

MAREES TERRESTRES.

BULLETIN d' INFORMATIONS.

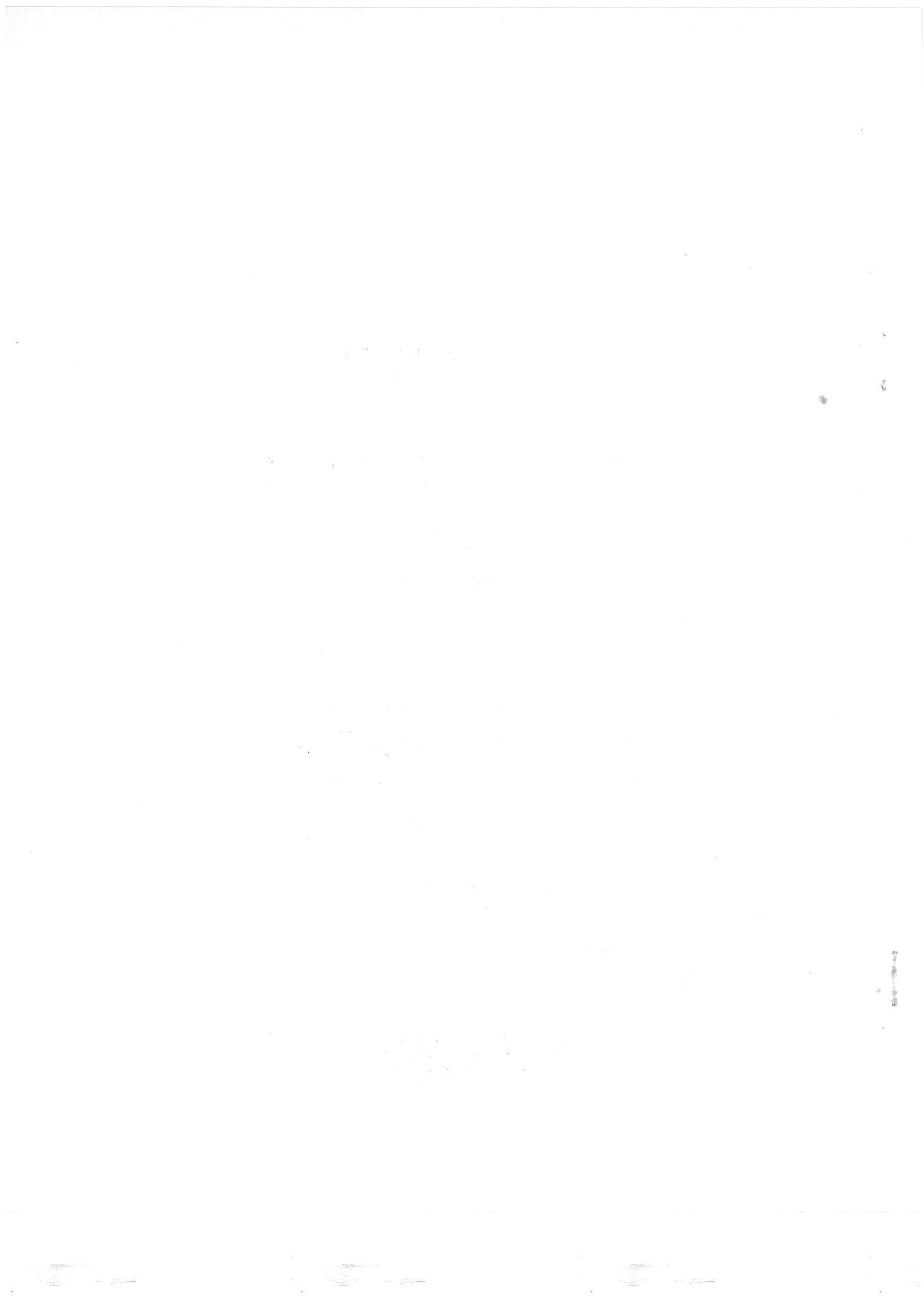
N° 28

15 mai 1962.

Association Internationale de Géodésie

Commission Permanente des Marées Terrestres

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



Méthodes de calcul électronique sur ordinateur I.B.M. 1620 dans l'analyse harmonique des marées terrestres au Centre International

par

P. MELCHIOR.

Depuis janvier 1962, l'Observatoire Royal de Belgique dispose d'un ordinateur électronique IBM 1620 à vingt mille mémoires ferrites, avec entrée-sortie cartes, bandes et machine à écrire. Le Service de Calcul Electronique, qui comprend aussi une Table Traçante (Data Plotter) de grandes dimensions, est placé sous la direction de M. Paul Melchior, astronome-adjoint, assisté de M. Paul Paquet, récemment nommé assistant à l'Observatoire Royal. Deux opérateurs, MM. H. Bernard et M. Vandebauw, assurent le travail normal des machines.

Cet équipement de calcul est actuellement utilisé par le Centre International des Marées Terrestres pour assurer tous les travaux d'analyses harmoniques qui étaient auparavant exécutés sur ordinateur IBM 650. On a profité au maximum des possibilités offertes par le nouvel ordinateur 1620 pour améliorer considérablement l'efficacité des programmes et réaliser l'automatisation intégrale du travail. Pour ce faire, six programmes successifs ont été élaborés en langage S.P.S.

L'organisation des calculs est basée sur un modèle de carte nouveau, que nous appelons " carte treize mots " et qui est spécifiquement conçue pour les marées.

Nous avons divisé la carte usuelle de 80 colonnes de la manière suivante :

a) Mot Indicatif de 8 colonnes.

Ce mot est, lui même, partagé en deux zones :

- | | | |
|----------------------------|---|--|
| zone " Type " : 3 colonnes | { | en colonne 1 le type d'appareil
0 = gravimètre (cartes rouges)
1 = pendule horizontal Nord Sud (cartes bleues)
2 = pendule horizontal Est Ouest (cartes vertes) |
| | | en colonnes 2,3 le numéro de l'appareil éventuellement abrégé. |
| zone " Date " : 5 colonnes | { | en colonne 4 le mois de l'année.
(désignés par 1,2,3,4,5,6,7,8,9,0,1,2) |
| | | en colonnes 5,6 le jour du mois |
| | | en colonnes 7,8 l'heure de la mesure qui figurera dans le premier des douze mots qui suivent. |

b) 12 Mots de 6 colonnes, soit 72 colonnes.

Chacun de ces 12 mots contient une ordonnée lue sur la courbe enregistrée (6 chiffres au maximum ce qui suffit largement).

Ainsi une carte contient exactement 12 heures et chaque jour sera représenté par 2 cartes.

Grâce à l'indicatif date, l'ordinateur pourra toujours calculer l'époque exacte de chaque mesure, de chaque combinaison de mesures, de chaque analyse.

Programme 1

Corrections de décalages.

Les enregistrements de marées terrestres sont assez fréquemment décalés soit parce que l'on a procédé à un étalonnage, soit parce que l'on a voulu compenser la dérive par une correction destinée à ramener l'enregistrement au centre du papier.

Le programme 1 lit les ordonnées brutes mesurées et les décalages également mesurés ; il opère toutes les corrections de manière à restituer une courbe sans cassures. Ce programme est pourvu d'un test de séquence qui vérifie, en fonction du calendrier inclu dans le programme, l'ordre et la continuité des données introduites.

Programme 2

Tests d'erreurs.

Ce programme réalise une double application de la combinaison d'erreurs de Lecolazet à chaque intervalle de 24 heures : les deux applications sont faites avec un écart de 4 heures de manière à mettre toutes les erreurs éventuelles en lumière.

La sortie de ce programme se fait par la sortie machine à écrire exclusivement étant donné qu'il ne s'agit que d'un test de vérification immédiate. La machine imprime directement les résidus de chaque application avec leur date de manière à localiser instantanément tout résidu excessif. En outre il calcule l'erreur quadratique moyenne d'une valeur mesurée pour tout multiple de 10 jours de mesures, cet intervalle étant laissé au gré de l'opérateur. Le programme est pourvu du même test de séquence que le programme 1.

Programme 3

Calcul et élimination de la dérive.

Ce programme applique la combinaison de Pertsev aux cartes entrées (indicatif et 12 ordonnées mesurées) et perfore les résultats sur des cartes analogues (indicatif et 12 ordonnées : six pour la marée, six pour l'état). Il y a donc exactement deux cartes sortie pour une carte entrée. On en trouvera un modèle ci-joint. Le test de séquence est toujours inclus à ce programme. Sa durée d'application à un mois de données est de 50 secondes (par l'entrée sortie cartes).

La combinaison de Pertsev a été retenue, de préférence à celle de Doodson parce que tout en n'en différant que par la non élimination des ondes quart diurnes qui ont peu d'importance dans le cas des marées terrestres, elle porte sur un intervalle de mesures un peu plus court, ce qui lui donne un réel avantage.

Programme 4

Combinaisons journalières de Lecolazet.

La sortie du programme 3 est traitée selon les combinaisons choisies par Lecolazet : série diurne et série semi-diurne. Le test de séquence est toujours appliqué.

En outre l'ordinateur lit la table d'étalonnages de l'instrument et applique les valeurs convenables aux résultats des combinaisons. Un test vérifie l'identité d'instrument de la table d'étalonnage et des données traitées.

Ces étalonnages ne sont pas nécessairement équidistants dans le temps, il suffit de mentionner la date de chacun d'entre eux pour que la machine interpole convenablement.

Chaque combinaison est datée par l'ordinateur (mois, jour, heure). Cette opération effectuée en cartes demande 30 secondes par mois d'observation.

Programme 5

Combinaisons mensuelles de Lecolazet.

Les combinaisons journalières sorties du programme précédent sont traitées selon la méthode proposée par Lecolazet. Le test de séquence, est toujours appliqué.

L'époque centrale de l'analyse est calculée par la machine qui fournit les amplitudes et phases des dix ondes principales.

L'introduction du décalage à adopter entre les analyses successives (en général 10,5 jours ou 21 jours) est laissée au choix de l'opérateur : l'ordinateur interroge l'opérateur automatiquement par la sortie machine à écrire, dès le début du programme ; une fois la réponse donnée le calcul se poursuit automatiquement pour toutes les données utilisables. La durée de chaque analyse est de 15 secondes.

Programme 6

Calcul des Ondes Homologues, des Rapports d'Amplitude, des différences de phase et Edition du Procès Verbal d'Analyse.

Ce programme est extrêmement élaboré. L'ordinateur lit, à la suite du programme, les caractéristiques de l'instrument traité (nom de la station, composante, numéro d'appareil, position géographique) et la sortie du programme 5. Il imprime les titres du procès verbal représenté à la figure 2, demandant l'introduction manuelle du numéro et le temps julien de la première analyse à effectuer (l'époque est lue dans la sortie du programme 5 et reproduite dans le titre).

L'ordinateur calcule alors les longitudes s, h, p, N, p_1 et le temps lunaire τ , puis effectue toutes les opérations de calcul des ondes homologues en 17 secondes pour les ondes semi-diurnes et en 30 secondes pour les ondes diurnes. Il édite alors le procès verbal convenablement mis en page (fig. 2).

Pour les analyses consécutives, l'ordinateur établit lui-même le numéro d'analyse et le temps julien. Tout est donc automatique dès la deuxième analyse.

Calcul et impression demandent $2^m 45^s$ pour les ondes semi-diurnes, 3^m pour les ondes diurnes.

Gezeitenregistrierung
mit Hilfe der elektromagnetischen Feder und ihre Eichung

Rudolf Brein, Frankfurt a.M.

Mitteilg. aus dem Institut für Angew. Geodäsie (II. Abt. DGFI)

Beim vierten internationalen Symposium über Erdgezeiten in Brüssel 1961 ist über den versuchsweisen Einbau einer elektromagnetischen Feder in ein North-American-Gravimeter berichtet worden [1]. Inzwischen wurde nun auch das Registriergerät fertiggestellt und erprobt.

Bei der angewandten Registriermethode gehen Empfindlichkeitswerte und mögliche Empfindlichkeitsänderungen der eingesetzten Messinstrumente nicht in das Registrierergebnis ein. Ausserdem erfolgen keine feinmechanischen Verstellungen. Damit entfallen viele Fehler, die bei Ausschlagsinstrumenten auftreten können. Auch die Gefahr einer Rückwirkung der Messgrösse auf die Messgeräte kann damit vermieden werden. Die Ausschaltung derartiger Fehler ist besonders bei Gravimeterregistrierungen von Bedeutung, da die Registriergrösse im Vergleich zur Messgrösse sehr klein ist und die Änderungen sehr langsam erfolgen, so dass eine hohe Konstanz der Messgeräte erforderlich ist.

Das Gravimeter hat bei dieser Registriermethode nur noch die Aufgabe, eine möglichst konstante Kraft zu liefern, wobei andererseits auch auf das Gravimeter eine konstante Schwerkraft wirkt. Diese ist frei vom Einfluss der Erdgezeiten, da die vertikale Komponente der Erdgezeiten selbsttätig durch Regelung der elektromagnetischen Feder kompensiert wird.

Zur Eichung der elektromagnetischen Feder kann dagegen die volle Funktion des Gravimeters mit Vorteil verwendet werden, da die Messvorgänge in beliebiger und rascher Zeitfolge vorgenommen werden können und ähnlich wie bei der Gravimeteereichung verlaufen.

In der Tabelle sind die bei einer Eichung erhaltenen Werte angegeben. Die Messspindel des Gravimeters wird auf die in Spalte 2 angegebenen Werte eingestellt. Der Strom durch die Spule der elektromagnetischen Feder wird so reguliert, dass die photoelektrische Anzeige des Gravimeters ungeändert bleibt. Die Regulierung des Spulenstromes erfolgt durch ein Potentiometer. Die Stellung des Potentiometers (Spalte 3) ist ein Mass für den Spulenstrom. Zur Elimination des Gravimeterganges und der Erdgezeiten werden die zur gleichen Messspindelstellung gehörenden Werte graphisch aufgetragen und durch eine ausgleichende Gerade verbunden. Durch Parallelverschiebung bringt man sodann sämtliche Werte in eine solche Lage, dass eine gleichmässige Kurve sich gut anschmiegt. (Fig. 1). Die Kurvenwerte stellen die Korrektur K (Spalte 4) dar. Aus der Spalte 7 ergibt sich der mittlere Fehler für eine Einzeleinstellung zu $m_1 = \pm 2,3$. Aus den beiden Δr - Werten mit den Spindelverstellungen $\Delta n = 2$ ergibt sich die mittlere Abweichung zu $m_2 = \pm 3$. Dieser Wert ist im Vergleich mit dem m_1 - Wert zu gross, denn er ist ja aus mehreren Einzelmessungen hervorgegangen. Die Grösse von m_2 ist durch Messspindelfehler zu erklären. Es muss mit m_2 - Werten bis 5 gerechnet werden. Daraus ergibt sich eine Unsicherheit des gemessenen Eichfaktors von $\pm \frac{5}{887} = \pm 0,6 \%$. Die Genauigkeit der Eichung lässt sich noch steigern, wenn grössere Δn - Werte verwendet werden. Vorteilhaft wird dann nicht das Potentiometer verstellt, sondern der Spulenstrom J wird durch Umschalten von A nach B oder C (Fig. 2) stufenweise um grössere Beträge geändert.

Die Gezeitenregistrierung erfolgt auf ein 4 cm breites Papierband, in das die Potentiometerstellung digital gelocht wird. In gleicher Weise könnten die Messwerte auch auf den Lochstreifen einer Rechenmaschine übertragen werden. Die Lochung erfolgt alle 15 Minuten und die Potentiometerstellung wird jede Minute einmal mit einem der Werte $\Delta R = +1, -1$ oder 0 geregelt. Die beiden Vorgänge werden durch eine Ato-Uhr ausgelöst. Die Lochung dient gleichzeitig als Zeitzeichen.

Die schrittweise Regelung ist wegen ihrer Einfachheit wenig störanfällig. Bei der angewandten einminutigen Regelung kann die Regelstufe nicht viel kleiner als 1 μgal genommen werden.

Die Mikroseismik am derzeitigen Aufstellungsort in Frankfurt a. M. ist so gross, dass auch eine feinere (und kurzzeitigere) Regelung keine Genauigkeitssteigerung bringen würde. In Fig. 3 ist der Ausschnitt einer Registrierung graphisch aufgetragen und der dazugehörige Lochstreifen wiedergegeben. Es wurde aus der Registrierung ein Teil mit möglichst vielen waagrechten Tangenten ausgewählt, weil dort die Streuungen am besten gesehen werden können.

Zwischen der Registrierung und den tatsächlichen Erdgezeiten besteht eine Phasendifferenz, die bei dieser Anordnung etwa 45 Sekunden beträgt. Diese Grösse ergibt sich aus der Zeitkonstante des Gravimeters und des Galvanometers von zusammen 15 Sekunden und der Zeitdifferenz zwischen der Schrittschaltung und der Lochschaltung, die bei der verwendeten Ato-Uhr auf 30 Sekunden eingestellt ist.

[1] Commun. de l'Obs. Royal de Belg. N° 188 sér. Geophys. Nr. 58 S. 139-143.

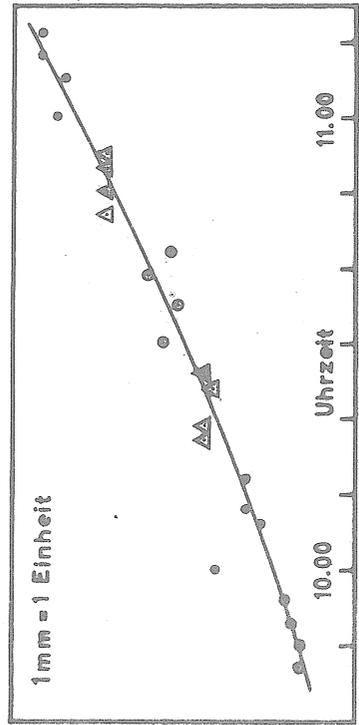
Tabelle

Datum 26.3. 1962.

1 Zeit	2 Spindel n	3 Pot. R	4 Korr. K	5 R_K R - K	6 Mittel \bar{R}_K	7 $ R_K - \bar{R}_K $	
9.47	1960,65	888	0	888,0	887,2	0,8	
9.50		(888)	1	887,0		0,2	
9.53		889	2	887,0		0,2	
9.56		(890)	3	887,0		0,2	
10.00	1958,65	459	4,5	[454,5]	446,7	7,8	
10.06		(453)	6,5	446,5		0,2	
10.08		455	7,5	447,5		0,8	
10.12		(455)	9	446,0		0,7	
10.17	1956,65	(013)	11	2,0	0,0	2	
10.19		013	11,5	1,5		1,5	
10.24		(012)	14	- 2,0		2	
10.26		013	14,5	- 1,5		1,5	
10.32	1960,65	906	16,5	889,5	886,4	3,1	
10.35		(904)	18,5	885,5		0,9	
10.39		908	20,5	887,5		1,1	
10.42		(905)	22,0	883,0		3,4	
10.47	1956,65	(026)	24,0	2,0	- 0,4	2,4	
10.50		026	26,0	0,0		0,4	
10.53		(026)	27,5	- 1,5		1,1	
10.55		026	28,0	- 2,0		1,6	
11.00	1958,65	480	31,0	449,0	446,5	2,5	
11.05		(478)	33,5	444,5		2,0	
11.08		482	35,0	447,0		0,5	
11.11		(482)	36,5	445,5		1,0	
Gesamtmittel der $\bar{R}_K : r$				- 0,2	446,6	886,8	
Differenzen des Gesamtmittels				Δr	446,8	440,2	887,0
Spindelverstellung				Δn	2,0	2,0	4,0

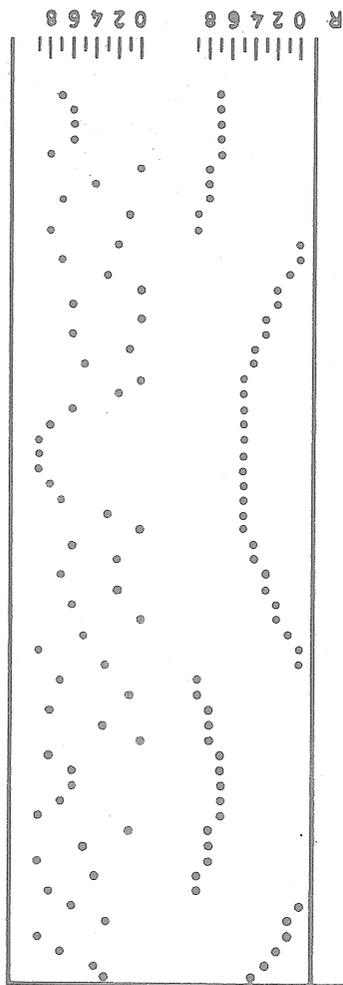
Die eingeklammerten Werte in Spalte 3 sind um 10 Einheiten vermindert. Dieser Betrag entspricht ungefähr dem toten Gang der Messspindel. Die Messspindel wurde abwechselnd in Richtung und entgegen der Richtung der Uhrzeigerdrehung eingestellt.

26.3.1962



▲ -0,2
● 4,466
● 8,968

26.3.1962



23.3.1962

24.3.1962

Fig. 1

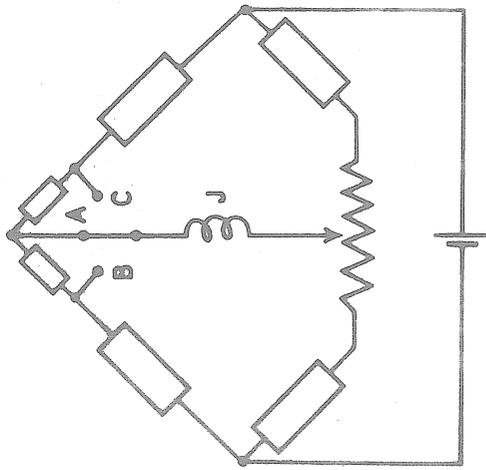


Fig. 2

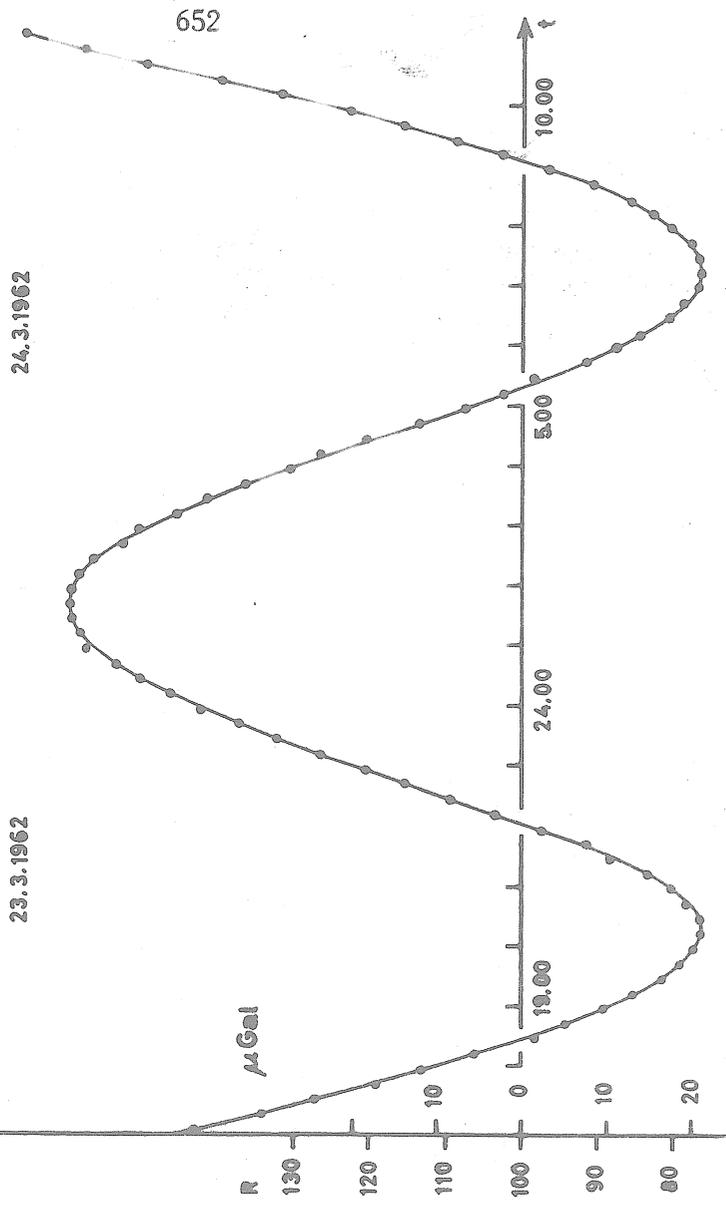


Fig. 3

Marées clinométriques de la surface de la Terre à Poltava d'après les observations
de 1858 - 1959.

A.E. Ostrovskii, P.S. Matveev et V.N. Londai

(Troudi Poltavskoi Gravimetritcheskoi Observatorii, X, pp. 14 - 19, Kiev 1961)

Depuis juillet 1958, les observations des inclinaisons de la surface de la Terre ont été reprises à l'Observatoire Gravimétrique de Poltava. Contrairement aux deux premières séries (1930-1941 et 1948-1952) faites à l'aide des pendules horizontaux à suspension Zöllner du type de Repsold-Levitskov [1, 2] la nouvelle série d'observations a été menée au moyen des pendules construits par A.E. Ostrovski [3] assurant l'enregistrement photo-électrique des inclinaisons.

Le but principal de ces observations est de contrôler ce nouveau type d'appareils dans les conditions d'une station pour laquelle les valeurs du coefficient γ sont déjà connues avec une précision suffisamment élevée. En outre, on espère que les données de ces observations permettront de tirer au clair les influences locales dans la déformation de marée de la surface de la Terre et cela pas seulement à Poltava.

Les clinomètres sont installés dans une nouvelle cave, située à côté des bâtiments de service et d'habitation de l'Observatoire, à 90 m. de l'ancienne cave dans laquelle ont été faites les deux séries précédentes d'observations clinométriques de Poltava. La profondeur de la nouvelle cave est de 3,80 m. L'épaisseur du remblai de terre au-dessus de la voûte, est de 1 m. Les piliers sur lesquels sont placés les clinomètres sont constitués de briques sur un béton. Sa partie inférieure s'enfonce dans la terre de 1 m. de sorte que la profondeur générale de la fondation du pilier est de 4,80 m.

L'orientation des clinomètres par rapport au méridien est avantageuse pour l'étude de la marée terrestre : l'un enregistre la composante N-S et l'autre la composante E-W. Le sens positif de mesure des ordonnées sur les pellicules photographiques correspond aux inclinaisons de la surface de la Terre vers le Sud et vers l'Ouest.

La salle d'enregistrement est située à 7 m. de la cave dans laquelle sont installés les clinomètres; elle est séparée de la salle des instruments par deux portes et un court corridor. Grâce à cette séparation, la présence de l'observateur dans la salle d'enregistrement n'exerce aucune influence sur le régime de travail des clinomètres.

Pour la période écoulée depuis le début des observations (10 juillet 1958) l'enregistrement n'a pas été continu. Les plus longues interruptions sont dues soit au mauvais état de l'appareillage, soit à son remplacement. Les petites coupures (de l'ordre de quelques heures) se présentent plus particulièrement à cause des conditions météorologiques (la chute abondante de pluie, les fortes variations de température, les premières gelées par l'absence de couche de neige . . .).

Les trois premiers mois d'observations (juillet-octobre 1958) ont déjà été réduits, et les résultats obtenus sont publiés [4, 5].

Le présent travail contient les résultats de la réduction des observations ultérieures du 2-XI-1958 au 14-VI-1959. Tout le matériel des observations pour ce moment a été utilisé pour l'analyse harmonique. A cause des très grandes influences météorologiques et des interruptions fréquentes dans les enregistrements à la fin de l'hiver et au début du printemps, les observations du 29-I au 22-III-1959 n'ont pas été insérées dans le travail.

La mesure des ordonnées à partir des enregistrements photographiques a été effectuée à l'aide d'une réglette de verre à divisions de 0,5 mm. Le calcul des amplitudes s'effectue après la transformation en mesures angulaires, des ordonnées exprimées en mesures linéaires.

L'alimentation des photoéléments illuminés pendant longtemps (jusqu'au 18-I-1959) a été obtenue à partir d'accumulateurs ; à cause de la baisse de tension de ceux-ci, la sensibilité des clinomètres pendant l'enregistrement varie dans de larges limites : elle diminue à peu près de 0''003/mm après le branchement des accumulateurs jusqu'à 0''006/mm avant le remplacement des accumulateurs déchargés (ce remplacement s'effectue régulièrement tous les 10-12 jours). Tenant compte de cette diminution assez rapide de la sensibilité, on arrive à effectuer la conversion des ordonnées horaires mesurées linéairement, en mesures angulaires, en multipliant par le facteur de conversion dont les valeurs horaires sont obtenues par interpolation linéaire entre les valeurs de la sensibilité contrôlées chaque jour et calculées d'après les impulsions imprimées sur la pellicule. En remplaçant les accumulateurs par des batteries chauffées, d'une grande capacité, la diminution de la sensibilité due à la baisse d'intensité sur les photoéléments illuminés est devenue insignifiante, à la suite de quoi il est apparu possible d'accomplir la conversion des ordonnées avec des valeurs du facteur constantes dans les limites d'un jour.

L'analyse harmonique des ordonnées observées a été effectuée d'après la méthode de P.S. Matveev [6]

Tout le matériel d'observation a été partagé en six séries de 29 jours, pour chacune desquelles on a déterminé les ondes O_1 , K_1 , N_2 , M_2 et S_2 , représentées comme suit :

$$\eta_i = R_i \cos (qt - \zeta_i) \quad (1)$$

où R_i est l'amplitude, ζ_i , la phase initiale de l'onde.

Pour chacune des ondes déterminées on a effectué la comparaison de la valeur observée de l'onde (1) avec sa valeur théorique dans l'hypothèse d'une Terre absolument rigide. Le résultat de cette comparaison a fourni les données de la table 1 pour la valeur du coefficient γ (rapport de l'amplitude observée à l'amplitude théorique) et pour le retard de phase κ . En ce qui concerne la table de la grandeur κ , il convient d'apporter quelque précision. Cette grandeur représente la différence entre les valeurs observées et théoriques des phases initiales, c'est-à-dire :

$$\kappa = \zeta_H - \zeta_T \quad (2)$$

A la valeur positive de κ correspond un retard de la phase observée par rapport à la phase théorique.

Pour déterminer la marée terrestre à Poltava, comme en n'importe quel point situé à une latitude moyenne, les données d'observations les plus favorables sont celles de la composante EW.

Cela résulte des valeurs des amplitudes théoriques R_T des ondes données dans la table 1, au-dessus des colonnes des résultats (R_T est exprimé en unités de 0°00001).

La table 1 montre que la composante NS de l'onde O_1 , ayant une très petite amplitude ($R_T = 0^{\circ}00084$) donne une valeur de γ fortement exagérée. L'onde K_1 donne un résultat notoirement irréel pour cette composante NS.

En ce qui concerne les données obtenues pour l'onde K_1 , il faut aussi noter, en raison du mauvais résultat, que, en plus de l'insuffisance de l'amplitude, se manifeste encore la présence de l'onde météorologique S_1 (onde de température) qui déforme fortement les inclinaisons de marées de la surface de la Terre.

Comme l'a montré l'analyse des observations antérieures l'onde S_1 pour la composante NS dans le cas de Poltava dépasse parfois de 15 à 20 fois l'onde K_1 . Avec cet ordre de perturbation les valeurs obtenues de γ , seront naturellement en désaccord, puisque pas une des méthodes d'analyse pour la discussion d'une série mensuelle d'observations ne permet de séparer l'onde S_1 de l'onde K_1 .

Du point de vue de la fidélité des valeurs de γ obtenues pour l'onde la plus sûre ($\gamma = 0,72$) les ondes O_1 et K_1 pour la composante EW ont donné un résultat acceptable. Toutefois ici les erreurs de détermination des grandeurs γ et κ apparaissent comme assez importantes. De même que dans le cas de la composante NS l'influence perturbatrice de l'onde S_1 se fait ici apparemment sentir.

Les ondes semi-diurnes N_2 et M_2 donnent pour γ dans les deux composantes des résultats concordant bien entre eux. Les valeurs des retards de phase κ pour ces ondes ne sont pas dépassées par les erreurs quadratiques moyennes correspondantes. Les valeurs de γ et κ , obtenues pour l'onde S_2 , sont assez proches de celles qu'on donne des résultats se trouvant dans les limites des erreurs.

Les moyennes pondérées des valeurs de γ pour les ondes semi-diurnes N_2, M_2 et S_2 ont été obtenues égales à 0,719 et 0,716 respectivement pour les composantes NS et EW.

TABLE 1.

Valeurs de γ et κ d'après les données des observations du 2-XI-1958 au 14-VI-1959 à Poltava.

Début d'une série mensuelle	Q ₁		K ₁		N ₂		M ₂		S ₂	
	γ	κ	γ	κ	γ	κ	γ	κ	γ	κ
1958 2 novembre 1 décembre 30 décembre 1959 24 mars 20 avril 17 mai	Composante $\alpha = 0^\circ$ (NS)									
	$R_r = 84$		$R_r = 130$		$R_r = 154$		$R_r = 804$		$R_r = 361$	
	2,837 -	0,22	1,903 -	151,59	0,428 -	49,24	0,629 -	2,85	0,948 -	8,10
	1,406 -	100,50	1,028 +	32,27	0,263 -	26,54	0,589 -	4,04	0,884 -	12,34
3,516 +	63,93	0,619 -	46,82	0,665 +	11,55	0,749 -	7,96	0,561 -	40,53	
4,487 -	53,31	2,883 +	110,59	0,837 -	72,10	0,679 -	8,79	0,772 -	32,37	
2,098 +	4,02	19,911 +	35,91	0,667 -	43,91	0,711 -	9,58	0,878 -	46,90	
0,844 +	124,44	3,367 -	136,80	0,909 -	1,75	0,729 -	11,89	1,007 -	66,59	
Moyenne	2,531 +	6,39	4,952 -	26,07	0,628 -	30,33	0,681 -	7,52	0,842 -	34,56
Erreur quadratique moyenne	+0,553 ±	32,81	+3,022 ±	42,57	+0,098 ±	12,74	+0,026 ±	1,40	+0,064 ±	8,96
Composante $\alpha = 90^\circ$ (EW)										
$R_r = 405$		$R_r = 621$		$R_r = 202$		$R_r = 1056$		$R_r = 474$		
2 novembre	1,090 +	13,95	0,800 +	26,28	0,788 +	7,07	0,714 +	5,19	0,839 -	3,86
1 décembre	1,591 +	3,82	0,728 -	24,67	1,015 -	23,05	0,749 -	5,01	0,593 +	36,49
30 décembre 1959	0,332 +	14,10	0,896 +	24,62	1,115 -	12,60	0,611 +	13,65	0,749 -	12,87
24 mars	0,544 +	10,27	0,548 +	11,26	0,749 -	0,26	0,746 +	3,61	0,722 -	2,74
20 avril	0,809 -	5,92	1,398 +	62,98	0,754 -	7,37	0,678 -	3,03	0,538 +	21,18
17 mai	1,003 -	29,61	2,405 +	47,95	0,427 -	53,19	0,685 -	11,56	0,872 +	12,35
Moyenne	0,895 +	1,10	1,129 +	24,74	0,808 -	15,82	0,697 +	0,48	0,719 +	8,42
Erreur quadratique moyenne	+0,181 ±	6,88	+0,281 ±	12,42	+0,097 ±	8,64	+0,021 ±	3,62	+0,053 ±	7,52

Bien que les trois ondes semi-diurnes fournissent des valeurs moyennes pondérées de γ très voisines pour les deux composantes, nous nous en abstenons de présenter ces valeurs comme les valeurs caractéristiques de la marée terrestre à Poltava. Cette conclusion ne sera fondée, à notre avis, qu'après l'achèvement de la réduction de tout le matériel des observations obtenu avec les nouveaux appareils. Et ces observations se poursuivent encore à présent.

En tant que résultat préliminaire pour la marée terrestre semi-diurne, il convient apparemment, de prendre les valeurs γ et κ obtenues pour l'onde lunaire semi-diurne principale M_2 .

Comme nous le voyons dans la table 1, les valeurs de γ pour cette onde apparaissent à peu près identiques pour les composantes NS et EW. En tout cas, elles ne donnent pas d'indications d'inégalité importante des valeurs de ce coefficient en fonction de l'azimut. Le retard de phase pour la composante EW est proche du zéro et pour la composante NS il est négatif et assez important ($-7^{\circ}52$).

Les données de la table 2 donnent la possibilité de comparer le résultat obtenu par nous pour l'onde M_2 avec les résultats correspondants obtenus par Z.W. Aksentieva [1] de 1930-1941 et A.E. Ostrovski, P.S. Matveev et S.M. Fandushina [4,5] en 1958.

En ce qui concerne le résultat de 1958 porté dans la table 2, il convient de noter qu'il diffère un peu du résultat rapporté dans les travaux [4,5]. La différence s'explique par le fait qu'aux valeurs de γ initialement publiées pour cette série d'observations, des corrections ont été introduites pour des valeurs admises erronément pour les constantes J_0 des clinomètres. L'introduction des corrections mentionnées a augmenté les valeurs précédentes de γ de 2,48 % pour la composante NS et de 3,12 % pour la composante EW.

T A B L E 2.

Comparaison des résultats, obtenus pour l'onde M_2

Epoque d'observation	Composante NS		Composante EW	
	γ	κ	γ	κ
1930-1941 [1]	0,724 ± 0,021	- 3°,20 ± 1°,00	0,667 ± 0,015	+ 0°,30 ± 0°,80
1958 [4,5]	0,658 ± 0,021	+ 0°,60 ± 3°,80	0,635 ± 0,048	+ 1°,95 ± 4°,10
1958-1959	0,681 ± 0,025	- 7°,52 ± 1°,40	0,697 ± 0,021	+ 0°,48 ± 3°,62

A partir de la table 2 on voit que pour la composante NS, la valeur obtenue pour γ dans le présent travail est intermédiaire entre les valeurs correspondantes des deux séries d'observations précédentes.

La valeur que donne la série de 1958 concorde avec cette nouvelle valeur. En ce qui concerne la composante EW, le nouveau résultat s'accorde le mieux possible avec celui que donne la série de onze années 1930-1941 pour γ aussi bien que pour κ .

En résumé on peut tirer la conclusion suivante .

Les résultats de la réduction d'une série de six mois d'observations clinométriques effectuées à Poltava en 1958-1959 à l'aide de clinomètres séismiques avec enregistreur photo-électrique, sont en accord satisfaisant avec les résultats de la série de onze années d'observations 1930-1941, ce qui témoigne de la sûreté des appareils de la nouvelle fabrication.

Bibliographie.

1. Z.N. Aksentieva : Résultats de la série d'onze années d'observations (de 1930 à 1941) sur les déviations de la verticale à Poltava.
Travaux de l'Observatoire Gravimétrique de Poltava T. II Izd. Vo AN. URSS, 1948.
2. Z.N. Aksentieva : Au sujet des travaux aux clinomètres à Poltava de 1948 à 1952.
Travaux du troisième congrès international des latitudes en 1954.
3. A.E. Ostrovski . Clinomètre séismique avec enregistreur photo-électrique.
Bulletin de l'Union pour la Séismologie N° 6, 1957.
4. A.E. Ostrovski : Observations des inclinaisons de marées de la Terre à Poltava en 1958.
R.S. Matveev,
S.M. Fandushina : " Recherches Gravimétriques " XIII division du programme N°1,M, 1960.
5. A.E. Ostrovski : Observations of the tidal tilts of earth by means of a photoelectric tiltmeter in Poltava, July-October 1958, Bolletino di Geofisica teorica ed applicata. N° 5, Marzo 1960, pp.60-63.
P. Matveiev and
S. Fandushina
6. P.S. Matveev : Analyse harmonique d'une série d'un mois d'observations de marées. Travaux de l'Observatoire Gravimétrique de Poltava, T. IX Isd. vo. AN. URSS 1960.

Influence des forces génératrices de marées luni-solaires sur la fréquence des tremblements de terre transcaucasiens.

par P.S. Matveev et V. Goloubitskii.

(Troudi Poltavskoï Gravimetritcheskoï Observatorii, X. pp. 67-74, Kiev 1961)

Les marées élastiques dans le milieu solide de la Terre, provenant de l'influence des forces génératrices de marées luni-solaires, provoquent des mouvements continus oscillatoires de l'écorce terrestre et des couches plus profondes. Ces mouvements sont accompagnés de tensions périodiques de l'ordre de 10^4 dynes/cm² dans l'écorce et dans les couches supérieures de l'enveloppe de la Terre. En soi, ces tensions ne sont pas à même d'amener une rupture dans les racines montagneuses et par conséquent d'être à l'origine des tremblements de terre. Cependant dans les endroits où, sous l'influence des mouvements tectoniques ou d'autres facteurs actifs, on a déjà accumulé une réserve de tensions proche de la limite de stabilité des racines, l'addition de tensions de marées même faibles peut être suffisante pour que l'on parvienne au seuil et que commence le processus de libération de l'énergie séismique. Ainsi, il y a des raisons de supposer que les déformations de marées du globe terrestre détermineront l'existence d'une certaine périodicité dans la fréquence des tremblements de terre.

L'idée de considérer les forces de marées comme une des causes possibles des tremblements de terre, a été proposée et développée pour la première fois en 1887 par le savant russe A.E. Lagor [1] dans sa théorie connue à présent sous le titre de «Théorie du crochet de détente». En vérité, des tentatives de considérer le phénomène des marées terrestres en vue d'une interprétation des tremblements de terre ont été entreprises bien avant Lagor. La première et la plus sérieuse tentative dans ce sens est liée au nom d'un savant français A. Pierret qui au début du XIX^m^e s. a proposé comme interprétation des causes des tremblements de terre la «théorie des marées internes» [2]. Conformément à cette théorie, les marées ayant pris naissance, sous l'influence de l'attraction luni-solaire, dans les couches profondes de la Terre, sur la surface du magma des tensions périodiques y seront provoquées par pression sur la semelle de l'écorce terrestre ; il doit en résulter l'apparition de cassures, constituant les origines des chocs. La périodicité rigoureuse des marées a dû, d'après A. Pierret, avoir des répercussions correspondantes dans la périodicité des tremblements de terre. Ses conclusions principales ont abouti au pronostic des effets suivants :

- 1) la fréquence des tremblements de terre au moment des syzygies est plus grande qu'au moment des quadratures ;
- 2) la fréquence des tremblements de terre s'accroît au moment du passage de la Lune au périgée et par contre diminue au moment du passage à l'apogée ;
- 3) les tremblements de terre ont lieu beaucoup plus souvent quand la Lune se trouve près du méridien que quand elle s'en éloigne de 90°.

Les défauts principaux de la «théorie des marées internes» sous la forme dans laquelle elle a été élaborée par Pierret et ses successeurs immédiats en France et en Allemagne, consistaient en ce qu'elle reposait sur des notions erronées sur la structure

interne de la Terre : outre cela elle présentait l'effet de l'attraction luni-solaire comme un facteur fondamental, responsable des tremblements de terre. A la suite de recherches ultérieures, cette théorie ne se confirma pas et c'est pourquoi elle a été rejetée. Elle a été soumise à une critique particulièrement sévère de la part des savants russes A.P. Orlov, A.E. Lagor et F.A. Bredichin. A l'opposé de la théorie de Pierret, « la théorie du crochet de détente » proposée par Lagor donne à l'effet des forces de marées le simple rôle d'un des agents du tremblement de Terre. Cette estimation prudente de l'influence possible des forces génératrices de marées de la Lune et du Soleil sur la fréquence des tremblements de terre fait qu'elle n'a guère été prise en considération jusqu'à nos jours.

A l'époque où la Séismologie s'est développée, en tant que branche indépendante de géophysique, par les travaux des savants russes, japonais, allemands et d'autres pays, on a tenté à maintes reprises de mettre en évidence par l'analyse statistique d'un grand nombre de tremblements de terre la périodicité de caractère de marée dans la fréquence des tremblements de terre et d'en estimer l'importance. Les résultats de ces recherches ont été très contradictoires. A cet égard la possibilité de donner une réponse sûre à la question de la réalité de l'effet de marée n'a pu être envisagée jusqu'à présent. A vrai dire, au sujet des contradictions des résultats obtenus, il faut n'avoir en vue que les essais de mettre en évidence la périodicité de l'origine lunaire. Quant à ce qu'il semble de la découverte des influences du Soleil, presque toutes les recherches sans exception sont affectées d'ondes annuelles et diurnes dont les amplitudes sont de l'ordre de 10 à 30 %. L'étude de la périodicité solaire, faite par V. Conrad, a montré toutefois que la présence de périodes annuelle et diurne dans la fréquence des tremblements de terre n'est pas due à l'influence de marée du Soleil, mais à la variabilité de la réceptivité de l'observateur au cours de l'année et de la période de 24 heures.

Le travail de L. Rodes [3] peut servir comme exemple caractéristique des recherches entreprises dans le but de découvrir les influences luni-solaires sur la fréquence des tremblements de terre ; travail dans lequel d'après les données de l'analyse statistique de 2242 enregistrements de tremblements de terre dans la station de l'Ebre l'onde diurne solaire est mise en évidence avec certitude mais dans laquelle, d'après les mêmes données, on n'a découvert aucune périodicité en rapport avec le mouvement diurne de la Lune.

Le résultat négatif de la tentative faite par Rodes pour mettre en évidence l'effet de marée lunaire ainsi que les résultats analogues des quelques autres auteurs ne démontrent pas pour autant l'absence de cet effet en général. Apparemment, cet effet est très faible et pour le déceler il faut analyser les données traitant d'une zone sismique déterminée quelconque mais non de toute la surface de la Terre comme l'a fait Rodes.

En partant de cette remarque nous avons essayé de mettre en évidence l'influence de l'effet des marées de la Lune et du Soleil sur la fréquence des tremblements de terre dans le Transcaucase. Comme matériel de départ on a pris 1813 tremblements de terre, survenus dans cette région au cours des années 1900 à 1950 [4].

Les instants origine des tremblements de terre ont été répartis d'après les angles horaires moyens (temps de Greenwich) τ de la Lune et t du Soleil et ont été groupés

en quelques variantes par groupes de deux heures. Les variantes suivantes de répartition ont été examinées :

- 1) d'après l'angle horaire de la Lune pour toute la période de 1900 à 1950 en entier ;
- 2) d'après l'angle horaire de la Lune au moment des pleines lunes et des nouvelles lunes (syzygies) ;
- 3) d'après l'angle horaire de la Lune au moment du premier et du dernier quartier (quadratures de la Lune) ;
- 4) d'après l'angle horaire du Soleil pour toute la période de 1900 à 1950 et séparément pour les périodes 1900-1924 et 1925-1950 ;
- 5) d'après l'angle horaire du Soleil pour la période d'été (23 mars - 22 septembre) ;
- 6) d'après l'angle horaire du Soleil pour la période hivernale (23 septembre - 22 mars).

Pour chacune des variantes énumérées on a obtenu 12 ordonnées caractérisant la fréquence des tremblements de terre dans les limites des jours lunaires et solaires. Les résultats de la répartition sont donnés dans la table 1, qui donne une idée du nombre de secousses enregistrées dans les intervalles de temps de deux heures correspondants.

Par la méthode de l'analyse harmonique on a calculé à partir des séries d'ordonnées obtenues, les ondes diurnes et les ondes semi-diurnes à l'aide desquelles l'allure de la fréquence (exprimée en pour-cent) peut être présentée par la série :

$$y = 100 + R_1 \cos (15^\circ T - \zeta_1) + R_2 \cos (30^\circ T - \zeta_2),$$

où R_1 et ζ_1 sont l'amplitude et la phase initiale de l'onde diurne, R_2 et ζ_2 sont l'amplitude et la phase initiale de l'onde semi-diurne, et T le temps de Greenwich (lunaire ou solaire). Les résultats de l'analyse sont donnés dans la table 2.

Pour les quatre variantes les plus importantes de la répartition on a calculé les erreurs quadratiques moyennes des amplitudes obtenues pour les ondes. Bien que ces erreurs soient apparues comme assez importantes leur comparaison avec les amplitudes correspondantes pour les cas des ondes diurne solaire et semi-diurne lunaire donne une raison de parler de la réalité des périodicités relevées.

Nous considérerons comme les plus importantes des répartitions : pour r -1) générale et 2) en fonction des syzygies, pour t - 3) général pour toute la période de cinquante ans et 4) pour la période hivernale. Ces quatre variantes de répartition présentent un intérêt particulier pour la raison que la comparaison de leurs résultats nous donne la possibilité de mettre en évidence et d'estimer la dépendance entre la fréquence des tremblements de terre, le changement de phases de la Lune et le changement des saisons. Comme nous l'avons noté plus haut, cette dépendance a déjà été prévue depuis longtemps et confirmée à maintes reprises par les résultats des travaux de quelques chercheurs (Tch. Devis, V. Conrad, G. Tampazian et autres) sur les tremblements de terre dans les diverses zones séismiques.

Les données de l'analyse statistique des tremblements de terre du Transcaucasie, comme on le voit par les tables 1 et 2, confirment ainsi la réalité de cette dépendance. Ainsi des 1813 secousses pour la période de 1900 à 1950, 951 (52,45 %) se présentent au moment des syzygies et 862 (47,55 %) au moment des quadratures. Dans la comparaison de la fréquence des tremblements de terre pour les périodes d'été et d'hiver, la dépendance est encore plus accentuée : en hiver elle est de 1023 (56,43 %) secousses tandis qu'en été elle est seulement de 790 (43,57 %).

TABLE 1.

Allure diurne de la fréquence des tremblements de terre au Transcaucasie survenus en 1900 - 1950

Heures des jours	Répartition d'après l'angle horaire τ de la Lune			Répartition d'après l'angle horaire t du Soleil				
	Général	Syzygies	Quadratures	Général	1900 - 1924	1925 - 1950	Eté	Hiver
23h - 1h	155	77	78	166	78	88	73	93
1 - 3	169	92	77	169	79	90	68	101
3 - 5	148	81	67	155	79	76	63	92
5 - 7	153	84	69	131	58	73	52	79
7 - 9	130	60	70	121	55	66	60	61
9 - 11	132	77	55	124	62	62	59	65
11 - 13	146	75	71	133	60	73	70	63
13 - 15	147	83	64	113	56	57	53	60
15 - 17	153	73	75	155	86	69	59	96
17 - 19	173	87	86	191	104	87	79	112
19 - 21	155	80	75	178	85	93	75	103
21 - 23	152	77	75	177	75	102	79	98
Σ	1813	951	862	1813	877	936	790	1023
Moyenne	151,1	79,2	71,8	151,1	73,1	78,0	65,8	85,2
%	100,00	52,45	47,55	100,00	48,37	51,63	43,57	56,43

TABLE 2

Les ondes diurnes et semi-diurnes dans l'allure de la fréquence des tremblements de terre du Transcaucase (Amplitudes R_1 et R_2 donnés en pour-cent)

Angle horaire	Répartition	R_1	ζ_1	R_2	ζ_2
r	Générale	$7,96 \pm 2,81$	320,9	$5,24 \pm 2,63$	113°,4
	Syzygies	$5,33 \pm 4,61$	328,2	$7,68 \pm 3,71$	96°,6
	Quadratures	10,93	317,0	3,79	153°,7
t	1900 - 1950	$21,16 \pm 4,47$	325,3	$4,23 \pm 3,77$	190°,9
	1900 - 1924	21,91	309,7	10,78	153°,8
	1925 - 1950	21,92	339,9	6,09	279°,5
	Été	14,84	317,6	7,70	296°,6
	Hiver	$26,18 \pm 4,94$	328,7	$10,77 \pm 4,65$	158°,8

L'accroissement du nombre de tremblements de terre au moment des syzygies a sans aucun doute pour cause le renforcement de l'intensité de l'action des marées (les forces génératrices de marées de la Lune et du Soleil s'additionnent). Comme confirmation de la validité de ce qui a été dit on peut arguer du fait que l'allure périodique de la fréquence des tremblements de terre aux époques de syzygies semble sensiblement plus précise que pour la période 1900-1950 considérée en entier. Cela est illustré sur la figure 1.

Quant à l'augmentation du nombre de tremblements de terre en période d'hiver par rapport à la période exclusive dans le caractère de réceptivité de l'observateur puisqu'une partie importante du matériel que nous avons employé a été obtenu par E.Y. Bious [4] à partir d'observations macroséismiques. Il convient selon toute probabilité d'interpréter l'accroissement de l'amplitude de l'onde solaire diurne pendant l'hiver (fig. 2) notamment par le caractère de réceptivité de l'observateur au cours de la journée. Il n'est pas exclu, en effet, qu'une grande partie de l'influence manifeste du Soleil sur l'allure de la fréquence des tremblements de terre puisse être interprétée non seulement par les caractères de réceptivité de la population mais par n'importe quelle autre influence tout à fait réelle du Soleil sur la Terre, par exemple par l'influence thermique sur la couche supérieure même de la Terre. Comme cela a été noté on peut considérer l'onde solaire diurne comme n'ayant pas une origine notoirement de marée. Mais l'amplitude qui, dans la répartition générale était égale à 7,96% et au moment des syzygies à 5,33% ne fournit pas non plus la possibilité d'interpréter l'onde lunaire diurne comme une influence de marée puisque à cette onde (M_1) correspond une composante qui ne constitue en tout dans la force génératrice de marée de la Lune que 3% de toute la force. Dans les valeurs relevées pour les ondes diurnes un fait mérite notre attention : les moments de maximum de fréquence coïncident avec les moments des culminations inférieures de la Lune et du Soleil au méridien central du Transcaucase.

L'onde lunaire semi-diurne pour la variante de répartition générale a une amplitude de 5,24% , avec un maximum proche du moment du passage de la Lune aux méridiens de 56°7 W et 123°3 E. Au moment des syzygies l'amplitude de cette onde augmente sensiblement (7,68%) et le maximum de fréquence tombe presque en même temps que pour la répartition générale pour toute la période de cinquante ans. Les moments de maximum pour ce cas correspondent aux culminations supérieures de la Lune dans les méridiens de 48°3 W et 131°7 E. Au moment des quadratures l'amplitude de l'onde lunaire semi-diurne diminue jusqu'à 3,79%.

L'augmentation d'amplitude de l'onde lunaire semi-diurne au moment des syzygies et la diminution au moment des quadratures, et de même l'accord satisfaisant des phases de cette onde pour les deux variantes importantes de la répartition (générale et des syzygies), donnent une raison de considérer l'effet découvert comme le résultat de l'influence de marée de la même onde lunaire semi-diurne principale M_2 de la marée terrestre sur l'allure de la fréquence des tremblements de terre du Transcaucase.

La comparaison que nous venons de faire de l'allure de la fréquence des tremblements de terre par la variation du vecteur de la force génératrice de marée pour un point de la partie centrale du Transcaucase a montré qu'au moment du maximum de fréquence la composante verticale de la force génératrice de marée (onde M_2) est dirigée vers le nadir, c'est-à-dire qu'elle augmente la force de pesanteur, mais la composante horizontale est orientée dans les azimuts de 214° (répartition générale) et 190° (syzygies). Sur les figures 3 et 4 les positions des composantes horizontale et verticale de la force génératrice de marée de la Lune, correspondant au maximum de la fréquence des tremblements de terre, sont marquées par des lignes pointillées (a-correspond à la répartition générale, b-au moment des syzygies).

A la lumière des quelques résultats du travail de R.J. Brazée [5] qui fait l'analyse statistique de la série des grands tremblements de terre en Californie, on peut s'attendre à ce que pour les zones particulières stimulant un effet des forces de marées sur la fréquence des tremblements de terre à un grand degré, on déterminera la composante horizontale du vecteur des forces génératrices de marées au lieu de la verticale. S'il en est ainsi que dans le Transcaucase, la composante horizontale de la force génératrice de marées au moment du maximum de fréquence de tremblements de terre est orientée approximativement le long du méridien, cela mérite une grande attention car c'est notamment dans cette direction que, sur les cartes séismiques du Transcaucase faites par F.Y. Bious et E.F. Sabarenskii [6-7], une zone épiscopentrale méridionale se manifeste d'une manière précise.

L'onde solaire semi-diurne S_2 dans la marée terrestre constitue environ 46 % de l'onde M_2 c'est pourquoi l'effet de l'onde S_2 dans l'allure de la fréquence des tremblements de terre pourrait être sensible. Il est regrettable que le grand désaccord dans les diverses variantes de répartition nous oblige de tirer la conclusion que d'après le matériel examiné, on ne parvient pas à montrer l'effet de l'influence de marée du Soleil. Apparemment, il est camouflé par des inégalités de l'onde solaire diurne manifestement d'origine étrangère aux marées et dont l'amplitude est assez grande.

Bibliographie.

- 1) Y. V. Batiouchkova : Notions sur les origines des tremblements de terre dans les travaux des chercheurs nationaux.
Is d. vo. AN URSS M 1959.
- 2) E. Rothé : Tremblements de terre M.L. 1934.
- 3) L. Rodes : The influence of the Moon on the frequency of earthquakes,
Gerl. Beitr. v. Geophys, Bd. 41, H. 2, Leipzig, 1934 S 209-212
- 4) E.Y. Bious : Caractères seismiques du Transcaucase, Ysol. vo. AN Grouz,
SSR, I 1948, II 1952.
- 5) J. Brazee : Earth tides and earthquakes, Earthquake Notes Seismol.
Soc. America, v. 28, N° 1, 1957.
- 6) E.F. Savarenskii, Seisme URSS
Sommes et perspectives de son étude, Travaux de Géophysique
in-ta AN. URSS N° 25 (152) 1954.
- 7) E.F. Savarenskii, Sur les altérations dans les cartes séismiques Isvestia AN.
URSS série géophysique N° 7 1956.

