

## Les fluctuations saisonnières de la rotation du globe terrestre et la circulation atmosphérique générale

Par F. H. VAN DEN DUNGEN, J. F. COX et J. VAN MIEGHEM<sup>1</sup> (Université de Bruxelles)

(Manuscrit reçu le 17 dec. 1951)

### Abstract

Seasonal fluctuations in the rate of rotation of the Earth are detected when checking the best clocks with astronomical time. These variations may be shown to result from transfer of momentum between the atmosphere and the globe. As a consequence, the study of these fluctuations may bring interesting information in the field of meteorology.

1. Les progrès réalisés dans la construction et la comparaison des garde-temps ont permis de déceler des fluctuations relatives  $\delta\omega/\omega$  de la rotation  $\omega$  de la Terre, dont l'ordre de grandeur est de  $\pm 10^{-8}$ . Le caractère irrégulier et la périodicité annuelle de ces fluctuations (FINCH 1950, SCHEIBE ET ADELSBERGER 1950, STOYKO 1936, 1937, 1949, UHINK 1950) suggèrent une cause d'origine météorologique (VAN DEN DUNGEN et al. 1949).

Les valeurs normales de  $\delta\omega/\omega$  établies par N. STOYKO (1951 a) pour le début et le milieu de chaque mois sont représentées à la fig. 1 (courbe I). Le calcul de ces valeurs normales est basé sur la comparaison des déterminations d'heure effectuées en six observatoires et portant sur une période de 15 années. Notons qu'ainsi N. STOYKO a éliminé, en principe, la variation erratique et la variation séculaire de la rotation du Globe. En effet, pour chacune des 15 années, il a calculé les fluctuations moyennes  $\delta\omega$  au début et au milieu des douze mois de l'année par rapport à la vitesse annuelle

moyenne  $\omega_m$  correspondante ( $\delta\omega \equiv \omega - \omega_m$ ). Il en résulte que la courbe I de la fig. 1 met uniquement en évidence les fluctuations de période annuelle; elle montre que la rotation de la Terre est accélérée de mars à août et retardée d'août à mars.

2. En l'absence de forces extérieures agissant sur le système «Terre — Atmosphère», la somme  $M_G + M_A$  des moments cinétiques du Globe et de l'Atmosphère, autour de l'axe de la Terre, demeure constante et, par suite, à chaque instant  $t$ , toute variation  $\frac{\partial M_G}{\partial t}$  du moment cinétique  $M_G$  du Globe est compensée par une variation  $\frac{\partial M_A}{\partial t}$ , égale et de signe contraire, du moment cinétique  $M_A$  de l'atmosphère; d'où

$$\frac{\partial M_G}{\partial t} = I_G \frac{\partial \omega}{\partial t} = - \frac{\partial M_A}{\partial t}, \quad (1)$$

où  $I_G$  désigne le moment d'inertie du Globe terrestre. Dès lors, une fluctuation de la rotation de la Terre ne peut provenir que d'un échange de quantité de mouvement d'Ouest,

<sup>1</sup> Communication présentée à la 9me Ass. Gén. de l'U.G.G.I.; AIM, Symposium sur la Circulation Générale des Océans et de l'Atmosphère, Bruxelles, 27—28 août 1951 et à l'Assemblée Annuelle de la «Deutsche Meteorologische Gesellschaft», Bad Kissingen, 12 octobre 1951.

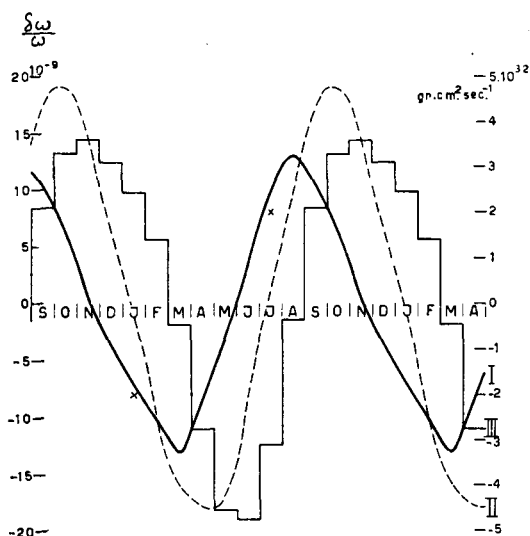


Fig. 1. Valeurs moyennes de  $\frac{\delta\omega}{\omega}$ .

Courbe I. Valeurs normales au début et au milieu du mois de N. STOVKO (1951).

Courbe II. Valeurs calculées à partir des échanges de quantité de mouvement d'Ouest entre le Globe et l'atmosphère terrestre, dans l'hypothèse d'une compensation parfaite de ces échanges à l'échelle du Globe, au bout d'une année. (F. H. VAN DEN DUNGEN, J. F. COX et J. VAN MIEGHEM, 1950).

× W. H. MUNK et R. L. MILLER, 1950.

Courbe III. Valeurs mensuelles normales de la fluctuation du moment cinétique absolu de l'atmosphère.

entre le Globe terrestre et l'atmosphère, à travers la surface de la Terre.

Mais un échange de quantité de mouvement d'W entre l'atmosphère et le Globe ne peut être dû qu'au frottement exercé par la surface du Globe sur les courants atmosphériques zonaux. Dans cet effet de frottement, il faut inclure l'effet provenant des différences de pression de part et d'autre des chaînes de montagnes orientées du Sud vers le Nord.

Il est aisé d'établir le bilan (VAN MIEGHEM 1950)

$$\frac{\partial M_A}{\partial t} = \iint_{\Sigma} \tau_x r \cos \varphi \delta \Sigma + \iint_{\sigma} (p_E - p_W) r \cos \varphi \delta \sigma \quad (2)$$

dans lequel  $\tau_x$  désigne la composante zonale de la tension due au frottement de la surface du Globe  $\Sigma$  sur la couche d'air adjacente;  $p_E$

et  $p_W$ , les pressions prises sur un même parallèle à l'Est et à l'Ouest des montagnes;  $\sigma$ , la surface limitée par le profil obtenu en projetant, à l'aide des parallèles, le volume occupé par les montagnes, sur un plan méridien;  $\varphi$ , la latitude et  $r$ , le rayon vecteur au centre de la Terre.

3. Grâce aux tables numériques établies par V. P. STARR et par ses collaborateurs (1949), à l'aide de données météorologiques de surface fort nombreuses, il est possible de calculer les deux termes au second membre du bilan (2)

et finalement d'en déduire  $\frac{\partial \omega}{\partial t}$  (VAN DEN DUNGEN et al. 1950 a).

Les tables V et VI du rapport précité de V. P. STARR fournissent les valeurs mensuelles normales de la quantité de mouvement échangée entre le Globe et l'atmosphère au N du parallèle de  $10^\circ$  N. Rappelons que le flux de la quantité de mouvement d'W, à travers la surface du Globe, est ascendant là où le vent dominant est d'E (latitudes tropicales) et, descendant là où le vent dominant est d'W (latitudes tempérées). Il en résulte, dans chaque hémisphère, un flux de quantité de mouvement vers les pôles (STARR 1948). Mais, comme les courants d'W sont beaucoup plus forts dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord et que, d'autre part, l'asymétrie entre les alizés des deux hémisphères est peu accusée, le flux ascendant à la surface du Globe («Terre → Atmosphère») aux basses latitudes de l'hémisphère Nord, n'est pas compensé, dans l'hémisphère Nord, par le flux descendant («Atmosphère → Terre») des latitudes tempérées. Une partie du flux ascendant à la surface du Globe, dans les régions tropicales de l'hémisphère Nord, traverse le plan de l'équateur (WIDGER 1949) et est compensé dans les régions tempérées de l'hémisphère Sud, où une circulation d'W plus intense entraîne, à la surface du Globe, un flux descendant de quantité de mouvement plus grand que dans l'hémisphère Nord.

De ces considérations, on déduit immédiatement pour les flux verticaux de quantité de mouvement d'W à la surface du Globe et pour les flux horizontaux méridiens de la même quantité, dans l'atmosphère libre, la répartition schématisée reproduite à la fig. 2 a. En partant de ce schéma, on est tenté de dessiner les lignes de flux du moment cinétique absolu

de l'air, dans un plan méridien, conformément au schéma de la fig. 2 b. Cependant il convient de noter que ce schéma ne peut être exact que s'il n'existe pas de circulation moyenne dans les plans méridiens ou, ce qui revient au même, si, dans l'atmosphère libre, seuls des échanges horizontaux de quantités de mouvement sont possibles (hypothèse géostrophique). Or, si l'on se reporte au profil connu de la circulation zonale (UNIVERSITY OF CHICAGO, 1947), on constate qu'au S du «Jet Stream» l'intensité du vent zonal suit à peu près la loi de la conservation du moment cinétique absolu, ce qui révèle l'existence, aux latitudes subtropicales et tropicales, d'une circulation moyenne dans le plan méridien. Au N du «Jet Stream», par contre, l'intensité du vent d'W suit une loi toute différente; à savoir, en première approximation, la loi de la conservation de la composante verticale de la rotationnelle absolue (ROSSBY, 1947), ce qui indique la prédominance, aux latitudes tempérées, d'échanges horizontaux suivant les méridiens. Bref, aux latitudes tempérées, les échanges de quantité de mouvement entre zones de latitudes différentes sont essentiellement des échanges horizontaux, tandis qu'aux latitudes plus basses, il y a, à la fois, échange horizontal et circulation méridienne moyenne (PALMÉN, 1951). On voit ainsi que les lignes de flux du moment cinétique absolu de l'atmosphère telles qu'elles ont été mises en évidence par V. P. STARR (1948) et W. K. WIDGER (1949) ne peuvent exister qu'aux latitudes tempérées (fig. 2 b).

4. En admettant que la compensation entre les flux ascendants et descendants de quantité de mouvement d'W, à travers la surface du Globe, soit parfaite à l'échelle de la Terre, au bout d'une année, nous avons obtenu (VAN DEN DUNGEN et al., 1950 a), pour la fluctuation de la rotation du Globe, des valeurs mensuelles moyennes (voir courbe II de la fig. 1) en bon accord avec les valeurs déduites des déterminations de l'heure (STOYKO 1936, 1937, 1949, 1951 a; SCHEIBE ET ADELSBERGER, FINCH, UHINK 1950). Remarquons que les amplitudes des courbes I et II de la fig. 1 sont du même ordre de grandeur et que, de plus, elles oscillent à peu près en phase. Enfin, nous avons complété la fig. 1 par deux points (x) qui mettent en évidence la variation saisonnière de la rotation de la Terre, telle qu'elle a été déduite, par W. H. MUNK et R. L. MILLER (1950), de la

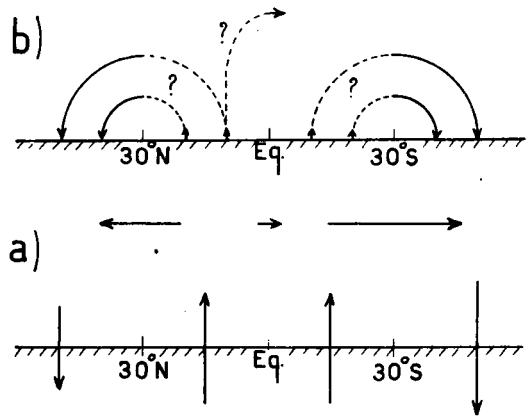


Fig. 2. Flux de la quantité de mouvement zonal d'W à la surface du Globe et dans l'atmosphère libre.

différence des moments cinétiques de l'atmosphère en janvier et en juillet.

En résumé, les fluctuations saisonnières de la rotation de la Terre apparaissent comme directement liées aux fluctuations des échanges de quantité de mouvement d'W entre le Globe et l'atmosphère, c'est-à-dire, en dernière analyse, aux fluctuations de la circulation atmosphérique zonale.

5. Inversement, en partant des valeurs normales des fluctuations de la vitesse de rotation de la Terre, établies par N. STOYKO pour le début de chaque mois (STOYKO, 1951 a), on peut déduire, grâce à (1), les valeurs mensuelles normales des fluctuations du moment cinétique absolu de l'atmosphère terrestre (voir fig. 1, courbe III). On constate que le moment cinétique absolu de l'atmosphère augmente d'août à mars (hiver boréal, été austral) et diminue de mars à août (été boréal, hiver austral), ce qui correspond à une forte asymétrie entre les circulations zonales des atmosphères des deux hémisphères.

Ensuite, en combinant les valeurs mensuelles normales de la fluctuation du moment cinétique absolu de l'atmosphère avec les valeurs mensuelles normales des quantités de mouvement d'W échangées entre la Terre et l'atmosphère au Nord du parallèle de  $10^{\circ}$  N (fig. 3, courbe I), déduites des tables de V. P. STARR (1949), on trouve, grâce à (1) et (2), les valeurs mensuelles normales des quantités de mouvement d'W échangées entre la Terre et l'atmosphère au Sud du parallèle de  $10^{\circ}$  N (fig. 3, courbe II).

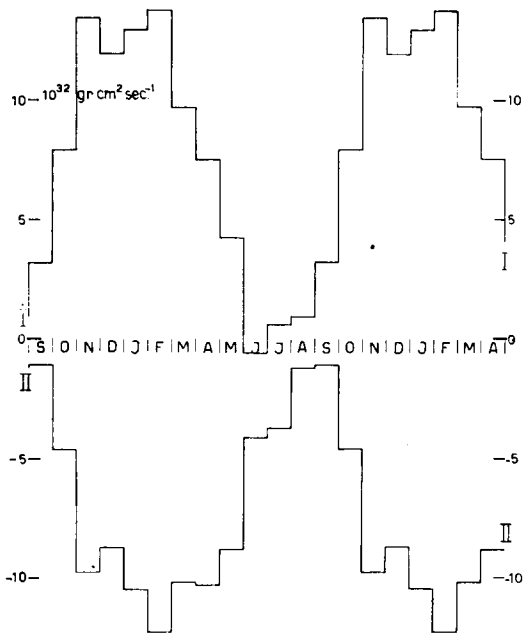


Fig. 3. Valeurs mensuelles normales du flux de la quantité de mouvement d'Ouest à travers la surface du Globe, au Nord du parallèle de  $10^{\circ}$  N (I) et au Sud de ce parallèle (II).

Flux « Terre  $\rightarrow$  Atmosphère » : +  
Flux « Atmosphère  $\rightarrow$  Terre » : —

On voit ainsi qu'au cours de l'année, le mois de juin excepté, le Globe terrestre cède de la quantité de mouvement à l'atmosphère au Nord du parallèle de  $10^{\circ}$  N (courbe I, fig. 3) et que, par contre, au Sud de ce parallèle, c'est l'atmosphère qui cède constamment de la quantité de mouvement à la Terre (courbe II de la fig. 3). Le flux « Atmosphère  $\rightarrow$  Terre » au Sud du parallèle de  $10^{\circ}$  N est minimum en août et septembre lorsque, en moyenne, la vitesse de rotation de la Terre est maximum; ce flux est maximum en février, lorsque la vitesse de rotation de la Terre est minimum (VAN DEN DUNGEN et al. 1951). Il en est à peu près de même pour le flux « Terre  $\rightarrow$  Atmosphère » au Nord du parallèle de  $10^{\circ}$  N (fig. 3, courbe I).

6. L'asymétrie entre les circulations des deux hémisphères, mise en évidence par les courbes en escaliers de la fig. 3, permet de conclure qu'il doit exister, dans l'atmosphère, un flux de moment cinétique absolu à travers le plan de l'équateur, dirigé de l'hémisphère N vers l'hémisphère S et que ce flux doit être maxi-

imum de novembre à février (été austral, hiver boréal) et minimum de juin à septembre (été boréal, hiver austral). De juin à septembre, il y a à peu près compensation, dans chaque hémisphère, entre les flux ascendant et descendant de quantité de mouvement à travers la surface du Globe (VAN DEN DUNGEN et al., 1951). Ce résultat est confirmé par les valeurs mensuelles normales du flux de moment cinétique absolu de l'air à travers la surface verticale zonale le long du parallèle de  $10^{\circ}$  N. Ces valeurs normales ont été calculées par V. P. STARR (dernière colonne des tables I et IV du Rapport précité, 1949). Il est regrettable qu'en raison de données aérologiques insuffisantes, nous ne disposons pas encore des valeurs correspondantes pour le flux à travers le plan de l'équateur.

7. Il est aisé de calculer les valeurs mensuelles normales des fluctuations du moment cinétique absolu de l'atmosphère au Nord (courbe I de la fig. 4) et au Sud (courbe II de la fig. 4) du parallèle de  $10^{\circ}$  N, à l'aide des courbes I et II de la fig. 3 et des valeurs mensuelles normales du flux de moment cinétique absolu à travers la latitude de  $10^{\circ}$  N, établies par V. P. STARR et ses collaborateurs (1949). Ces fluctuations sont plus accusées dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord; elles sont pratiquement constantes de mars à juin et de septembre à décembre dans l'hémisphère Nord et d'octo-

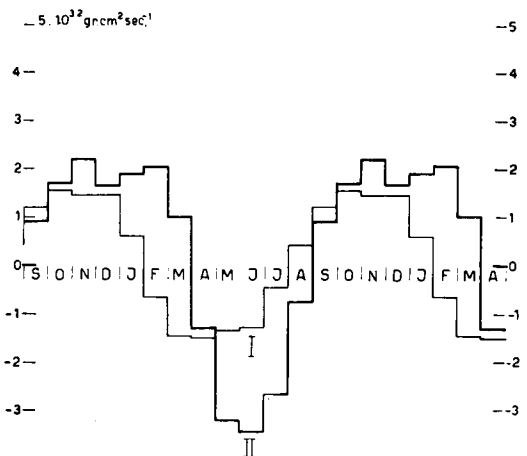


Fig. 4. Valeurs mensuelles normales de la fluctuation du moment cinétique de l'atmosphère au Nord du parallèle de  $10^{\circ}$  N (I) et au Sud de ce parallèle (II).

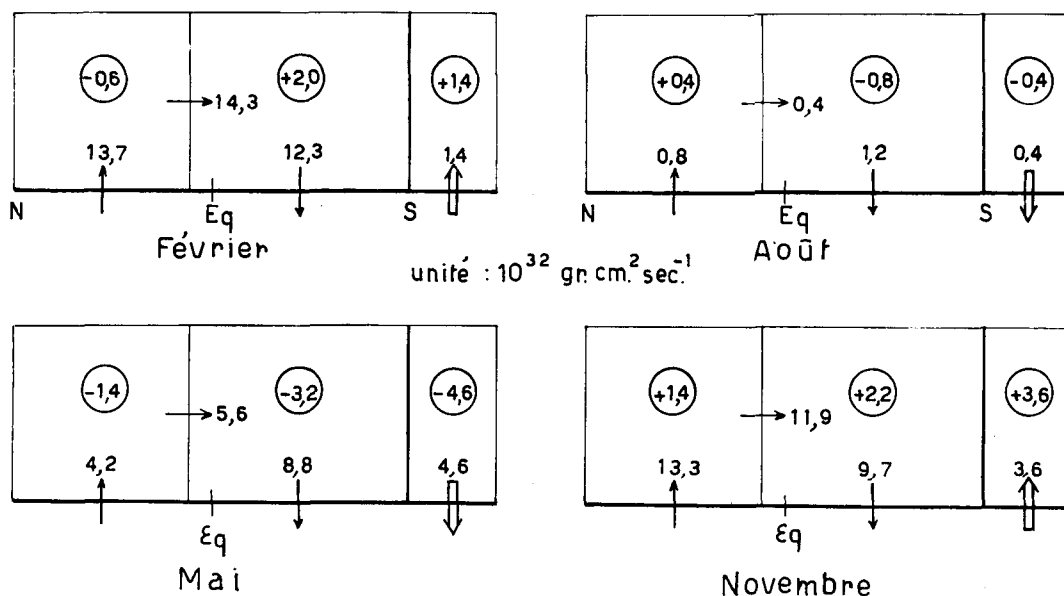


Fig. 5. ○ Fluctuation du moment cinétique absolu de l'atmosphère;  
 → Flux du moment cinétique absolu à travers la surface du Globe et à travers la surface verticale zonale le long du parallèle de  $10^\circ \text{ N}$ ;  
 ⇒ Flux résultant à travers la surface du Globe; aux époques de l'année où la vitesse de rotation de la Terre est maximum (août—septembre) et minimum (février—mars) et aux époques où cette vitesse croît (mai—juin) et décroît (novembre—décembre) le plus rapidement; à la ligne unité:  $10^{32} \text{ gr cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ .

bre à février (été austral) dans l'hémisphère Sud (VAN DEN DUNGEN et al. 1951).

8. Afin de mettre en évidence le lien entre les fluctuations du bilan du moment cinétique absolu de l'atmosphère et les fluctuations de la rotation de la Terre, nous avons représenté ces fluctuations graphiquement à la fig. 5, aux époques de l'année où la vitesse de rotation de la Terre est voisine de ces valeurs extrêmes et aux époques où cette vitesse varie le plus: vitesse minimum en février, accroissement de vitesse le plus fort en mai, vitesse maximum en août et diminution de vitesse la plus rapide en novembre.

On constate ainsi 1°) que l'échange de quantité de mouvement entre les atmosphères des deux hémisphères est le plus faible lorsque la vitesse de rotation de la Terre est maximum (août) et le plus fort lorsque cette vitesse est minimum (février), 2°) que l'échange de quantité de mouvement entre l'atmosphère et la Terre, à l'échelle du Globe, est minime (à peu près compensation, à la surface du Globe, entre le flux ascendant de l'hémisphère N et le

flux descendant de l'hémisphère S) lorsque la vitesse de rotation de la Terre est voisine de ces valeurs extrêmes (en février et en août) et que, par contre, cet échange est considérable (non compensation entre les mêmes flux) lorsque la vitesse de rotation de la Terre varie le plus rapidement (en mai et en novembre).

E. PALMÉN a fait observer que si l'on admet le point de vue de la circulation méridienne (PALMÉN 1951), l'on doit s'attendre à un échange maximum du moment cinétique vers le Sud, à travers le parallèle de  $10^\circ \text{ N}$  lorsque l'équateur thermique occupe sa position la plus septentrionale, c'est-à-dire vers le mois d'août et, à un échange minimum, vers le mois de février, lorsque l'équateur thermique occupe sa position la plus méridionale. Le fait que l'on observe le contraire (voir fig. 5) prouve qu'à côté de la circulation méridienne moyenne, dont on ne peut nier l'existence (voir fin du § 3), il existe, aux basses latitudes, un échange horizontal de quantité de mouvement.

9. Enfin, à la fig. 6, nous avons reproduit les valeurs normales de  $\delta\omega/\omega$  au début et au

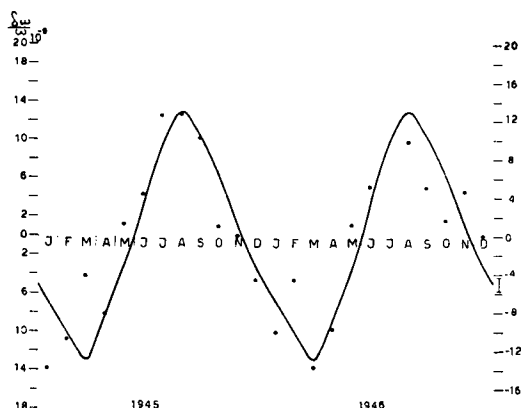


Fig. 6. Variation saisonnière de la rotation de la Terre pendant les années 1945—1946, d'après N. STOYKO (1951).  
Courbe I: valeurs normales de  $\delta\omega/\omega$ .

milieu de chaque mois (STOYKO 1951 a, courbe I de la fig. 1) ainsi que les valeurs de  $\delta\omega/\omega$  au milieu de chacun des mois des années 1945 et 1946 (STOYKO, 1951 b). La fig. 6 représente les anomalies dans la variation annuelle de la rotation de la Terre au cours de ces deux années, notamment: un retard supplémentaire dans la rotation de la Terre par rapport à la normale (courbe I), de septembre à février, et une

avance supplémentaire, de mars à août. En se reportant à la fig. 5, on voit que ces anomalies dans la fluctuation annuelle de la rotation de la Terre, en 1945 et 1946, peuvent être expliquées par un renforcement de la circulation des alizés par rapport à la circulation zonale d'W au cours de l'hiver boréal et de l'été austral et par un renforcement de la circulation zonale d'W par rapport à la circulation des alizés au cours de l'été boréal et de l'hiver austral.

Nous sommes donc en droit de conclure que les fluctuations saisonnières de la rotation de la Terre peuvent être considérées comme un indice intégré de la circulation atmosphérique zonale. Dans l'état actuel des moyens techniques, les horloges à quartz ne permettent la détermination d'une fluctuation  $\delta\omega$  de la rotation  $\omega$  de la Terre que pour une période d'au moins dix jours. Cette fluctuation représente alors un indice de circulation décadaire global.

L'étude des fluctuations de la rotation moyenne annuelle  $\omega_m$  de la Terre (fluctuations séculaires de  $\omega$ ) et la recherche d'éventuelles causes météorologiques, n'est pas sans impliquer, en plus de l'amélioration des garde-temps, des progrès dans la définition de l'échelle des temps (cf. VAN DEN DUNGEN et al., 1950 b).

## REFERENCES

- FINCH, H. F., 1950: On a periodic fluctuation in the length of the day. *The Observatory*, **70**, 854, pp. 10—13.
- MUNK, W. H. and MILLER, R. L., 1950: Variation in the Earth's angular velocity resulting from fluctuations in atmospheric and oceanic circulations. *Tellus*, **2**, 2, pp. 93—101.
- PALMÉN, E., 1951: The rôle of atmospheric disturbances in the general circulation. *Quat. Journ. of the Roy. Met. Soc.*, **77**, 333, pp. 337—354.
- ROSSBY, C. G., 1947: On the distribution of Angular Velocity in Gaseous Envelopes under the influence of large scale Horizontal Mixing Processes. *Bull. Am. Met. Soc.*, **28**, 2, pp. 53—68.
- SCHIEBE, A. und ADELSBERGER, U., 1950: Die Gangleistungen der PTR Quarzuhren und die jährliche Schwankung der astronomischen Tageslänge. *Zs. für Physik*, **127**, pp. 416—428.
- Staff Members of the Department of Meteorology of the University of Chicago, 1947: On the General Circulation of the Atmosphere in Middle Latitudes. *Bull. Am. Met. Soc.*, **28**, 6, pp. 255—280.
- STARR, V. P., 1948: An essay on the general circulation of the Earth's atmosphere. *J. of Meteorology*, **5**, 2, pp. 39—43.
- and collaborators, 1949: Investigation of the general circulation of the atmosphere. Report 4, M.I.T., Cambridge, U.S.A.
- STOYKO, N., 1936: Sur l'irrégularité de la rotation de la Terre. *C. R., Paris*, **203**, pp. 39—40.
- 1937: Sur la périodicité dans l'irrégularité de la rotation de la Terre. *C. R., Paris*, **205**, pp. 79—81.
- 1949: L'irrégularité de la rotation de la Terre et les horloges astronomiques. *Ac. Roy. de Belgique, Bull. de la Cl. des Sc.*, 5e sér., **35**, pp. 669—670.
- 1951 a: Les fluctuations saisonnières de la rotation de la Terre. *Ac. Roy. de Belgique, Bull. de la Cl. des Sc.*, 5e sér., **37**, pp. 378—392.
- 1951 b: Sur la variation saisonnière de la rotation de la Terre pendant les années 1945—1946. *Ac. Roy. de Belgique, Bull. de la Cl. des Sc.*, 5e sér., **37**, pp. 532—3.
- UHINK, W., 1950: Gänge der Quarzuhren des Geodäti-

- schen Instituts Potsdam und ihre Verwendung zur Feststellung von Zeitschwankungen. *Astronomische Nachrichten*, **278**, 3, pp. 97—104.
- VAN DEN DUNGEN, F. H., COX, J. F. et VAN MIEGHEM, J., 1949: Sur les fluctuations de période annuelle de la rotation de la Terre. *Ac. Roy. de Belgique, Bull. de la Cl. des Sc.*, 5e sér., **35**, pp. 642—655.
- 1950 a: Sur les fluctuations saisonnières de la rotation de la Terre. *Ac. Roy. de Belgique, Bull. de la Cl. des Sc.*, 5e sér., **36**, pp. 388—402.
- 1950 b: La définition de l'unité fondamentale de temps. *Ac. Roy. de Belgique, Bull. de la Cl. des Sc.*, 5e sér., **36**, pp. 704—706.
- 1951: Sur les fluctuations saisonnières de la rotation du Globe terrestre et la compensation des échanges de quantité de mouvement entre l'atmosphère et le Globe. *Ac. Roy. de Belgique, Bull. de la Cl. des Sc.*, 5e sér., **37**, pp. 427—435.
- VAN MIEGHEM, J., 1950: Les bilans de la quantité de mouvement et de l'énergie mécanique dans l'atmosphère. *Annales de Géophysique*, **6**, fasc. 4, pp. 227—237.
- WIDGER, W. K. Jr., 1949: A study of the flow of angular momentum in the atmosphere. *J. of Meteorology*, **6**, 5, pp. 291—299.