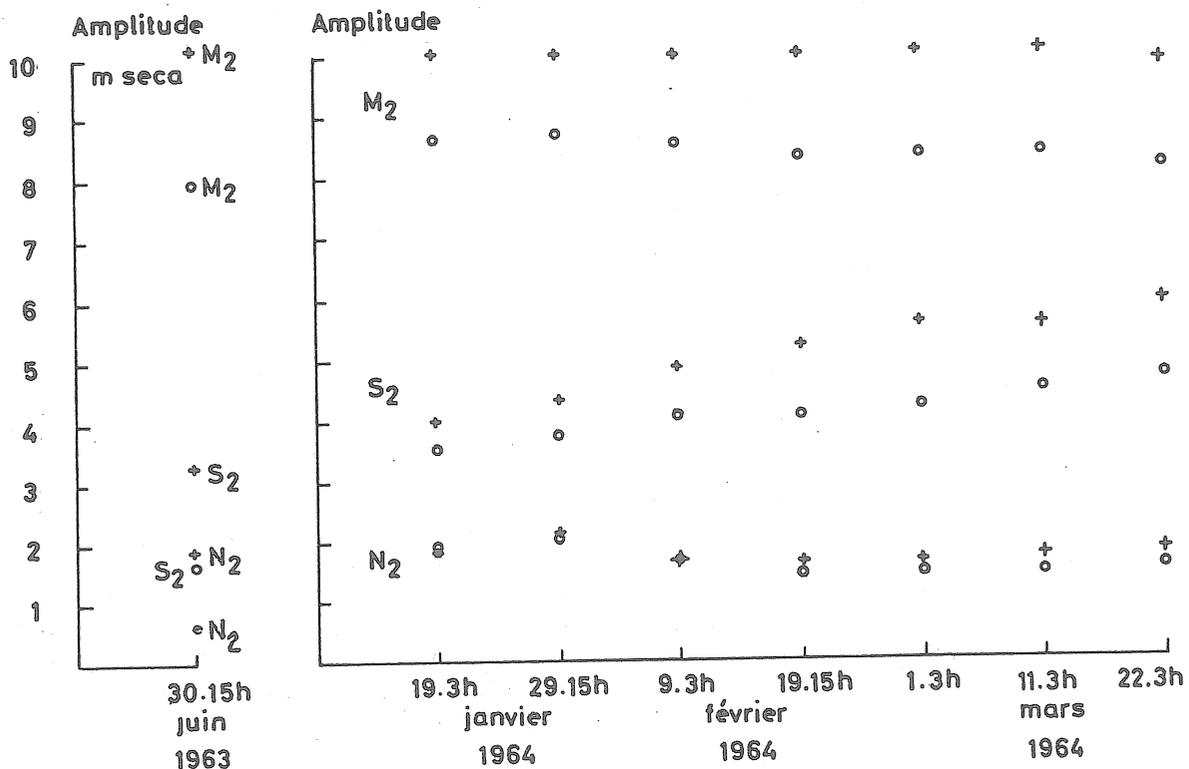


FIG.2A + Amplitude calculée
o Amplitude observée

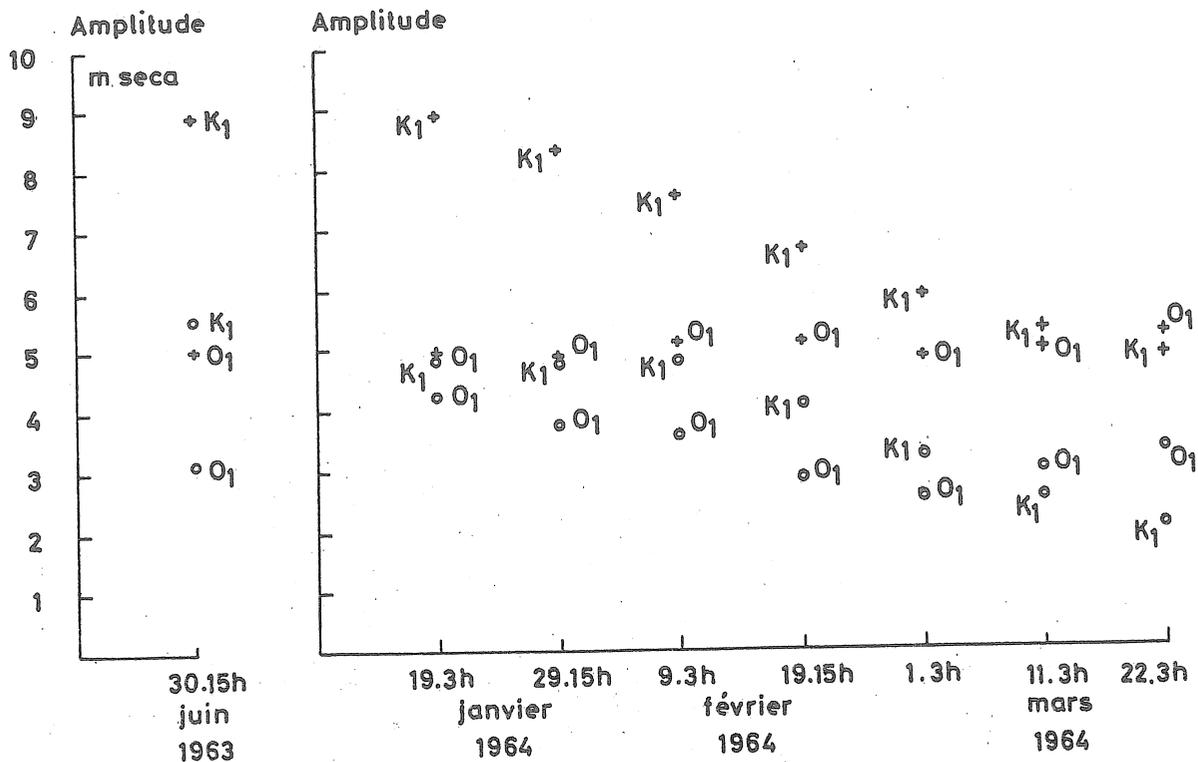


FIG.2B

CONCLUSIONS.

Après treize mois d'observations et d'expériences réalisées avec le clinomètre I.A.G.U.L. type I, n° 1, on peut cependant déjà conclure :

- 1° que l'introduction d'organes de réglage et d'une vis d'équerre métalliques, de même que l'emploi d'une pierre de taille comme système de liaison clinomètre-écorce terrestre, ne doivent pas être incriminés comme cause de la dérive ;
- 2° que le maintien en permanence sous l'embase d'une crapaudine dilatable de J. Verbaandert (godet ouvert) ne nuit pas au bon fonctionnement de l'instrument, malgré les conditions peu favorables de l'ambiance ;
- 3° que l'on peut obtenir de très hautes sensibilités sans recourir à l'emploi de niches étanches ;
- 4° que dans le cas d'un appareil amorti, il est indispensable d'associer à chaque mesure de sensibilité une mesure de sa sensibilité libre ou de sa période libre (si l'on ne dispose pas en permanence sous l'embase d'un dispositif d'étalonnage tel que la crapaudine dilatable de J. Verbaandert), afin de pouvoir contrôler la diminution éventuelle de sensibilité lors de l'amortissement ;
- 5° que la dérive instrumentale est pratiquement nulle.

Les observations continuent et différents perfectionnements seront introduits. Dans les installations ultérieures, étant donné la valeur très faible de la dérive (très probablement d'origine géophysique), il est envisagé de supprimer le levier de dérive, la compensation de cette dernière pouvant se faire très aisément, en déplaçant le godet mercuriel le long d'une latte de laiton inclinée de 45° sur l'horizon et munie de crochets espacés de 2,5 cm.

En cas de dérive géophysique plus importante, une vis sans fin serait placée sur la tête du levier de dérive pour permettre une commande à distance.

Grâce à des méthodes de construction très simple et d'installation particulièrement économique et rapide (deux heures suffisent à la mise en place de l'appareillage et à la mise en période de l'instrument) ce type de clinomètre semble donc convenir parfaitement pour l'établissement d'un réseau de stations non permanentes afin de pouvoir faire des cartes d'anomalies clinométriques.

Le maintien en permanence sous l'embase d'une crapaudine dilatable étalonnée présente en outre l'avantage de permettre lors de chaque visite une mesure de sensibilité qui constitue un véritable étalonnage sans mesurer la période et sans interrompre l'enregistrement. Il suffit en effet, de déplacer le godet mercuriel d'un crochet de la latte d'étalonnage au suivant et de mesurer le déplacement correspondant du spot pour en tirer la valeur de la sensibilité.

Il peut en outre être utilisé comme sismographe pour les ondes de longue période et peut servir à l'étude et au contrôle de la stabilité des sols, notamment dans le cas d'importantes constructions de génie civil telles que les barrages.

Enfin, un second type de clinomètre ayant un bâti à symétrie plane, vient d'être construit à l'Université de LIEGE et permettra de faire des comparaisons avec ceux du type I.

REMERCIEMENTS.

J'exprime mes plus vifs remerciements à M. le Recteur M. DUBUISSON et à la Commission du Patrimoine de l'Université de LIEGE qui ont bien voulu mettre à ma disposition les crédits nécessaires pour le premier équipement et pour les déplacements à la station expérimentale de Kanne.

Il m'est très agréable de redire toute ma gratitude à M. le Professeur L. PAUWEN pour le bienveillant intérêt qu'il m'a témoigné au cours de ces recherches.

Je remercie sincèrement M. J. VERBAANDERT pour l'aimable accueil qu'il m'a toujours réservé à l'Observatoire Royal de Belgique.

Le Centre international des Marées terrestres a assumé le dépouillement des enregistrements et leur analyse harmonique sur ordinateur. J'en remercie vivement M. P. MELCHIOR, Directeur, et M. VANDEWINKEL, calculateur.

Mes remerciements vont aussi à M. J. MEDAETS, Ingénieur en chef-Directeur au Corps des Mines et M. OFFERMAN ainsi qu'à ses collaborateurs de la champignonnière AVERGAT dont l'obligeance a facilité la réussite des expériences entreprises.

Je me plais à y associer M. R. MOUILLET, maître préparateur technicien à l'Université de Liège pour le soin qu'il a apporté dans le montage des clinomètres et l'exécution des organes de réglage ainsi que pour son aide dévouée pour l'installation et l'entretien de la station.

INSTITUT D'ASTRONOMIE ET DE GEODESIE
DE L'UNIVERSITE DE LIEGE.

BIBLIOGRAPHIE.

[1] J. VERBAANDERT et P. MELCHIOR :

Les stations géophysiques souterraines et les pendules horizontaux de l'Observatoire Royal de Belgique.

Monographies Obs. Royal de Belgique n° 7, 147 pp. 1961.

[2] P. A. BLUM :

Contribution à l'étude des variations de la verticale en un lieu.

Annales de Géophysique, T-19, n° 3, 215-243, 1963.
