

4.2. CONTRIBUTION APPORTÉE PAR LES MARÉES TERRESTRES DANS L'ÉTUDE DE LA ROTATION DE LA TERRE

P. MELCHIOR

(*Observatoire Royal de Belgique, Uccle, Bruxelles, Belgique*)

RÉSUMÉ

Trois aspects de l'étude expérimentale des marées terrestres présentent un intérêt direct pour l'étude de la rotation de la Terre: (1) La détermination expérimentale des nombres de Love et l'étude des effets dynamiques du noyau liquide sur les nutations de l'axe principal d'inertie; (2) Le retard de la marée terrestre; et (3) Les dérives des pendules horizontaux.

ABSTRACT

Three aspects of the experimental study of earth-tides present a direct interest for the study of the rotation of the earth. These are (1) the experimental determination of the Love numbers and the dynamical effects of the liquid core on nutations of the principal axis of inertia; (2) the delay of earth-tides; and (3) the drift of horizontal pendulums.

1. Effets du noyau liquide sur les ondes tesserales diurnes et sur les nutations associées

Le problème théorique consiste à exprimer les nombres de Love h , k en fonction de la répartition interne des propriétés élastiques et de la densité.

En 1957, Jeffreys reprenant une étude antérieure de Poincaré démontre qu'un effet de résonance dû aux mouvements dans le noyau liquide se manifeste sur les ondes dont la période est suffisamment voisine de celle du jour sidéral (K_1 et, dans une moindre mesure P_1). Or ce sont précisément les composantes horizontales de ces ondes de marée qui créent les couples de précession et de nutation:

l'onde K_1 correspond à la précession et à la nutation de 18,6 an

l'onde O_1 correspond à la nutation semi-mensuelle

l'onde P_1 correspond à la nutation semi-annuelle.

L'amplitude théorique de ces ondes est respectivement de 0''0070, 0''0050, 0''0023 mais la précision d'une seule mesure horaire au pendule horizontal atteint 0''0002.

Les nutations associées ont des amplitudes théoriques respectives de 9''22, 0''09 et 0''55 tandis que la précision d'une observation au cercle méridien atteint au maximum 0''2. En outre la période semi-annuelle n'est pas favorable à une détermination astronomique expérimentale.

On voit ainsi l'intérêt évident qu'il y a à passer de la méthode de mesure d'angles,

Markowitz and Guinot (eds.), Continental Drift, 71-76. © I.A.U.

purement géométrique, des astronomes à la méthode dynamique consistant à mesurer directement à l'aide de pendules horizontaux les forces qui créent les nutations.

Jeffreys et Vicente (1957) ont traité une série de modèles à noyau liquide. Molodensky développe une étude analogue en 1961 et obtient des résultats assez semblables à ceux de Jeffreys et Vicente (Molodensky, 1961).

Selon ces calculs théoriques les trois ondes diurnes que l'on peut espérer déduire avec quelque précision des enregistrements auront pour coefficients d'amplitude les nombres reproduits dans le Tableau 1.

Tableau 1

	Déviations de la verticale facteur $\gamma = 1 + k - h$				Variations de g facteur $\delta = 1 + h - \frac{3}{2}k$			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
K_1	0.714	0.693	0.734	0.730	1.183	1.185	1.137	1.143
P_1	0.695	0.696	0.699	0.697	1.196	1.172	1.154	1.158
O_1	0.654	0.658	0.688	0.686	1.224	1.211	1.159	1.164
$(O-K_1)$	-0.060	-0.035	-0.046	-0.044	+0.041	+0.026	+0.022	+0.021

- (1) Modèle de Jeffreys et Vicente.
- (2) Modèle de Jeffreys et Vicente avec particule centrale.
- (3) Modèle de Molodensky avec noyau fluide homogène.
- (4) Modèle de Molodensky avec graine centrale.

L'effet de résonance atteint donc près de 10% de l'amplitude totale.

Une relation indiquée par Melchior (1950):

$$k/h = 1/\lambda = \left(\int_0^a \rho r^4 dr \right) / \left(\int_0^a \rho r^2 dr \right) \tag{1}$$

soit encore

$$k/h = \left(e - \frac{q}{2} \right) / [(C - A)/A] = 1 - (2/5) \sqrt{1 + \eta} = (3/2) (C/Ma^2) \sim 1/2,$$

où λ est le paramètre de d'Alembert et η le paramètre de Radau ($q = \omega^2 a / 2g$, $e =$ aplatissement) est retrouvée par Molodensky (1961) mais non dans les modèles de Jeffreys et Vicente et c'est la raison des désaccords assez prononcés qui existent entre ces deux théories pour le facteur δ .

Nous avons trouvé en 1951 :

$$k/h = 0.504$$

et G. Jobert avait démontré que si l'on fait abstraction de l'hypothèse implicite en (1) que les déformations sont homothétiques par rapport au centre, on peut seulement écrire (Jobert, 1952):

$$k/h \leq 0.504.$$

La discussion de résultat expérimentaux portant sur 19 414 jours d'observations en 27 stations fondamentales nous a conduits à la solution présentée dans le Tableau 2 (Melchior, 1966).

Tableau 2
Résultats expérimentaux

Ondes	γ	δ	k	h	k/h
K_1	0.747	1.143	0.220	0.473	0.465
P_1	0.721	1.148	0.262	0.541	0.484
O_1	0.676	1.160	0.328	0.652	0.503

Les effets dynamiques sont conformes aux théories bien qu'un peu plus prononcés que prévu pour le facteur γ .

La solution pratiquement statique qui correspond à l'onde O_1 appelle les remarques suivantes:

- (1) elle donne pour le facteur δ une valeur égale à celle d'Asie Centrale;
- (2) ce même facteur δ est égal à celui trouvé par Lecolazet et Steinmetz pour l'onde zonale Mf ($\delta = 1.16 \pm 0.09$) qui obéit à la théorie statique;
- (3) la valeur de k concorde avec celle trouvée par Markowitz dans les variations de la vitesse de rotation de la Terre résultant des variations d'aplatissement dues à la même onde Mf ($k = 0.34 \pm 0.07$);
- (4) elle restitue pratiquement la valeur 0.504 que nous avons trouvée pour le rapport k/h et s'accorde bien avec les modèles de l'intérieur de la Terre construits par Kaula;
- (5) cette valeur de k donnerait cependant au mouvement du pôle une période (de Chandler) de 460 jours, ce qui est excessif et mérite examen. Il résulte de l'incertitude où nous sommes quant à la valeur exacte de cette période, que les procédés de moyennes mobiles utilisés pour calculer le mouvement séculaire du pôle doivent être remplacés par des méthodes de filtrage plus adéquates (filtres passe bande).

Ces résultats subiront certes encore quelques retouches lorsqu'on apportera les petites corrections dues aux effets indirects. Mais ceux-ci sont faibles pour les ondes diurnes et nous ne pensons pas que l'essentiel des conclusions puisse en être affecté.

2. Les ondes semi-diurnes et le freinage de la rotation de la Terre

Les marées terrestres de période semi-diurne sont plus difficiles à interpréter car les océans et en particulier les mers atlantiques côtières sont le siège d'importantes marées de caractère semi-diurne parce qu'elles appartiennent à des systèmes qui entrent en résonance dans cette gamme de fréquences.

Il s'ensuit que les appareils enregistreurs subissent sur ces fréquences d'importants effets perturbateurs que l'on appelle effets indirects parce qu'ils ont toutes les caractéristiques de la marée mais sont transmis par l'intermédiaire des marées océaniques.

Tableau 3
Composante Verticale. Déphasage de l'onde M_2

Atlantique		Centre		U.R.S.S.	
<i>Bruxelles I</i>	+ 0° 72	Kieselbach	− 4° 00	Poulkovo	− 2° 09
<i>Bruxelles II</i>	+ 1° 56	Potsdam	− 0° 98	Krasnaya P	− 4° 23
Dourbes	+ 0° 96	Berggieshübel	− 2° 98	Moscou	− 1° 34
Vedrin	+ 0° 03	Tihany	− 0° 37	Kiev	− 2° 82
Battice	+ 0° 78	Borowiec	− 1° 46	Poltava	− 1° 30
<i>Luxembourg</i>	+ 0° 74			Tbilissi	(+ 1° 20)?
<i>Strasbourg</i>	+ 2° 08	<i>Nord</i>			
Karlsruhe	+ 0° 34	<i>Stockholm</i>	− 2° 65	<i>Asie</i>	
<i>Frankfurt/M.</i>	+ 0° 72	<i>Helsinki</i>	− 0° 41	<i>Talgar</i>	− 3° 43
<i>Bonn</i>	+ 0° 89			Tashkent	− 4° 10
Hannover	+ 1° 37	<i>Sud</i>		Alma Ata	− 3° 51
Berlin	+ 0° 68	Sofia	− 1° 45	Frounze	− 3° 60
Bad Salzungen	+ 0° 60	<i>Genova</i>	− 0° 20	Langchow	− 2° 88
Freiberg	+ 0° 20	<i>Trieste</i>	− 0° 80	<i>Téhéran</i>	− 3° 67
		Costozza	− 2° 18	<i>Kyoto</i>	− 2° 17
		Resina	− 2° 72		

+ = avance, − = retard.

Les stations en italique sont celles pour lesquelles une analyse globale a été faite sur une très longue série d'observations (de 250 à 1000 jours).

Si l'on examine le Tableau 3, on constate que les effets indirects ne pourront guère justifier les différences de caractère régional que présente le groupement des stations. Ces effets indirects sont d'ailleurs très faibles pour l'onde K_1 qui présente cependant sensiblement la même répartition de phases que l'onde M_2 .

Sans vouloir entrer ici dans les discussions de détail, nous pouvons résumer les faits comme suit:

Les déphasages sont faibles en Europe Occidentale et Centrale, aussi bien pour l'onde diurne K_1 que pour l'onde semi-diurne M_2 . Ces mêmes déphasages sont par contre très prononcés pour K_1 aussi bien que pour M_2 en Russie, en Asie Centrale et au Japon.

Le Tableau 3 montre que l'on peut délimiter trois zones:

Europe Atlantique:	avance de 0°7 environ
Europe Centrale et Italie:	retard de 1°7 environ
URSS, Asie et Japon:	retard de 3°5 environ

Or, ces phases concernent la marée globale.

Ce qui nous intéresse c'est le déphasage de la marée de déformation et celui-ci est six fois plus grand si le facteur d'amplitude δ est égal à 1·20.

Un retard de la déformation de type sectoriel (onde M_2) provoque évidemment un freinage de la vitesse de rotation de la Terre, car le couple exercé par les composantes Est-Ouest de la force de marée sur cette déformation radiale de marée n'est plus nul si le bourrelet est décalé par rapport à l'axe Terre-Lune.

On constate ici la présence de déformations relatives entre diverses régions de l'écorce terrestre ce qui donnerait lieu à une dissipation d'énergie additionnelle.

On peut interpréter les résultats repris dans la Tableau 3 en disant que le bourrelet de marée aborde le Japon et l'Asie avec un retard sensible qu'il rattrape rapidement au cours de sa progression à travers l'Europe, le tableau montre que le Japon est solidaire de l'Asie ce que confirment les mesures de longitude et de latitude présentées au cours de ce Symposium.

3. Contribution des stations clinométriques à l'étude des mouvements récents de l'écorce terrestre

Dans une note récente (Melchior et Brouet, 1966) nous avons montré que les pendules horizontaux en quartz, bien installés (c'est-à-dire directement dans la roche) présentent des dérives rapidement décroissantes liées à la procédure d'installation.

Après deux ou trois ans de fonctionnement cette dérive est de l'ordre de 0''002 par jour et l'appareil tend vers une stabilité presque totale.

Dès lors on peut espérer obtenir à longue échéance des informations de caractère nouveau si l'on dispose d'un réseau de stations assez nombreuses pour permettre l'élimination des effets purement régionaux.

Les perturbations locales les plus dangereuses sont de caractère hydrologique (crues de rivières et de nappes aquifères souterraines).

Une étude plus récente a été menée avec un système d'étalonnage automatique programmé réalisant la mesure de la sensibilité des appareils deux ou trois fois par semaine.

Deux appareils (VM76 et VM77) ainsi installés dans la mine de Příbram (Tchécoslovaquie) à une profondeur de 1500 m, ont une sensibilité qui présente une très faible variation rigoureusement linéaire:

$$s = 0''0013 - 0''0000017/\text{jour}$$

par millimètre à 5 m (focale) (7 mois d'observations avec 72 mesures automatiques de s à chaque appareil).

Il est souhaitable qu'un bon réseau de stations bien équipées soit développé sans tarder.

4. Conclusion

Nous estimons que les problèmes de la rotation de la Terre et de ses déformations ne peuvent plus être abordés séparément.

Bibliographie

Jeffreys, H., Vicente, R.O. (1957) The Theory of Nutation and the Variation of Latitude,

- Mon. Not. R. astr. Soc.*, **117**, 142–161. – The Theory of Nutation and the Variation of Latitude: The Roche model core, *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **117**, 162–173.
- Jobert, G. (1952) Marées terrestres d'un globe fluide hétérogène, *Ann. géophys.*, **8**, 106–111.
- Melchior, P. J. (1950) Sur l'influence de la loi de répartition des densités à l'intérieur de la Terre dans les variations Luni-Solaires de la gravité en un point, *Geofis. pura appl.*, Milano, **XVI**, 105–112; ou *Commun. Obs. r. Belgique*, **195** (*Géoph.*, **20**).
- Melchior, P. (1966) *The Earth Tides*, Pergamon Press, New York, 458 pp.
- Melchior, P., Brouet, J. (1966) Contribution des stations clinométriques de marées terrestres à l'étude des mouvements récents de l'écorce, *Ile Symp. Intern. sur les Mouvements récents de l'Ecorce Terrestre, Helsinki 1965*, *Commun. Obs. r. Belgique*, **B8**, (*Géoph.*, **75**), 275–281.
- Molodensky, M.S. (1961) The Theory of Nutations and Diurnal Earth Tides, *Ive Symp. Intern. sur les Marées Terrestres*, *Commun. Obs. r. Belgique*, **188** (*Géoph.*, **58**), 25–56.