

P 502/1

Découvrez plus de documents  
accessibles gratuitement dans [Archimer](#)

EXCLU DU PRÊT



Publications du  
**Centre National pour l'Exploitation des Océans**  
**( C N E X O )**

Série : Rapports scientifiques et techniques  
N° 29 - 1976

**LA MARÉGRAPHIE AU LARGE**

*par*

*J.-L. HYACINTHE*



PUBLICATIONS DU  
CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS  
( C N E X O )

Rapport Scientifique et Technique N° 29

MAREGRAPHIE AU LARGE

par

J. L. HYACINTHE

Contribution n° 299  
du Département Scientifique  
du Centre Océanologique de Bretagne  
B.P. 337 - 29273 BREST Cédex



Le principe de la mesure de la marée au large à l'aide d'un manomètre différentiel, dans lequel une membrane est soumise d'un côté à la pression variable de la colonne d'eau et de l'autre à une pression gazeuse de variation connue avec la température, remonte à la fin du siècle dernier (Ingénieur Hydrographe FAVE).

A partir d'un capteur à corde vibrante TELEMAC, l'Association Française pour l'Etude des Grandes Profondeurs Océaniques et l'Ingénieur Hydrographe EYRIES avaient développé un prototype apparaissant comme une maquette de faisabilité.

Le COB, en conservant le même principe de mesure et le même capteur, est passé au stade de l'appareil complètement développé et facilement utilisable à la mer. On trouvera dans ce rapport scientifique et technique la description de l'instrument réalisé et la méthode d'analyse écrite pour le cas particulier des mesures au large.

Si le capteur a déjà donné lieu à des mesures satisfaisantes de marée (Eyriès 1964, COB 1970), il semble cependant que le domaine de la marégraphie au large nécessite de la part de celui qui s'y intéresse le développement d'un type de patience particulier même pour l'océanographe procédant à des mesures en mer, ainsi que l'acceptation de nombreux aléas et accidents de parcours. Cela a été vérifié sur les expériences étrangères et se vérifie sur la notre : deux mouillages d'un mois réussis sur le seuil Groenland-Faroe pendant Overflow 73 n'ont pu donner lieu à un dépouillement valable et un appareil mouillé pendant l'expérience d'intercomparaison d'octobre 73 n'a pas pu être encore récupéré.

Il n'en demeure pas moins que l'appareil français est l'un des rares appareils permettant de mesurer la marée jusqu'à 6 000 m de profondeur et d'apporter ainsi une importante contribution à l'océanographie. Toutefois, avant de procéder à nouveau à des mesures en mer que l'on veut couronnées de succès, des essais de longue durée de l'électronique de fiabilité accrue réalisée par des moyens industriels auront lieu au voisinage du marégraphe du port de BREST, ainsi que des essais dans le grand caisson 1 000 bars, dont l'installation est prévue au COB, afin de progresser significativement dans le problème de l'étalonnage des capteurs.

## Chapitre I - Marémètre enregistreur

Un marémètre toutes profondeurs a été développé par le Centre Océanologique de Bretagne du CNEXO. Il comporte : un capteur à deux cordes vibrantes donnant la pression différentielle et la température avec des précisions de 0,5 cm et 5 m°C, un système associé de pression de référence, et, dans un conteneur d'acier inoxydable, une électronique à base de circuits digitaux MOS avec un enregistreur magnétique incremental à haute densité et à faible consommation. La résistance du conteneur d'électronique limite seule la profondeur maxima de travail à 6 000 m. Avec la sensibilité du capteur de pression, les traits les plus importants du marémètre sont l'importance du temps d'enregistrement autorisée (plus de 6 mois) et l'adaptabilité de l'instrument : celui-ci peut être utilisé avec un courantomètre Aanderaa modifié et une ligne de mouillage dans une configuration faible profondeur ou bien avec un release acoustique associé et un lest dans la configuration grande profondeur. La récupération normale se fait par le moyen du release acoustique (ou de son horloge de déclenchement en sécurité) ; dans la configuration faible profondeur, la récupération par dragage est également possible.

### Système de pression de référence

La mesure de la marée est faite par le moyen de la pression au fond avec un capteur différentiel nécessitant un système de pression de référence. Les composantes principales de ce système sont :

- un accumulateur hydropneumatique du type "transfert" d'environ 5 l de capacité,
- un détendeur de plongée classique,
- un clapet de surpression.

Quand l'appareil est descendu au fond de la mer, dans une première phase le détendeur fournit au capteur de l'azote sec à la pression ambiante ; cet azote provient de l'accumulateur où il est à une pression initiale dépendant de la profondeur de travail : 200 bars pour 6 000 m, soit une pression accessible par les moyens habituels. Dans une seconde phase, quand la pression intérieure à l'accumulateur devient égale à la pression ambiante exté-

rière, de l'huile à la pression de l'eau de mer entre dans l'accumulateur et comprime directement l'enveloppe plastique contenant l'azote. Sur le fond, une vanne commandée électriquement ferme la communication avec le capteur dont la pression intérieure, très proche de la pression ambiante moyenne, joue le rôle d'une pression de référence. Quand l'appareil revient en surface, l'ouverture mécanique de la même vanne sous l'effet de la différence de pression autorise l'échappement de l'azote par le clapet de surpression. La canalisation n'est prévue pour la haute pression qu'entre l'accumulateur et le détendeur ; entre le détendeur, le capteur et le clapet de surpression, elle est réduite à une canalisation souple.

### Capteur

Le "témoin sonore" est une technique extensométrique mise au point en 1928 pour la surveillance du comportement des barrages-voute : la sensibilité, la solidité et l'absence de dérive de la corde vibrante permettant les mesures de longue durée dans des conditions physiques très variables. De plus, la mesure de fréquence est facile et se prête à un taux d'échantillonnage adaptable.

Le capteur Télémac est un cylindre d'acier inoxydable de 90 cm de long et de 10 cm de diamètre avec, en atmosphère d'azote pressurisé, deux cordes d'acier inoxydable d'environ 10 cm de long vibrant dans un champ magnétique. Pour chaque corde, il y a deux électroaimants alimentés en courant sinusoïdal, l'un d'entretien et l'autre d'écoute. Une extrémité de la corde manométrique est attachée à un châssis rigide et l'autre extrémité à un diaphragme d'acier inoxydable de 2 mm d'épaisseur et de 5 cm de diamètre. La pression sur le fond, après filtrage mécanique d'éventuelles variations à courte période dans un réservoir de fluide intermédiaire, agit sur le diaphragme. La déformation du diaphragme, toujours éloignée de la limite élastique, entraîne une variation dans la tension du fil dont la fréquence naturelle de vibration est modifiée. Entre la fréquence  $N$  et la variation de pression  $\Delta P$  existe une loi quadratique

$$\Delta P \sim K_p (N^2 - N_0^2)$$

C'est le fait que la corde vibrante est soumise à un effort de tension relativement faible qui lui donne sa qualité de sensibilité et d'absence de dérive.

Avec des fréquences d'environ 800 Hz et un  $\Delta P$  donné en mètres d'eau, le coefficient  $K_p$  est d'environ  $- 1,96.10^{-4}$  correspondant pour le capteur à une sensibilité d'environ  $- 0,3$  m/Hz. Echantillonnée sur 100 secondes, la fréquence est mesurée avec une précision de  $10^{-2}$  Hz, ce qui fournit une résolution de 0,3 cm. Pour la correction des variations thermiques de la pression de référence, importante pour les grandes profondeurs, des mesures de température avec une résolution de l'ordre du  $m^\circ C$  sont nécessaires. Elles sont obtenues par l'intermédiaire d'une seconde corde dite corde thermométrique attachée à un châssis en invar, et dont la dilatation linéaire sous l'effet de la température modifie la tension et donc la fréquence naturelle. Le coefficient  $K_t$  de la loi parabolique est d'environ  $- 1,25.10^{-4}$  correspondant pour le capteur à une sensibilité de  $- 0,2^\circ C/Hz$  et à une résolution de  $2 m^\circ C$ .

L'expérience a montré que la longueur de la corde est essentielle pour éviter une dérive importante. La fourniture d'énergie aux cordes doit être considérée avec attention compte-tenu de la viscosité de l'azote sous haute pression. La vibration est de faible amplitude et l'adaptation de phase de l'entretien automatique garantit une vibration à la fréquence propre et non à une fréquence forcée. Afin d'éliminer les calories dues à la compression de l'azote dans le capteur et pour obtenir un équilibre thermique, quelques heures s'écoulent, après que l'appareil est sur le fond, avant de refermer la vanne de communication du capteur. Des variations de 15 % (entre 0 et 5 000 m de profondeur de travail) ont été constatées sur le coefficient  $K_p$  d'un même capteur. Pour nous, ces variations sont dues à des modifications sous l'effet de la pression de la condition d'encastrement de la bordure du diaphragme entraînant par une flèche initiale un décalage dans la déformation de celui-ci pour une même différence de pression. C'est le fait même de cet encastrement et, par suite de l'assemblage de matériaux différents, des contraintes différentielles sous l'effet de la température pouvant apparaître dans le châssis de la corde manométrique, qui rendent indispensable un étalonnage dans toute la gamme des profondeurs de travail pour chacun des capteurs utilisés.

## Electronique et système d'enregistrement

Les mesures de fréquence sont faites avec une résolution de  $10^{-2}$  Hz avec un temps de comptage (et de prise de moyenne) de 100 s sur chaque intervalle d'échantillonnage de 5 mn. Comme les fréquences mesurées ne varient que lentement et en tirant partie des sensibilités des cordes, des compteurs de 10 bits binaires sont utilisés pour mémoriser les trois chiffres décimaux les moins significatifs des fréquences exprimées en  $10^{-2}$  Hz. Ces bits sont enregistrés sur la bande magnétique et suffisent pour suivre par continuité la variation des paramètres mesurés. Toutefois, pour éviter des erreurs, chaque heure une mesure supplémentaire est faite avec les mêmes compteurs mais avec un temps de comptage de 1 s et les trois chiffres décimaux des fréquences données en Hz sont enregistrés.

Aux 10 bits de chaque mesure de fréquence s'ajoutent un bit de type de mesure et un bit de parité : en conséquence une suite de 24 bits est enregistrée à chaque temps d'écriture avec une vitesse de 64 caractères par seconde. Avec 13 mesures par heure, l'autonomie de 6 mois correspond à environ  $1.5 \cdot 10^6$  bits. Sur la bande magnétique, un intervalle de 3 bits est laissé avant chaque mesure pour la synchronisation en lecture et un intervalle plus long est laissé toutes les heures pour autoriser la lecture par blocs de données sur une heure. Finalement, la capacité nécessaire est de l'ordre de  $2 \cdot 10^6$  bits.

En conséquence, nous avons choisi un enregistreur digital incremental à haute densité et à faible consommation de marque MEMODYNE, série 200, utilisant des cassettes de bande magnétique de type certifié : à la densité d'enregistrement standard de 615 BFI, on peut stocker plus de  $2 \cdot 10^6$  bits sur une bande de 300 pieds. Les circuits logiques CMOS nécessitent seulement en alimentation fournissant 54 mA pendant l'enregistrement et  $2 \mu\text{A}$  entre les périodes d'enregistrement. Les caractéristiques de faible encombrement et de faible poids permettent d'adapter facilement l'enregistreur à notre électronique. Pour la lecture des bandes, on utilise une adaptation du système de lecture seule modèle 122 avec sortie sur une bande perforée compatible avec notre ordinateur.

.../..

Outre les mesures de fréquence, l'ensemble électronique remplit les autres fonctions suivantes :

- fermeture de la vanne de pression de référence avec un délai variable pouvant aller jusqu'à 8 heures,

- commande de mise en marche d'un courantomètre extérieur à chaque séquence de mesure normale,

- information journalière : chaque jour, une mesure de température est remplacée par un numéro de jour lu dans un compteur spécial,

- sortie auxiliaire pour mise en route, avec une légère avance sur la séquence de mesure, d'un enregistreur extérieur ou d'une transmission à distance,

- possibilité de test à une cadence 16 fois plus rapide et sur des fréquences données simulant le capteur.

Un oscillateur à quartz (avec une température d'inversion à 15 °C) est utilisé pour contrôler les différentes fonctions en temps nécessaires. Sa dérive est d'environ  $7.10^{-6}$  ou encore d'1 s par jour ou encore de 3 mn sur une période de mesure de 6 mois, c'est à dire une valeur inférieure à l'intervalle de temps d'échantillonnage.

Le bloc alimentation comprend, pour une autonomie de 6 mois, une pile au mercure 6 V 12 Ah pour l'électronique, 3 piles au mercure 4 V 2 Ah pour le moteur de l'enregistreur et un accumulateur Cd-Ni 12 V 0,5 Ah pour brûler le fusible permettant de fermer la vanne de pression de référence.

Le tableau de contrôle comprend les points tests, les commutateurs de commande et les boutons de remise à zéro.

L'électronique et l'alimentation sont montées sur un châssis attaché au couvercle, de leur container afin d'être facilement extrait pour la maintenance et la mise en place des cassettes.

### Description de l'appareil

Un cylindre d'acier inoxydable Z2 CND 17.13 de 2,4 cm d'épaisseur et de dimensions intérieures diamètre 20 cm, longueur 48 cm, assure la protection de l'électronique avec l'enregistreur et l'alimentation. Les

connections électriques aux composants extérieurs du système que sont le capteur et éventuellement le courantomètre AANDERAA sont réalisées par des connecteurs et des cordons MARSH and MARINE.

Dans la configuration faible profondeur, ce container d'électronique, le capteur et les composants du système de pression de référence sont montés sur un châssis tubulaire pour la protection, la manipulation et le mouillage. Il est possible d'ajouter sur ce châssis un courantomètre enregistreur AANDERAA modifié modèle 5 (profondeur de travail 6 000 m). Dans ce cas, le container AANDERAA est utilisé avec son électronique et une cellule de conductivité et avec une connexion électrique :

- au container de l'électronique du marégraphe dont l'horloge est utilisée pour ce déclenchement de mesures extérieures : les vitesses de courant et la direction sont donc mesurées en même temps que les variations de hauteur de la colonne d'eau,

- à un container spécial avec le rotor habituel du courantomètre et un capteur de direction de vent. Le container est suspendu de manière à rester vertical pour une position inclinée du châssis de l'instrument.

Toutes les parties métalliques sont faites généralement dans le même matériau (acier inoxydable) mais, pour éliminer complètement la corrosion électrolytique, des anodes solubles de Zn sont placées sur chaque composant et une peinture vernis polyuréthane est utilisée. Cette configuration est utilisée avec une ligne de mouillage terminée par un système séparé de largueur de lest muni de balises de signalisation (radio et lumineuse) se déclenchant lorsque cette extrémité de la ligne de mouillage est revenue en surface. L'instrument complet a pour dimensions 110 cm x 55 cm x 55 cm et le poids est de 160 kg dans l'air et de 110 kg dans l'eau.

Pour la configuration grande profondeur, le container de l'électronique, le capteur, les composantes du système de pression de référence et un dispositif de largage AMF sont attachés directement à un châssis instrumental posé sur un disque de fonte jouant le rôle de lest et retenu par le crochet du système largueur. L'appareil entier, avec son lest, mesure environ 170 cm de haut et 70 cm de diamètre ; son poids est d'environ 350 kg dans l'air et 230 kg dans l'eau.

### Equipement de bord, opération en mer et configuration de mouillage

A bord, après les tests électroniques et la mise en route, juste avant la mise à l'eau de l'instrument, l'intérieur du container d'électronique est rincé au fréon puis rempli du même gaz sous une faible surpression afin de permettre une éventuelle détection de fuites avec un détecteur de fréon. La même opération est faite avec le release AMF. Deux dates doivent être choisies : l'une pour la fermeture de la vanne de pression de référence (suivant la profondeur), l'autre pour l'horloge de déclenchement en secours du release.

La configuration grande profondeur est mise à l'eau avec une flottabilité réalisée à partir de sphères de verre Corning Glass de 16" de diamètre sur une ligne de nylon d'environ 500 m terminée par un flotteur avec des balises ERJI lumineuse et radio 27 MHz actionnées par un bouton de pression. La communication entre le navire et l'appareil est limitée au système largueur : l'équipement de bord comprend un modèle 200 AMF (codeur, récepteur, amplificateur de puissance et transducteur) pour :

- déclencher le pinger acoustique du largueur AMF modèle 253 afin de déterminer la position du navire relative à l'appareil et pour servir de balise acoustique de repérage pendant la récupération,

- larguer le lest afin d'autoriser le retour en surface de l'appareil ; en surface, des relèvements sont obtenus par un récepteur radio portatif OAR.

Dans la configuration faible profondeur, le lest est une chaîne de 200 kg directement attachée au release AMF suspendu à une flottabilité réalisée à partir de 3 sphères Corning Glass et portant les balises de repérage. Cette flottabilité est à l'extrémité d'une ligne de mouillage attachée à l'instrument. A la mise à l'eau, l'appareil est d'abord descendu sur le fond puis le lest est lâché à une certaine distance de l'appareil, variable suivant la profondeur. La ligne de mouillage intermédiaire est en nylon et demeure suspendue en subsurface au-dessus du fond par l'intermédiaire de quelques sphères Corning Glass de 8" de diamètre.

# MARÉMÈTRES DÉVELOPPÉS AU CENTRE OCÉANOLOGIQUE DE BRETAGNE



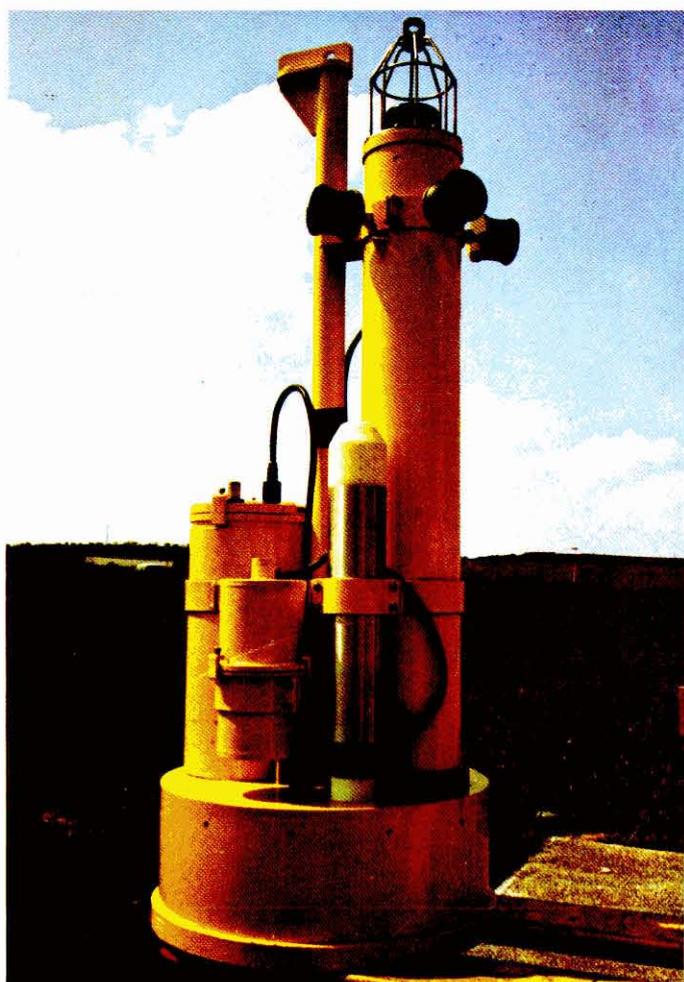
Ph. 1. — Configuration faible profondeur avec son courantomètre.



Ph. 2. — Configuration faible profondeur électronique apparente.



Ph. 3. — Configuration grande profondeur côté système de pressurisation.



Ph. 4. — Configuration grande profondeur côté capteur.

## Chapitre II - Méthode d'analyse

### Introduction

Le dépouillement de mesures de marée au large nous a amenés à définir une méthode propre d'analyse tenant compte des caractéristiques de ces mesures : elles ne sont pas systématiques, peuvent avoir des durées variables avec des temps d'échantillonnage divers, peuvent ou non être rattachées à une station de référence voisine, proviennent d'appareils pouvant présenter des dérives en temps et en hauteur mesurée. Classique dans son principe, la méthode utilisée se rattache à l'analyse harmonique par la méthode des moindres carrés. Elle a donné lieu à un programme Fortran écrit pour l'ordinateur IBM 1130 du COB/DS.

### Analyse harmonique par la méthode des moindres carrés

Suivant l'usage établi par Doodson, on introduit, pour plus de commodité dans les calculs, l'origine dite de temps central en notant les hauteurs observées (en nombre impair  $2n + 1$ , et à des intervalles de temps  $\Delta t$ )  $\zeta_d$  avec  $d = -n, \dots, 0, \dots, +n$  : l'observation centrale,  $d = 0$ , est supposée faite à  $t = 0$ . La série harmonique pour  $N$  composantes de vitesse angulaire  $\omega_q$  ( $q : 1$  à  $N$ ) sera écrite

$$\zeta(d) = \bar{\zeta} + \sum_{q=1}^N (C_q \cos \omega_q d \Delta t + D_q \sin \omega_q d \Delta t)$$

Les valeurs du niveau moyen  $\bar{\zeta}$  et des coefficients  $C_q$  et  $D_q$  rendant minima la quantité

$$u^2 = \sum_{d=-n}^{+n} \left[ \zeta(d) - \zeta_d \right]^2$$

vérifient les équations, dites équations normales

.../...

$$\left\{ \begin{array}{l} (2n+1) \bar{\zeta} + \sum_{v=1}^N C_v S(\omega_v) = \sum_{d=-n}^n \zeta_d \\ S(\omega_q) \bar{\zeta} + \sum_{v=1}^N \frac{1}{2} C_v \left[ S(\omega_v - \omega_q) - S(\omega_v + \omega_q) \right] = \sum_{d=-n}^n \zeta_d \cos \omega_q d \Delta t \\ \sum_{v=1}^N \frac{1}{2} D_v \left[ S(\omega_v - \omega_q) + S(\omega_v + \omega_q) \right] = \sum_{d=-n}^n \zeta_d \sin \omega_q d \Delta t \end{array} \right.$$

dans lesquelles on a introduit la notation :

$$S(\omega) = \frac{\sin (2n+1) \frac{\omega \Delta t}{2}}{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}}$$

### Description du programme

Dans deux fichiers permanents sur disque sont écrits :

- une liste de 72 composantes fondamentales ou harmoniques se décomposant en :

- . 10 ondes de longue période : Sa, Ssa, Sta, MSm, Mm, MSf, Mf, MStm, Mtm, MSqm,
- . 19 composantes diurnes : 2Q<sub>1</sub>, σ<sub>1</sub>, Q<sub>1</sub>, ρ<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, τ<sub>1</sub>, M<sub>1</sub>, X<sub>1</sub>, Π<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, Ψ<sub>1</sub>, φ<sub>1</sub>, θ<sub>1</sub>, J<sub>1</sub>, SO<sub>1</sub>, OO<sub>1</sub>, KQ<sub>1</sub>,
- . 18 composantes semi-diurnes : QQ<sub>2</sub>, ε<sub>2</sub>, 2N<sub>2</sub>, μ<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, ν<sub>2</sub>, OP<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, MK<sub>2</sub>, λ<sub>2</sub>, L<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, R<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, MSN<sub>2</sub>, η<sub>2</sub>, 2SM<sub>2</sub>,
- . 5 composantes 1/3 diurnes : MO<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, MK<sub>3</sub>, SK<sub>3</sub>,
- . 7 composantes 1/4 diurnes : MN<sub>4</sub>, M<sub>4</sub>, SN<sub>4</sub>, MS<sub>4</sub>, MK<sub>4</sub>, S<sub>4</sub>, SK<sub>4</sub>,
- . 7 composantes 1/6 diurnes : 2MN<sub>6</sub>, M<sub>6</sub>, MSN<sub>6</sub>, 2MS<sub>6</sub>, 2MK<sub>6</sub>, 2SM<sub>6</sub>, MSK<sub>6</sub>,
- . 6 composantes 1/8 diurnes : 3MN<sub>8</sub>, M<sub>8</sub>, 2MSN<sub>8</sub>, 3MS<sub>8</sub>, 2(MS)<sub>8</sub>, 2MSK<sub>8</sub>.

Pour chacune de ces composantes le fichier comprend un numéro d'onde, les coefficients de Doodson, i, j, k, l, m, n, le terme correctif de l'argument pour se ramener à un cosinus et à un coefficient positif

dans le développement, le coefficient dans le développement de Doodson pour les ondes fondamentales, les numéros des ondes composantes pour les ondes harmoniques.

- un développement de Doodson en 380 termes du potentiel générateur de marée déduit de la publication "Développement type du potentiel générateur de marée", lettre circulaire n°4-H, mai 1954 de International Hydrographic Review :

$$V = \sum_{i=0}^3 \left[ G_i(\phi) \sum_{j,k,l,m,n=-6}^{+6} A_{ijklmn} \cos V_{ijklmn} + G'_i(\phi) \sum_{j,k,l,m,n=-6}^{+6} B_{ijklmn} \sin V_{ijklmn} \right]$$

où

$$V_{ijklmn} = i\tau + js + kh + lp + mN' + np_s$$

avec  $i, j, k, l, m, n$ , coefficients de Doodson et la valeur de  $A_{ijklmn}$  ou  $B_{ijklmn}$  pour chaque composante. Les coefficients géodésiques  $G_i$  et  $G'_i$  ainsi que les éléments astronomiques  $\tau, s, h, p, N', p_s$  sont calculés dans le programme. Rappelons que  $\tau$  est un temps lunaire.

En entrée du programme sont données pour des composantes, parmi les 72 données ci-dessus, retenues pour l'exécution de l'analyse considérée, les constantes harmoniques  $H'_q$  et  $G'_q$  à une éventuelle station de référence : si on veut faire l'analyse sans station de référence, les  $G'_q$  sont faits égaux à 0 et les  $H'_q$  sont égalés au coefficient de l'onde dans le développement de Doodson. En entrée également, les numéros initiaux et finaux du segment de  $n$  enregistrements retenus pour analyse. Deux "gardes" d'au moins 24 cartes sont laissées pour le lissage. Sont donnés également le temps d'échantillonnage  $\Delta t$  en fraction d'heure, les dérives en pression et en temps de l'appareil, la latitude, une fréquence supérieure de lissage  $\omega_s$  et un coefficient  $K$  pour le critère de résolution de Rayleigh ; enfin, le jour initial en calendrier julien et l'instant initial en T.U..

Le programme effectue ensuite les opérations suivantes :

.../...

1. - calcul des éléments astronomiques  $s, h, p, N', p_s$  pour le "temps central"  $t_c$  du segment analysé
- calcul des coefficients géodésiques  $G_i(\varphi)$  et  $G'_i(\varphi)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) pour la latitude de  $\varphi$  du point d'observation
- calcul de l'argument astronomique  $V_{ijklmn} = V_q$  des composantes retenues pour le temps central  $t_c$  (avec terme correctif en  $-\frac{\pi}{2}$  ou (et)  $-\pi$  pour se ramener d'un sinus ou (et) d'un coefficient négatif à un cosinus avec un coefficient positif dans le développement de Doodson
- calcul de la vitesse angulaire des composantes retenues  $\omega_q$
- calcul de l'intervalle de vitesse angulaire minimum pouvant donner lieu à résolution suivant un critère de Rayleigh corrigé par un coefficient  $K$  pouvant être choisi entre 0,8 et 1

$$\Delta\omega = K \frac{2\pi}{n\Delta t}$$

- détermination des composantes non séparables du niveau moyen et de blocs de composantes séparables sur l'enregistrement ; à chaque bloc est affectée la vitesse angulaire de la composante la plus importante de ce bloc
- pour toutes les composantes retenues, calcul de la modulation nodale  $f_q$  et  $u_q$  pour le temps central  $t_c$ . Pour cela, en utilisant le fichier du développement de Doodson, on rapporte la somme géométrique des ondes du même sous-groupe (mêmes valeurs des 3 premiers coefficients de Doodson  $i, j, k$ ) à l'onde composante  $q$  considérée :

$$f_q e^{iuq} = \frac{\sum_{lmn} (G A_{lmn} - i G' B_{lmn}) e^{2i\pi V_{lmnr}}}{G A_q - i G' B_q}$$

- calcul des coefficients  $L_s$  d'une formule de lissage des hauteurs données par l'enregistrement : le lissage fait intervenir 48 hauteurs réparties par moitié de part et d'autre de la hauteur à lisser et ne

.../...

laisse passer que les vitesses angulaires comprises entre 0 et une valeur  $\omega_s$  en faisant la sommation des hauteurs de rang  $s$  ( $s = -24$  à  $+24$ ) affectées du coefficient de lissage :

$$L_s = \frac{\sin s \omega_s \Delta t}{s \tau} \cdot \frac{\sin \frac{s \tau}{49}}{\frac{s \tau}{49}}$$

La fraction en  $\frac{s \tau}{49}$  est un facteur de Lanczos introduit pour supprimer le phénomène de Gibbs dû au fait que l'on prend un nombre fini de termes pour le filtrage. Dans le programme, le lissage est optionnel et peut être supprimé en introduisant en donnée une valeur nulle pour  $\omega_s$ .

2. - lecture des hauteurs données (valeurs entières ramenées au centimètre le plus proche) par cartes groupant 24 hauteurs successives,
  - translation de temps par interpolation pour que les instants de mesure passent par des heures T.U. rondes ( $\Delta t$  est un sous multiple entier de 3 600 s),
  - correction des dérives éventuelles en temps et en hauteur mesurée de l'appareil,
  - lissage comme indiqué plus haut,
  - calcul des seconds membres des équations normales écrites au paragraphe précédent,
3. - calcul des coefficients des premiers membres des équations normales,
  - résolution en  $\bar{h}$ ,  $C_q$ ,  $D_q$  du système linéaire par la méthode de Gauss modernisée : élimination par addition après mise sous forme triangulaire. La symétrie des coefficients des équations normales est utilisée pour réduire le nombre de mémoires utilisé et autoriser une inversion de matrice symétrique de rang 73,
  - des solutions en  $C_q$  et  $D_q$  sont tirées les amplitudes  $M_q = \sqrt{C_q^2 + D_q^2}$  et les phases

$$\varphi_q = \text{Arctg} \frac{D_q}{C_q}$$

.../...

4. - séparation des composantes non séparables par l'analyse et calcul des constantes harmoniques: si l'indice variable  $q'$  s'applique à une onde du groupe d'ondes non séparables d'une composante principale d'indice  $q$ , on calcule

$$\beta_{q'} = (G_{q'} - V_{q'} - u_{q'}) - (G_q - V_q - u_q) \quad \gamma_{q'} = \frac{f_{q'} H_{q'}}{f_q H_q}$$

$$c_q = 1 + \sum_{q'} \gamma_{q'} \cos \beta_{q'} \quad s_q = - \sum_{q'} \gamma_{q'} \sin \beta_{q'}$$

et les composantes séparées sont écrites :

$$f_q H_q = \frac{M_q}{\sqrt{c_q^2 + s_q^2}} \quad G_q - V_q - u_q = \phi_q + \text{Arctg} \frac{s_q}{c_q}$$

$$f_{q'} H_{q'} = \gamma_{q'} f_q H_q \quad G_{q'} = G_q - V_q - u_q + \beta_{q'}$$

5. écriture et perforation des résultats sous forme de constantes harmoniques,
6. - à partir des constantes harmoniques calculées, prédiction pour une autre période de composantes choisies après calcul pour la nouvelle période des éléments astronomiques  $\tau, s, h, p, N', p_s$ , des arguments astronomiques  $V_q$

$$\zeta = \bar{\zeta} + \sum f_q H_q \cos (V_q + u_q - G_q)$$

- calcul des écarts de la hauteur prédite à la hauteur mesurée et variance.

L'utilisation de l'IBM 1130 nous a conduits à segmenter le programme en plusieurs programmes s'appelant l'un après l'autre. L'intervention de l'opérateur se réduit à l'entrée des cartes précisant les composantes choisies, la station et l'enregistrement comme indiqué plus haut. Dans le cas de temps d'échantillonnage différents de 1 h, des données horaires aux heures T.U. rondes du segment analysé sont sorties pour un tracé de courbes de marées ou le tracé automatique sur plotter de courbes de Suthons permettant une éventuelle correction d'effets météorologiques.

### Exemple d'application

Pour un séminaire de comparaison des différentes méthodes utilisées sur le plan international, nous avons procédé à des analyses et des prédictions portant sur un enregistrement de 116 jours à Unst.

4 analyses ont été faites sur deux séries de données horaires sur 29 jours (plus 1 jour avant et après pour lissage) aux extrémités de l'enregistrement, et sur les séries des données horaires des 15 premiers jours correspondants. Les données étaient déjà corrigées de leur dérive instrumentale.

Les analyses ont été faites sur les 29 composantes données sur le tableau et en utilisant Lerwick comme référence. On trouvera également sur le tableau les constantes harmoniques déduites des 4 analyses avec, dans une colonne particulière, dans le cas de séparation, l'indication de l'onde analysée. Les composantes choisies ayant été limitées à l'ordre 3, nous avons pris comme fréquence supérieure de lissage  $\omega_s = 90^\circ/\text{h}$ . Le coefficient K intervenant dans le critère de résolution de Rayleigh a été fait égal à 0,8. On peut noter sur les résultats que dans l'analyse de Y', la composante  $\mu_2 = 2MS_2$  et les composantes séparées  $2N_2$  et  $\epsilon_2 = MNS_2$  ont des amplitudes deux fois plus grandes que pour X' et 6 fois plus grandes que pour X ou Y. Le temps de calcul sur l'IBM 1130 (configuration 16 K) est de 10 minutes pour les analyses de 29 jours et de 7 minutes pour les analyses de 15 jours (une analyse de 1 an prendrait donc 1h15mn). Ce temps pourrait être légèrement réduit par la non écriture d'un certain nombre de résultats intermédiaires de calculs.

Pour obtenir un test d'efficacité des synthèses ont été faites pour chaque période de 29 jours à partir des deux analyses sur l'autre période : par calcul des résidus, la variance résiduelle a été calculée. On trouvera ces variances dans le tableau joint pour lequel on s'est limité à des synthèses avec des termes des seules espèces 1 et 2 : on a pris systématiquement soit 20 termes soit 8 termes sauf dans le cas des résultats de l'analyse de Y' : dans ce cas la synthèse avec 20 termes donnait une variance de  $528,99 \text{ cm}^2$  provenant de la prise en compte des composantes  $\mu_2$ ,  $2N_2$  et  $\epsilon_2$ . Une synthèse sans ces termes, donc à 17 termes, a ramené la variance à  $71,60 \text{ cm}^2$ . On voit que les déviations standard déduites des variances sont de l'ordre de 5 à 6 cm pour une synthèse à 20 ou 8 termes à partir d'une analyse sur 29 jours, et de l'ordre de 8 à 9 cm dans le

cas d'une analyse sur 15 jours. Le calcul d'une synthèse à 20 termes et de la variance résiduelle pour une période de 29 jours prend 5 minutes sur le calculateur ; ce temps est abaissé à 3 minutes pour une synthèse limitée à 8 termes.

## ANALYSE HARMONIQUE

- Méthode d'analyse par les moindres carrés après lissage (filtrage 0 à 90°/h).
- Deux séries continues X (29 jours) et X' (15 jours) commençant le 9 mai 1972 à 0 h G.M.T.
- Deux séries continues Y (29 jours) et Y' (15 jours) commençant le 2 août 1972 à 0 h G.M.T.
- Synthèse avec des termes des seules espèces 1 et 2. Comparaison à des données non modifiées.
- Durée sur IBM 1130 : analyse, 10 mn ;  
synthèse et var., 5 mn.

	Lerwick = référ.		29 jours				15 jours							
	Compo- santes	H <sub>cm</sub>	g''	X		Y		X'		Y'				
				tiré de	H <sub>cm</sub>	g''	H <sub>cm</sub>	g''	tiré de	H <sub>cm</sub>	g''	H <sub>cm</sub>	g''	
	MM	2,5	142,9		3,0	109,6	3,9	187,4						
	MSF	3,2	21,7	MSF	0,4	294,1	1,9	282,4	MSF	1,1	80,6	1,3	167,0	
	MF	2,4	225,5		0,3	137,9	1,5	126,2		0,9	284,4	1,0	10,8	
	NJ <sub>1</sub> = 2Q <sub>1</sub>	0,6	291,2		σ <sub>1</sub>	0,5	263,4	0,3		251,0	σ <sub>1</sub>	1,5	284,5	2,5
	μJ <sub>1</sub> = σ <sub>1</sub>	0,8	335,4		0,7	307,6	0,4	295,2		2,1	328,7	3,4	22,5	
	Q <sub>1</sub>	2,4	331,1		2,5	333,9	1,9	335,1		O <sub>1</sub>	2,1	319,3	1,7	317,8
	O <sub>1</sub>	7,8	28,8		7,6	21,1	7,2	19,8		O <sub>1</sub>	6,8	15,0	5,5	13,5
	NO <sub>1</sub> = M <sub>1</sub>	0,7	65,5		0,8	301,6	0,3	288,3		O <sub>1</sub>	0,6	51,7	0,5	50,2
	P <sub>1</sub>	2,1	146,8	K <sub>1</sub>	2,0	137,6	2,3	141,1	K <sub>1</sub>	1,5	139,6	1,7	153,6	
	K <sub>1</sub>	7,4	162,3		6,9	153,1	7,9	156,6		5,4	155,1	6,1	169,1	
	J <sub>1</sub>	2,7	206,6		0,4	206,5	0,8	192,3		2,0	199,4	2,2	213,4	
	OO <sub>1</sub>	0,5	302,7		0,2	323,8	0,2	314,0		0,5	348,3	0,6	352,4	
	MNS <sub>2</sub> = ε <sub>2</sub>	0,6	242,2		0,7	198,3	0,6	283,5		μ <sub>2</sub>	2,3	206,7	5,6	297,4
	2N <sub>2</sub>	1,5	267,7	μ <sub>2</sub>	1,8	251,6	1,2	248,2	μ <sub>2</sub>	5,6	232,2	13,3	322,9	
	2MS <sub>2</sub> = μ <sub>2</sub>	2,2	265,1		2,5	249,0	1,7	245,6		7,9	229,6	18,3	320,3	
	N <sub>2</sub>	12,4	292,1		13,5	271,9	13,6	271,3		M <sub>2</sub>	13,1	267,1	13,7	266,3
	μ <sub>2</sub>	2,5	295,9	N <sub>2</sub>	2,7	275,7	2,8	275,1	M <sub>2</sub>	2,6	270,9	2,8	270,1	
	M <sub>2</sub>	58,6	311,4		68,7	290,5	69,1	289,6		62,1	286,4	64,8	285,6	
	λ <sub>2</sub>	0,8	270,0		L <sub>2</sub>	0,7	320,0	2,4		315,9	M <sub>2</sub>	0,8	245,0	0,8
	2MN <sub>2</sub> = L <sub>2</sub>	1,7	293,4		1,4	343,4	5,2	339,3		1,8	268,4	1,9	267,6	
	T <sub>2</sub>	1,1	339,6	S <sub>2</sub>	1,4	321,2	1,3	318,3	S <sub>2</sub>	1,3	308,1	1,3	319,2	
	S <sub>2</sub>	21,0	345,1		25,3	326,7	24,6	323,8		23,5	313,6	23,4	324,7	
	K <sub>2</sub>	6,1	343,6	S <sub>2</sub>	7,4	325,2	7,1	322,3	S <sub>2</sub>	6,8	312,1	6,8	323,2	
	M <sub>3</sub>				0,5	170,1	0,5	173,3		0,8	185,5	0,5	207,0	
	M <sub>4</sub>	1,5	285,2		0,8	262,6	0,8	275,0		0,9	293,1	0,7	266,5	
	MS <sub>4</sub>	1,1	358,4		0,6	328,4	1,2	5,3		0,8	346,5	1,3	12,4	
	M <sub>6</sub>	1,3	224,1		0,9	221,3	0,7	214,0		0,7	216,4	0,6	220,3	
	2MN <sub>6</sub>	0,7	192,3		0,4	187,1	0,4	191,2	M <sub>6</sub>	0,4	184,6	0,3	188,5	
	2MS <sub>6</sub>	1,3	263,1		0,6	245,9	0,8	273,7		0,4	217,7	0,8	288,1	

Synthèse 20 ou 17 termes Données et période Var. (Données Synth.) 20 ou 17
8

X <sup>20</sup>	Y <sup>20</sup>
Y	X
27,28 cm <sup>2</sup>	31,83 cm <sup>2</sup>
X <sup>8</sup>	Y <sup>8</sup>
Y	X
35,06 cm <sup>2</sup>	36,48 cm <sup>2</sup>

X' <sup>17</sup>	Y' <sup>17</sup>
Y	X
85,38 cm <sup>2</sup>	71,60 cm <sup>2</sup>
X' <sup>8</sup>	Y' <sup>8</sup>
Y	X
80,46 cm <sup>2</sup>	62,84 cm <sup>2</sup>

Var. (Données X) = 2 796,27 cm <sup>2</sup>	Var. (Données Y) = 2 999,65 cm <sup>2</sup>
---	---

Edité par  
Imprimerie Commerciale et Administrative  
21-23, rue Jean Jaurès  
29200 Brest

Octobre 1976

Toute demande de cette publication devra être adressée au

SERVICE DOCUMENTATION  
CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE  
B.P. 337 - 29273 BREST CEDEX