

**Sur l'effet des marées terrestres
dans les variations de niveau observées dans la nappe d'eau
atteinte à 2.000 m de profondeur
par le sondage de Turnhout (Belgique),**

par PAUL J. MELCHIOR, Dr. Sc.

1. Les caractéristiques du sondage de Turnhout tant au point de vue technique que géologique ont été décrites précédemment. Il s'agit donc là d'une nappe artésienne à 102° C non jaillissante et dont le niveau se stabilisait à 11,5 m sous le niveau du sol.

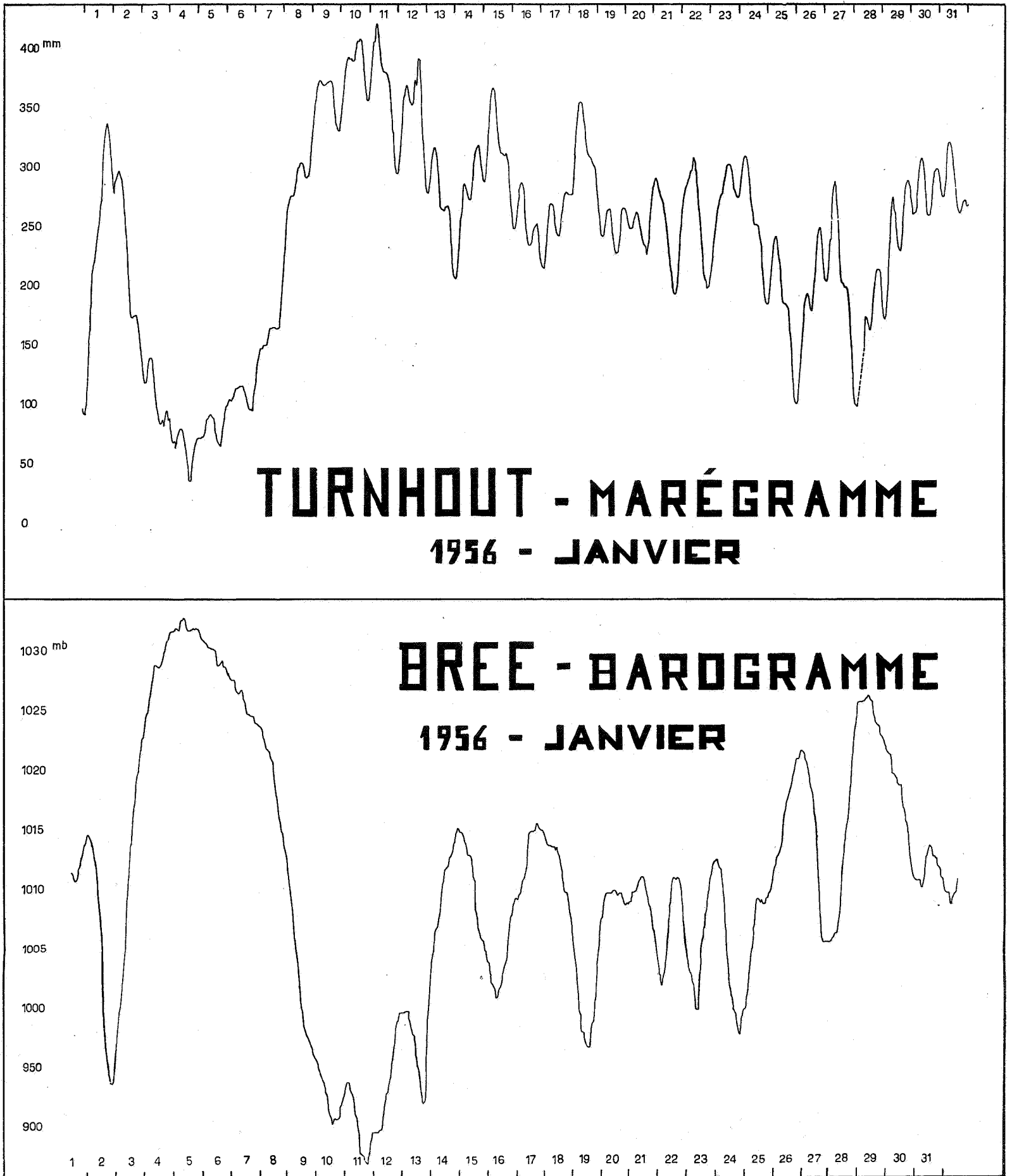


FIG. 1.

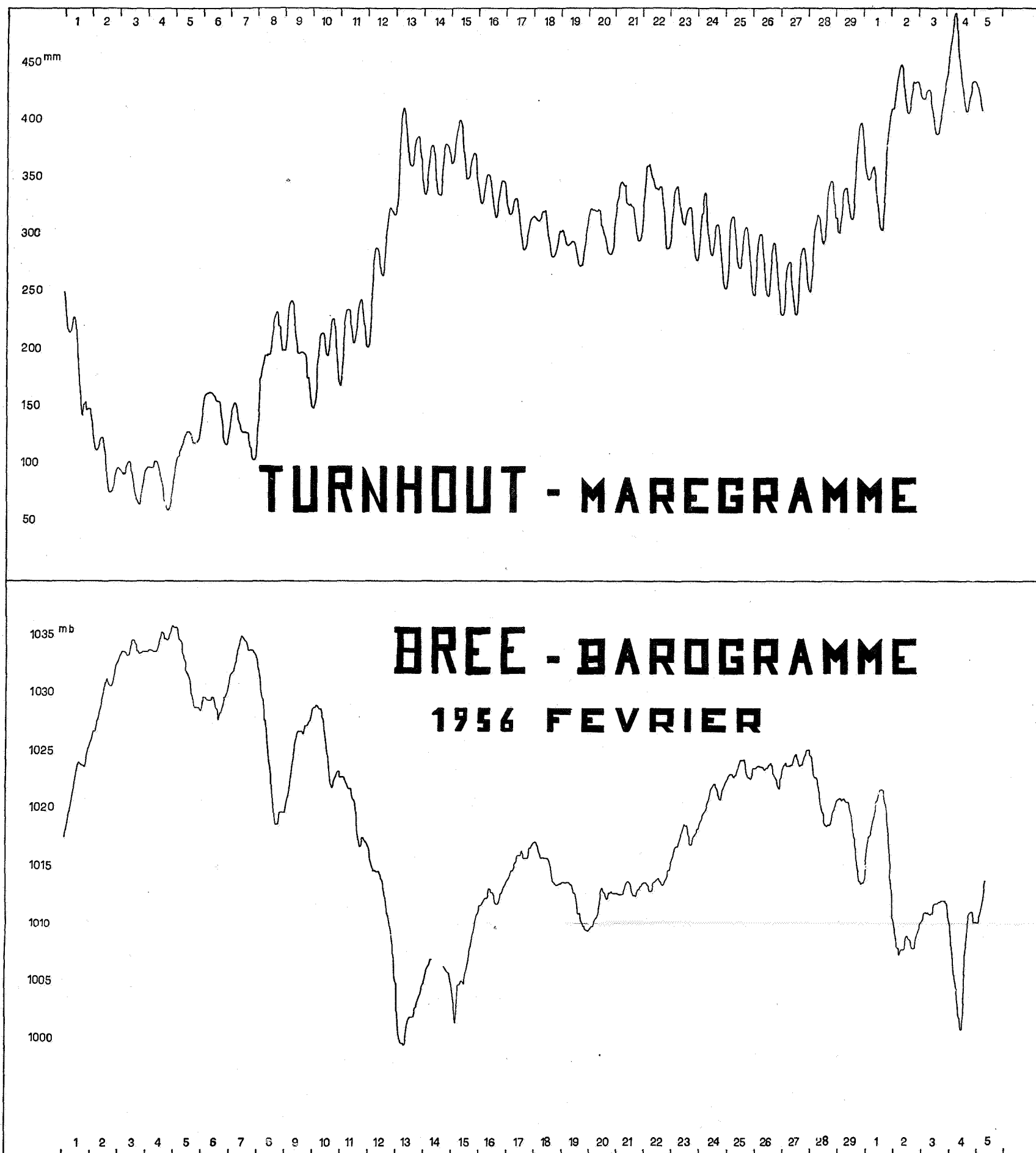


FIG. 1 (suite).

Les mesures de niveau et les dépouillements ont été effectués par les soins du Service Géologique de Belgique; la précision d'une lecture est en moyenne de 2 mm. A partir de ces dépouillements des enregistrements originaux, nous avons reproduit (fig. 1) les diagrammes, en modifiant évidemment l'échelle des temps. Ne disposant pas d'un barographe enregistreur à Turnhout même, nous avons pris en considération les variations de la pression atmosphérique à Bree d'après les enregistrements que nous a communiqués l'Institut Royal Météorologique de Belgique (fig. 1).

L'examen le plus sommaire de la figure 1 révèle que la nappe d'eau réagit comme un véritable baromètre à toute variation de pression et qu'il se superpose à cet effet principal une oscillation à courte période (semi-diurne à diurne). La présence de cette dernière oscillation n'est évidemment pas non plus pour surprendre puisqu'on connaît déjà par plusieurs exemples l'effet produit sur les nappes d'eau artésiennes par les marées terrestres (effets alternés de compressions et de dilatations) [1].

Nous avons soumis ces enregistrements de niveau à l'analyse mathématique, procédant en deux étapes : tout d'abord étude et élimination des variations de niveau irrégulières résultant des variations de la pression atmosphérique, ensuite mise en évidence des diverses ondes de la marée par l'analyse harmonique.

La période du 15 décembre au 31 décembre 1955, début des enregistrements, présente des anomalies et des accidents dans l'enregistrement; elle n'a pas été analysée.

2. Influence des variations de pression atmosphérique sur le niveau. — Les graphiques montrent que cet effet est prédominant dans les oscillations enregistrées. Les oscillations de marée étant nettement plus faibles et de période beaucoup plus courte, on a pu déterminer par moindres carrés le « coefficient d'efficacité » des variations de pression sur le niveau d'eau.

On a trouvé :

Pour le mois de janvier	+ 0,0840 millibar	} = - 1 mm d'eau.
Pour le mois de février	+ 0,0808 millibar	
et pour l'ensemble	+ 0,0824 millibar	

La dernière valeur, adoptée dans tous les calculs de réduction, repose ainsi sur la considération de 1.508 mesures horaires com-

binées de pression atmosphérique et de niveau d'eau. Le coefficient de corrélation a été trouvé égal à 0,993, ce qui correspond à la certitude du lien physique.

Il convient toutefois de noter que la station de Bree, bien que la plus proche de Turnhout, en est encore distante de 50 km, si bien que l'on doit faire quelques réserves quant à la perfection de l'élimination des effets de la pression atmosphérique dans les variations de niveau.

On a donc affranchi les courbes originales de l'effet des variations de pression, tenant compte de ce coefficient d'efficacité 0,0824 : les courbes résiduelles sont représentées à la figure 2. Elles ne sont pas exemptes de quelques perturbations ou dérives dont l'origine n'est pas toujours très claire. A partir du 28 janvier, une correction systématique de -87 mm a été appliquée, tandis qu'à partir du 1 février on corrigeait soigneusement d'une dérive linéaire évidente de $+5$ mm par jour.

On relève à première vue des variations d'une période de 7 à 8 jours. Il est difficile d'en fixer l'origine : on peut suspecter, comme nous l'avons dit, l'imperfection de l'élimination des effets atmosphériques ou peut-être faire une relation avec les phénomènes analogues observés dans les variations de l'intensité de la pesanteur par LECOLAZET et NEUMANN [2]. Des recherches ultérieures devraient être orientées en particulier sur ce fait et il ne serait pas sans intérêt de faire des mesures gravimétriques simultanées avec les mesures de niveau.

3. Ce sont les courbes corrigées de la figure 2 qui ont été soumises à l'analyse harmonique. Nous avons adopté la méthode de DOODSON et traité indépendamment trois séries de 31 jours [3, p. 10] :

I. — Du 31 décembre 1955 au 31 janvier 1956 ..	Époque 15 janvier 1956;
II. — Du 16 janvier 1956 au 15 février 1956	Époque 31 janvier 1956;
III. — Du 1 février 1956 au 2 mars 1956	Époque 16 février 1956.

Les séries I et III sont donc indépendantes et en combinant vectoriellement pour chaque onde les résultats qui en seront déduits, on obtiendra des résultats correspondant à tout l'ensemble des mesures.

La table I donne les résultats obtenus pour toutes les ondes principales (amplitude observée supérieure à 0,5 mm). On a apporté les corrections dues aux effets des ondes subsidiaires. Les coordonnées géographiques du puits sont $\varphi = 51^{\circ}19'26''$,

$\lambda = 4^{\circ}56'45''$ E. La latitude permet de calculer le rapport théorique des amplitudes des diverses ondes diurnes à l'amplitude théorique de l'onde M 2 (table I).

Dans la table II nous avons rappelé la signification et la vitesse horaire de chacune de ces ondes : on voit ainsi que les ondes J 1 et surtout K 1 sont très difficiles à isoler des effets météorologiques S 1; il en va de même évidemment de S 2. Par contre O 1 et surtout Q 1 s'en séparent très facilement. Ceci nous éclaire sur l'interprétation à donner aux résultats de la table I.

D'autres ondes mineures ont été mises en évidence, telles μ_2 , M₁, M₃, etc., mais leur amplitude n'est absolument pas significative et nous ne les reproduisons pas ici.

La plupart des calculs, faits en double, ont été effectués par M. BERNARD calculateur à l'Observatoire. Nous tenons à le remercier du soin qu'il y a apporté.

4. Interprétation des résultats. — Compte tenu de la précision des mesures (± 2 mm sur une lecture individuelle de niveau) et de la difficulté de séparation de certaines ondes des effets d'origine météorologique, la cohérence des résultats des deux mois traités indépendamment et l'accord avec la théorie des marées dans les puits doivent être considérés comme des plus remarquables. On sait, en effet, que les marées dans les puits sont en opposition de phase (c'est-à-dire que leur phase théorique serait 180°) par rapport à la marée théorique statique puisqu'elles sont dues à des effets de compressions et de dilatations exercés alternativement par l'écorce compressible sur la nappe d'eau lors de ses déformations provoquées par l'action du potentiel luni-solaire : la compression correspondant à la marée basse de l'écorce donne lieu à une hausse de niveau, donc à une marée haute dans le puits.

Outre la valeur de la phase qui est fixée à 180° par la théorie, les amplitudes doivent respecter les rapports que fixe entre elles la mécanique céleste et qui ont été indiqués à la table I également, l'amplitude de M 2 étant prise comme référence. On ne peut, en effet, prendre en considération que des amplitudes relatives, les amplitudes absolues n'ayant pas de sens tant que les dimensions de la nappe d'eau ne nous sont pas connues, ce qui est évidemment toujours le cas. Les valeurs individuelles correspondant à chacun des trois intervalles analysés permettent tout d'abord de se faire une idée de la

**OSCILLATIONS DU NIVEAU
APRÈS ÉLIMINATION DES EFFETS DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE
JANVIER 1956**

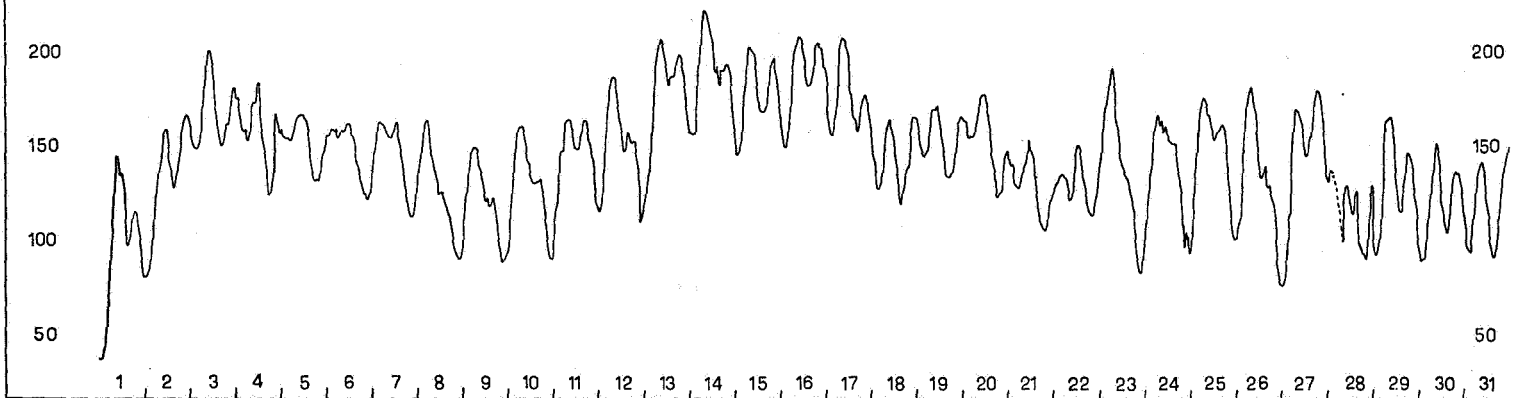


FIG. 2.

**OSCILLATIONS DU NIVEAU
APRÈS ÉLIMINATION DES EFFETS DE LA PRESSIION ATMOSPHERIQUE
FÉVRIER 1956**

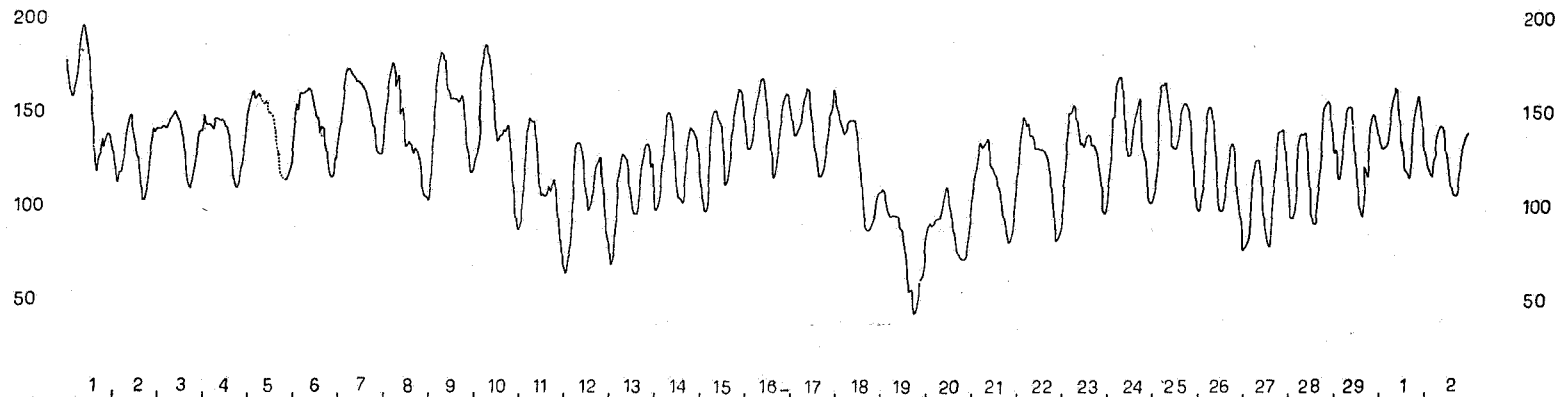


FIG. 2 (suite).

TABLE I. — Composantes de la marée dans la nappe artésienne de Turnhout (méthode de DOODSON).

Ondes	Phases			Amplitudes			Phases I/III	Amplitudes I/III mm	Amplitudes relatives	
	I	II	III	I	II	III			Observées	Théorie statique
Semi-diurnes										
M 2	186°6	188°6	183°6	14,78	14,76	14,92	185°1	14,84	—	—
N 2	193°5	190°9	157°8	2,51	2,75	2,28	176°6	2,28	0,154	0,194
L 2	167°5	191°7	291°0	0,66	1,07	0,85	242°4	0,37	0,025	0,028
S 2	212°6	213°3	205°8	6,94	6,75	6,58	209°3	6,75	0,455	0,460
Diurnes										
K 1	164°1	165°0	159°2	13,61	14,27	14,68	161°6	14,13	0,952	1,460
O 1	152°1	156°3	150°2	12,51	11,75	11,52	151°2	12,02	0,810	1,037
Q 1	181°2	165°3	175°8	2,33	3,85	2,35	178°5	2,34	0,157	0,201
J 1	258°1	304°8	144°3	2,32	1,43	0,83	238°9	0,93	0,063	0,082
OO 1	212°5	156°9	81°8	2,20	0,53	1,21	179°5	0,84	0,057	0,044

TABLE II.

Ondes	Signification	Vitesse horaire
Semi-diurnes		
M 2	Terme lunaire principal	28°9841042
N 2	Terme principal provenant de l'ellipticité de l'orbite lunaire	28°4397295
L 2	Terme secondaire provenant de l'ellipticité de l'orbite lunaire	29°5284789
S 2	Terme solaire principal	30°0000000
μ 2	Variation (effet des perturbations exercées par le soleil sur l'orbite lunaire)	27°9682084
Diurnes		
O 1	Terme lunaire principal	13°9430356
Q 1	Terme principal provenant de l'ellipticité de l'orbite lunaire	13°3986609
J 1	Terme mineur provenant de l'ellipticité de l'orbite lunaire	15°5854433
OO 1	Terme lunaire du second ordre	16°1391017
K 1	Terme luni-solaire	15°0410686
S 1	Terme provenant exclusivement des effets météorologiques	15°0000000

signification des résultats obtenus. Dans l'ensemble toutes les ondes principales ont des amplitudes bien significatives — sauf peut-être OO 1 dont la moyenne vectorielle est cependant en bon accord avec la théorie.

En ce qui concerne les phases, ce sont évidemment les ondes de faible amplitude qui donnent la dispersion la plus forte (L 2, J 1, OO 1) tandis que la moyenne vectorielle fondant les résultats des deux mois d'observations rapproche les caractéristiques de ces ondes mineures des conditions théoriques : ceci résulte des vertus de la moyenne d'un plus grand nombre d'observations.

TABLE III. — Puits à marée connus [4].

Puits	Latitude	Longitude	Altitude m	Caractéristiques Profondeur	Date	Amplitude totale mm	Dist. totale km	Auteur
EUROPE								
Lille, France	50°39' N.	3°03' E.	24	Un puits artésien	1840	?	60	ARAGO
Duchcov, Bohême	50°37' N.	13°44' E.		Mine inondée	1879	30	300	KLÖNNE
Londres, Angleterre (Kew Obs.) ..	51°28' N.	0°19' W.	5	Un puits	1918	0,4	70	BILHAM
Turnhout, Belgique	51°19' N.	4°57' E.	28	Sondage — 2.000 m	1956	60	90	MELCHIOR
AFRIQUE								
Tarka Bridge, Afrique du Sud ...	32°10' S.	25°37' E.	850	Six puits — 70 m	1913	40	100	YOUNG
Kiabukwa, Congo Belge	7°47' S.	27°13' E.	598	Source chaude	1953	170	1.500	MELCHIOR
AMÉRIQUE DU NORD								
Carlsbad, New-Mexico	32°18' N.	104°00' W.	900	Trois puits — 90 m	1939	21	900	ROBINSON, THEYS
Tooele County, Utah	40°36' N.	112°21' W.		—	1941	3	1.000	ROBINSON
Iowa City, Iowa	41°39' N.	91°32' W.	200	Puits — 250 m	1939	40	500	ROBINSON
Conchas Dam., New-Mexico	35°24' N.	104°11' W.		Plusieurs puits	1939	10	1.000	THEYS
East Tennessee	—	—		—	1955	?	600	RICHARDSON
Pecos, Texas	31°30' N.	103°50' W.	906	Puits artésien — 75 m	1951	3	700	GEORGE- ROMBERG.

On peut donc affirmer que l'on se trouve ici en présence d'une manifestation indiscutable de l'action des marées terrestres.

Dans plusieurs des cas connus précédemment (Dux, Carlsbad, Iowa) où l'analyse harmonique n'a pas été faite avec toute la rigueur désirable, on avait constaté que le rapport des amplitudes $S\ 2/M\ 2$ était systématiquement plus grand que ne le prévoit la théorie : 0,6 au lieu de 0,46.

L'étude de la source chaude de Kiabukwa (Congo Belge) située presque sur l'équateur ($\varphi = -7^\circ$) et l'étude présente relative à Turnhout ($\varphi = +51^\circ$) montrent qu'il n'en est rien et que le rapport $S\ 2/M\ 2$ est bien 0,46 comme le veut la théorie statique.

L'étude que nous avons faite à l'époque sur les variations de niveau à Kiabukwa avait été faite par la méthode de DARWIN, qui est d'ailleurs bien suffisante pour le but poursuivi et aussi pour la précision avec laquelle ces mesures sont exploitables, car aucune mesure de pression atmosphérique n'y avait été faite.

Toutefois, nous avons recalculé les ondes principales par la méthode de DOODSON sur trois intervalles indépendants :

- | | |
|---|-------------------------|
| I. — Du 27 décembre 1953 au 26 janvier 1954 . | Époque 11 janvier 1954; |
| II. — Du 28 janvier 1954 au 27 février 1954 ... | Époque 12 février; |
| III. — Du 5 mars 1954 au 4 avril 1954 | Époque 20 mars; |

dont les résultats sont repris dans la table IV ainsi que la combinaison vectorielle représentant les résultats globaux pour les trois mois d'observations.

On sait qu'à cette latitude les ondes diurnes sont pratiquement nulles; elles sont en outre fortement perturbées par les effets atmosphériques non éliminés, qui dans cette région ont un caractère d'exceptionnelle régularité diurne. On ne peut donc rien conclure de ces ondes dont les phases trouvées s'écartent considérablement de 180° , tandis que les phases des ondes semi-diurnes sont très voisines de cette valeur théorique.

Notons que le rapport $S\ 2/M\ 2 = 0,524$ est encore supérieur à 0,465 mais bien moins que dans les cas précédemment connus : on peut attribuer ce petit désaccord à la non-élimination des effets atmosphériques.

Dans l'étude précédemment publiée de Kiabukwa, les amplitudes données sont en réalité les doubles amplitudes. Il est préférable, pour éviter toute méprise, de se conformer à la règle habituelle en donnant l'amplitude proprement dite (semi-range), ainsi que nous l'avons fait ici dans les tables I et IV.

L'amplitude observée pour $M\ 2$ à Kiabukwa reste la plus forte jamais enregistrée : 7,53 cm.

TABLE IV.

Composantes de la marée dans la source de Kiabukwa
(méthode de DOODSON).

Ondes	Phases			Amplitudes			Phases I/III	Amplitudes I/III mm	Amplitudes relatives	
	I	II	III	I	II	III			Observées	Théorie statique
M 2	180°8	183°3	186°9	7,40	7,27	7,93	183°7	7,53	—	—
N 2	179°4	165°0	162°9	1,91	1,53	1,03	170°8	1,49	0,198	0,194
L 2	214°1	229°1	265°5	0,21	1,12	0,38	235°1	0,55	0,073	0,028
μ 2	167°8	169°8	210°1	0,91	1,48	0,36	174°1	0,89	0,118	0,023
S 2	182°4	183°7	181°7	3,58	3,78	4,48	182°6	3,95	0,524	0,465

CALCUL DE LA DILATATION CUBIQUE.

L'effet des dilatations cubiques dues aux marées terrestres se révèle donc dans bien des cas plus accessible à la mesure que les autres manifestations de ces déformations de la croûte. Ceci est évident a priori puisqu'il s'agit d'un effet « cubique ». On a pu mettre en évidence des ondes telles que L 2, O 1, Q 1, O 0 avec une précision qui n'a encore jamais été atteinte dans les observations au pendule horizontal ou au gravimètre, où l'extraction de ces composantes est assez illusoire. A titre d'exemple, dans les enregistrements interférométriques réalisés par MICHELSON pour les déviations de la verticale, le facteur d'amplitude $1 + k - h$ varie, d'un mois à l'autre, de 0,34 à 2,04 pour l'onde O 1, tandis qu'à Turnhout l'amplitude de cette onde est très significative (8 % de variation).

Malheureusement on ne peut faire une théorie complète de ces effets de dilatation cubique puisqu'on ne connaît pas la contenance du « réservoir » souterrain. On doit donc se borner à l'étude comparative des diverses ondes et l'on étudiera donc ici les amplitudes *relatives* à l'onde M 2, ainsi que cela a déjà été indiqué dans les tables I et IV.

H. JEFFREYS vient de faire connaître [3] les résultats numériques d'une étude très importante relative aux effets dynamiques du noyau fluide sur les composantes diurnes de la marée, qui, se représentant par des fonctions tesserales, perturbent la position du pôle moyen d'inertie et induisent ainsi des mouvements dans le noyau. Les marées semi-diurnes (fonctions sectorielles) et à longue période (fonctions zonales) n'affectant pas la position du pôle d'inertie n'impliquent pas ces mouvements dans le noyau et obéissent à la théorie statique. Il est donc logique de prendre la plus importante des ondes semi-diurnes M 2 comme référence pour la définition des amplitudes relatives.

Étant donné la précision des observations de niveau à Turnhout, on pouvait concevoir l'espoir de déceler dans les amplitudes relatives des diverses ondes diurnes un effet sensible de cette nature.

Pour ce faire, il faudrait exprimer la dilatation cubique D en fonction des nombres de Love $h k l$ [1] et introduire les valeurs numériques de JEFFREYS. Mais ceci n'est pas possible en général et l'étude des dilatations cubiques comporterait l'intervention d'un quatrième nombre de Love f . Une étude sommaire de la dilatation cubique [4] a montré que dans une étude préliminaire

on pourrait considérer D comme proportionnel à h ou mieux à 4 h — 6 l et l'on aurait pour les diverses ondes pour lesquelles JEFFREYS nous a déjà donné des résultats numériques :

Ondes.	4h-6l	Effet relatif.	Théorie statique.	Théorie corrigée.	Observations.
—	—	—	—	—	—
K 1	1,452	0,787	1,460	1,149	0,952
O	1,838	0,996	1,037	1,033	0,810
OO	1,600	0,868	0,044	0,038	0,057
M 2	1,844	—	—	—	—

Ainsi le désaccord le plus grand constaté à Turnhout — pour l'onde K 1 — tend à se réduire presque complètement si l'on tient compte même approximativement de la théorie dynamique de JEFFREYS pour les ondes diurnes.

Il faut encore remarquer que les dispersions observées pour ces différentes ondes diurnes étaient, relativement aux amplitudes :

$$K 1 : 1,07/14,13 = 0,076;$$

$$O 1 : 0,99/11,52 = 0,086;$$

$$OO : 1,67/0,84 = 1,988.$$

Le résultat obtenu pour O O n'est pas suffisamment significatif pour une telle recherche.

On fera cependant encore cette réserve que la phase trouvée pour K 1 est 161° alors que la théorie prévoit 180°. Il serait souhaitable que des mesures plus précises encore soient effectuées, avec une étude très soignée des effets de la pression atmosphérique grâce à l'installation du barographe au puits même.

Ces résultats montrent la pertinence de la remarque faite par W. D. LAMBERT dans son Rapport Général sur les marées terrestres présenté à l'Assemblée de l'UGGI à Bruxelles en 1951 : « *Il est entendu que le type d'appareil à employer ne sera pas limité au gravimètre et que toute sorte d'appareil pouvant faire ressortir la déformation de la Terre sous l'influence de la Lune et du Soleil doit concourir à la conclusion finale.* »

Les « dilatomètres », par suite de leur sensibilité, mettent en jeu des quantités dont la mesure est accessible aisément. Ils nous paraissent donc susceptibles d'apporter une contribution importante au problème des marées terrestres. L'idée de la construction d'un dilatomètre artificiel avancée autrefois par PEKERIS [5] mériterait d'être approfondie.

On peut calculer rigoureusement la dilatation cubique dans le cas de la théorie statique par la méthode d'intégration numérique de TAKEUCHI. Nous avons trouvé ainsi [4] :

$$D = 0,49 \frac{W_2}{ag};$$

on aura, pour l'onde M₂ dont l'amplitude théorique $\frac{W_2}{g}$ est de 24 cm à l'équateur :

$$D = 2.10^{-8} = DV/V \quad (a = 6,37.10^8 \text{ cm}).$$

Sachant qu'à Kiabukwa l'amplitude de la marée était de 7,5 cm dans un réservoir de 2 m/4 m, on en déduirait $DV = 6.10^5 \text{ cm}^3$ et par conséquent $V = 30$ millions de mètres cubes.

A Turnhout, la hauteur de la marée M₂ est de 1,5 cm dans un tubage de 22 cm de diamètre, c'est-à-dire que $DV = 6.10^2 \text{ cm}^3$. Comme d'autre part $\cos^2 \varphi = 0,4$ on aurait $V = 80.000 \text{ m}^3$.

Ces chiffres représentent la quantité d'eau qui en milieu strictement fermé donnerait lieu à une marée de même amplitude que celle que nous observons. Ils n'ont pas d'autre sens et il est bien évident que le milieu n'est jamais complètement fermé par suite de la porosité des couches qui l'enferment et aussi par suite des connexions avec des nappes d'alimentation. Ces chiffres pourraient tout au plus avoir un intérêt au point de vue différentiel, en ce sens que la valeur très élevée observée à Kiabukwa vis-à-vis de Turnhout pourrait être liée à la nature des terrains. Dans ce cas le résultat obtenu pour Kiabukwa serait sans doute plus proche de la réalité.

Nous tenons à remercier chaleureusement M. A. GROSJEAN, Directeur du Service Géologique de Belgique, qui a fait procéder aux mesures de niveau et qui a porté un très vif intérêt à cette étude.

Nous avons eu avec lui ainsi qu'avec M. le Prof. Y. DE MAGNÉE des discussions fructueuses dont nous leur sommes très reconnaissant. Nous tenons aussi à remercier cordialement M. GULINCK pour l'esprit de collaboration amicale dans lequel nous avons travaillé.

BIBLIOGRAPHIE.

1. MELCHIOR, P., Les marées terrestres. (*Monog. Obs. roy. Belg.*, n° 4, 1954.)
— Les divers aspects des marées terrestres (*B. S. B. G.*, LXIV, 2, 1955, pp. 252-301.)
 2. LECOLAZET et NEUMANN, Variation périodique de la gravité. (*C. R. Comité Nat. Français Géodésie Géophysique*, 1954, pp. 71-72.)
 3. Commission pour l'étude des marées terrestres. (Groupe XIII — Gravitométrie — du Comité Spécial pour l'A.G.I.) Rapports et recommandations. (*Comm. Obs. roy. Belg.*, n° 100, Série Géophysique, n° 36, 1956.)
 4. MELCHIOR, PAUL J., Sur l'effet des marées terrestres dans les variations de niveau observées dans les puits, en particulier dans le sondage de Turnhout (Belgique). (*Ibid.*, n° 108, Série Géophysique, n° 37, 1956.)
 5. LAMBERT, W. D., Rapport sur les marées de l'écorce terrestre. (*Travaux Assoc. Géodésie, Rapports Généraux VII^e Assemblée Washington, 1939* ou bien *U. S. Coast and Geodetic Survey Sp.*, Publ. 223, pp. 25-33, 1940.)
 6. SPERLING, K., Gibt es Gezeiteneinflüsse im Erdölförderbetrieb? (*Erdöl und Kohle*, 6, n° 8, pp. 446-449, 1953.)
-