MAREES TERRESTRES

BULLETIN D'INFORMATIONS

N°72

15 Octobre 1975

Association Internationale de Géodésie

Commission Permanente des Marées Terrestres

Éditeur Prof. Paul MELCHIOR

Observatoire Royal de Belgique

3, Avenue Circulaire

1180 Bruxelles

TABLE DES MATIERES

p

P.S. MATVEYEV, I.Y. BOGDAN (Traduction)
Sur la possibilité d'éliminer l'effet résiduel de l'onde diurne de température à partir des résultats de la détermination des ondes les plus importantes de la marée terrestre 4086

L.I. MIRONOVA, M.V. OKHOTSIMSKAIA, A.V. KHOROMSKII (Traduction)
Observations géophysiques complexes à Obninsk 4101

P.S. MATVEYEV, S.N. KORBA, I. You BOGDAN, E.A. SLAVINSKAYA (Traduction)
Comparaison des résultats de l'analyse harmonique des observations clinométriques au point de Velikié Boudicha, obtenues par deux méthodes 4116

V.G. BOULATSEN (Traduction)
Etalonnage et sensibilité des extensomètres à tige en quartz avec transformateur du type à torsion 4123

J. ORZECHOWSKI
Moyens d'accélération et de l'accroissement de la précision des calculs dans les méthodes des analyses des observations des marées 4143

T. CHOJNICKI
Remarques concernant l'article de K. Schüller:"Ein Vorschlag zur Beschleunigung des Analysenverfahrens Chojnicki" 4150

B. DUCARME
The Computation Procedures at the International Center for Earth Tides (I.C.E.T.) 4156

P. MORGAN
Résumé of Commission n°5, Marées Terrestres (Earth Tides) Section V International Association of Geodesy. Grenoble, August 1975 4182

Traduction

Sur la possibilité d'éliminer l'effet résiduel de l'onde diurne de température à partir des résultats de la détermination des ondes les plus importantes de la marée terrestre

P.S. Matveyev, I.Y. Bogdan

Rotation et déformations de marées de la Terre - V pp.85-94 - 1973

La présence de l'onde de température journalière S_1 dans les inclinaisons de la surface de la Terre peut être envisagée comme l'une des sources essentielles des erreurs systématiques dans la détermination des marées terrestres.

Le mécanisme de formation de cette onde perturbatrice est extrêmement complexe et n'a pour ainsi dire pas encore été étudié jusqu'à présent. On ne peut considérer comme bien établi que le fait qu'elle est principalement due à la déformation de la couche superficielle sous l'influence des variations journalières de la température. Il n'est pas exclu également qu'une certaine partie de l'onde S_1 soit provoquée par l'influence immédiate des variations journalières de la température de l'air à l'intérieur de la station aussi bien sur le clinomètre même que sur l'appareil enregistreur.

L'ampleur et le caractère de la déformation journalière de température de la couche superficielle dépend beaucoup de la position gécgraphique,

du relief environnant, de l'époque de l'année, de la structure du sol, de sa conductibilité calorifique, de l'humidité et des propriétés mécaniques, de l'aspect et de la composition de la couverture de végétation, de la limpidité de l'atmosphère, de la température et de l'humidité de la couche près de la surface de l'air, de la vitesse et de la direction du vent etc...

La plupart des facteurs énumérés sont soumis à des variations importantes d'un mois à l'autre et certaines même d'un jour à l'autre. C'est pourquoi leur apport dans l'inclinaison (onde S_1) se fait sentir de façon très instable aussi bien en amplitude qu'en phase. La période de cette onde est également instable. Elle est seulement voisine en moyenne de 24 heures, en variant avec le temps en conformité avec les variations du cycle journalier de la balance thermique de la surface réelle de la Terre.

La complexité de structure de l'inclinaison journalière de température apparaît dans l'irrégularité extrême de sa forme. En fait, l'application à cette inclinaison du terme "onde" est jusqu'à un certain degré conventionnelle puisque sa représentation réalisée dans la pratique à titre d'harmonique diurne simple n'est qu'une première approximation de son allure propre. Plus exacte serait la représentation de cette inclinaison en série de Fourier renfermant outre l'harmonique diurne fondamentale, les premières inégalités de cette onde (semi-diurne, tiers-diurne etc...). Cependant cette voie amène à des difficultés très grandes dans la théorie de l'analyse des marées terrestres et c'est pourquoi il a fallu jusqu'à présent s'en abstenir.

Le désir de se débarrasser de l'influence de l'onde de température S_1 force à installer les clinomètres le plus profondément possible sous la surface de la Terre, dans des galeries de mines. Cependant on ne peut pas résoudre tous les problèmes en relation avec l'étude des déformations de marées de la Terre en s'appuyant sur les données des observations faites dans les mines. Pour avoir une vue plus large du réseau des points clinométriques et en particulier

pour étudier l'effet tectonique indirect il est apparu très nécessaire ces derniers temps d'obtenir les données sur les inclinaisons de la surface de la Terre dans des endroits où il n'y a pas de mines et où il faut aménager des galeries spéciales ou des puits pour installer les appareils. Pour faire les observations en ces points on emploie des clinomètres avec commande à distance-photoélectriques du système A.E. Ostrovskii [1] ou de puits de la firme Askania [2] installés à une profondeur relativement faible (en moyenne à 6 à 20 m). Bien qu'avec cette installation le niveau du bruit de température baisse de plus d'un ordre [3] en comparaison avec les observations à des profondeurs de 3 à 4 m [4,5,6] on ne peut apparemment négliger son influence sur certaines ondes de l'inclinaison de marée. Malheureusement il n'y a pas encore de théorie qui permette de déceler et de tenir compte de cette influence.

Nous donnons ici un procédé assez efficace (à notre point de vue) de l'élimination de l'effet total de l'onde de température S_1 des résultats de la détermination des ondes de marée à courte période dans les inclinaisons de la surface de la Terre. Ce procédé peut être appliqué aussi à d'autres données d'analyse harmonique des observations des marées terrestres, en particulier aux résultats de l'analyse des variations de la force de pesanteur et des déformations linéaires de l'écorce terrestre.

On se sert ici des valeurs γ et κ et également des amplitudes R_T et des phases initiales ξ_T de l'onde étudiée aux époques initiales (ou moyennes) des séries réduites. Les données caractérisant les valeurs moyennes mensuelles de l'onde S_1 dans les inclinaisons (aux mêmes époques), amplitudes R_S et phases initiales ξ_S sont obtenues par les observations elles-mêmes sans aucune information supplémentaire sur le régime des facteurs énumérés plus haut provoquant l'apparition de cette onde [3].

Soit pour n'importe laquelle des n séries réduites la valeur "observée" de l'onde déterminée X:

$$X_n = R_T \gamma_n \cos[qt-(\zeta_T+\varkappa_n)], \qquad (1)$$

où q est la vitesse de variation de la phase pour une heure de temps moyen [7].

De même, la valeur la plus sûre X de cette onde au site d'observation pourra être écrite sous cette forme:

$$X = R_T \bar{\gamma} \cos[qt-(\zeta_T+\varkappa)]. \qquad (2)$$

En admettant que la valeur "observée" X_n outre l'erreur accidentelle globale δX, renferme encore une certaine erreur systématique ΔX_S (due à l'onde S_1), pour chaque n séries on peut composer l'équation

$$X = \Delta X_s + \delta X + X_n \qquad (3)$$

Concernant ΔX_s on peut faire différentes hypothèses. Nous nous limiterons dans cet article à deux de celles-ci:

1) Supposons que l'amplitude de ΔX_s est dans une dépendance linéaire de l'amplitude de l'onde de température diurne S_1 moyennée par intervalle mensuel.

2) Supposons la présence d'un certain retard de phase (provoqué par la méthode d'analyse harmonique) de la valeur ΔX_s par rapport à l'onde S_1.

Dans la forme générale la valeur ΔX_s peut être représentée par l'expression

$$\Delta X_s = \Delta R \cos(qt - \Delta\zeta) \qquad (4)$$

En tenant compte des hypothèses émises on peut l'écrire sous la forme suivante

$$\Delta X_s = \bar{\kappa} R_s \cos[qt - (\zeta_s+\gamma)] \qquad (5)$$

Ici $\bar{\kappa}$ et γ sont les paramètres caractérisant la dépendance supposée de la valeur X_s en fonction de l'onde diurne de température représentée habituellement sous la forme

$$S_1 = R_s \cos(15°t - \zeta_s) \qquad (6)$$

Substituons (1), (2) et (5) dans (3), nous obtenons des cosinus de différences et nous identifions successivement les coefficients de cos qt et sin qt dans les premier et second membres de l'égalité:

$$\begin{aligned} &\gamma\cos(\zeta_T+\varkappa)+kR_S\cos(\zeta_S+\nu)-\gamma_n\cos(\zeta_T+\varkappa_n)=v,\\ &\gamma\sin(\zeta_T+\varkappa)+kR_S\sin(\zeta_S+\nu)-\gamma_n\sin(\zeta_T+\varkappa_n)=v'. \end{aligned} \qquad (7)$$

Ici v et v' sont les écarts des résultats des observations par rapport à leurs valeurs les plus probables, déterminés par le niveau des erreurs accidentelles δX, et le coefficient k représente l'estimation moyenne de la variation de la valeur γ en fonction de l'amplitude R_s c'est-à-dire

$$k = \frac{\bar{k}}{R_T} = \frac{\bar{k}\,R_s}{R_T\,R_s} = \frac{\Delta\gamma}{R_s} \qquad (8)$$

Pour n séries réduites on a pu composer 2n équations conventionnelles de la forme (7). Ramenons les à la forme qui convient pour la solution par

$$\begin{aligned} &x_1\cos\zeta_T - x_2\sin\zeta_T + x_3 R_S\cos\zeta_S - x_4 R_S\sin\zeta_S - l = v,\\ &x_1\sin\zeta_T + x_2\cos\zeta_T + x_3 R_S\sin\zeta_S - x_4 R_S\cos\zeta_S - l' = v'. \end{aligned} \qquad (9)$$

Nous introduisons ici les notations

$$\begin{aligned} &\gamma\cos\varkappa = x_1\ ;\quad \gamma\sin\varkappa = x_2\ ;\\ &k\cos\nu = x_3\ ;\quad k\sin\nu = x_4 \end{aligned} \qquad (10)$$

et

$$\begin{aligned} &\gamma_n\cos(\zeta_T+\varkappa_n)=l,\\ &\gamma_n\sin(\zeta_T+\varkappa_n)=l'. \end{aligned} \qquad (11)$$

Après avoir résolu le système des n paires d'équations conventionnelles de la forme (9) d'après le schéma de Gauss, nous trouvons les valeurs les plus probables des quatre inconnues x_i (satisfaisant à la condition $[vv] = \min$), les valeurs des coefficients de poids Q_{ii} de ces inconnues et la somme des carrés des écarts (corrections) v c'est-à-dire la valeur $[vv]$.

Sur la base des données obtenues on calcule les erreurs quadratiques moyennes m_i des inconnues x_i d'après la formule

$$m_i = \pm Mo \sqrt{Q_{ii}} \qquad (12)$$

où, pour l'erreur de poids unitaire M_o en tenant compte du nombre d'inconnues dans les équations (9) nous avons l'expression

$$M_o = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{2n-4}} \qquad (13)$$

Le passage des valeurs trouvées des inconnues aux paramètres qui nous intéressent se fait par les relations

$$\begin{aligned} f &= \sqrt{x_1^2 + x_2^2}\ , \quad \varepsilon = arc\,tg\ \frac{x_2}{x_1}\ ; \\ k &= \sqrt{x_3^2 + x_4^2}\ , \quad \nu = arc\,tg\ \frac{x_4}{x_3}\ . \end{aligned} \qquad (14)$$

L'estimation de la précision des résultats définitifs se fait d'après les formules très simples (grâce aux égalités $Q_{11} = Q_{22}$ et $Q_{33} = Q_{44}$)

$$\begin{aligned} m_f &= m_1\ , \quad m_\varepsilon^0 = 57^0,296\ \frac{m_1}{f}\ ; \\ m_k &= m_3\ , \quad m_\nu^0 = 57,296\ \frac{m_3}{k}\ . \end{aligned} \qquad (15)$$

Nous avons appliqué le procédé à certains résultats de la détermination des ondes les plus importantes de la marée terrestre d'après les observations clinométriques à Darievka et Likhovka [8,9]. (profil Soumi-Kherson)

Des observations y ont été faites de 1964 à 1969 à l'aide de clinomètres photoélectriques Ostrovskii installés dans les mines.

TABLE 1

Coefficients des équations conventionnelles (q) pour la correction des résultats de la détermination de l'onde S_2 à Likhovka (composante NS: appareil 08)

Numéro	x_1	x_2	x_3	x_4	$-Z$
I	+0,810	-0,587	+1,627	-8,212	-0,357
2	+0,587	+0,810	+8,212	+1,627	-0.316
3	-0,990	+0,141	-0,528	-4,086	+0,541
4	-0,141	-0,990	+4,086	-0,528	+0,167
5	+0,941	+0,339	-5,746	-0,396	-0,586
6	-0,339	+0,941	+0,396	-5,746	+0,152
7	-0,671	-0,742	-6,959	+4,356	+0,349
8	+0,742	-0,671	-4,356	-6,959	-0,387
9	+0,996	-0,046	+0,826	-0,105	-0,575
I0	+0,046	+0,999	+0,105	+0,826	-0,033
II	-0,930	-0,369	+3,793	-0,015	+0,480
I2	+0,869	-0,930	+0,015	+3,793	-0,087
I3	-0,307	-0,952	-3,287	-2,572	+0,203
I4	+0,952	-0,307	+2,572	-3,287	-0,452
I5	-0,357	-0,934	-5,710	+1,675	+0,188
I6	+0,934	-0,357	-1,675	-5,710	-0,480
I7	+0,299	+0,954	-6,406	+2,825	-0,172
I8	-0,954	+0,299	-2,825	-6,406	+0,542
I9	-0,239	-0,971	-2,664	+1,878	+0,147
20	+0,971	-0,239	-1,878	-2,664	-0,547
2I	+0,176	+0,984	-1,088	+0,645	-0,142
22	-0.984	+0,176	-0,645	-1,088	+0,479
23	-0,111	-0,994	-0,942	+0,271	+0,115
24	+0,994	-0,111	-0,271	-0,942	-0,548
25	+0.487	-0,873	-0,304	-0,881	-0,213
26	+0,873	+0,487	+0,881	-0,304	-0,496

Selon la profondeur des galeries (à Darievka - 8 m., à Likhovka - 9 m) d'après le niveau de bruit venant des facteurs météorologiques et l'influence du relief de l'endroit, les conditions pour les observations des inclinaisons de marées à Darievka et Likhovka ont été moins bonnes que dans les autres endroits du profil. Tout cela a évidemment provoqué une diminution de précision des résultats et a donné une raison de croire qu'on peut découvrir dans ces résultats des effets systématiques de l'onde diurne de température S_1.

Pour le point de "Likhovka" nous avons analysé les ondes S_2, M_2 et O_1 pour le point de "Darievka" uniquement les résultats de l'onde M_2.

A titre d'exemple de la préparation des données nous donnons dans la table 1 le système des équations (9) composé sur la base des résultats à Likhovka, onde de marée S_2 [9], onde de température diurne S_1 [3] en composante NS. Nous noterons en même temps que pour ce point d'observation, outre les résultats de 12 mois publiés précédemment [9] nous utilisons ici encore un résultat supplémentaire obtenu d'après une série d'observations (7 avril au 9 mai 1969) non inclus dans la réduction précédente.

Les résultats sont donnés dans les tables 2 et 3. Sous les valeurs trouvées γ, x, k et ν nous donnons leurs erreurs quadratiques moyennes calculées d'après les formules (15). Pour faire la comparaison des valeurs précisées γ et x avec les valeurs vectorielles moyennes non corrigées obtenues précédemment de ces valeurs, nous donnons ces dernières dans la table 2.

Comme nous le verrons, les valeurs du coefficient k pour l'onde M_2 ont été trouvées très faibles - pas plus de cinq unités du troisième chiffre dans γ d'une milliseconde d'amplitude de l'onde R_s.
D'où aussi le peu d'importance de la variation des résultats pour cette onde - ils ne sont pas sortis des limites des erreurs quadratiques moyennes.

TABLE 2

Valeurs moyennes de γ et x avant et après le calcul de l'influence de l'onde de température diurne S_1

SITE	Onde	Composante	Appareil	Avant Correction		Après Correction	
				γ	x	γ	x
Likhovka	S_2	NS	08	0,439 ± 96	−46°,72 ±12,32	0,515 ± 63	−29,78 ± 7,01
"	S_2	EW	09	0,717 ± 72	−12,71 ± 7,64	0,664 ± 77	+ 7,44 ± 6,65
Likhovka	M_2	NS	08	0,536 ± 12	+ 4,77 ± 1,02	0,540 ± 10	+ 4,66 ± 1,09
"	M_2	EW	09	0,712 ± 11	+ 6,35 ± 0,86	0,711 ± 10	+ 6,41 ± 0,79
Likhovka	O_1	NS	08	0,549 ± 362	+24,74 ±33,26	0,712 ± 330	+20,29 ±26,53
"	O_1	EW	09	0,704 ± 34	− 4,00 ± 4,41	0,695 ± 40	− 4,18 ± 3,29
Darievka	M_2	NS	08	0,633 ± 11	+ 3,85 ± 1,34	0,635 ± 13	+ 3,33 ± 1,17
"	M_2	EW	09	0,682 ± 8	+ 6,89 ± 0,68	0,675 ± 11	+ 8,11 ± 0,90

TABLE 3

Valeurs des paramètres caractérisant l'influence de l'onde de température diurne S_1 sur les ondes de marées à Likhovka et Darievka

SITE	Onde	Composante	Appareil	κ	ν	$\frac{m_k}{k}$	r
Likhovka	S_2	NS	08	0,0750 ± 130	+325,0 ± 9,9	0,17	0,81 ± 7
"	S_2	EW	09	0,0441 ± 93	+283,9 ± 12,1	0,21	0,81 ± 7
Likhovka	M_2	NS	08	0,0048 ± 21	+155,6 ± 25,1	0,44	0,47 ± 16
"	M_2	EW	09	0,0012 ± 12	+145,0 ± 57,3	1,00	0,17 ± 19
Likhovka	O_1	NS	08	0,1644 ± 640	+177,4 ± 22,3	0,39	0,49 ± 15
"	O_1	EW	09	0,0098 ± 47	+209,2 ± 27,5	0,48	0,24 ± 19
Darievka	M_2	NS	08	0,0034 ± 18	+ 93,2 ± 30,3	0,53	0,39 ± 17
"	M_2	EW	09	0,0047 ± 22	+318,6 ± 26,8	0,47	0,45 ± 16

Ainsi, les résultats de l'onde M_2 dans les mines de profondeur de 7 à 9 m étaient altérés à un degré très faible par l'influence systématique de l'onde diurne de température S_1.

Nous considérons comme opportun de noter ici cette circonstance comme une des qualités de notre méthode de réalisation d'observations clinométriques dans les mines. Cependant le problème de la profondeur optimale de la mine ne peut être en effet résolu ici et nous l'avons laissé ouvert jusqu'à l'analyse des résultats obtenus dans d'autres points à d'autres profondeurs.

Le faible degré de perturbation de l'onde M_2 par l'onde de température diurne S_1 est déterminé sans aucun doute par le rapport favorable de ces deux ondes en vitesses angulaires (périodes) et en amplitudes. Ces relations sont moins favorables pour l'onde lunaire diurne O_1 dont la détermination a exigé des derniers temps une grande attention en relation avec les recherches de l'effet dynamique du noyau liquide de la Terre.

C'est pourquoi il était tout à fait naturel qu'il y ait dans les résultats de la détermination des ondes S_2 et O_1 des effets systématiques plus importants de l'influence de l'onde S_1. Les données des tables 2 et 3 le confirment particulièrement pour l'onde S_2.

En effet, pour les deux composantes de cette onde à Likhovka, les valeurs du coefficient k étaient à peu près d'un ordre plus grandes que pour l'onde M_2. Pour la composante NS, la valeur du facteur γ a augmenté de 0,076 et le retard de phase x de 16°9 et deux corrections ont conduit à une meilleure concordance de l'onde S_2 avec l'onde M_2.

Pour la composante EW, la valeur moyenne x a également augmenté de plus de 20° et est arrivée dans une très bonne concordance avec le résultat obtenu pour l'onde M_2 cependant la valeur γ pour cette composante était après correction dans une concordance un peu moins bonne avecl'onde M_2 qu'avant la correction.

En ce qui concerne l'onde O_1, les valeurs γ et x obtenues pour la composante NS très faible en amplitude ont subi des variations sensibles. Pour la composante EW ces variations, comme dans le cas de l'onde M_2 étaient insignifiantes.

Ainsi les données des tables 2 et 3 témoignent de la présence d'un effet systématique sensible de l'onde de température diurne S_1 sur certaines ondes de marées. Le fait établi a une grande importance mais pour en tirer un profit précis, il faut avoir une représentation claire du niveau d'importance de cet effet et en tenir compte lors de la spécification des valeurs obtenues γ et x. L'erreur relative de la détermination du coefficient k dont les valeurs sont données dans la table 3 peut servir d'un des critères pour cette estimation. Si l'on admet que les valeurs trouvées pour le coefficient k ne sont sûres que si l'erreur relative de sa détermination n'est pas de plus de 50% alors dans notre exemple ce n'est que pour ces cas (ondes

M2 en composante EW à Likhovka et en NS à Darievka) qu'on peut tirer une conclusion sur l'absence de l'effet d'influence de l'onde S_1.

Le critère proposé constitue évidemment une approximation puisque dans n'importe quel cas concret il arrive qu'on se heurte à la difficulté d'augmenter la valeur critique de l'erreur relative mk/k. C'est pourquoi, à titre de meilleur critère on peut recommander la valeur du coefficient de corrélation r qui caractérise le degré de dépendance de la série des valeurs en fonction des valeurs correspondantes de l'onde S_1 calculées aux époques initiales des séries réduites en tenant compte de la valeur la plus sûre du paramètre ν et présentées en série de valeurs u_s et v_s c'est-à-dire

$$\begin{aligned} \Delta L &= l - x_1 \cos\zeta_T + x_2 \sin\zeta_T = f_n \cos(\zeta_T + z_n) - f\cos(\zeta_T + \varkappa), \\ \Delta L' &= l' - x_1 \sin\zeta_T + x_2 \cos\zeta_T = f_n \sin(\zeta_T + z) - f\sin(\zeta_T + \varkappa) \end{aligned} \qquad (16)$$

$$\begin{aligned} u_S &= R_S \cos(\zeta_S + \nu), \\ v_S &= R_S \sin(\zeta_S + \nu). \end{aligned} \qquad (17)$$

TABLE 4

Comparaison des valeurs ΔL et ΔL' avec le relief des inclinaisons de température diurnes à Likhovka

NUMERO	S_1 (NS)		O_1 (NS)		M_2 (NS)	
	$\{u_S\ v_S\}$	$\{\Delta L\ \Delta L'\}$	$\{u_S\ v_S\}$	$\{\Delta L\ \Delta L'\}$	$\{u_S\ v_S\}$	$\{\Delta L\ \Delta L'\}$
I	+6,04	+0,522	-2,00	-I,001	-4,88	-0,050
2	+5,79	+0,405	-8,13	-I,409	-6,81	-0,038
3	+I,88	+0,232	+0,35	+0,364	-I,I9	-0,016
4	+3,6I	+0,595	-4,05	-2,833	-3,89	-0,044
5	-4,48	-0,209	+5,73	+2,486	+5,07	+0,064
6	+3,62	+0,562	-0,66	-0,323	-2,74	-0,015
7	-3,20	-0,503	+7,I5	+I,40I	+8,I4	+0,047
8	+0,42	+0,I78	+4,04	+I,465	+I,08	+0,02I
9	+0,73	+0,004	-0,83	+0,890	-0,79	+0,04I
I0	-0,39	+0,330	-0,07	+0,864	+2,45	+0,0I0
II	+3,II	+0,470	-3,79	+I,908	-3,46	+0,037
I2	-2,I6	-0,I54	+0,I6	+0,360	+I,55	-0,067
I3	-I,I8	-0,389	+3,I2	-I,5I4	+I,89	+0,008
I4	+3,97	-0,026	-2,72	+0,86I	-3,68	-0,044
I5	-5,63	-0,370	+5,78	+I,I29	+5,89	+0,049
I6	+I,90	+0,208	+I,42	-0,459	-0,84	-0,004
I7	-6,87	-0,4I6	+6,52	+0,359	+7,00	-0,034
I8	+I,36	+0,0I3	+2,53	+0,7I8	-0,08	-0,044
I9	-3,26	-0,306	+2,75	+0,050	+3,20	+0,028
20	-0,0I	-0,076	+I,75	+0,752	+0,6I	+0,037
2I	-I,27	-0,253	+I,I2	-0,367	+I,26	0
22	+0,I0	-0,243	+0,60	+0,265	+0,I4	+0,04I
23	-0,93	-0,I55	+0,95	-0,008	+0,97	-0,008
24	+0,32	-0,236	+0,23	+I,960	-0,I4	+0,020
25	+0,89	-0,096	+0,26	+0,057	-0,09	-0,007
26	+0,26	-0,I46	-0,92	+0,I6I	-0,95	+0,004

TABLE 5

Valeurs γ et x caractérisant l'onde S_2 (NS) à Likhovka avant et après avoir tenu compte de l'influence de l'onde de température diurne S_1

Epoque initiale t_o de la série	Avant Correction		Après Correction	
	γ	x	γ	x
67071100	0,464	+54°,92	0,539	-22,09
67080100	0,181	+96,00	0,187	-15,98
67082000	0,286	-122,17	0,226	- 7,59
67091200	0,665	-81,65	0,366	-15,62
67102100	0,148	-49,91	0,161	-72,58
68012400	0,779	+ 8,70	0,532	- 3,79
68032100	0,702	-62,80	0,910	-46,31
68080100	0,534	-77,40	0,445	-24,19
68082300	0,698	-66,34	0,600	-19,36
68091400	0,698	-54,54	0,601	-34,67
68100600	0,821	-45,03	0,795	-33,56
68102800	0,780	-35,59	0,786	-33,31
690:0700	0,676	-36,33	0,746	-36,56
Valeur Moyenne	0,439 ± 96	-46,72 ±12,32	0,515 ± 63	-29,78 ± 7,01

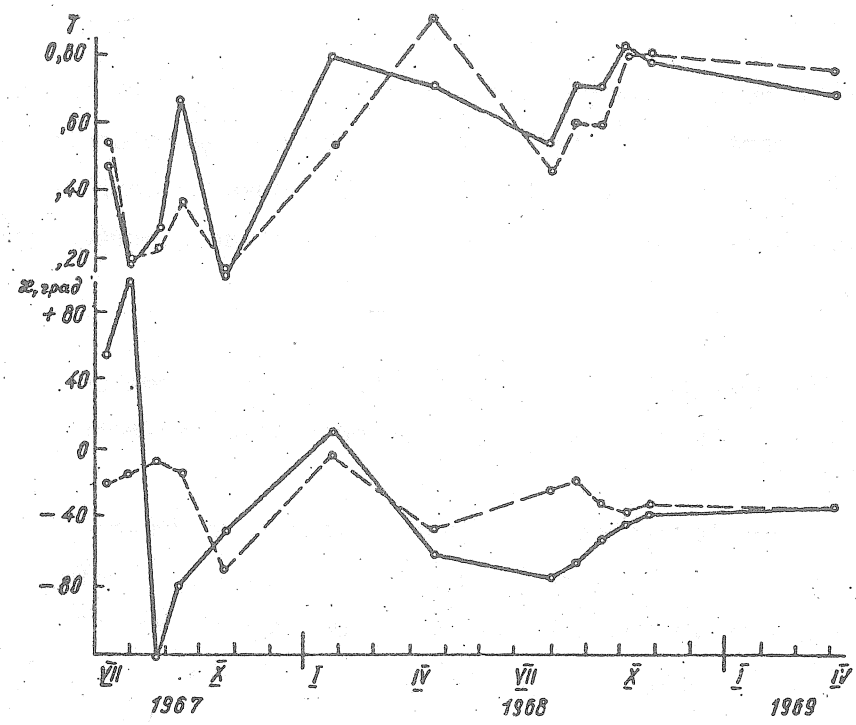

Fig. Valeurs γ et x pour l'onde S_2 (NS) à Likhovka avant (———) et après (-----) avoir tenu compte de l'influence de l'onde de température diurne S_1.

Les valeurs des coefficients de corrélation r sont donnés dans la table 3 pour chacun des résultats examinés plus haut. Nous donnons là également les erreurs quadratiques moyennes m_r de ces valeurs calculées d'après la formule

$$m_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{2n}} \qquad (18)$$

Si on se propose d'avance une probabilité déterminée P et si on trouve les valeurs lui correspondant du paramètre t_q (pour la répartition de Student) on peut considérer le lien de corrélation découvert comme sûr pour r satisfaisant à l'inégalité [10]

$$|r| > t_q \, m_r \qquad (19)$$

Dans notre exemple pour P = 0,99 et, lui correspondant t_q = 2,8 les valeurs trouvées r ne satisfont pas à cette inégalité seulement pour trois cas - pour M_2 (EW) à Likhovka, pour M_2 (NS) à Darievka et pour O_1 (EW) à Likhovka.

Comme nous le verrons, l'estimation de sécurité de la dépendance de l'onde de marée X en fonction de l'onde de température S_1 d'après le coefficient de corrélation r est plus rigoureuse en comparaison avec l'estimation d'après le niveau choisi arbitrairement de l'erreur relative de la détermination du coefficient k.

C'est pourquoi lors de la solution du problème de la correction des valeurs γ et x nous considérons plus fondée l'application du critère (19).

A titre d'exemples illustrant le degré de dépendance des résultats de la détermination des ondes de marées séparées en fonction de l'onde S_1, nous donnons dans la table 4 les séries de valeurs de (17) et (16) pour les ondes S_2, O_1, M_2 et S_1 en composante NS à Likhovka.

Pour indiquer par un exemple concret combien peut être sensible l'effet de l'influence de l'onde S_1 dans les résultats de l'analyse harmonique (lors de la présence d'une corrélation nettement décelée) nous donnons dans la table 5 pour l'onde S_2 (NS) à Likhovka les valeurs γ et x obtenues pour chacun des n séries mensuelles avant et après correction. Ces données sont reproduites graphiquement.

BIBLIOGRAPHIE

1 OSTROVSKII A.E.
Etude des marées terrestres, 2, série "Résultats AGI, Edit. Ac. Sc. URSS M 1961

2 ROSENBACH Y., JAKOBI Ch.
Problèmes des mouvements actuels de l'écorce terrestre M 1969

3 BOGDAN I. You.
Ce livre, page 76

4 BONTCHKOVSKII V.F.
Quelques généralisations des résultats des observations des inclinaisons de la surface de la Terre. Edit. Ac. des Sc. URSS, M 1959

5 PANASSENKO G.D.
Observations clinométriques à la presqu'île Kolskii "Naouka" M.L. 1965

6 BOULATSEN V.G., TOKAR V.Y.
Ce livre, page 33

7 MATVEYEV P.S.
Marées Terrestres "Naoukova Doumka" K 1966

8 MATVEYEV P.S., BOGDAN I. You.
Rotation et déformation de marées de la Terre 4, 1972

9 MATVEYEV P.S., BOGDAN I.D., DOUBIK B.S., SLAVINSKAIA E.A.
Rotation et déformations de marées de la Terre 3 "Naoukova Doumka" K, 1971

10 SMIRNOV N.V., DOUMINE - BARKOVSKII Y.V.
Cours de théorie de probabilités et de statistique mathématique pour les applications techniques "Naouka" M 1965.

Traduction

Observations géophysiques complexes à Obninsk.

L.I. Mironova, M.V. Okhotsimskaĭa, A.V. Khoromskii

Résultats de la réduction des inclinaisons de marées à Tso "Obninsk"

Les observations ont été faites avec deux paires d'appareils Ostrovskii [2] placés dans une des salles de l'édifice souterrain de Tso qui se trouve à la profondeur de 30m dans une couche épaisse de calcaire.

Dans l'édifice sont aménagées les salles avec des socles pour l'installation des appareils. Dans la salle d'une surface d'environ 24m^2 on a fait deux socles en béton de dimensions de deux et quatre mètres carrés solidement fixés dans le calcaire.

Les observations ont été faites avec les cinq clinomètres n°s 23, 27, 28, 29 et 30.

Dans le premier complexe l'appareil n°23 a enregistré la composante NS et le n°28 la composante EW, dans le second complexe l'appareil n°27 a

enregistré la composante NS jusqu'au 17 juin 1968 et ensuite il a été remplacé par l'appareil n°30; la composante EW a été enregistrée tout le temps par l'appareil n°29.

Avant le début des observations tous les appareils ont été soumis à l'étalonnage [4](table I.)

Table I.

Valeurs du coefficient J_o.

N° des appareils	J_o en micro-ampères par sec d'arc.	
	Bobine I	Bobine 2
23	0,9994	0,9997
27	I,0006	I,0025
28	I,0030	I,0025
29	I,0007	I,0020
30	I,0025	I,0012

Nous donnons sur la figure I l'enregistrement diurne d'un des complexes avec un développement dans le temps de 20mm/heure. On a sur la bande outre les enregistrements des deux composantes des inclinaisons (pistes supérieures ondulées) l'enregistrement de la température de l'air à l'intérieur de la salle où sont installés les clinomètres et la droite (inférieure sur l'enregistrement) appelée ligne fixe pour le relever des calculs des ordonnées des inclinaisons et de la température.

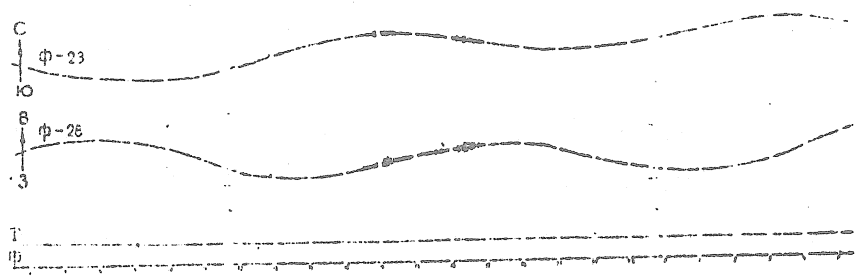

Fig.1. Enregistrement diurne des inclinaisons de la surface de la Terre à Obninsk.

Les valeurs de l'inclinaison ont été soumises à l'analyse harmonique de Pertsev [6] sur EVM "Minsk-22". Pour les phases le signe plus correspond à un retard.

L'analyse harmonique a été faite avec un déplacement du jour moyen de la série d'un jour. Les déplacements ont été calculés en commençant au milieu de la première série (7 avril 1967) jusqu'au milieu de la série suivante (16 décembre 1968). On a obtenu aussi environ 600 déplacements pour chaque appareil.

On a calculé pour chaque jour dans cet intervalle les valeurs γ et x données dans la table. D'après ces tables on a calculé les valeurs moyennes γ et x pour chaque onde, pour chaque mois et tout le laps de temps des observations.

Table 2

Valeurs moyennes mensuelles γ des appareils

N°27 et 30. Composantes NS.

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IV.1967 г.	0,658	0,832	0,641	0,762	0,495
V	0,722	1,050	0,584	0,935	0,726
VI	0,647	1,061	0,758	0,560	0,743
VII	0,705	0,723	0,762	0,711	1,153
VIII	0,727	0,700	0,676	0,762	1,309
IX	0,685	0,702	0,639	0,712	0,941
X	0,664	0,803	0,610	0,735	0,692
XI	0,658	0,847	0,649	0,964	0,449
XII.1967 г.	0,673	0,768	0,770	0,910	0,514
I.1968 г.	0,691	0,618	0,433	0,646	0,645
II	0,699	0,647	0,605	0,888	0,631
III	0,683	0,659	0,725	0,719	0,529
IV	0,669	0,769	0,661	0,902	0,708
V	0,682	0,760	0,805	0,995	0,388
VI	0,640	0,731	0,759	1,195	0,582
VII	0,563	0,620	1,132	0,646	0,537
VIII	0,640	0,605	0,662	0,637	1,039
IX	0,652	0,700	0,656	0,748	1,123
X	0,626	0,789	0,694	0,700	0,538
XI	0,613	0,734	0,599	0,780	0,585
XII.1968 г.	0,643	0,759	0,773	0,860	0,584
moyenne arithmétique	0,664	0,756	0,695	0,798	0,705
Erreur quadratique moyenne	±0,008	±0,026	±0,029	±0,034	±0,055

Table 3.

Valeurs moyennes mensuelles de l'appareil N°23. Composante NS.

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IУ.I967 г.	0,708	0,864	0,603	0,777	0,566
У	0,7I4	I,077	0,65I	I,00I	0,675
УI	0,675	I,076	0,740	0,585	0,7I4
УП	0,704	0,737	0,636	0,72I	I,048
УШ	0,754	0,730	0,786	0,787	I,3I4
IX	-	-	-	-	-
X	-	-	-	-	-
XI	-	-	-	-	-
XП.I967 г.	-	-	-	-	-
I.I968 г.	0,7I3	0,530	0,388	0,772	0,607
П	0,70I	0,648	0,579	0,923	0,639
Ш	0,685	0,674	0,683	0,775	0,67I
IУ	0,693	0,779	0,627	0,83I	0,660
У	0,647	0,737	0,843	0,950	0,409
УI	0,6I5	0,787	0,757	0,900	0,725
УП	0,578	0,635	I,22I	0,563	0,565
УШ	0,66I	0,63I	0,686	0,6I2	I,I50
IX	0,684	0,7I7	0,720	0,874	I,I36
X	0,644	0,8I7	0,794	0,63I	0,507
XI	0,639	0,8I4	0,664	0,68I	0,5I9
XП.I968 г.	0,655	0,800	0,7I9	0,8I7	0,589
moyenne arithmétique	0,647	0,768	0,7I2	0,776	0,735
Erreur quadratique moyenne	±0,0I0	±0,034	±0,04I	±0,032	±0,063

Table 4

Valeurs moyennes mensuelles de l'appareil

N°29. Composante EW.

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IУ.I967 г.	0,704	0,6I6	0,706	0,323	0,805
У	0,74I	0,556	0,799	0,7I7	0,566
УI	0,752	0,642	0,703	0,704	0,3I0
УII	0,8I0	0,472	0,824	0,834	0,I95
УIII	0,742	0,59I	0,683	0,756	0,3I7
IX	0,726	0,64I	06784	0,596	0,7II
X	0,749	0,6I8	0,7I6	0,6I0	0,926
XI	0,774	0,638	0,743	0,748	0,9I3
XII.I967 г.	0,742	0,849	0,875	0,696	0,805
I.I968 г.	0,777	0,749	0,552	0,887	0,874
II	0,755	0,772	0,780	0,864	I,052
III	0,764	0,784	0,749	0,633	I,055
IУ	0,723	0,602	0,774	0,7I9	0,675
У	0,7I6	0,535	0,7I2	0,568	0,4II
УI	0,7I2	0,566	0,843	0,69I	0,207
IУ	0,720	0,527	I,025	0,657	0,253
УIII	0,726	0,6I2	0,843	0,585	0,394
IX	0,708	0,653	0,808	0,592	0,769
X	0,734	0,632	0,58I	0,679	0,79I
XI	0,7I0	0,746	0,695	0,699	0,900
XII.I968 г.	0,690	0,883	0,736	0,856	0,995
moyenne arithmétique	0,737	0,652	0,758	0,686	0,663
Erreur quadratique moyenne	±0,006	±0,023	±0,02I	±0,027	±0,064

Table 5

Valeurs moyennes mensuelles de l'appareil N°28. Composante EW

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IУ.1967 г.	0,733	0,669	0,714	0,753	0,822
У	0,737	0,603	0,745	0,722	0,590
УI	0,753	0,670	0,660	0,698	0,337
УП	0,778	0,526	0,730	0,781	0,237
УШ	0,754	0,597	0,715	0,784	0,240
IX	-	-	-	-	-
X	-	-	-	-	-
XI	-	-	-	-	-
XП.1967 г.	-	-	-	-	-
I.1968 г.	0,771	0,776	0,556	0,777	0,844
П	0,750	0,794	0,821	0,869	1,065
Ш	0,761	0,835	0,753	0,683	1,039
IУ	0,754	0,593	0,635	0,644	0,694
У	0,736	0,567	0,654	0,583	0,438
УI	0,725	0,610	0,806	0,704	0,252
УП	0,708	0,545	0,997	0,634	0,270
УШ	0,728	0,615	0,752	0,574	0,375
IX	0,723	0,729	0,729	0,595	0,736
X	0,744	0,656	0,630	0,671	0,821
XI	0,735	0,767	0,732	0,754	0,935
XП.1968 г.	0,721	0,928	0,830	0,888	1,002
moyenne arithmétique	0,742	0,675	0,733	0,713	0,629
Erreur quadratique moyenne	±0,004	±0,027	±0,024	±0,022	±0,074

Table 6

Valeurs moyennes mensuelles x pour les appareils N°27 et 30. Composante NS.

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IУ.1967 г.	+1,7	-18,5	-5,6	+2,9	-37,5
У	+4,0	-18,7	-4,6	+9,1	-66,8
УI	+1,6	-23,5	-13,7	+18,8	-69,3
УП	+2,9	-22,7	-15,4	+25,1	-72,3
УШ	+3,3	-22,5	-0,3	-11,4	-49,2
IX	+3,2	-13,1	+25,7	+2,2	-10,2
X	+2,4	-7,5	+16,1	+4,4	+18,9
XI	+1,2	-1,3	+1,3	+8,1	-18,9
XП.1967 г.	+0,4	-2,7	+1,2	-3,4	+4,0
I.1968 г.	+0,8	-9,2	-6,3	+9,6	+14,4
°П	+0,1	-16,8	+8,9	-3,0	+38,2
Ш	+1,9	-14,7	+2,4	-5,3	+11,5
IУ	-1,0	-28,0	+21,1	-7,4	-32,3
У	-0,5	-6,9	+5,5	-18,1	-7,8
УI	-1,8	-13,1	+4,3	-26,4	+37,1
УП	+9,7	+2,0	-13,4	+16,4	-41,6
УШ	+3,4	-15,4	+1,4	+2,3	-46,2
IX	+3,4	-13,0	+5,5	+0,4	-19,5
X	+0,6	-2,7	+18,5	-8,4	+21,0
XI	+0,6	+0,5	+2,0	+5,9	+5,6
XП.1968 г.	+1,8	-2,5	-1,6	-7,1	-5,5
moyenne arithmétique	+1,9	-11,9	+1,6	+0,7	-11,9
Erreur quadratique moyenne	±0,5	±1,9	±2,1	±2,6	±7,6

Table 7

Valeurs moyennes mensuelles x pour l'appareil N°23. Composante NS.

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IУ.1967 г.	-0,3	-19,6	-1,4	+1,9	+32,0
У	-1,1	-21,4	-3,3	+11,7	+3,0
УI	+0,8	-26,6	-15,0	+22,2	-26,8
УП	+1,8	-23,3	-15,3	+22;8	-20,7
УШ	+2,5	-25,0	+2,5	-6,6	-37,8
IX	-	-	-	-	-
X	-	-	-	-	-
XI	-	-	-	-	-
XП.1967 г.	-	-	-	-	-
I.1968 г.	+1,5	-4,1	-12,2	+9,0	+16,2
П	-0,9	-19,6	-7,2	-1,6	+34,4
Ш	+2,3	-15,1	-0,2	-9,7	+16,7
IУ	+1,2	-18,6	+13,7	+5,3	-23,0
У	+2,4	-8,4	+6,7	+4,1	-7,5
УI	+0,5	-19,1	+3,6	-13,8	+29,4
УП	+5,4	-7,2	-10,4	+17,0	+41,9
УШ	-0,8	-21,6	-24,1	-2,8	+42,8
IX	+2,5	-15,6	+6,7	-2,9	+41,6
X	+14,3	-4,7	+19,8	-4,6	+23,2
XI	+0,4	-1,0	+10,2	+4,2	+10,9
XП.1968 г.	+2,9	-6,2	-2,3	-1,2	-5,6
moyenne arithmétique	+2,1	-15,1	-1,7	+3,4	+15,5
Erreur quadratique moyenne	±0,9	±2,0	±2,8	±2,5	±5,8

Table 8

Valeurs moyennes mensuelles x pour l'appareil N°29. Composante EW.

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IУ.1967 г.	+4,9	+13,1	-17,6	-16,1	-26,8
У	+2,0	+18,2	-19,3	-2,6	-12,4
УI	+3,1	+15,9	-7,6	+5,0	-26,7
УП	+4,0	+16,0	-2,7	-0,3	+19,4
УШ	+2,8	+6,6	+9,7	-4,8	-30,4
IX	+2,6	+3,2	-2,7	+0,4	-38,2
X	+0,9	+3,4	-1,3	-2,2	-14,7
XI	+2,3	+16,8	-3,3	+17,1	-3,3
XП.1967 г.	+2,2	+11,9	+6,2	+7,4	+6,1
I.1968 г.	+1,5	+8,8	+18,1	-3,6	+4,8
П	+1,5	+8,5	+0,8	-2,5	+20,9
Ш	+2,2	+13,7	+6,1	+6,6	+32,0
IУ	-1,0	+15,0	+4,0	+7,9	-23,0
У	+0,3	+2,7	-9,0	-2,6	+43,0
УI	-0,4	+20,5	+5,4	+5,7	-31,6
УП	-2,9	+27,4	+4,1	-8,1	-3,7
УШ	+0,7	+17,3	-1,5	-12,2	+33,1
IX	+1,3	+8,0	-7,9	-1,5	+40,7
X	+3,0	+7,2	+5,1	+1,2	-12,2
XI	+4,6	+11,1	+6,2	-3,6	-4,8
XП.1968 г.	+6,4	+14,7	+6,0	+2,5	-3,4
moyenne arithmétique	+1,7	+12,4	-0,6	-0,3	-1,5
Erreur quadratique moyenne	±0,4	±1,3	±1,9	±1,6	±5,4

Table 9.

Valeurs moyennes mensuelles x pour l'appareil N°28. Composante EW.

Mois, année	M_2	S_2	N_2	O_1	K_1
IУ.I967 г.	+2,2	+I3,I	-5,0	-II,9	-29,I
У	+I,3	+I7,4	-I7,0	-2,4	-I7,2
УI	+3,7	+I9,6	-2,5	+7,7	-29,8
УП	+4,I	+I3,8	-4,2	+3,I	+I9,5
УШ	+2,9	+8.5	+9,7	+I,0	-23,9
IX	-	-	-	-	-
X	-	-	-	-	-
XI	-	-	-	-	-
XП.I967 г.	-	-	-	-	-
I.I968 г.	+I,7	+I3,5	-3,5	+0,9	+6,4
П	+0,8	+8,2	-I,9	-2,5	+22,4
Ш	+2,0	+I3,3	+2,8	+9,8	+35,8
IУ	-0,7	+I5,3	+5,2	+I4,4	-28,8
У	+0,2	+8,8	-I0,4	+3,5	+43,7
УI	+0,3	+29,8	+3,3	+5,8	-36,3
УП	-3,8	+28,I	+3,4	+2,2	-I,7
УШ	-0,4	+I5,9	-9,8	-4,3	+3I,4
IX	+0,3	+I0,9	-I,0	+2,3	+40,4
X	+I,5	+II,I	+9,4	+2,3	-I4,4
XI	+4,9	+I4,9	+I,7	+0,3	-I,9
XП.I968 г.	+I,7	+I5,5	+4,9	+7,I	+I,2
moyenne arithmétique	+I,3	+I5,2	+0,9	+2,6	+I,0
Erreur quadratique moyenne	±0,5	±I,5	±I,7	±I,4	±6,6

Les valeurs mensuelles moyennes γ sont données dans les tables 2, 3, 4 et 5 et les moyennes mensuelles de x dans les tables 6, 7, 8 et 9.

On peut constater par les tables 2 à 5 que d'après les observations des deux appareils parallèles, les valeurs γ pour les cinq ondes principales M_2, S_2, N_2, O_1 et K_1 diffèrent dans les limites des erreurs. Il convient de noter que les erreurs des ondes diurnes sont sensiblement plus grandes que pour les semi-diurnes. On peut tirer des conclusions analogues pour x.

Les graphiques de la variation de γ de l'onde M_2 des quatre appareils sont donnés à la figure 2. Sur chaque courbe on voit 6 à 7 mm de variations périodiques de jour dont l'amplitude dépend beaucoup de la qualité des données d'observations.

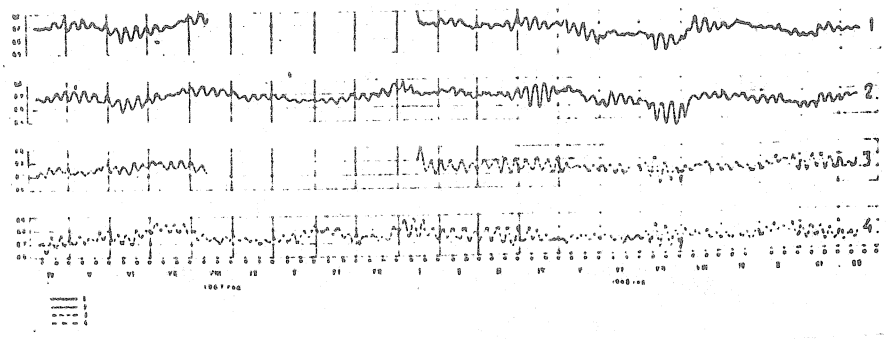

Fig.2 Graphiques des valeurs γ pour l'onde M_2 semi-diurne
Appareils 1-23 (NS); 2-27 (NS); 3-28 (EW); 4-29 (EW).

Nous donnons sur les figures 3, 4 les graphiques de l'allure de la variation des valeurs moyennes mensuelles γ pour les ondes M_2 et K_1. On y voit bien l'effet saisonnier pour l'onde K_1. Ce phénomène peut s'expliquer par l'influence des facteurs météorologiques.

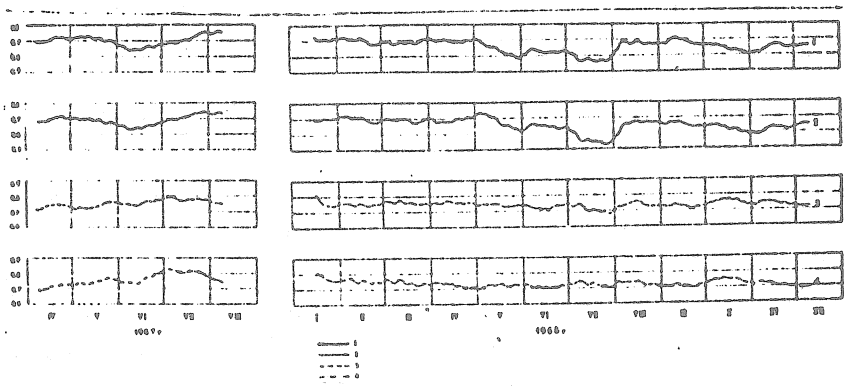

Fig.3

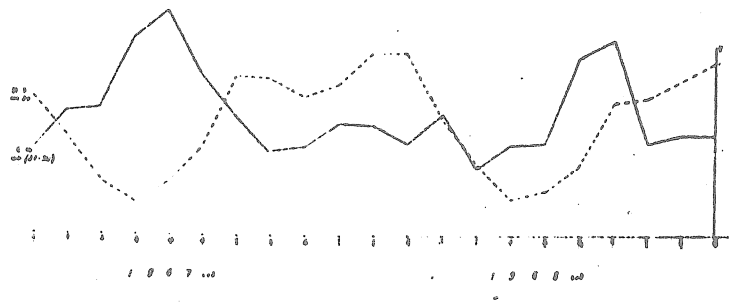

Fig.4 Graphiques de la variation de γ pour l'onde K_1.

L'examen comparatif des graphiques des valeurs moyennes diurnes des inclinaisons, de la pression atmosphérique et de la température de l'air extérieur permettent d'établir un degré important de similitude [5].

Pour déceler le lien avec la température de l'air extérieur il ne faut pas utiliser la méthode des valeurs moyennes diurnes mais appliquer la méthode des différences sur de plus petits intervalles. On a relevé chaque jour pour 4, 10, 16 et 22 heures du temps de Greenwich les valeurs de l'inclinaison observée et théorique.

On a composé pour chaque époque les différences entre les inclinaisons observées et théoriques multipliées préalablement par γ; ainsi les inclinaisons sont affranchies des ondes de marées.

Ensuite pour éliminer la dérive de l'inclinaison on a formé les différences pour deux époques successives. On a représenté de la même façon les données météorologiques.

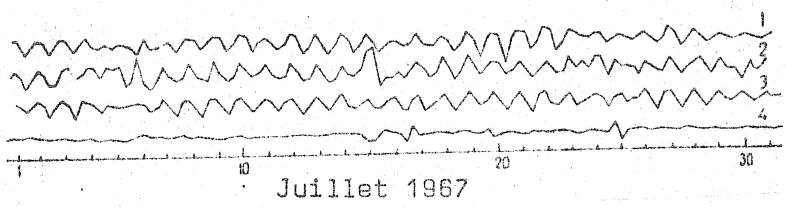

Fig. 5 Graphiques des inclinaisons provoquées par la déformation de température de la surface de la Terre 1-Appareil N°23 (NS); 2 appareil N°28 (EW); 3-graphique de la variation de la température; 4-graphique de la variation de la pression.

Nous donnons sur la figure 5 les graphiques des résultats de ces calculs d'après les données des observations faites en juin 1967 par les deux clinomètres N°23 (NS) et N°28 (EW).

Ceci permet d'émettre l'hypothèse que dans l'inclinaison de marée observée il y a une onde diurne due aux variations diurnes de la température de l'air extérieur. La température dans la salle où sont installés les appareils se maintient continuellement avec une précision allant jusque 0.02° par jour. La conséquence naturelle de cette hypothèse peut être la présence d'un grand désaccord des valeurs des ondes O_1 et K_1 et une forte erreur dans leur détermination ce qui se confirme aussi par les résultats de l'analyse harmonique.

Comme on le constate par le graphique l'amplitude de l'onde diurne reliquat est à peu près la même aussi bien pour la composante NS que pour la composante EW. En outre les courbes sont en assez bonne corrélation avec la courbe obtenue à la suite de la réduction des données de la température de l'air extérieur.

On a fait l'estimation de la valeur possible de l'amplitude de l'onde de température diurne provenant des variations de température de la résistance électrique de la ligne reliant le clinomètre au galvanomètre. Il est apparu ainsi que l'amplitude de l'onde diurne sur le graphique (fig.5) est au moins d'un ordre plus grande que celle qui est possible à cause des variations de température de la résistance électrique de la ligne.

Tout cela témoigne de la grande importance de l'allure journalière de la température de l'air extérieur sur les inclinaisons de la surface de la Terre. Cependant il faut avoir en vue que le mécanisme de cette influence est déterminé par la déformation de température de la surface de la Terre.

La présence des particularités saisonnières sur les graphiques (Fig.3, 4) sont selon toute probabilité en relation avec l'influence de la température sur les inclinaisons.

Pour augmenter la précision de la détermination de la valeur γ particulièrement pour les ondes diurnes il faut introduire la correction de l'influence de l'allure diurne de la température de l'air extérieur.

Résumé

Les résultats obtenus pour les variations de γ au cours des observations d'un an et demi par les deux complexes de clinomètres à Obninsk ont permis d'établir l'allure saisonnière des inclinaisons de la surface de la Terre et une convergence assez bonne des valeurs γ pour les deux complexes de clinomètres.

BIBLIOGRAPHIE

[1] DOBROKHOTOV Y.S., KOUTIREV V.V., KHOROMSKII A.V.
Détermination des azimuts des lignes d'appui dans le bâtiment souterrain de l'Observatoire géophysique central. "Observations géophysiques complexes à Obninsk, 1970.

[2] OSTROVSKII A.E.
Le clinomètre avec enregistrement photoélectrique. Publ.:"Gravimétrie" N°2, M. Edit. Ac. des Sc. URSS, 1961.

[3] OKHOTSIMSKAIA M.V., KHOROMSKII A.V.
Première série d'observations clinométriques à Obninsk. Méthode de mesure des marées terrestres et des déformations lentes de la surface de la Terre. M. "Naouka", 1969.

[4] OKHOTSIMSKAIA M.V., KHOROMSKII A.V.
Plateforme pour l'étalonnage des clinomètres. Observations géophysiques complexes à Obninsk N°1, Obninsk, 1970.

[5] OKHOTSIMSKAIA M.V., KHOROMSKII A.V.
Sur l'influence des facteurs météorologiques. Sur l'allure de la variation des inclinaisons de la surface de la Terre d'après les observations à Obninsk. (Cette publication).

[6] PERTSEV B.P.
Analyses harmoniques des marées élastiques. Izv. Ac. des Sc. URSS - Série géophysique, 1958 N°8

[7] PERTSEV B.P.
Sur la prise en considération de la dérive lors des observations des marées élastiques 1959 N°4

Traduction

Comparaison des résultats de l'analyse harmonique des observations clinométriques au point de Velikié Boudicha, obtenues par deux méthodes.

P.S. Matveyev, S.N. Korba, I. You Bogdan et E.A. Slavinskaya.

Rotation et déformations de marées de la Terre - VI - pp.54-1974

Velikié Boudicha est situé sur le profil Soumi-Kherson [1,2]. L'installation à une profondeur de 12,4 m et l'aménagement de l'enregistrement ont été réalisés de juin à Octobre 1965. Des observations régulières ont commencé le 11-XI-1965 avec deux paires de clinomètres photoélectriques Ostrovskii installés en enregistrement paralléle sur le même socle. Les appareils 49 et 03 enregistraient la composante NS et les 62 et 05 la composante EW.

Toutes les données de 1965 à 1966 (en composante NS - 24 mois/appareil, en composante EW - 27 mois/appareil) ont été soumises à l'analyse harmonique suivant le schéma de P.S. Matveyev [3] sur EVM M-220 à l'Institut de cybernétique de l'Ac. des Sc. d'Ukraine (programme S.N. Korba [4]. Les résultats ont été publiés en [2]. Leur résumé pour les ondes de marées principales, communes avec les ondes déterminées par la

méthode de A.P. Vénédikov [7] est donné dans les tables 1 et 2 dans les lignes marquées par la lettre M.

Pour l'onde K_1 les résultats sont donnés dans les tables 1 et 2 suivant deux variantes . Dans la ligne $\bar{M}$ sont données les valeurs γ et x trouvées directement d'après le schéma [3] c'est à dire sans tenir compte de l'influence de l'onde de température diurne S_1 sur l'onde K_1 et de l'effet de la différence des valeurs γ pour les ondes P_1 et K_1. Nous donnons dans la ligne M les valeurs γ et x caractérisant l'onde K_1 affranchie de l'influence des ondes S_1 et P_1.

Les valeurs des paramètres des ondes P_1 et S_1 sont également données dans les tables 1 - 3.

Pour plus de sécurité nous avons réduit les données d'observation d'après le schéma élaboré par A.P. Vénédikov [7].
L'analyse a été faite à l'Institut de Cybernétique de l'Ac. des Sc. d'Ukraine sur EVM M-220 d'après le programme composé par S.N. Korba.

Table 1

Résultats de l'analyse harmonique des inclinaisons de marées à Velikié Boudicha (NS) obtenus d'après les méthodes de Venedikov (V) et Matveyev (M).

Onde	Méthode	γ 49	γ 03	γ Moyenne	x 49	x 03	x Moyenne
Q_1	M	0,986 ± 811	1,181 ± 698	1,098 ± 529	− 35°,69 ± 49,51	− 39°,44 ± 33,41	− 38°,27 ± 27,69
	B	0,946 ± 963	1,973 ± 1,182	1,356 ± 747	− 7,75 ± 41,23	− 65,78 ± 24,27	− 50,85 ± 20,91
O_1	M	0,577 ± 121	0,391 ± 133	0,493 ± 90	− 0,52 ± 13,20	+ 27,40 ± 17,19	+ 9,84 ± 10,47
	B	0,648 ± 186	0,425 ± 215	0,552 ± 141	+ 18,03 ± 11,63	+ 25,81 ± 20,48	+ 19,93 ± 10,11
P_1	M	1,411 ± 530	1,351 ± 519	1,380 ± 371	− 18,97 ± 21,51	+ 7,91 ± 22,00	− 5,83 ± 15,38
	B	1,194 ± 451	1,889 ± 547	1,475 ± 348	− 43,03 ± 15,29	+ 9,89 ± 11,72	− 9,70 ± 9,30
K_1	$\bar{M}$	0,934 ± 156	0,960 ± 134	0,949 ± 102	+ 11,58 ± 9,10	+ 10,47 ± 13,35	+ 11,23 ± 7,52
	M	0,899 ± 156	0,816 ± 159	0,858 ± 111	+ 16,88 ± 9,88	+ 19,17 ± 11,15	+ 17,89 ± 7,39
	B	0,905 ± 138	0,643 ± 170	0,801 ± 107	+ 8,00 ± 6,17	+ 17,25 ± 10,71	+ 10,30 ± 5,35

(suite) M_1	M	1,389 ± 2,103	1,572 ± 753	1,551 ± 706	+118,12 ± 58,08	+184,67 ± 62,72	+148,84 ± 42,62
	B	0,802 ± 1,433	0,722 ± 1,756	0,770 ± 1,110	-132,59 ± 72,41	+147,35 ± 98,57	- 34,47 ± 58,36
N_2	M	0,568 ± 53	0,642 ± 41	0,614 ± 32	+ 0,84 ± 2,89	+ 2,70 ± 2,98	+ 1,74 ± 2,08
	B	0,610 ± 52	0,687 ± 72	0,636 ± 42	+ 1,51 ± 3,46	+ 5,56 ± 4,24	+ 3,13 ± 2,68
M_2	M	0,630 ± 8	0,648 ± 7	0,640 ± 5	- 1,58 ± 93	+ 0,20 ± 75	- 0,50 ± 58
	B	0,634 ± 10	0,657 ± 14	0,642 ± 8	+ 0,80 ± 66	- 0,19 ± 84	+ 0,42 ± 52
S_2	M	0,705 ± 23	0,583 ± 20	0,636 ± 15	- 0,84 ± 1,79	+ 10,95 ± 1,59	+ 5,74 ± 1,19
	B	0,690 ± 22	0,566 ± 29	0,645 ± 18	- 2,61 ± 1,26	+ 10,45 ± 2,07	+ 9,21 ± 1,08

Table 2

Résultats de l'analyse harmonique des inclinaisons de marées à Velikié Boudicha (EW) obtenus par les méthodes de Venedikov (V) et Matveyev (M).

Onde	Méthode	γ			α		
		62	05	Moyenne	62	05	Moyenne
Q_1	M	0,659 ± 151	0,710 ± 141	0,686 ± 103	+20°,10 +10,25	+36°,53 ±11,28	+27°,53 ± 7,58
	B	0,710 ± 230	0,889 ± 231	0,799 ± 163	+12,53 ±13,13	+20,05 ±10,52	+17,11 ± 8,20
O_1	M	0,678 ± 33	0,677 ± 23	0,677 ± 19	- 1,98 ± 2,56	- 2,89 ± 2,07	- 2,53 ± 1,61
	B	0,684 ± 46	0,701 ± 46	0,693 ± 33	- 0,62 ± 2,75	- 2,30 ± 2,63	- 1,50 ± 1,90
P_1	M	0,765 ± 110	0,803 ± 103	0,785 ± 75	- 6,56 ± 8,24	-14,06 ± 7,35	-10,74 ± 5,48
	B	0,741 ± 112	0,823 ± 108	0,783 ± 78	- 6,59 ± 6,09	-15,16 ± 5,30	-11,47 ± 4,00
	M	0,778 ± 31	0,786 ± 38	0,781 ± 24	+ 2,70 ± 1,83	+ 4,05 ± 2,22	+ 3,25 ± 1,41
K_1	M	0,786 ± 34	0,804 ± 31	0,796 ± 23	+ 3,67 ± 2,45	+ 4,60 ± 2,24	+ 4,18 ± 1,65
	B	0,767 ± 34	0,795 ± 33	0,781 ± 24	+ 4,04 ± 1,80	+ 3,60 ± 1,69	+ 3,81 ± 1,23
M_1	M	1,300 ± 440	1,336 ± 434	1,318 ± 309	+30,74 ±17,08	+20,98 ±17,58	+26,00 ±12,25
	B	1,507 ± 488	1,029 ± 484	1,266 ± 344	+42,70 ±13,12	+22,53 ±19,10	+36,23 ±10,82
N_2	M	0,666 ± 37	0,680 ± 28	0,675 ± 22	+ 2,97 ± 1,65	+ 0,64 ± 2,21	+ 2,14 ± 1,32
	B	0,689 ± 43	0,638 ± 51	0,668 ± 33	+ 1,64 ± 2,56	- 0,29 ± 3,25	+ 0,90 ± 2,01
M_2	M	0,700 ± 8	0,708 ± 7	0,705 ± 5	+ 6,04 ± 42	+ 5,04 ± 37	+ 5,48 ± 28
	B	0,706 ± 9	0,704 ± 10	0,705 ± 7	+ 5,97 ± 50	+ 4,13 ± 58	+ 5,19 ± 38
S_2	M	0,765 ± 24	0,681 ± 22	0,719 ± 16	+ 7,42 ± 1,64	+ 4,46 ± 1,30	+ 5,60 ± 1,02
	B	0,773 ± 18	0,673 ± 21	0,731 ± 14	+ 8,81 ± 95	+ 5,21 ± 1,25	+ 7,49 ± 76

Par la comparaison des valeurs γ et $\varkappa$ obtenues pour chacun des appareils par les deux méthodes nous constaterons que la divergence de ces valeurs pour toutes les ondes déterminées ne sort pas des limites des intervalles doublés des erreurs quadratiques moyennes. Les moyennes pour les deux appareils concordent mieux; elles sont obtenues en utilisant des poids inversement proportionnels aux carrés des erreurs quadratiques moyennes.

Dans ce cas, la divergence des valeurs obtenues par les deux méthodes ne sort pas en général des limites des erreurs quadratiques moyennes correspondantes.

Table 3

Comparaison des résultats de la détermination de l'onde de température diurne S_1 à Velikié Boudicha par les deux méthodes.

Méthodes d'analyse	Composante NS			Composante EW		
	Appareil	R_s, M.C.A	ζ_s	Appareil	R_s, M.C.A	ζ_s
M	49	0,538 ± 264	+ 4°6 ±28,2	62	0,135 ± 251	- 6°7 ±106,8
B	49	0,370 ± 224	+12,2 ±24,6	62	0,217 ± 256	+ 51,0 ± 47,7
M	03	1,352 ± 256	+48,3 ±10,8	05	0,512 ± 234	-117,6 ± 26,3
B	03	1,429 ± 270	+48,5 ± 7,6	05	0,483 ± 248	-125,0 ± 20,8

Les résultats de la détermination de l'onde de température S_1 par les deux méthodes (table 3) concordent aussi. Pour cette onde, la divergence aussi bien en amplitude R_s qu'en phase initiale ζ_s ne sort pas des limites de l'intervalle égal à la somme des erreurs quadratiques moyennes correspondantes.

La comparaison des résultats de la détermination de l'onde S_1 (table 3) demande quelques explications. Le fait est que dans les résultats obtenus d'après le schéma de Venedikov [7] l'onde de température S_1 est inséparable de l'onde de marée diurne extrêmement faible et s'exprime (comme toutes les ondes de marées) par les valeurs γ_s (amplitude) et α_s (déphasage). Dans le schéma [6] l'onde S_1 représente l'onde diurne exclusivement météorologique (de température) puisque la composante de marée de cette onde petite en valeur (moins de 0,05 M.C.D.) (somme des harmoniques 164. 554 et 164.556) a déjà été prise en considération dans le processus d'analyse harmonique d'après le schéma [3]. La phase initiale ζ_s obtenue d'après le schéma [6] est rapportée à l'époque $t_o = t_o + 12^h$ où t_o est l'époque initiale (première ordonnée horaire) de la première série mensuelle de la série analysée des observations. Ainsi pour représenter les résultats de la détermination de l'onde S_1 d'après Venedikov (valeurs γ_s et α_s) dans une forme comparable avec nos résultats, il faut faire deux réductions:

1. Passer des valeurs γ_s et α_s aux valeurs $(R_s)_{Vén.}$ et $(\zeta_s)_{Vén.}$ d'après les formules

$$(R_s)_{Ben} = \gamma_s (R_T)_s ,$$
$$(\zeta_s)_{Ben} = (\zeta_T)_s - \alpha_s = (\zeta_T)_s + \alpha_s . \qquad (2)$$

2. Eliminer des valeurs $(R_s)_{Vén.}$ et $(\zeta_s)_{Vén.}$ l'apport de la composante de marée de l'onde S_1 (somme des harmoniques 164.554 et 164.556). A Velikié Boudicha la marée S_1 est très faible.

Pour la composante NS l'amplitude théorique $(R_T)_s$ est en tout seulement 0,008 M.C.D. et pour la composante EW - 0,039 M.C.D. Quant à la composante de marée observée effectivement de cette onde, elle aura l'amplitude $(R_{obs})_s$, près de 30% moins que les valeurs réduites: c'est à dire environ 0,006 et 0,027 M.C.D. pour les directions NS et EW.

C'est pourquoi en tenant compte du haut niveau d'erreur des valeurs comparées dans la table 3, R_s et ζ_s (presque d'un ordre plus élevé que les valeurs $(R_T)_s$) on a décidé lors de la préparation des résultats de la détermination de l'onde S_1 d'après Venedikov de se limiter uniquement à la première des deux réductions citées plus haut. Les valeurs théoriques $(R_T)_s$ et $(\zeta_T)_s$ nécessaires pour cette réduction ont été calculées d'après les formules correspondantes provenant du travail [3].

La convergence des résultats de la détermination des ondes les plus importantes (et de l'onde de température S_1) permet de tirer une conclusion sur la sûreté des deux méthodes d'analyses appliquées. Cette conclusion est en bon accord avec la comparaison faite il y a peu par S.N. Korba et P.S. Korba sur de longues séries d'observations de marées de la pesanteur à Simféropol et à Yalta [5].

BIBLIOGRAPHIE

[1] P.S. MATVEYEV, I.Y. BOGDAN, G.M. LISSENKO
Géophysique et Astronomie, II, "Naoukova Doumka" K, 1967.

[2] BOGDAN I.Y., LISSENKO G.M., MATVEYEV P.S.
Rotation et déformations de marées de la Terre. Publ.1,
"Naoukova Doumka" K, 1970

[3] MATVEYEV P.S.
Marées Terrestres "Naoukova Doumka" K, 1966

[4] KORBA S.N.
Rotation et déformations de marées de la Terre,Publ.5,
"Naoukova Doumka" K, 1973

[5] KORBA S.N., KORBA P.S.
Rotation et déformations de marées de la Terre, Publ. 4
"Naoukova Doumka" K, 1972

[6] MATVEYEV P.S.
Rotation et déformations de marées de la Terre
Publ.2, "Naoukova Doumka" K, 1970

Traduction

Etalonnage et sensibilité des extensomètres à tige en quartz avec transformateur du type à torsion

V.G. Boulatsen

Rotation et déformations de marées de la Terre - VI - pp68-78 1974

Il existe deux procédés de détermination de la sensibilité des extensomètres: calcul et expérimental.

Dans le premier procédé le grandissement du système est calculé d'après ses paramètres (dimensions ou autres caractéristiques découlant des particularités de construction). Par exemple, l'utilisation des extensomètres à tige avec partie sensible du type à torsion a souvent été limitée à la détermination de la sensibilité par la relation

$$\alpha = 2L\frac{S}{D} \qquad (1)$$

où α est l'écart du trait lumineux, L le levier optique, S le déplacement sur le sol, D le diamètre de la bille de l'installation à torsion.

Pour les autres types de transformateurs générateurs (capacitif, inductif, photoélectrique et autres) la sensibilité des extensomètres se détermine expérimentalement. Le calibrage du canal d'enregistrement se fait d'après les mesures des déplacements de l'élément mobile du transformateur attaché solidement à la tige. De petits déplacements de la tige sont créés par différents procédés:par dispositif de réduction micrométrique, par vis différentielles,par générateurs à magnétostriction ou inductif (chauffage d'une partie de la tige, etc...)

L'application des générateurs de type mécanique consiste à donner à la tige des déplacements d'un valeur donnée. Cependant, même si ces équipements étaient parfaits, il ne paraît pas possible de donner des déplacements de l'ordre de dizaines de microns avec une haute précision.

Les méthodes mentionnées n'ont pas garanti la détermination de la sensibilité avec une haute précision. D'après certains auteurs, l'erreur est estimée entre 10% et 40% (1, 2, 6). Les mesures ont été faites avec de grands déplacements et la sensibilité dans le domaine des micro déplacements a été trouvée par extrapolation.

L'application du procédé interférométrique a augmenté la précision de la détermination de la sensibilité. Hade et d'autres (6) ont employé un interféromètre de Michelson pour l'étalonnage des extensomètres d'Ogdensbourg. Ils ont utilisé le laser et ont obtenu la sensibilité avec une erreur de 2 à 5%. Les mesures ont été faites sur des déplacements très faibles (jusqu'à 0,03 μ).

Blayney et Gilman (7) ont créé un extensomètre sur la base de l'interféromètre Fabry-Perrot avec un calibrage interférométrique indirect ce qui a donné la possibilité d'augmenter la précision de détermination de la sensibilité jusqu'à quelques pourcents.

Ces dernières années on a largement employé les mesures laser qui ont des importants avantages par rapport aux autres types d'extensomètres puisqu'elles garantissent l'obtention de l'échelle d'enregistrement dans le processus des observations par le calcul des maxima interférentiels (8).

Dans la pratique de l'exploitation des extensomètres avec une partie sensible du type à torsion on a également un essai de détermination expérimentale de la sensibilité (1-2). Cependant l'étalonnage du canal d'enregistrement a été fait non pas en mesures directes des déplacements du bout libre du levier mais à l'aide des générateurs calibrés préalablement par méthode interférométrique c'est-à-dire en donnant à la tige un déplacement connu.

Particularités de la partie sensible du type à torsion

La construction du transformateur à bille se caractérise par sa simplicité, par l'absence de sources de dérive. L'essai des observations dans beaucoup de stations a monté la sûreté de l'équipement, la stabilité dans le fonctionnement. Puisque le transformateur à bille constitue un générateur du type à contact, la possibilité d'une réaction inverse sur la tige provoquée par le frottement qui peut altérer la transmission des déplacements constitue une imperfection.

La détermination de la sensibilité d'après la formule (1) est basée sur l'hypothèse de la rigidité absolue de la tige et cela à juste titre lors de l'absence de forces participant à son mouvement. Les forces de retour dans les suspensions, proportionnelles aux déplacements de la tige, les forces de friction dans l'équipement à torsion dépendant du serrage de la bille aux surfaces d'oscillation peuvent être les mêmes forces.

Enfin, la formule (1) est exacte pour le cas de l'uniformité idéale dans la régularité de la forme géométrique de la bille et des surfaces participant dans la transmission du mouvement de la tige à la bille et également lors de l'absence de glissement de la bille.

Les calculs théoriques des sources d'erreur sont examinés en détail dans le travail de Latinina (2). L'auteur considère que l'équipement à bille garantit la précision du calcul de l'ordre de $\pm$ 0,05 μ en considérant certaines conditions optimales de travail (pureté des surfaces des classes 8 et 9, la présence de l'effet total des forces de retour et fixes de l'ordre de quelques grammes).

Un essai de détermination expérimentale de la sensibilité de l'extensomètre à tige avec transformateur à bille a été entrepris à l'Institut de Géophysique de l'Académie des Sciences d'Ukraine (3). L'extrémité libre du tube en quartz est relié à une petite tête à ressort de mesure des petits déplacements avec une valeur de division de 0,1 micron.

Les déformations de la tige ont provoqué par leur charge de petits poids.Le déplacement de la tache lumineuse réfléchie depuis le miroir fixé sur la bille est enregistré sur papier photographique. La précision de l'étalonnage de l'extensomètre par cette méthode est environ de 8%.

Méthode d'étalonnage.

Dans l'extensomètre de Poltava la tige est constituée de morceaux séparés de tubes en quartz d'une longueur de 1 M. Leur liaison dans la tige a été faite à l'aide d'une soudure avec une consolidation successive des joints par des manchons en ciment.

Le diamètre extérieur des tubes est de 70 mm, l'épaisseur des parois est de 1,5 mm à 2,5 mm. L'étalon de longueur de l'extensomètre d'Inkerman est en tubes de quartz d'une longueur de 3 m, reliés également entre eux par des manchons en ciment. Le diamètre extérieur de la tige est de 48 mm, l'épaisseur des parois est de 2,5 à 3,5 mm. Les deux tiges ont la même section transversale (4,0 cm^2) et à peu près un poids égal (environ 18 à 19 kgs). En outre les deux appareils ont le même système de suspension, ainsi dans l'extensomètre de Poltava l'étalon de longueur est posé sur dix suspensions doubles et celui d'Inkerman sur huit.

L'analogie de construction et la proximité de certains paramètres les plus importants des tiges des deux extensomètres (section transversale, poids, quantité de suspensions) nous ont permis d'exécuter les recherches sur l'étalonnage de l'extensomètre de Poltava et lors de l'étalonnage de l'appareil d'Inkerman on s'est limité uniquement à trois déplacements gradués pour lesquels on a fait des observations de déformations de marées.

En entreprenant l'étalonnage des extensomètres nous nous sommes donné comme but de résoudre trois problèmes:

1) étudier le générateur de faibles déplacements avec un interféromètre et cela après son installation dans l'appareil c'est-à-dire en liaison solide avec la tige. Autrement dit nous nous sommes efforcés de déterminer si le générateur peut servir pour donner à la tige des déplacements d'une valeur déterminée avec une précision de 1%.

2) examiner s'il existe des différences dans les déplacements des bouts fixé et libre de la tige lors de la transmission du déplacement obtenu depuis le générateur c'est-à-dire si la tige se comporte comme un corps absolument rigide.

3) déterminer si la sensibilité calculée d'après la formule (1) correspond à la sensibilité déterminée d'après les déplacements du bout libre de la tige et aux déplacements correspondants enregistrés photooptiquement par le transformateur à bille.

Pour que les conditions d'étalonnage correspondent aux conditions de fonctionnement des enregistrements de marées il faut résoudre les deux derniers problèmes simultanément. A la suite de l'étalonnage, cette condition permet d'évaluer expérimentalement l'influence totale des forces de retour des suspensions, des forces de frottement dans l'équipement à torsion sur la transmission des déplacements depuis la tige fixée au bout libre et également d'étudier l'influence du régime du déplacement gradué pour la découverte de la possibilité de glissement de la bille.

Avant son installation dans l'appareil le générateur d'étalonnage a été étudié sur l'interféromètre.

Les déplacements de la plaque supérieure provoqués par les variations de la longueur du noyau en nickel ont été mesurés par l'interféromètre. Les mesures ont été faites avec des courants de force différente garantissant les déplacements par magnétostriction dans les limites de 0,3 à 2,7 micron.

Avec un courant d'une valeur donnée, les déplacements ont été mesurés de telle sorte que dans le contact avec le tube de l'interféromètre soient introduits les points de la plaque supérieure du générateur répartis régulièrement en circonférence sur un diamètre de 60 mm et avec un centre correspondant au centre de la plaque. Nous avons essayé de voir par ces mesures si la plaque supérieure du générateur se déplace parallèlement à elle même avec un champ magnétique constant. Nous noterons que par l'intermédiaire des plaques supérieure et inférieure le générateur est attaché solidement à la tige à l'aide de boulons.

Les recherches faites ont montré qu'avec la même tension du champ magnétique, l'élément de magnétostriction donne un raccourcissement hétérogène en provoquant le déplacement de la plaque du générateur qui lui est reliée sous un certain angle par rapport à son axe (fig.1).

Les déplacements sont obtenus avec un courant de 150 Ma. Les mesures ont été faites en 20 points de la plaque supérieure du générateur. D'après ces données on a tracé les lignes d'égal déplacement tous les 0,5 micron. Pour le courant donné le non-parallélisme du déplacement est égal à 0,45 micron.

Le phénomène de déplacement non-parallèle de la plaque supérieure du générateur a été observé avec tous les courants dans lesquels on a étudié les déplacements du générateur d'étalonnage. Nous donnons sur les figures 2 et 3 les différences des déplacements mesurés par l'interféromètre aux points 11 et 18, 13 et 20 de la plaque du générateur avec des courants de force différente et différents bobinages de la bobine du générateur.

Les graphiques montrent que ce générateur de petits déplacements ne peut être utilisé en tant qu'équipement donnant à la tige des déplacements d'une valeur connue à l'avance.

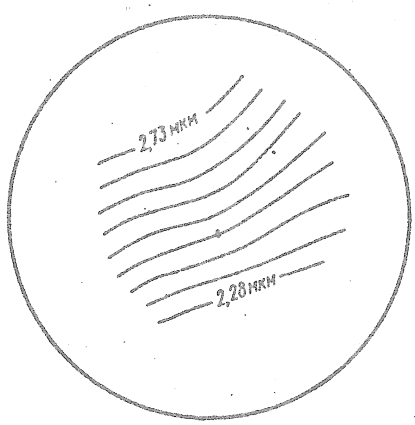

Fig. 1 Lignes d'égal déplacement construites d'après les mesures interférométriques des déplacements de la plaque supérieure du générateur gradué en 20 points.

Pour étalonner l'extensomètre il faut avoir des mesures interférométriques directes des déplacements de la tige donnés par le générateur dans la position de fonctionnement c'est-à-dire en liaison solide avec la tige. C'est pourquoi lors de l'étalonnage ce générateur est utilisé uniquement pour la création de petits déplacements de la tige.

La méthode d'étalonnage est donnée sur la figure 4. Les déplacements de la tige provoqués par le générateur ont été mesurés par l'interféromètre aussi bien pour le bout fixe que pour le bout libre (aux points A, B et C) . On a enregistré ainsi sur le papier photographique le mouvement du trait lumineux réfléte depuis le miroir attaché sur la bille. Les points A et B se trouvent à la distance de 1,3 m respectivement du générateur d'étalonnage et du bout libre de la tige.

L'éloignement du point A au générateur est provoqué par le fait que près du générateur, comme l'ont montré les mesures préliminaires, des déformations de la tige provoqués par le non-parallélisme des déplacements de la plaque du générateur sont possibles.

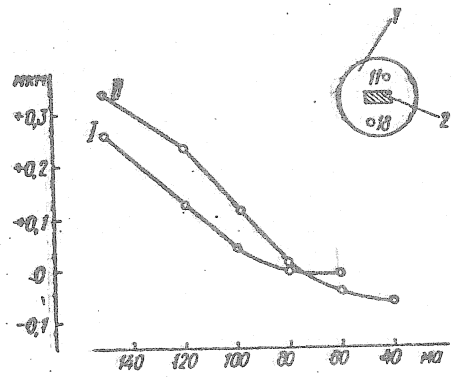

Fig.2 Graphiques des différences des déplacements de la plaque supérieure du générateur gradué construits d'après les mesures interférométriques des déplacements aux points 11 et 18. 1-schéma de disposition des points 11 et 18 sur la plaque supérieure du générateur; 2- noyau en nickel, I et II sont les graphiques des différences des déplacements lors de l'utilisation d'enroulements de la bobine du générateur ayant une résistance respectivement de 120 et 159 ohms.

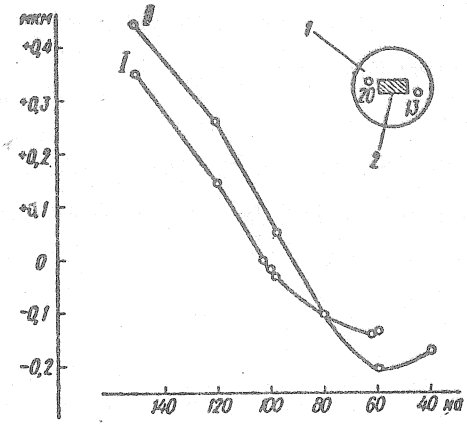

Fig.3 Graphiques des différences des déplacements de la plaque supérieure du générateur gradué construits d'après les mesures interférométriques des déplacements aux points 20 et 13.
Notations conventionnelles, voir fig.2

Lors de l'étalonnage on a utilisé des billes d'un diamètre de 480 et 956 microns étudiées préalablement pour la régularité de leur forme géométrique. Le polissage des détails de l'équipement de torsion a été fait avec des pâtes de diamant qui garantissent la propreté des surfaces de l'ordre de classe 12, 13.

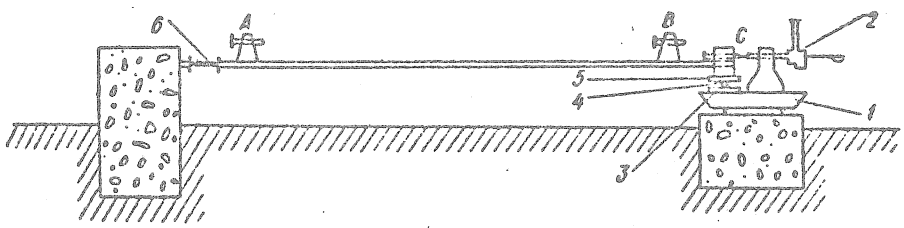

Fig. 4 Schéma d'étalonnage de l'extensomètre 1, - bâti de l'interféromètre NK , 2 - tube de mesure de l'interféromètre, 3 - table sur laquelle la bille roule, 4 - bille, 5 - touche transmettant le mouvement de la tige à la bille, 6 - générateur d'étalonnage, A, B et C. - points où ont été mesurés les déplacements de la tige par l'interféromètre.

Les mesures interférométriques des déplacements et l'enregistrement photographique du mouvement du trait lumineux ont été faits pour deux régimes d'impulsion dans la bobine du générateur.

1. - Le temps d'accroissement de l'impulsion de zéro au maximum déterminé LC par les paramètres de la bobine est de 0,024 ± 0,002 sec.

2. - Lors du branchement avec décharge linéaire du condensateur, le temps de montée du courant dans la bobine provoqué par les paramètres RC de la chaîne est d'environ 1,7 ± 0,1 sec. Ce régime d'arrivée de l'impulsion est appelé "retard de l'impulsion".

Les mesures interférométriques des déplacements de la tige et l'enregistrement des rotations correspondantes de la bille ont été faites pour deux chargements de l'extrémité libre avec poids de 400 et 800 g.

Dans le travail on a utilisé l'interféromètre Yverskii avec une valeur de division voisine de 0,05 micron. L'échelle de l'interféromètre a été calibrée d'après la longueur d'onde uniquement après installation du tube dans la position de travail et contrôlée dans le processus des mesures. Les vis placées sur les supports servant pour les mesures interférométriques (A, B et C) sont pourvues de ressorts qui enlèvent le looft.

Le déplacement de la tige a été mesuré par l'interféromètre et a été enregistré par l'équipement à bille lors des nombreuses injections de courant de même force dans la bobine du générateur (30 à 40 déplacements). Ce procédé permet de diminuer l'influence des erreurs accidentelles des mesures et également des erreurs provoquées par l'influence des microhétérogénéités de surface de roulement du transformateur à cause du mouvement du point nul provoqué par la présence de l'observateur prés de la tige. En outre, dans le processus de l'étalonnage, la bille et la table sur laquelle elle roule se sont déplacées périodiquement ce qui a également contribué à l'élimination des erreurs semi-systématiques provoquées par les microhétérogénéités et l'irrégularité de la forme géométrique des surfaces en contact.

A la suite de l'application de cette méthode les erreurs quadratiques moyennes des déplacements mesurés par l'interféromètre sont en moyenne de 0,002 micron et des déplacements du trait lumineux de 0,03 mm.

La force du courant admise à travers la bobine du générateur calibré a été régularisée par le magasin de résistances HCP-63 (classe de précision 0,05) et a été mesuré par l'appareil M-1107 (classe de précision 0,2).

Les étalonnages ont été faits sur l'extensomètre de Poltava dans le domaine des déplacements 0,35 à 2,04 micron. La valeur de la limite inférieure des mesures est déterminée par la présence de bruit industriel. Pour obtenir des résultats sûrs, les mesures ont évidemment été faites le soir et la nuit. A Inkerman, les conditions étaient favorables à l'exécution des expériences.

Ici les mesures sont faites dans le domaine de 0,23 à 0,74 micron.

Table 1

Courant d'étalonnage, ma	Déplacements de la tige, mesurés par l'interféromètre, MKM.						
	Bout fixé		Bout libre				
	Point A	Point A avec retard d'impùlsion	Bille de diamètre 956 micron			Bille de diamètre 480 micron	
			Point C	Point C avec retard d'impulsion	Point B	Point C	Point C (charge 400g)
49,9	0,356	0,312	0,356	0,318	0,364	0,358	0,355
60,2	0,537	0,503	0,543	0,515	0,545	0,543	0,536
70,2	0,744	0,718	0,748	0,712	0,758	0,747	0,748
80,I	0,97I	0,950	0,978	0,954	0,980	0,98I	0,972
90,0	I,206	I,I90	I,206	I,I84	I,2I3	I,2I6	I,207
I00,0	I,439	–	I,435	–	I,446	I,438	I,444
II0,0	I,656	I,637	I,654	I,637	I,668	I,660	I,652
I20,0	I,862	–	I,854	–	I,869	I,863	I,859
I30,0	2,039	2,032	2,045	2,019	2,056	–	–

Table 2

Courant d'étalonnage, ma	Déplacements du bout libre de la tige enregistrée photo-optiquement par l'équipement à torsion, mm.					
	Bille de diamètre 956 micron		Bille d'un diamètre de 480 micron			
	sans retard d'impulsion	Avec retard d'impulsion	Sans retard d'impulsion	Avec retard d'impulsion	Avec une charge de 400g	Avec une charge de 800g
49,9	4,66	4,09	9,17	–	9,17	9,23
60,2	7,02	6,56	13,99	13,53	14,01	13,99
70,2	9,75	9,26	19,09	18,87	19,06	19,10
80,1	12,65	12,23	25,37	24,53	24,82	24,90
90,0	15,48	15,38	30,88	–	30,59	30,56
100,0	18,70	18,28	36,88	36,56	36,74	36,77
110,0	21,39	21,22	42,44	–	42,30	42,10
120,0	24,04	23,74	47,38	47,65	42,32	47,15
130,0	26,36	26,09	–	–	–	–

Résultats de l'étalonnage, estimation des erreurs instrumentales et de la sensibilité.

On a composé d'après les données de la table 1 les différences des déplacements mesurés pour les bouts fixe et libre de la tige (table 3). On constate que la valeur moyenne de la différence est de 0,4 $\pm$ 0,1%.

Ainsi, l'étalon de quartz de l'extensomètre en position de travail transmet le déplacement sans perturbations. Autrement dit, lors de la transmission des déplacements d'étalonnage, la tige se comporte comme un corps absolument rigide.

En outre, on peut conclure d'après les données de la table 3 que les valeurs des différences mentionnées ne dépendent pas du régime de l'impulsion et également de la variation la plus probable de la charge sur le bout libre de la tige.

Les mesures interférométriques des déplacements du bout de la tige sont faites avec une variation de charge sur la bille de 200g correspondant au cas de rupture d'une suspension ce qui dans la pratique de l'exploitation de l'extensomètre n'a pas été observé. On a fait un enregistrement photo-optique du déplacement du bout libre de la tige avec une charge de 800g sur la bille. Cependant des variations du déplacement (dans les limites de 0,1%) n'ont pas été décelées (voir table 2). Lors de l'augmentation de la pression sur la bille on augmente la force de frottement, ce qui doit provoquer une augmentation de la déformation de la tige et par conséquent une diminution du déplacement d'étalonnage. Dans les limites les plus probables de la variation de la pression, cette dépendance n'existe pas. Les expériences faites confirment la conclusion tirée par Latinina (2).

L'utilisation de fil de tungstène à titre de suspension diminue le danger de variation de la pression sur la bille dans le processus des observations provenant de la distension des suspensions.

Table 3

Courant d'étalonnage, ma	Différences des déplacements d'après les bouts fixe et libre de la tige, microns.									
	Diamètre de la bille 956 microns						Diamètre de la bille 480 microns			
	Sans retard d'impulsion		Avec retard d'impulsion				Sans retard d'impulsion			
	C-A		B-A		C-A		C-A		C-A avec charge 400g	
	MKM	%	MKM	%	MKM	%	MKM	%	MKM	%
49,9	0,000	0,0	+0,008	+2,2	+0,006	+1,9	+0,002	+0,6	-0,001	-0,3
60,2	+0,006	+1,1	+0,008	+1,5	+0,012	+2,4	+0,006	+1,1	-0,001	-0,2
70,2	+0,004	+0,5	+0,014	+1,9	-0,006	-0,8	+0,006	+0,4	-0,004	+0,5
80,1	+0,007	+0,7	+0,009	+0,9	+0,004	+0,4	+0,010	+1,0	+0,001	+0,1
90,0	0,000	0,0	+0,007	+0,6	-0,006	-0,5	+0,010	+0,3	+0,001	+0,1
100,0	-0,004	-0,3	+0,007	+0,5	–	–	-0,001	-0,1	+0,005	+0,3
110,0	-0,002	-0,1	+0,007	+0,4	0,000	0,0	+0,004	+0,2	-0,004	-0,2
120,0	-0,008	-0,4	+0,007	+0,4	–	–	+0,001	+0,1	-0,003	-0,2
130,0	+0,006	+0,3	+0,017	+0,8	-0,013	-0,6	–	–	–	–
Moyenne	+0,001	+0,2	+0,009	+1,0	0,000	+0,4	+0,004	+0,5	0,000	0,0

La valeur moyenne de la différence entre les déplacements des bouts fixe et libre de la tige est de 0,4 ± 0%. Il convient de tenir compte que l'erreur de détermination de la sensibilité de l'interféromètre provoquée par la valeur imprécise de la longueur d'onde est de ± 0,4%. Des erreurs provoquées par les variations d'effort de la tige de mesure du tube de l'interféromètre sont possibles. Par conséquent, l'erreur de la sensibilité de l'extensomètre se détermine par la précision des mesures des déplacements calibrés et par les erreurs d'enregistrement de ces déplacements par le transformateur à bille.

L'un des avantages de ce transformateur est la possibilité de calculer la valeur "théorique" de la sensibilité avec une précision de 0,1 à 0,2% déterminée par les erreurs du diamètre de la bille et de la longueur du levier optique.

Les diamètres des billes sont mesurés interférométriquement par la comparaison avec les mesures finales de seconde classe. Les erreurs des diamètres provoquées par l'irrégularité de la forme géométrique et par les erreurs de mesures sont 2 microns. La précision des mesures du levier optique est de 3 mm.

Nous donnons dans les tables 4 et 5 les valeurs de la sensibilité calculées d'après les données des tables 1 et 2. L'enregistrement photo-optique ayant été fait dans un local avec une humidité relative de l'ordre de 98% on a introduit une correction de déformation du papier (1,2%) dans les valeurs des déplacements mesurées

Table 4

Courant d'étalonnage, ma	Sensibilité en déplacements, microns					
	Diamètre de la bille 956 microns			Diamètre de la bille 480 microns		
	Sans retard de l'impulsion	Avec retard de l'impulsion	Valeur théorique de la sensibilité	Sans retard de l'impulsion	Avec charge 400g	Valeur théorique de la sensibilité
49,9	0,0764	0,0778		0,0390	0,0387	
60,2	0,0774	0,0785		0,0388	0,0383	
70,2	0,0757	0,0769		0,0391	0,0392	
80,1	0,0773	0,0780	0,07900 ± 13 (0,2%), λ=6050 mm	0,0387	0,0392	0,03960 ± 10 (0,2%), λ=6060 mm
90,0	0,0779	0,0770		0,0394	0,0395	
100,0	0,0767	–		0,0390	0,0393	
110,0	0,0773	0,0771		0,0391	0,0391	
120,0	0,0771	–		0,0393	0,0393	
130,0	0,0776	0,0774				
Moyenne	0,07716	0,07753		0,03905	0,03908	
Erreur quadr. moyenne	± 18 (0,2%)	± 24 (0,3%)		± 9 (0,2%)	± 16 (0,4%)	

Table 5

Différences des observations et de la sensibilité théorique.

Caractéristique MKM/mm.	Diamètre de la bille 956 microns		Diamètre de la bille 480 microns	
	sans retard	avec retard	sans retard	avec retard
	-0,00184 ± 22	-0,00147 ± 27	-0,00055 ± 13	-0,00052 ± 19
%	-2,4 ±3	-1,9 ±3	-1,4 ±3	-1,3 ±5
Poids, g	1,28	0,87	0,92	0,43
Poids moyen %	-1,9%±0,2			

La valeur moyenne pondérée de la différence entre la sensibilité observée et théorique est de 1,9 ± 0,2 %. Par conséquent, la précision de la détermination de la sensibilité de l'extensomètre est dans les limites de 2%.

Table 6

Courant d'étalonnage, ma	Déplacement du trait lumineux mm.	Valeur théorique de la sensibilité	Bout de la tige libre		
			Déplacement mesures interfér. microns	Sensibilité microns /mm.	Différence des sensibilités observée et théorique
I00,7	8,39	0,08646 ± I8 diamètre de la bille 956 microns L = 5440 mm	0,738	0,0880	+I,7
62,0	3,02		0,267	0,0884	+2,2
58,0	2,67		0,234	0,0876	+I,3
				Moyenne	±I,7

Les résultats de l'étalonnage de l'extensomètre d'Inkerman se trouvent dans la table 6: la différence des sensibilités observée et théorique est de ± 1,7%.

En comparant ce résultat avec le résultat correspondant obtenu par l'étalonnage de l'extensomètre de Poltava on peut tirer la conclusion que la précision de la détermination de la sensibilité des extensomètres à tige en quartz avec transformateur de type à torsion est de 2%. Les sources principales d'erreurs sont:

1. Les micro-hétérogénéités des surfaces en contact. La présence de ces hétérogénéités peut provoquer le glissement de la bille et un changement du rayon effectif de la courbure de la bille particulièrement lors des déplacements proches en valeur des dimensions des hétérogénéités des surfaces d'oscillation.

2. Les forces agissant sur la bille du côté des miroirs fixés sur elle. Les forces dépendant du moment d'inertie des miroirs par rapport à l'axe de la bille et des accélérations dans son mouvement surgissent au moment de branchement et de débranchement du courant. Elles peuvent être également la cause du glissement de la bille. L'augmentation de la vitesse d'accroissement de l'impulsion dans la bobine de presque deux ordres n'a pas changé la valeur de la différence entre la sensibilité observée et la sensibilité théorique (table 3). Cependant la diminution de cette différence lors de l'utilisation de la bille de diamètre 480 microns (table 4) s'explique par la diminution du moment d'inertie du système de retour et par l'augmentation de la force de friction en comparaison avec les valeurs analogues pour la bille de diamètre de 950 microns.

En effet, sur la bille de 480 microns est fixé un miroir et sur la bille de 956 microns, deux miroirs -

Lors des observations des déformations linéaires de marées à Inkerman il y a eu deux types d'enregistrements depuis un équipement à torsion photoélectrique et optique.

La sensibilité de l'extensomètre à enregistrement photoélectrique se trouvait d'après les écarts d'étalonnage de l'enregistrement photographique et les déplacements correspondants de la tige. L'alimentation du générateur d'étalonnage se faisait depuis une batterie d'éléments PU-85 d'une puissance d'environ 0,4 volt. Cela a garantit la constance de l'impulsion d'étalonnage sur de longs intervalles de temps.

Lors des observations à Inkerman on a utilisé des billes de différent diamètre et on a fait également le remplacement des autres détails du transformateur à bille.

Conclusions.

1. Les recherches d'un générateur par magnétostriction ont montré qu'il ne peut être utilisé pour donner à la tige de l'extensomètre des déplacements d'une valeur déterminée à l'avance.

2. Il faut faire un étalonnage immédiat interférométrique de l'extensomètre d'après les déplacements du bout libre de la tige en utilisant le générateur comme équipement pour créer de faibles déplacements de la tige.

3. L'étalon en quartz transmet les déplacements sans perturbations. La différence des déplacements ($0,4 \pm 0,1$ %) découverte dans le processus de l'étalonnage se trouve dans les limites des erreurs de mesures.

4. La sensibilité de l'extensomètre en quartz à tige avec transformateur du type à torsion déterminée est obtenue avec une précision allant jusqu'à 2%.

BIBLIOGRAPHIE

1. LATININA L.A., et autres
Izv. Ac. des Sc. URSS. Physique de la terre, 1968, 3.

2. LATININA L.A.
Analyse du fonctionnement du déformographe à tige N. 4218 -72 M., 1972

3. BALAVADZE B.K., KASTVELICHVILI K.Z.
Observations des marées terrestres à Tbilissi. Edit. "Metsniercba" Tbilissi, 1972.

4. BOULATSEN V.G., OVTCHINNIKOVA V.A.
Rotation et déformations de marées de la Terre. Publ. 1 "Naoukova Doumka" K, 1970

5. BOULATSEN V.G.
Dans le livre: Rotation et déformations de la Terre. Publ. 4 "Naoukova Doumka" K, 1972.

Moyens d'accélération et de l'accroissement de la précision des calculs dans les méthodes des analyses des observations des marées.

Janusz Orzechowski

Institut de Géophysique de l'Académie Polonaise des Sciences.

Les études récentes portant sur le phénomène des marées terrestres exigent - entre autres - l'élaboration de séries d'observations de plus en plus longues et l'emploi de nouvelles méthodes d'analyses d'une haute précision théorique.

L'élaboration d'une expérience sur ordinateur exige un laps de temps plus grand ce qui entraine des difficultés techniques dans son exécution.

Le temps consacré à l'élaboration des longues séries d'observations de marée, peut être représenté (à 10% près) par la formule:

$$T = N * C * I * DP + K \qquad /1/$$

où:

T - temps approximatif d'exécution

N - nombre d'observations de marée,

C - nombre d'ondes du développement du potentiel, considérées dans le calcul,

K - composanté constante, englobant le temps de la translation du programme, le temps d'action des périphériques d'entrée et de sortie /K $\cong$ 5 $\div$ 10% T/,

I - nombre d'itérations du cycle des calculs,

DP - coefficient de précision des calculs:

1 - simple précision

5$\div$10 - double précision

On peut réduire le temps nécessaire à l'élaboration des calculs sur ordinateur:

1 - en échangant le modèle d'ordinateur pour un modèle plus grand,
2 - en réduisant le nombre d'ondes /C/ du développement du potentiel, considérées dans les calculs,
3 - en éliminant certains cycles /I/ de calculs /omission du calcul de la valeur des corrections pour l'observation /Venedikov/, en éliminant la compensation préliminaire /5//,
4 - en choisissant un type d'ordinateur où les nombres réels de précision simple seraient d'une précision supérieure à 10^{-10} /DP=1/,
5 - en employant des méthodes numériques qui tiendraient compte des propriétés spécifiques de la méthode d'analyse élaborée ainsi que celles de l'ordinateur.

Ne seront point traitées ici les méthodes d'accélération des calculs considérées aux points 2 et 3 qui mènent d'habitude aux simplifications au cours de l'élaboration des observations des marées, ou qui nous privent d'informations essentielles.

1. Calcul des équations d'observation et des valeurs de la marée théorique.

Au cours des 80% du temps de travail de l'ordinateur les programmes élaborant les ensembles d'observations des marées, appliquent la formule du calcul de l'équation des corrections:

$$v_t = \sum_{j=1}^{C} A_j * R_j * \cos(\phi_{oj} + K_j * t) - \sum_{\Delta=1}^{C} B_j * R_j * \sin(\phi_{oj} + K_j * t) - P_t - D_t + CK \qquad /2/$$

ou la formule du calcul des observations théoriques:

$$P_{te} = \sum_{j=1}^{C} R_j * \cos(\phi_{oj} + K_j * t) \qquad /3/$$

où:

$A_j = \gamma_j * \cos\Delta\phi_j$; $B_j = \gamma_j * \sin\Delta\phi_j$,

R_j - amplitude de l'onde de marée,

K_j - vitesse angulaire de l'onde de marée,

ϕ_{oj} - la phase initiale à l'époque t_o,

t - le temps compté à partir de l'époque t_o,

P_t - valeur de la marée observée à l'époque t,

D_t - valeur de la dérive à l'époque t,

P_{te} - valeur de la marée théorique à l'époque t,

A_j, B_j, CK - inconnues déterminées.

On remarque que le temps est calculé au moyen de la formule

$t=t_o+(n-1)*dt$ où:

n - numéro d'ordre de l'observation comptant à partir de la première observation de la série,

dt - intervalle de temps entre des observations voisines.

Les formules (2) ou (3) peuvent être calculées de deux manières:

1. Après avoir calculé l'époque t pour chaque observation de la série nous procédons au calcul de:

$$\phi_j=\phi_{oj}+K_j*t$$

et

$$R_j \sin\phi_j,\ R_j \cos\phi_j$$

2. Avant de calculer la première observation de la série, nous procédons au calcul des valeurs pour toutes les ondes C:

$$Q1=R_j*\sin(\phi_{oj}+K_j*(t_o-dt)) \ ; \ P1=\sin(K_j*dt)$$

$$Q2=R_j*\cos(\phi_{oj}+K_j*(t_o-dt)) \ ; \ P2=\cos(K_j*dt)$$

Par la suite nous calculons pour chaque observation:

$$Q = R_j * \sin\phi_j = Q1 * P2 + Q2 * P1$$

$$P = R_j * \cos\phi_j = Q2 * P2 - Q1 * P1$$

$$Q1 = Q$$

$$Q2 = P$$

Du point de vue précision les deux manières d'effectuer les calculs des termes des formules (2) (3) sont équivalentes.

En analysant les temps théoriques des opérations arithmétiques par l'ordinateur [3] on a calculé que le second système de calcul est quatre fois plus rapide que le premier.

Ceci résulte surtout du fait que le temps nécessaire à calculer les valeurs de la fonction sin ou cos est vingt fois plus long que le temps nécessaire à réaliser la multiplication.

On s'est servi du programme modifié pour effectuer une compensation de contrôle de 10 976 observations de marée, en employant 511 ondes en développement du potentiel et on a déterminé des paramètres de marée pour 15 groupes d'ondes ainsi que leurs erreurs moyennes.

On a constaté que le temps de calcul a été réduit de trois fois (3.26) tandis que les paramètres ne subissaient aucun changement essentiel. (voir Tableau 1).

Tableau 1

Onde	δ	$\delta_N - \delta_A$	m_δ	$\Delta\phi$	$\Delta\phi_N - \Delta\phi_A$	$m_{\Delta\phi}$
Q1	1.159	-.000007	.004	-2.09	-.0001	.18
O1	1.200	-.000001	.001	-1.78	0	.03
M1	1.363	+.000001	.008	2.30	-.0002	.33
P1	1.171	0	.002	-0.39	0	.07
S1	3.663	-.000178	.093	110.64	-.0093	1.45
K1	1.198	+.000001	.001	-.93	0	.02
J1	1.316	+.000026	.009	-1.19	-.0002	.38
001	1.299	-.000017	.016	-2.13	-.0002	.72
2N2	1.269	+.000006	.019	6.11	-.0022	.86

N2	1.273	+.000006	.004	1.27	-.0005	.16
M2	1.250	0	.001	-.42	0	.03
L2	1.233	-.000003	.035	-5.76	+.0020	1.62
S2	1.201	+.000006	.002	-.40	-.0002	.08
K2	1.254	+.000017	.006	-5.07	+.0010	.29
M3	1.117	-.000195	.057	2.50	+.0012	2.91

Afin que les erreurs de calcul ne s'accumulent pas en même temps que ne s'accroit le temps t, on réitérait toutes les 1000 observations le calcul des coefficients Q1 et Q2 selon la première méthode.

Quoique ce système de calcul n'a pas nettement amélioré la précision des calculs, il est à recommander lors de l'élaboration de très longues séries d'observations.

2. Calcul des éléments astronomiques.

L'analyse des observations des marées terrestres exigent des calculs dont la précision s'élève à 9-10 chiffres significatifs.

Il est donc possible d'employer la simple précision pour élaborer des analyses des observations des marées sur les ordinateurs tels que CDC, ICL, UNIVAC.

Toutefois aux points névralgiques du programme, cette opération exige l'emploi de méthodes numériques spéciales.

En calculant les formules:

$$s = 277.02236215 + 481267.883141636*T - .0011333333*T^2$$
$$h = 280.18950145 + 36000.768925008*T + .0003025 *T^2$$
$$p = 334.38525760 + 4069.03403305 *T - .0103250005*T^2 \qquad /4/$$
$$N' = 100.84320196 + 1934.142008276*T - .0020777779*T^2$$
$$P_1 = 281.22085687 + 1.719175012*T + .0004527779*T^2$$

il faut réaliser la multiplication par parties et on obtiendra:

```
I100 = 100*T
T100 = T*100. - I100
```

ainsi que:

```
LK = 277+I100* 4812+4812*T100

S=(.022362152293+T*(67.883141636+T*(-1133.33326E-6+1.88889E-6*T))
*  +AMOD(4812.*T100,1.))+MOD(LK,360)
S=AMOD(S,360.)
LK=280+360*T100
H=(.18950144547+T*(.76892500828+3.025E-4*T)+AMOD(360.*T100,1.))
*+MOD(LK,360)
H=AMOD(H,360.)
LK=334+41*I100+41*T100
P=(.38525759571-T*(30.965966949+T*(103.25E-4+12.5E-6*T))
*+AMOD(41.*T100,1.))+MOD(LK,360)
P=AMOD(P,360.)
LK=100+I100*19+19*T100

N=(.8432019611+T*(34.142008276-T*(20.77777869E-4+2.22222E-6*T))
*+AMOD(19.*T100,1.))+MOD(LK,360)
N=AMOD(N,360.)
P1=(.22085686756+T*(1.7191750124+T*(4.52777915E-4+3.33333E-6*T)))+281.
```

Grâce à cette méthode du calcul des formules on obtient des résultats, dont la précision est supérieure de 2 à 4 chiffres significatifs.

3. Conclusion.

Les méthodes d'accélération des calculs des observations des marées que nous venons de traiter, élaborées et vérifiées sur les ordinateurs CDC, peuvent être appliquées aux ordinateurs de tous les genres et à toutes les méthodes d'analyse des observations des marées.

Une étude exacte des possibilités techniques de l'ordinateur employé ainsi que des propriétés numériques des méthodes de calcul de l'analyse des observations des marées employée peut fournir une accélération allant jusqu'à 20 fois.

En employant ces méthodes on accélère le travail sans pour cela renoncer à la précision théorique du matériel d'observation spumis à l'analyse.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BANACHIEWICZ, T.,
Rachunek krakowianowy, PWN, Warszawa, 1959

[2] T. CHOJNICKI
Détermination des paramètres de marée par la compensation des observations au moyen de la méthode de moindres carrés
Materialy i Prace Instytutu Geofizyki PAN, vol 55, 1972

[3] P. NAUR,
A manual of Gier Algol 4,
Regnecentralen, Copenhagen 1967

[4] ORZECHOWSKI J.,
Ensemble des méthodes de transformation des données de marée fondées sur le principe de moindres carrés,
Materialy i Prace Instytutu Geofizyki PAN, vol. 55 1972

[5] T. CHOJNICKI
Remarques concernant l'article de K. Schüller "Ein Vorschlag zur Beschlennigung des Analysenverfahrens Chojnicki",
B.I.M. n° présent, 1975

[6] D.E. CARTWRIGHT, A.C. EDDEN
Corrected Tables of Tidal Harmonics.
The Geophysical Journal, vol.33, N°3, 1973

Remarques concernant l'article de K. Schüller: "Ein Vorschlag zur Beschleunigung des Analysenverfahrens Chojnicki" [4]

T. Chojnicki

La méthode permettant d'effectuer les analyses d'observations des marées terrestres que j'ai présenté, [1,2] comporte deux problèmes fondamentaux:

1. La détermination des coefficients d'amplitude et des déphasages des ondes de marée du matériel d'observation dont on a éliminé la dérive. On effectue cette détermination en compensant les observations par la méthode des moindres carrés et les équations d'observations s'écrivent alors:

$$v_t = \sum_{j=1}^{p} A_j \sum_{i=1}^{n_j} R_i \cos\phi_{it} - \sum_{j=1}^{p} B_j \sum_{i=1}^{n_j} R_i \sin\phi_{it} - P_t - D_t + C$$

où: $A_j = \gamma_j \cos\Delta\phi_j$, $B_j = \gamma_j \sin\Delta\phi_j$ et C - sont les inconnues déterminées au cours de la compensation, p - le nombre de groupes d'ondes de mêmes inconnues, n_j - le nombre d'ondes dans un groupe j.

v_t, P_t, D_t - représentent successivement: la correction, l'observation et la dérive à l'instant t, R_i et ϕ_i - l'amplitude et la phase de l' "i"-nième onde.

2. La détermination de la dérive qui rendra possible la résolution du problème 1. En commentant ce problème j'ai souvent attiré l'attention sur le fait que quelques soient les méthodes employées, leurs défauts éventuels peuvent influencer les résultats définitifs de l'étape suivante des calculs, c.à.d. la résolution du problème 1.

Pour ma part j'ai présenté deux manières menant à la détermination de la dérive et notamment la méthode des points neutres /3/ ainsi qu'une compensation préliminaire des observations brutes à condition que $\Sigma(v + D)^2$ = minimum.

En tenant compte de ce qui vient d'être dit, la proposition de Schüller /4/ consistant à compenser les observations selon ma méthode après en avoir éliminé la dérive à l'aide des filtres de Pertsev ne peut être considérée comme "la méthode accélérée de Chojnicki" car, comme je l'ai rappelé au point 2 - j'ai indiqué à maintes reprises la possibilité d'un tel emploi de cette méthode.

Par contre, on pourrait considérer la proposition de Schüller comme une conviction de l'inutilité de la détermination de la dérive par une compensation préliminaire (double).

La différence entre les observations "pures" après que la dérive a été éliminée par le filtre de Pertsev et les observations "pures" après élimination de la dérive par la méthode de compensation préliminaire est selon Schüller:

$$\underline{\Delta y} = \underline{PM} \cong \underline{0}$$

La grandeur $\underline{PM}$, qui représente l'effet de l'application du filtre de Pertsev à la "dérive brute" aurait été égale à zéro pour le filtre idéal dont les coefficients d'amplification des ondes de marée auraient été égaux à zéro. Les coefficients pour le filtre de Pertsev ainsi que les valeurs des éléments du vecteur $\underline{\Delta y}$ sont présentés au tableau 1.

Comme on vient de le voir, on ne peut absolument pas considérer les éléments $\underline{\Delta y}$ comme neutres, vu la précision avec laquelle on détermine actuellement les amplitudes des ondes de marée.

Les tableaux 2a et 2b comprennent deux listings de résultats obtenus d'une double compensation ainsi que d'une compensation unitaire d'observation et d'où la dérive a été éliminée au moyen du filtre de Pertsev. On remarque que plus les observations sont précises, plus les différences entre les résultats atteignent et dépassent leurs erreurs moyennes.

En résumant, on peut dire que la proposition de Schüller porte atteinte à la qualité fondamentale de la méthode de double compensation, qui est de limiter considérablement les erreurs de filtrage.

Il existe un autre moyen par lequel on pourrait accélérer cette méthode sans risquer de détruire ses qualités. Il est clair que la compensation préliminaire ne sert qu'à obtenir un modèle approximatif d'observation dont on aura besoin pour les observations suivantes,et dans le but d'obtenir la dérive en limitant d'une façon effective les erreurs de filtration. Un tel modèle approximatif peut être obtenu d'une manière beaucoup plus simple, sans recourir à la compensation préliminaire, en le déduisant par exemple du modèle théorique, en partant du principe que les coefficients d'amplitudes de toutes les ondes sont égaux à 1,17 pour la composante verticale ou 0.72 pour les composantes horizontales et que les déphasages sont nuls. Dans ce cas, les résidus de marée pour lesquels on a employé un filtre, s'élèvent seulement à 10 ou 15% de la marée globale tandis qu'en employant la compensation préliminaire, ils s'élèveraient à 6 ou 10%.

Les tableaux 2a et 2b contiennent aussi les résultats obtenus à l'aide de la méthode simplifiée. On remarque qu'ils sont très rapprochés des résultats obtenus à partir de la compensation double et supérieurs aux résultats obtenus en employant le filtre de Pertsev par rapport aux observations brutes.

La simplification présentée ici, permet de raccourcir les calculs de 33%.

Un autre moyen menant à la réduction du temps de calcul en réalisant la méthode numérique est d'utiliser certaines transformations algorithmiques plus avantageuses lors des calculs sur ordinateurs.

Mr. Orzechowski a obtenu une triple réduction du temps des calculs en appliquant cette méthode aux longues séries d'observations.

On a élaboré actuellement à Varsovie une version plus récente du programme de la méthode /15 E/ dont le temps du calcul, par rapport à l'ancienne méthode a été raccourci quatre fois et dans laquelle le volume de mémoire requis est indépendant du nombre d'observations et qui met en profit le développement du potentiel selon Cartwright-Tayler-Edden /6/.

Pour terminer, je voudrais remarquer que certaines tendances que l'on observe actuellement consistant en une approche "économique" des méthodes de recherche dans le domaine des marées - sont nuisibles. Si le domaine des recherches sur les marées doit fournir une réponse au sujet de la structure interne de la Terre en se basant sur des observations vérifiant des modèles théoriques, il faudrait - en perfectionnant les méthodes d'observation et de calcul, tendre à arriver au moins à la quatrième décimale après la virgule dans les valeurs du coefficient d'amplitude, sans tenir compte des frais.

Dans le cas contraire le sens des recherches de marée devient problématique, et toute réussite "économique" au détriment de la précision devient inutile.

BIBLIOGRAPHIE

[1] T. CHOJNICKI
Détermination des paramètres de marée par la compensation des observations au moyen de la méthode des moindres carrés.
Publ. of the Inst. of Geophysics Polish
Ac. of Sci., vol.55, 1972

[2] T. CHOJNICKI
Ein Verfahren zur Erdgezeitenanalyse in Anlehnung an das Prinzip der kleinsten Quadrate.
Mitteil. aus dem Inst. für Theoret. Geodäsie der Univ. Bonn, nr 15,1973

[3] T. CHOJNICKI
Détermination de la dérive dans les mesures des marées au moyen de la méthode des points neutres.
Publ. of the Inst. of Geophysics Polish Ac. of Sci., vol.71, 1973

[4] SCHULLER K.
Ein Vorschlag zur Beschleunigung des Analysenverfahrens Chojnicki.
Bull. d'inform. marées terr. n°70, 1975

[5] J. ORZECHOWSKI
Moyens d'accélération et de l'accroissement de la précision des calculs dans les méthodes des analyses des observations des marées.
B.I.M. N° 73

[6] D.E. CARTWRIGHT, A.C. EDDEN
Corrected Tables of Tidal Harmonics
The Geophysical Journal, vol.33, n°3, 1973

Tableau 1

Onde	Coefficient d'accroissement du filtre de Piercev	Δ_y pour $\varphi \cong 50^\circ$	
		composante verticale	composante horizontale
Q1	+ 0.0107	+ 0.0537	+ 0.0122
O1	+ 0.0031	+ 0.0976	+ 0.0158
M1	− 0.0003	− 0.0002	− 0.0001
K1	+ 0.0002	+ 0.0065	+ 0.0019
J1	+ 0.0037	+ 0.0077	+ 0.0015
001	+ 0.0100	+ 0.0190	+ 0.0025
2N2	+ 0.0064	+ 0.0015	+ 0.0035
N2	+ 0.0019	+ 0.0116	+ 0.0045
M2	− 0.0007	− 0.0246	− 0.0070
L2	− 0.0012	− 0.0002	− 0.0005
S2	0	0	0
M3	− 0.0125	− 0.0059	− 0.0015

Tableau 2a Station Książ m_o = 0.67 milisecondes

Onde	m_m	Compensation double	Compensation après emploi du filtre de Piercev	Δ	Compensation avec le modèle approximatif au lieu de la compensation préliminaire	Δ
Q1	+ 0.0320	0.7333	0.7070	+0.0263	0.7283	+0.0050
O1	0.0067	0.7371	0.7294	+0.0077	0.7360	+0.0011
M1	0.1142	1.6844	1.6874	−0.0030	1.6864	−0.0020
K1	0.0051	0.8162	0.8157	+0.0005	0.8160	+0.0002
J1	0.0864	1.1856	1.1790	+0.0066	1.1854	+0.0002
001	0.1361	1.2924	1.2395	+0.0529	1.2646	+0.0278
2N2	0.0708	0.8137	0.7795	+0.0342	0.8007	+0.0130
N2	0.0154	0.8691	0.8619	+0.0072	0.8686	+0.0005
M2	0.0034	0.8616	0.8644	−0.0028	0.8621	−0.0005
L2	0.1910	0.8893	0.8984	−0.0091	0.8952	−0.0059
S2	0.0060	0.8343	0.8341	+0.0002	0.8343	0
M3	0.2673	0.5168	0.5217	−0.0049	0.5091	+0.0077

Tableau 2b Station Tihany m_o = 1.52 microgals

Q1	+ 0.0100	1.2606	1.2137	+0.0469	1.2535	+0.0071
O1	0.0018	1.2020	1.1902	+0.0118	1.2016	+0.0004
M1	0.0676	2.1254	2.1297	−0.0043	2.1257	−0.0003
K1	0.0014	1.1798	1.1792	+0.0006	1.1798	0
J1	0.0250	1.5241	1.5058	+0.0183	1.5202	+0.0039
001	0.0360	0.9008	0.8864	+0.0144	0.9280	+0.0272
2N2	0.0634	1.3546	1.3156	+0.0390	1.3494	+0.0052
N2	0.0088	1.2547	1.2425	+0.0122	1.2537	+0.0010
M2	0.0016	1.2205	1.2244	−0.0039	1.2207	−0.0002
L2	0.1352	0.8515	0.8550	−0.0035	0.8465	+0.0050
S2	0.0032	1.2032	1.2030	+0.0002	1.2032	0
M3	0.1225	1.0701	1.0840	−0.0139	1.0634	+0.0067

The Computation Procedures at the International Center for Earth Tides (I.C.E.T.)

B. DUCARME*

1. Summary

For the reduction of the tidal observations I.C.E.T. has designed a complete computation chain.
From the digitization process to the final determination of the tidal parameters, all the data are handled in the same way therefore the results are thoroughly comparable.
Each step of the reduction procedure corresponds to a computation program.

2. Preparation of the data

Digitization, smoothing and correction of the data. Computation of the calibration factors.

2.1 Digitization of the records (MT11)

The records are digitized using a semi automatic reading table. The digital voltmeter has a precision of 0.025 mm (10.000 digits for a 25 cm chart width). The readings are rounded to the nearest 0.1 mm.
The data are first transferred on magnetic cassettes with a simultaneous listing. They are copied on magnetic tape, processed on the computer and punched in the International Format (annex). Gaps are marked by special interruption cards (9999 in first four columns).

---

*Chargé de Recherches au FNRS, Observatoire Royal de Belgique

2.2 Smoothing and correction of the data (MT31)

An application of the Lecolazet combination error [Lecolazet, 1959] is made on the data,twice every day, with a four hours shift. This filter eliminates the tidal frequencies and the residuals correspond to the non tidal perturbations (bad readings, jumps, anomalous drift).

We know from experience that there is no advantage to try to improve the curve if the residuals are lower than 300 in 0.1 mm units. When one of the daily residuals is higher than 300, the corresponding data are listed and two other filters are applied:

$-Z^5 1/2$ [Lecolazet, 1959]
to check the jumps in the curve.
-DM47 [De Meyer, 1973]
to eliminate all frequencies higher than 0.15 c/h
It allows to correct directly the bad readings.

Figure 1 shows the response of the combinations when applied with an hourly shift. They allow to correct reading errors or jumps as small as 1 mm.

2.3 Determination of sensitivity (MT51)

This program is designed to calculate the calibration factors of pendulums and gravimeters.

For pendulums one can consider period measurements [Verbaandert, Melchior, 1960] as well as automatic calibration using the crapaudine method. [Melchior, 1966].
A sub-routine is provided for the computation of the K factor using the $K=ST^2$ relation [Verbaandert, 1960].
For gravimeters the program can be used for electromagnetic (Askania GS15) or electrostatic (Geodynamics) calibrations.

3. Harmonic Analysis of the records (MT71)

To save computer time ICET only uses the least square analysis with preliminary application of the Venedikov filters [Venedikov, 1966a, 1966b]. For provisional computations a reduced development of the potential is sufficient. The complete tidal potential is needed to obtain accurate results as shown on § 3.8

3.1 Determination of the three components of the tidal forces.

In 1922, Doodson published the coefficients of the terms appearing in the harmonic development of the Tidal Potential.

Recently Cartwright, Tayler and Edden [Cartwright, Tayler, 1971; Cartwright, Edden, 1973] constructed a more accurate harmonic development using the new astronomical and geodetic constants. They compared their results with the development of Doodson, by adopting the same normalisation (geodetic coefficients).

We shall explicitly describe here the theoretical tidal functions used in the new programs of computation that we have written in Fortran at the International Centre of Earth Tides.

3.11 The Tidal Potential.

Let us write the tidal potential as

$$V = \frac{GE\mu\rho^2}{r^3} \left[P_2(z) + \frac{\rho}{r} P_3(z) + \dots \right] \qquad (1)$$

with

$$P_2(z) = \frac{1}{2} (3 \cos^2 z - 1)$$

$$P_3(z) = \frac{1}{2} (5 \cos^3 z - 3 \cos z)$$

z: geocentric zenith distance

$GE = 398603\ km^3\ s^{-2}$, geocentric constant of gravitation

$\mu = \frac{M}{E} = \frac{1}{81.30}$: ratio of the Moon and Earth masses

ρ: geocentric radius.

r: geocentric distance of the Moon.

Following Doodson we put out of brackets the factor

$$D(\rho) = \frac{3}{4} GE\mu \frac{\rho^2}{c^3} = \frac{3}{4} \bar{g} \bar{a}^{-2} \sin^3 \pi \frac{\rho^2}{a^3} \qquad (2)$$

wherein $\frac{a}{c} = \sin \pi = \sin 3422".608 = 3422".451 = 0.016592510$ which is the sine equatorial parallax of the Moon.

$\bar{g} = \frac{GE}{\bar{a}^2}$: mean value of g on the sphere having same mass and volume as the Earth.

Then

$$V = D(\rho) \left(W_2 + \frac{\rho}{a} W_3 \right) \qquad (3)$$

with $W_2 = \frac{2}{3} (3 \cos^2 z - 1) \left(\frac{c}{r}\right)^3$

$$W_3 = \frac{2}{3} (5 \cos^3 z - 3 \cos z) \left(\frac{c}{r}\right)^4 \sin \pi$$

Bartels and Horn [1952] define the Doodson's constant as

$$D = \frac{3}{4} \mu \bar{g} \frac{\bar{a}^{-4}}{a^3} \sin^3 \pi = \frac{3}{4} GE\mu \sin^3 \pi \frac{\bar{a}^{-2}}{a^3} \qquad (4)$$

$$D(\rho) = \left(\frac{\rho^2}{\bar{a}^2} \right) D \qquad (5)$$

Using the new Geodetic Reference System (1967) we get

$\bar{a} = \sqrt[3]{a^2 b} = 6371023.6$ m

$\bar{g} = 982.024$ cm s^{-2}

and

$D = 26277.2377$ $cm^2 s^{-2}$

We have now to transform the expression (3) from the local to the equatorial coordinates system.

According to the Doodson procedure we separate the factors N_{ij}, functions of D and ψ (geocentric latitude), which are called geodetic coefficients, from the factors M_{ij} which are functions of δ, H and $\frac{c}{r}$. This allows to develop the potential in series of purely harmonic functions of the time. These functions are distributed according to the coefficient j of H, into the Laplace families of tides: long period (j=0), diurnal (j=1), semidiurnal (j=2) and terdiurnal (j=3):

$$V = \sum_{i=2}^{3} \sum_{j=0}^{3} W_{ij}, \qquad W_{ij} = M_{ij} N_{ij} \qquad (6)$$

The complete development was given by Doodson , but as we are here concerned with the Geodetic Coefficients we give them explicitly

$$N_{20} = \frac{1}{2} D (1 - 3 \sin^2\psi)$$

$$N_{21} = D \sin 2\psi$$

$$N_{22} = D \cos^2\psi$$

$$N_{30} = 1.11803\ D' \sin\psi (3-5 \sin^2\psi) \qquad (7)$$

$$N_{31} = 0.72618\ D' \cos\psi (1-5 \sin^2\psi)$$

$$N_{32} = 2.59808\ D' \sin\psi \cos^2\psi$$

$$N_{33} = D' \cos^3\psi$$

with

$$D' = D \frac{\rho}{a}$$

In the expressions derived from the chosen third order potential, the numerical coefficients are such that the maximum value of the corresponding geodetic coefficient with respect to ψ is equal to 1.

Hence the coefficients of amplitudes obtained in developping the M_{ij} functions will immediately give the order of magnitude of the harmonic constituents.

3.12. The components of the tidal forces.

The three components of the tidal forces along the radial and the horizontal directions are, in geocentric coordinates,

$$-\frac{\partial V}{\partial \rho} = C_V(\rho)\left(2W_2 + \frac{3\rho}{a}W_3\right)$$

$$-\frac{\partial V}{\rho\,\partial \psi} = C_V(\rho)\frac{\partial}{\partial \psi}\left(W_2 + \frac{\rho}{a}W_3\right) \qquad (8)$$

$$-\frac{\partial V}{\rho\cos\psi\,\partial \lambda} = C_V(\rho)\frac{\partial}{\partial \lambda}\left(\frac{W_2 + \frac{\rho}{a}W_3}{\cos\psi}\right)$$

with

$$C_V = \frac{D_o}{\frac{-2}{a}} = \frac{D(\rho)}{\rho}$$

For the third order potential we also define:

$$C'_V = \frac{\rho}{a}C_V \qquad (9)$$

From the geodetic coefficients (7) we can derive the new geodetic coefficients for the components of the tidal force (Table 1).

However the instruments are physically measuring with respect to the vertical direction given by the plumb line and we may consider that this is a good approximation of the normal to the ellipsoid.

Now we have to rotate the axis in the meridian plane from the system (ρ,ψ) to the geographic coordinates system (n,ϕ).

If we define the components of the force along the three axes as follows:

Z: vertical, pointing down along the normal n to the ellipsoid.

X: horizontal, positive to the south.

Y: horizontal, positive to the west.

The deviations of the vertical $(\xi\eta)$ are positive to the North and positive to the East. Moreover we define the longitudes positive to the East.

$$Z = -\frac{\partial V}{\partial n} = -\left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\cos\varepsilon + \frac{\partial V}{\rho\partial\psi}\sin\varepsilon\right)$$

$$X = -\frac{\partial V}{R_1\partial\phi} = -\left(\frac{\partial V}{\rho\partial\psi}\cos\varepsilon - \frac{\partial V}{\partial\rho}\sin\varepsilon\right) \qquad (10)$$

$$Y = -\frac{\partial V}{\rho\cos\psi\partial\lambda}$$

the angle of rotation ε is the difference between the geographic and geocentric latitudes:

$$\varepsilon = \phi - \psi = \alpha \sin 2\phi \qquad (11)$$

with $\quad tg\psi = (1-\alpha)^2 tg\phi$

and R_1 is the radius of curvature of the meridian

Then

$$\xi = \frac{X}{g}, \qquad \eta = \frac{Y}{g} \qquad (12)$$

Defining the coefficients

$$C_H = \frac{D(\rho)}{\rho\, g}, \qquad C'_H = C_H\frac{\rho}{a} \qquad (13)$$

which appear in the development of the horizontal components, we obtain the new geodetic coefficients

1° In the vertical component

$$Z_{20} = -C_V\left[(1 - 3\sin^2\psi)\cos\varepsilon - \frac{3}{2}\sin^2\psi\sin\varepsilon\right]$$

$$Z_{30} = -3.35409\, C'_V\left[\sin\psi(3-5\sin^2\psi)\cos\varepsilon - \cos\psi(5\sin^2\psi - 1)\sin\varepsilon\right]$$

$$Z_{21} = -2C_V(\sin 2\psi\cos\varepsilon + \cos 2\psi\sin\varepsilon)$$

$$Z_{31} = -0.72618\, C'_V\left[3\cos\psi(1-5\sin^2\psi)\cos\varepsilon - \sin\psi(15\cos^2\psi - 4)\sin\varepsilon\right] \qquad (14)$$

$$Z_{22} = -C_V(2\cos^2\psi\cos\varepsilon - \sin 2\psi\sin\varepsilon)$$

$$Z_{32} = -2.59808\, C'_V\left[3\sin\psi\cos^2\psi\cos\varepsilon + (1-3\sin^2\psi)\cos\psi\sin\varepsilon\right]$$

$$Z_{33} = -3C'_V(\cos^3\psi\cos\varepsilon - \cos^2\psi\sin\psi\sin\varepsilon)$$

2° In the North-South component

$$
\begin{aligned}
\xi_{20} &= C_H \left[\frac{3}{2} \sin 2\psi \cos\varepsilon + (1-3\sin^2\psi)\sin\varepsilon\right] \\
\xi_{30} &= 3.35409\ C'_H \left[\cos\psi(5\sin^2\psi - 1)\cos\varepsilon + \sin\psi(3-5\sin^2\psi)\sin\varepsilon\right] \\
\xi_{21} &= -2C_H (\cos 2\psi \cos\varepsilon - \sin 2\psi \sin\varepsilon) \\
\xi_{31} &= 0.72618\ C'_H \left[\sin\psi(15\cos^2\psi - 4)\cos\varepsilon + 3\cos\psi(1-5\sin^2\psi)\sin\varepsilon\right] \\
\xi_{22} &= C_H (\sin 2\psi \cos\varepsilon + 2\cos^2\psi \sin\varepsilon) \\
\xi_{32} &= 2.59808\ C'_H \left[\cos\psi(2-3\cos^2\psi)\cos\varepsilon + 3\sin\psi\cos^2\psi\sin\varepsilon\right] \\
\xi_{33} &= 3C'_H (\sin\psi\cos^2\psi\cos\varepsilon + \cos^3\psi\sin\varepsilon)
\end{aligned}
\qquad (15)
$$

3° In the East-West component

$$
\begin{aligned}
\eta_{20} &= 0 \\
\eta_{21} &= -2C_H \sin\psi \\
\eta_{31} &= -0.72618\ C'_H (1 - 5\sin^2\psi) \\
\eta_{22} &= -2C_H \cos\psi \\
\eta_{30} &= 0 \\
\eta_{32} &= -2.59808\ C'_H \sin 2\psi \\
\eta_{33} &= -3C'_H \cos^2\psi
\end{aligned}
\qquad (16)
$$

These formulas were given by H.G. Wenzel [1974] and for the North-South and the East-West components do not differ from Lecolazet's calculation, which is limited to the first approximation by putting

$$
\begin{aligned}
\cos\varepsilon &= 1 \\
\sin\varepsilon &= \alpha\sin 2\psi
\end{aligned}
\qquad (17)
$$

and neglects the corrections of ellipticity on the terms coming from the third order potential.

Lecolazet's constant F is our constant C_H where ρ is developped as:

$$\rho = 1 - \alpha \sin^2\phi + \frac{h}{a} \qquad (18)$$

h being the height above the ellipsoid.

From the definition of the Doodson's constant we derive the numerical expressions of C_V and C_H:

$$C_V = \frac{D(\Psi)}{\rho} = \frac{D}{a^2}\rho = \frac{3}{4}\frac{GE\mu \sin^3\pi}{a^3}\rho = 41.291125\ (1 - \alpha\sin^2\phi + \frac{h}{a})\ \mu\text{gals} \qquad (19)$$

$$C_H = \frac{D}{ga^2}\rho = \frac{3}{4}\frac{GE\mu\sin^3\pi}{ga^3}\rho \cdot 206265'' = 8.516906 \times \frac{10^3}{g}(1 - \alpha\sin^2\phi + \frac{h}{a})\ \text{mseca}$$

$$C'_V = C_V\ (1 - \alpha\sin^2\phi + \frac{h}{a})$$

$$C'_H = C_H\ (1 - \alpha\sin^2\phi + \frac{h}{a})$$

3.13 The trigonometric functions of the arguments.

In Doodson's original paper the arguments of the tidal constituents are associated with cosine or sine functions.

A simple rule let know if we have to introduce a sine or cosine of the argument: if the sum of the numbers i (order of the potential) and j (defining the family of the tide) is an even number one has to use a cosine function.

Thus we have

for long period terms: { M20 cosine
M30 sine

for diurnal terms: { M21 sine
M31 cosine

for semidiurnal terms: { M22 cosine
M32 sine

for terdiurnal terms: { M33 cosine

In our program we adopt as a rule to express a sine function of ARG as cos (ARG - π/2) = cos ARG* which is valid for Vertical and North-South components. For the East-West component, as we have a derivation with respect to the longitude (included in τ), we get

$$\left.\begin{aligned} d \cos ARG &= -\sin ARG = \cos (ARG + \pi/2) \\ d \sin ARG &= \cos ARG = \cos (ARG^{*} + \pi/2) \end{aligned}\right\} \qquad (20)$$

The addition of π/2 to all arguments gives the correct trigonometric function for the East-West component. One should remember that Lecolazet [1958, 1959b] added π to the arguments in Vertical and East-West component instead of changing the sign of the geodetic coefficient. To avoid the introduction of negative amplitudes he also added π to some arguments.

3.2 The principles of the least square analysis.

We have seen that the tidal phenomena have an accurate mathematical representation in terms of the development of the potential.
Thus we can write the equations of observation corresponding to each reading ℓ_i under the form

$$\ell_i + v_i = f(x, y \ldots) \qquad (21)$$

where x, y ... are the unknown tidal parameters (e. g. amplitude and phases of the waves) and the v_i are the observation errors.

The solution is obtained from the normal equations giving the most probable values of the unknowns and the corresponding errors.

As a matter of fact the tidal records are disturbed by a non stationary noise function g(u, v ...) which is related to instrumental drift, meteorological effects etc ... The equations of observations become

$$\ell_i + v_i = f(x, y \ldots) + g\,(u, v \ldots) \qquad (22)$$

However we can reduce the solution of system (22) to the solution of system (21) using a filtering process. If we apply an analogical or numerical filter F to the records in such a way that all frequencies external to the tidal spectrum are removed we can write

$$\ell'_i + v'_i = F(\ell_i) = f'\,(x, y \ldots) \qquad (23)$$

and then use the classical least squares solution.

The validity of such a method using a reduced mathematical representation of the phenomena depends upon two assumptions.

1- The filtering (e.g. the Venedikov filters) really eliminate the noise external to the tidal spectrum.

In our computation scheme the smoothing (MT31) has already removed the noise of frequency higher than the ter diurnal band (TD).

The Venedikov filters must mainly eliminate the noise with a frequency lower than the diurnals, conventionally called drift. Under normal conditions, that is with good instruments, the efficiency of these filters is quite satisfactory. However eventual anomalous parts of the records should be removed.

2- There is no noise in the tidal frequencies. This is the reason why all the tidal instruments must be carefully protected against meteorological effects which have frequencies in the diurnal (D) and semidiurnal (SD) bands.

There are no physical or mathematical means to separate that noise from the tidal signal before proceeding to the harmonic analysis. Nevertheless we can easily detect the anomalies due to external perturbations by checking the relationships between the amplitude ratios and relative phases of the different waves.

3.3 The application of the Venedikov filters (MT61)

This program applies the even and odd Venedikov filters for D, SD and TD waves on each set of 48 hours of continuous registration.

The six resulting quantities are punched on one card as well as the epoch and the calibration factor used. An option allows to read and write on magnetic tapes.

3.4 Constitution of the equations of observations.

The Venedikov filtering process intends to separate the D, SD and TD signals and to get three independant sets of equations of observations.

For each tidal frequency band one gets even M_i and odd N_i orthogonal components. For every central epoch t_i of the 48 hours record we can write

$$\left.\begin{aligned} M_i &= \sum_{t=-23.5}^{+23.5} \ell_{ti+t} \times C_t \\ N_i &= \sum_{t=-23.5}^{+23.5} \ell_{ti+t} \times S_t \end{aligned}\right\} \qquad (24)$$

C_t and S_t being the coefficients of the filters.
The tidal harmonic model gives a relation

$$\ell_i = \Sigma_j A_j \cos\alpha_{ij} \tag{25}$$

Using the astronomical constants we can evaluate at any time t_i the theoretical value of the amplitude A_j^T and of the arguments α_{ij}^T.
Taking as unknowns the amplitude ratios d_j and phase differences ϕ_j defined as

$$d_j = \frac{A_j}{A_j^T} \tag{26}$$

$$\phi_j = \alpha_{ij} - \alpha_{ij}^T \tag{27}$$

the hourly readings will be expressed by

$$\ell_i = \Sigma_j d_j A_j^T \cos(\alpha_{ij}^T + \phi_i) \tag{28}$$

Developping equation (28) and taking as auxiliary unknowns the even and odd components of the waves

$$\left.\begin{aligned} \xi_j &= d_j \cos\phi_j \\ \eta_j &= -\, d_j \sin\phi_j \end{aligned}\right\} \tag{29}$$

we get

$$\ell_i = \Sigma_j a_{ij} \xi_j + b_{ij} \eta_j \tag{30}$$

where

$$\left.\begin{aligned} a_{ij} &= A_j^T \cos\alpha_{ij}^T \\ b_{ij} &= A_j^T \sin\alpha_{ij}^T \end{aligned}\right\} \tag{31}$$

When applying the even and odd Venedikov filters on the data we get for each species of tides (D, SD, TD) two sets of observation equations

$$\left.\begin{aligned} M_i &= \Sigma_j \xi_j c_j a_{ij} + \Sigma_j \eta_j c_j b_{ij} \\ N_i &= \Sigma_j \xi_j s_j a_{ij} + \Sigma_j \eta_j s_j b_{ij} \end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

where c_j and s_j are the amplification factors of the corresponding even and odd filters.

Such a formulation is valid only on the condition that we can separate all the tidal constituents of the data set. This can only be done for those waves having periods commensurable within the available time interval and this is why we have to define groups of waves.

Inside each such group we assume that the amplitude factors and the phase differences are equal for all constituents.

The classical separation of the groups is given in table 3. A more detailed separation is proposed in table 4. The auxiliary unknowns ξ and η allow the determination of the amplitude factor d and the phase difference ϕ for each group.

$$d = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \qquad (33)$$

$$\phi = - \operatorname{arctg} \left(\frac{\eta}{\xi}\right) \qquad (34)$$

The associated errors can be calculated from the unit weight error s_o given by the least squares method and the elements of the weight matrix Q:

$$s_d = s_o \sqrt{(\xi^2 \; Q_{\xi\xi} + 2\xi\eta \; Q_{\xi\eta} + \eta^2 \; Q_{\eta\eta}) / (\xi^2 + \eta^2)} \qquad (35)$$

$$s_\phi = \frac{s_o}{\xi^2 + \eta^2} \sqrt{\eta^2 \; Q_{\xi\xi} + 2\xi_\eta \; Q_{\xi\eta} + \xi^2 \; Q_{\eta\eta}} \qquad (36)$$

3.5 Principal Options.

3.51 A first master card

ensures the high versatility of this program.

Option 1 - reduced (52 D, 31 SD, 16 TD) or complete tidal development (197 D, 150 SD, 16 TD)

Option 2 - the results are either listed or punched (for the constitution of the library).

Option 3 - global analysis or sequential monthly analysis of the data to check the stability of the results with time.
A special subroutine is used to plot the amplitude factors of the main tidal constituents (O_1, K_1, M_2)

3.52 A second master card

is used for the separation of the groups. The classical repartition follows Venedikov original paper (table 3).
The maximum possible separation is given in table 4.
The main constituent of the first group (117.655 - elliptical wave of the variational wave of O_1) had no name in the Darwin classification.
As Q_1 is the elliptical wave of O_1 and σ_1 its variational one, we call this new group σQ_1. The last group of the semidiurnals also had no name in the classification. As the wave 295.555 is a declinational wave of K_2, itself declinational wave of M_2, we call it a $2K_2$.

3.6 Specific Options.

Specific options are provided for the different components (vertical or horizontal).

3.61 Instrumental phase lag of the gravimeters.

The instrumental phase lags $\phi(O_1)$ and $\phi(M_2)$ and their ratio f define two models for the correction of the results of the analysis. (Ducarme, 1975)
Model 1 - Galvanometers or electronic filters are widely used with static gravimeters. These are short period instruments, very sensitive to microseismic and industrial noise and generally require a strong filtering.
A simple Kelvin body with an associated retardation time θ gives a good representation of such a filtering effect.
The associated phase lag ϕ and attenuation factor R for a wave of period T are given by

$$\phi = - \text{arc tg} \frac{2\pi\theta}{T} = - \text{arc tg}\alpha \qquad (37)$$

$$R = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2}} \qquad (38)$$

In this case f = 0.48 and θ is deduced from the given value of $\phi(M_2)$ by formula (37). The phase lag of the waves is directly proportional to their angular speed.

Model 2 - For astatised gravimeters, it has been shown (Steinmetz 1960, Ducarme 1975) that the simplest model fitting the rheological properties of the instruments is a two parameters one, equivalent to the association of a Kelvin body with an Hooke body.
The response of such a system to the step input function is

$$x(t) - x(o) = A(1 + \varepsilon (1-e^{-t/\theta}))$$

The model is thus completely determined when we know the value of ε which gives the contribution of the Kelvin body to the total displacement and the value of the parameter $\tau = 2\pi\theta$ associated with that Kelvin body.
Then the phase lag and attenuation factor of a wave of period T are given by

$$\phi = - \text{arc tg} \frac{\alpha}{1 + \frac{1+\alpha^2}{\varepsilon}} \qquad (39)$$

$$R^2 = \frac{1 + \alpha^2/(1+\varepsilon)}{1+\alpha^2}$$

where $\alpha = \frac{\tau}{T}$

The parameters ε and α can easily be determined from the given values of $\phi(M_2)$ and $\phi(O_1)$ which in this case are no more proportional to the angular speed of the waves.

3.62 Inertial Correction.

Pariiskii (1961) has shown that an inertial correction proportional to the square of the angular speed is to be introduced for the gravimeters. The δ factor of a wave of angular speed ω is reduced by the quantity

$$q = 0.0041 \frac{\omega 2}{\omega^2(S2)} \qquad (40)$$

where $\omega(S2)$ is the angular speed of the tidal wave S_2.

3.63 Azimut of Pendulums.

The theoretical clinometric tide in an azimut α taken from North to East can be written as

$$Mth = A_{NS} \cos \omega t \cos\alpha - A_{EW} \sin\omega t \sin\alpha \qquad (41)$$

$$A_\alpha = \sqrt{A_{NS}^2 \cos^2\alpha + A_{EW}^2 \sin^2\alpha} \qquad (42)$$

$$\operatorname{tg} p = \frac{A_{EW} \sin\alpha}{A_{NS} \cos\alpha} \qquad (43)$$

we get

$$Mth = A_\alpha \cos(\omega t + p) \qquad (44)$$

The corresponding observed clinometric tide is

$$M\,obs = \gamma A_\alpha \cos(\omega t + p + \phi) \qquad (45)$$

$$= \xi A_\alpha \cos(\omega t + p) + \eta A_\alpha \sin(\omega t + p) \qquad (46)$$

where ξ and η are the usual auxiliary unknowns.
The analysis of tidal clinometric records in azimut α is thus reduced to the general procedure.

3.64 Parallax and timing errors.

With photographic recorders, a timing error can be introduced by a possible parallax of the light flashes providing the time marks. This is easily corrected by adding that timing error to the given time of the observations. The data have always to be given in Universal Time (U.T.) but, when necessary, a constant correction can be applied to the time assigned to the readings.

3.7 Observed Amplitudes.

Following a resolution of the 7th International Symposium on Earth Tides held in Sopron (September 1973) we give, for each group, the observed amplitudes and instantaneous phases at the mean epoch of the analysis (tables 5 and 6).

These instantaneous amplitudes and phases are not absolutely representative as they continuously vary according to the vectorial composition of the individual tidal constituents inside each group.
This was pointed out by Varga (1973) who concluded that it was not possible to obtain the correct tidal amplitude of any group.

Nevertheless the knowledge of the amplitude of the tidal groups is needed for the indirect effects corrections. This is why we calculate on the span of the really analysed data a mean theoretical amplitude, which is a mean of the amplitudes calculated on each set of 48 hours during the constitution of the equations of observations. The mean observed

amplitude is obtained by multiplying the theoretieal amplitude by the amplitude factor of the group.

3.8 Comparison of complete and reduced tidal development.

Many authors agree (Z. Simon, 1974) that a reduced development do not give precise results even for the main constituents.

The results of the analysis with complete and reduced potential for two theoretical tidal series directly computed from the positions of the moon and the sun are presented in Tables 5 and 6.

The computed m.s.e. are strongly reduced when using the complete development. Moreover a big phase lag appears on M_2 in the 32 days analysis with the reduced potential. It is a reason why the ICET always uses the complete development for its final computations.

ANNEX

International Format

col 1	component - 0 gravimeter 1 NS pendulum 2 EW pendulum 3 dilatometers or wells 4 horizontal extensometers 5 vertical extensometer
col 2-4	instrument number
col 5-8	station number
col 9-13	integer part of the reduced julian date for 72/01/01: 41317 (00h) 41318 (12h)
col 14-15	year
col 16-17	month
col 18-19	day
col 20	0 card beginning with a 0 hour reading 1 card beginning with a 6 hour reading 2 card beginning with a 12 hour reading 3 card beginning with a 18 hour reading
col 21-25	first reading in tenth of millimeter
col 26-30	second reading
col 75-80	twelfth reading

Every interruption in the recordings must be pointed out by a card with INDI=9999, in columns 1-4.

Table 1.

Components of the Tidal Forces

	Long Period	Diurnal	Semidiurnal	Terdiurnal 3,3
$\partial V/\partial \rho$	(2,0) $C_V(1-3\sin^2\psi)$ (3,0) $3C'_V(1.11803\sin\psi(3-5\sin^2\psi))$	(2,1) $2C_V\sin 2\psi$ (3,1) $3C'_V(0.72618\cos\psi(1-5\sin^2\psi))$	(2,2) $2C_V\cos^2\psi$ (3,2) $3C'_V\,3.59808\sin\psi\cos^2\psi$	$3C'_V\cos^3\psi$
$\frac{\partial V}{\rho\partial\psi}$	(2,0) $-\frac{3}{2}C_V\sin 2\psi$ (3,0) $-3C'_V(1.11803\cos\psi(5\sin^2\psi-1))$	(2,1) $2C_V\cos 2\psi$ (3,1) $-C'_V(0.72618\sin\psi(15\cos^2\psi-4))$	(2,2) $-2C_V\sin 2\psi$ (3,2) $C'_V\,2.59808\cos\psi(1-3\sin^2\psi)$	$-3C'_V\sin\psi\cos$
$\frac{\partial V^*}{\rho\cos\psi\,\partial\lambda}$	(2,0) 0 (3,0) 0	(2,1) $2C_V\sin\psi$ (3,1) $C'_V(0.72618(1-5\sin^2\psi))$	(2,2) $2C_V\cos\psi$ (3,2) $C'_V\,2.59808\sin 2\psi$	$3C'_V\cos^2\psi$

* The harmonic components depend on λ through the local mean lunar time τ

If we take the convention of the geodetists: positive to the East, we get $\frac{\partial\tau}{\partial\lambda} = +1$

Table 2.

Corrections to Arguments

	Long Period		Diurnal		Semidiurnal		Terdiurnal
	2,0	3,0	2,1	3,1	2,2	3,2	3,3
Vertical	0	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	0
North-South	0	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	0
East-West	-	-	0	$\pi/2$	$\pi/2$	0	$\pi/2$

TABLE 3

CLASSICAL SEPARATION OF THE GROUPS FOLLOWING VENEDIKOV

ONE MONTH SEPARATION

DIURNAL WAVES		SEMI-DIURNAL WAVES	
1- 62	Q1	198-236	2N2
63- 88	O1	237-260	N2
89-110	M1	261-286	M2
111-143	P1S1K1	287-300	L2
144-165	J1	301-347	S2K2
166-197	OO1	-	

SIX MONTHS SEPARATION

DIURNAL WAVES		SEMI-DIURNAL WAVES	
1- 62	Q1	198-236	2N2
63- 88	O1	237-260	N2
89-110	M1	261-286	M2
111-120	P1	287-300	L2
121-143	S1K1	301-309	S2
144-165	J1	310-347	K2
166-197	OO1	TER-DIURNAL WAVES	
		348-363	M3

ONE YEAR SEPARATION

DIURNAL WAVES		SEMI-DIURNAL WAVES	
1- 62	Q1	198-236	2N2
63- 88	O1	237-260	N2
89-110	M1	261-286	M2
111-120	P1	287-300	L2
121-123	S1	301-309	S2
124-143	K1	310-347	K2
144-165	J1	TER-DIURNAL WAVES	
166-197	OO1	348-363	M3

FINE STRUCTURE

DIURNAL WAVES		SEMI-DIURNAL WAVES	
1- 62	Q1	198-236	2N2
63- 88	O1	237-260	N2
89-110	M1	261-286	M2
111-113	PI1	287-300	L?
114-120	P1	301-309	S2
121-123	S1	310-347	K2
124-134	K1	TER-DIURNAL WAVES	
135-136	PSI1	348-363	M3
137-143	PHI1	-	
144-165	J1	-	
166-197	OO1	-	

TABLE 4

MAXIMUM SEPARATION FOR THE GROUPS

ONE MONTH SEPARATION

DIURNAL WAVES		SEMI DIURNAL WAVES	
1- 11	SIGMAQ1	198-236	2N2
12- 32	SIGMA1	237-260	N2
33- 62	Q1	261-286	M2
63- 88	O1	287-300	L2
89-110	M1	301-321	S2K2
111-143	PISIK1	322-347	2K2
144-165	J1		
166-183	OO1		
184-197	NU1		

SIX MONTHS SEPARATION

DIURNAL WAVES		SEMI DIURNAL WAVES	
1- 11	SIGMAQ1	198-216	EPS2
12- 21	2Q1	217-236	2N2
22- 32	SIGMA1	237-260	N2
33- 52	Q1	261-286	M 2
53- 62	RO1	287-300	L2
63- 78	O1	301-309	S2
79- 88	TAU1	310-321	K2
89-103	NO1	322-336	ETA2
104-110	K11	337-347	2K2
111-120	P1	TER DIURNAL WAVES	
121-143	SIK1	348-363	M3
144-151	TETA1		
152-166	J1		
166-172	SO1		
173-183	OO1		
184-197	NU1		

ONE YEAR SEPARATION

DIURNAL WAVES		SEMI DIURNAL WAVES	
1- 11	SIGMAQ1		
12- 21	2Q1	198-216	EPS2
22- 32	SIGMA1	217-226	2N2
33- 52	Q1	227-236	MU2
53- 62	RO1	237-249	N2
63- 79	O1	250-260	NU2
79- 88	TAU1	261-286	M2
89-103	NO1	287-291	LAMB2
104-110	K11	292-300	L2
111-120	P1	301-305	T2
121-123	S1	306-309	S2
124-144	K1	310-321	K2
144-151	TETA1	322-336	ETA2
152-165	J1	337-347	2K2
166-172	SO1	TER DIURNAL WAVES	
173-183	OO1	348-363	M3
184-197	NU1		

FINE STRUCTURE

DIURNAL WAVES		SEMI DIURNAL WAVES	
1- 11	SIGMAQ1	198-216	EPS2
12- 21	2Q1	217-226	2N2
22- 32	SIGMA1	227-236	MU2
33- 52	Q1	237-249	N2
53- 62	RO1	250-260	NU2
63- 78	O1	261-286	M2
79- 88	TAU1	287-291	LAMB2
89-103	NO1	292-300	L2
104-110	K11	301-305	T2
111-113	P11	306-309	S2
114-120	P1	310-321	K2
121-123	S1	322-336	ETA2
124-134	K1	337-347	2K2
135-136	PSI1	TER-DIURNAL WAVES	
137-143	PHI1	348-363	M3
144-151	TETA1	-	
152-165	J1	-	
166-172	SO1	-	
173-183	OO1	-	
184-197	NU1	-	
		-	

TABLE 5

THEORETICAL TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY /KRAMER/

32 DAYS

GROUP	A. REDUCED TIDAL DEVELOPMENT CONSTITUENTS			AMPLITUDE µGALS	B. COMPLETE TIDAL DEVELOPMENT CONSTITUENTS			AMPLITUDE µGALS
Q1	1-11	1.0080	0.06	5.2270	1- 62	1.0057	-0.15	5.2173
		0.0078	0.44			0.0019	0.11	
O1	12-21	1.0036	-0.01	26.8095	63- 88	0.9992	-0.04	26.7994
		0.0015	0.09			0.0004	0.02	
M1	22-99	1.0434	-4.53	2.8088	89-110	0.9978	-0.15	2.8193
		0.0146	0.80			0.0033	0.19	
P1 S1 K1	30-40	1.0007	-0.14	51.0347	111-143	0.9999	-0.00	51.0396
		0.0008	0.04			0.0002	0.01	
J1	41-45	1.0045	1.37	2.0523	144-165	1.0014	0.06	2.0642
		0.0196	1.12			0.0047	0.27	
OO1	46-52	1.0957	-6.58	0.6867	166-197	1.0003	0.15	0.6983
		0.0638	3.34			0.0139	0.80	
MSE DIURNALS 0.6788 µGAL					MSE DIURNALS 0.1630 µGAL			
2N2	53-58	1.0181	-2.75	1.2102	198-236	1.0133	-0.54	1.2085
		0.0141	0.80			0.0026	0.15	
N2	59-64	0.9818	-1.53	5.9796	237-260	1.0081	-0.27	5.9841
		0.0027	0.16			0.0005	0.03	
M2	65-69	1.0013	-0.28	31.9572	261-286	1.0030	-0.01	31.9607
		0.0005	0.03			0.0001	0.01	
L2	70-74	1.0476	-6.68	1.3998	287-300	1.0027	-0.51	1.3497
		0.0118	0.64			0.0022	0.13	
S2 K2	75-83	0.9969	-0.12	13.0104	301-347	1.0043	0.07	13.0098
		0.0012	0.07			0.0002	0.01	
MSE SEMI DIURNALS 0.2732 µGAL					MSE SEMI DIURNALS 0.05132 µGAL			

TABLE 6

THEORETICAL VARIATION OF GRAVITY /H.G.WENZEL/

740 DAYS

GROUP	A. REDUCED TIDAL DEVELOPMENT CONSTITUENTS			AMPLITUDE µGALS	B. COMPLETE TIDAL DEVELOPMENT CONSTITUENTS			AMPLITUDE µGALS
Q1	1-11	1.0124	-0.43	6.5148	1- 62	0.9994	-0.00	6.5134
		0.0017	0.09			0.0005	0.01	
O1	12-21	1.0002	-0.02	32.2597	63- 88	0.9997	-0.02	32.2581
		0.0003	0.02			0.0001	0.01	
M1	22-29	1.0058	2.78	1.6600	89-110	0.9997	-0.02	1.6692
		0.0058	0.33			0.0016	0.09	
PI1	30-30	1.0012	0.51	0.8209	111-113	0.9983	0.02	0.8175
		0.0128	0.73			0.0035	0.20	
P1	31-32	0.9999	-0.03	13.9449	114-120	0.9996	0.00	13.9420
		0.0008	0.04			0.0002	0.01	
S1	33-34	1.0036	-0.61	0.2317	121-123	0.9926	0.17	0.2251
		0.0450	2.60			0.0126	0.73	
K1	35-38	0.9991	-0.01	44.1639	124-134	0.9997	0.00	44.1643
		0.0002	0.01			0.0001	0.00	
PSI1	39-39	0.9781	0.31	0.3292	135-136	0.9948	-0.14	0.3367
		0.0311	1.82			0.0085	0.49	
PHI1	40-40	0.9833	-3.86	0.5921	137-143	0.9973	0.05	0.5913
		0.0174	1.01			0.0048	0.28	
J1	41-45	1.0333	2.57	2.8582	144-165	0.9991	0.04	2.8614
		0.0038	0.21			0.0010	0.06	
OO1	46-52	0.9756	-0.89	1.5337	166-197	0.9985	-0.03	1.5236
		0.0066	0.39			0.0018	0.11	
MSE DIURNALS 0.8914 µGAL					MSE DIURNALS 0.2443 µGAL			
2N2	53-58	1.0190	1.67	1.0986	198-236	1.0006	0.01	1.0890
		0.0061	0.34			0.0013	0.07	
N2	59-64	1.0091	0.68	5.8431	237-260	1.0005	-0.01	5.8468
		0.0012	0.07			0.0003	0.01	
M2	65-69	1.0010	-0.07	27.7381	261-286	1.0000	-0.01	27.7394
		0.0002	0.01			0.0001	0.00	
L2	70-74	0.8824	-3.14	0.4796	287-300	0.9971	-0.01	0.4773
		0.0121	0.79			0.0029	0.17	
S2	75-76	1.0007	-0.14	13.0538	301-309	1.0001	-0.00	13.0578
		0.0005	0.10			0.0001	0.01	
K2	77-83	0.9942	0.53	3.8873	310-347	0.9993	-0.01	3.8852
		0.0017	0.10			0.0004	0.02	
MSE SEMIDIURNALS 0.5783 µGAL					MSE SEMIDIURNALS 0.1222 GAL			
M3					348-363	0.9972	0.06	0.3420
						0.0019	0.11	
					MSE TER DIURNALS 0.0516 µGAL			

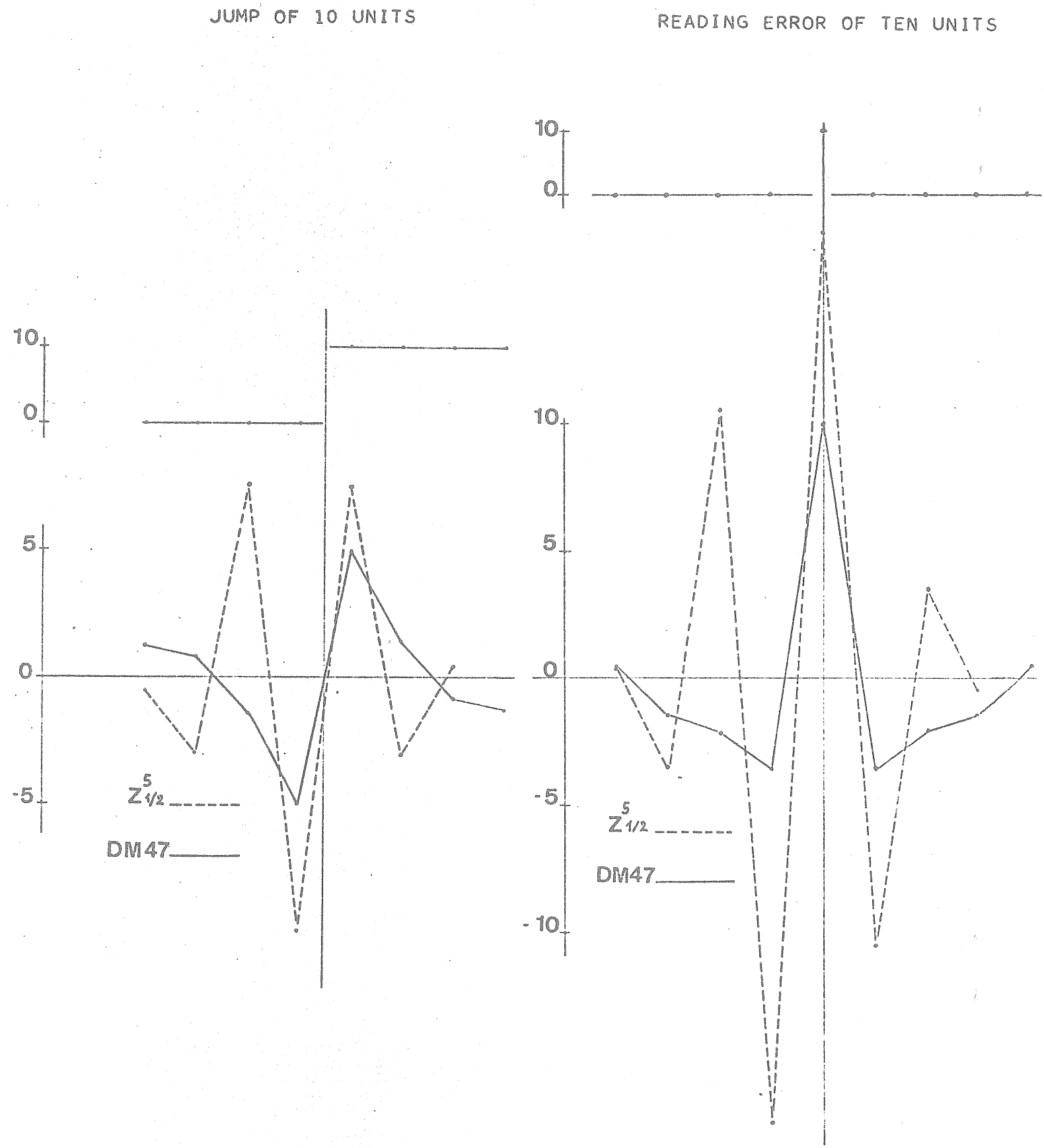

FIGURE 1 RESPONSE OF THE FILTERS

BIBLIOGRAPHIE

[1] BARTELS, HORN
Astronomie und Geophysik
Landolt-Boernstein - Springer Verlag,pp. 271, 1952

[2] CARTWRIGHT D.E., TAYLER R.J.
New computations of the tide-generating potential
Geoph. J.R. Astr. Soc. 23 pp. 45-74, 1971

[3] CARTWRIGHT D.E., EDDEN A.C.
Corrected tables of tidal harmonics
Geoph. J.R. Astr. Soc. 33, pp. 253-264, 1973

[4] DE MEYER F.
Estimation and automatic correction of the individual error
B.I.M. n°65 pp. 3526-3550, 1973

[5] DOODSON A.T.
The harmonic development of the tide generating potential
Proc. Roy. Soc. London, A.100, pp. 305-329, 1922

[6] DUCARME B.
A fundamental station for trans world gravity profiles
to be published, 1975

[7] LECOLAZET R.
La méthode utilisée à Strasbourg pour l'analyse harmonique de la marée gravimétrique
B.I.M. n°10, pp. 153-178, 1958

[8] LECOLAZET R.
Sur l'estimation des erreurs internes affectant les résultats d'une analyse harmonique mensuelle
B.I.M. n°17 pp. 269-278, 1959a

[9] LECOLAZET R.
Le développement harmonique des déviations périodiques théoriques de la verticale
B.I.M. n°14, pp. 211-221, 1959b

[10] MELCHIOR P.J.
Un système d'étalonnage automatique programmé pour les stations clinométriques souterraines
B.I.M. n°44 pp. 1707-1709, 1966

[11] MELCHIOR P.
Harmonic analysis of Earth Tides
Methods in computational physics vol. 13 pp. 271-343 Academic Press, 1973

[12] PARIISKII N.N.
Correction des accélérations verticales lors des observations des variations de marée de la force pesanteur
Gravimetrical Res. 1 Publ. Acad. Sc. USSR, pp. 39-40
B.I.M. n°69 pp. 3878-3880, 1961

[13] SIMON Z.
On some properties of Venedikov method of tidal analysis
Studia Geoph. et Geod. 18 pp. 381-385, 1974

[14] STEINMETZ L.
Etalonnage des enregistrements et étude expérimentale du trainage d'un gravimètre North American par l'emploi d'un dispositif à attraction électrostatique
B.I.M. n°21 pp. 396-408, 1960

[15] VARGA P.
Theoretical limitations of the harmonic analysis of earth tides
Magyar Geof. Intezet Geofizikai Kozlemenyek 22 pp.51-57, 1973

[16] VENEDIKOV A.P.
Une méthode pour l'analyse des marées terrestres à partir d'enregistrements de longueur arbitraire.
O.R.B. Comm. n°250 S. Geoph. n°71 pp437-459, 1966A

[17] VENEDIKOV A.P.
Sur la constitution de filtres numériques pour le traitement des enregistrements de marée terrestre
Acad. Roy. Belg. Bull. Cl. Sc. 5 LII, 6 pp. 827-845, 1966B

[18] VERBAANDERT J.
Etalonnage des pendules horizontaux par crapaudine dilatable étudiée interférométriquement.
3e Symp. Marées Terrestres Trieste
Boll. Geofis. Teor. E Appl. Vol. 2 n°5, pp. 81-90 1960

[19] VERBAANDERT J., MELCHIOR P.J.
Les stations géophysiques souterraines et les pendules horizontaux de l'Observatoire Royal de Belgique
O.R.B. Mon. 7 pp. 1-146, 1960

[20] WENZEL H.G.
The correction of tidal development to ellipsoidal normal
B.I.M. n°68 pp. 3784-3790, 1974

Résumé of Commission n°5, Marées Terrestres (Earth Tides)
Section V International Association of Geodesy

Grenoble, August 1975

President: Prof. L. Lecolazet
Secretary: Prof. P. Melchior

Resolution Committee appointed by the President: Prof. R. Mather
Dr. M. Bonatz
Dr. J. Harrison
Dr. P. Morgan

In particular, the President asked that some urgent consideration be given to the venue of the Commission next meeting which was scheduled for some time in 1977 on the occasion of its twenty anniversary. Dr. Bonatz has given an invitation to visit Bonn, Dr. Harrison to visit Boulder and Dr. Kuo to visit New York.

Prof. P. Melchior. The Secretary's opening remarks were directed towards defining the goals sought by research into the phenomena of Earth Tides. The principal goals were as follows:

1. Questions of fundamental astronomy
2. Space dynamics and the effect of tides on orbits and observations.
3. Gravimetry and the necessity to ensure the absolute nature of these fundamental points.
4. Understanding the physics of the earth interior. That is the influence on $K_1 P_1$ and O_1 and the near resonance waves ψ_1 and ϕ_1.
5. The inverse problem of improving cotidal and corange charts from observations and the general problems of ocean tides.
6. An understanding of the effects of cavities on the observations.

The proposed program of the Commission sought to reflect the latest and most advanced studies in these area.

THE PROGRAM

Paper n°1. C. Le Provost: Simplification de la représentation spectrale des marées dans une mer littorale: la Manche

This paper dealt with a simulated study of the English Channel by means of an elaborate laboratory model which was able to reproduce in scale all of the natural conditions. Twenty components were identified and evaluated. In particular ratios were established M_2N_2 and S_2 which enabled prediction on the basis of M_2 alone. A similar set of ratios were established for the non-linear semi diurnal waves. These ratios when coupled with effective maps of the major components allows a complete picture to be drawn of this complex shallow water area.

Paper n°2. J.C. Harrison: Cavity, topographic and geological influences on earth tide tilt and strain observations.

This paper described by way of analytical theory for ellipses and ellipsoids and finite element techniques for other shapes the effect that location and shape have on the validity of the observational data from strainmeters, extensometers tiltmeters when placed in tunnels and cavities. The finite element technique was also used to gain an insight into the effects that topography might have on the observations. It was interesting to note that this will have a large bearing upon studies of crustal movement in areas of geological and topographical changes. Finally Dr Harrison showed that he was able to considerably explain observed tidal strain data by applying cavity and topographic corrections as currently conceived.

Paper n°3. R. Lecolazet and L. Steinmetz: Sur la structure fine du spectre diurne.

Prof. Lecolazet presented an analysis of three gravimeters over a number of years. A number of instrumental difficulties prevented the unambiguous detection of resonance effects in the liquid core as described by the wave ψ_1 due to dispersion. The possibility that this resonance frequency has some time dependant characterization was also discussed.

Paper n°4. J.C. Usandivaras and B. Ducarme: Etude de la structure du spectre diurne.

A study of some high quality clinometric and gravimetric data in an attempt to elucidate a mechanism for the near resonance waves π_1, ψ_1 and ϕ_1.

Paper n°5. B. Bodri: Earth tide phase lag and anelasticity of the mantle.

An earth model, B_2 of Bullen and Haddon, was constructed. Values for the Love numbers k, ℓ and h were computed for tides up to third order along with their phase lags. These lags were sufficiently small, of the order of 1-2 minutes of arc to support the hypothesis that the majority of tidal energy is dissipated in the oceans.

Paper n°6. P. Varga: The analysis of gravity registrations on non-tidal frequencies.

A study based on numerical integration of the basic differential equations representing an elastic earth. A very small phase lag of the same size that Bodri reported was indicated in the results.

Paper n°7. M. Van Ruymbeke: Un pendule horizontal VM équipé d'un capteur de déplacement à capacité variable.

Modifications to horizontal pendulums for sensitive but stable capacitive sensing of displacements are described.

Paper n°8. P. Melchior and B. Ducarme: the ratio ℓ/h: a simple method for the prospection of tidal deformations.

A simple experimental technique to aid in the correct choice of site and cavity location for extensometers is explained.

Paper n°9. W. Torge and H.G. Wenzel: Comparison of earth tide observations with seven different gravimeters at Hannover.

A calibration paper describing the performance of modified LCR gravity meters.

Paper n°10. H.G. Wenzel: Interpolation of calibration values for earth tide observations with prediction-filtering.

The reduction of a non-feedback equiped LCR gravity meter records was able to produce the amplitude of M_2 with this technique to within $\pm$ 0.002 after 1 month.

Paper n°11. R. Mather and K. Bretreger: An experiment to determine radial deformation of earth tides in Australia by ocean tides.

A study seeking to reduce the large number of cotidal parameters by the application of truncation functions since tidal heights from altimetry data will shortly become available.

Paper n°12. T. Honkasalo: Observations of earth tides in Finland.

A description of two profiles yielding consistent results. The profiles were obtained with calibrated geodynamics gravity meters.

Paper n°13. I. Nakagawa, M. Satomura, M. Ozeki, H. Tsukamoto: Tidal change of gravity by means of an Askania gravimeter at Kyoto, Japan.

A discussion of the structure of diurnal tides and the analysis thereof from a continuous three year record.

P. Morgan