

L'ENSEIGNEMENT DES MARÉES DANS LA MARINE BRÉSILIENNE

par le Vice-Amiral Alberto DOS SANTOS FRANCO

*Causerie donnée à la 8^e Conférence Hydrographique Internationale,
mai 1962*

C'est un honneur et un privilège d'avoir l'occasion unique d'expliquer à une assemblée de techniciens comme celle-ci comment les officiers subalternes de la Marine Brésilienne qui suivent les cours d'hydrographie reçoivent leur instruction sur les marées.

Je dois dire d'abord qu'au cours de la deuxième guerre mondiale, presque toutes les activités hydrographiques, y compris le cours de levés hydrographiques, ont été arrêtées. Ce ne fut qu'en 1948, après une remise au point des programmes d'étude, que les cours annuels recommencèrent.

Sous sa nouvelle forme, le programme d'étude des marées était basé sur l'*Admiralty Manual of Tides* ⁽¹⁾, qui a été l'ouvrage de base pendant trois ans. Comme nous le savons, les auteurs de cet excellent ouvrage expliquent tous les phénomènes en n'utilisant que des mathématiques élémentaires. De cette façon, il est évident que certaines questions ne pouvaient être expliquées ni comprises aussi clairement que si on avait employé les mathématiques supérieures. Après quelques objections de la part d'officiers-élèves et quelques observations faites par divers instructeurs, on décida de changer la façon d'enseigner les marées. C'est ainsi que la *Diretoria de Hidrografia e Navegação* m'invita à rédiger un nouveau manuel d'un niveau supérieur à l'*Admiralty Manual of Tides* et concernant les sujets suivants :

- Le phénomène des marées
- Les forces génératrices des marées
- La marée d'équilibre
- Le développement harmonique
- Les marées en eaux peu profondes
- Les méthodes abrégées de prédiction des marées
- Les machines à prédire les marées
- L'analyse harmonique des marées
- La réduction des marées
- Les courants de marées

(1) *Admiralty Manual of Tides*, par A. T. DOODSON et H. D. WARBURG, publié par H.M. Stationery Office, Londres.

Comme on le voit, tous ces sujets sont contenus dans la première moitié de l'*Admiralty Manual of Tides* et tout le monde s'accorde à estimer que ces sujets ne doivent pas être ignorés d'un hydrographe.

Ceci posé, j'ai commencé à écrire le nouveau manuel dans lequel j'ai traité à fond les sujets choisis. En réalité, mon travail fut assez long, mais pas au point de gêner mes cours d'enseignement. Naturellement, l'ouvrage couvre davantage de sujets que n'en nécessite strictement le cours, mais nous savons que lorsque celui-ci est terminé, l'hydrographe doit pouvoir s'y reporter pour se tirer d'embarras. On peut maintenant se demander comment l'étudiant peut apprendre toutes ces matières parmi tant d'autres en une seule année. La réponse est que nous avons mis à profit les techniques d'enseignement qui permirent au cours de la deuxième guerre mondiale de convertir en six mois un avocat américain et un bon officier de pont. De plus, il est bien entendu que le cours est destiné à des élèves d'un niveau déjà élevé.

Je vais maintenant parler de l'ouvrage lui-même dans le but de montrer le niveau scientifique des matières qui y sont traitées.

Le traitement mathématique des phénomènes physiques amène souvent des transformations algébriques si étendues qu'on oublie quelquefois le phénomène lui-même. Bien que j'aie essayé autant que possible d'éviter cet inconvénient dans mon ouvrage, je dois avouer que pour le sujet qui nous concerne, il est parfois extrêmement difficile de faire des simplifications. Mais il y a une manière de lire l'ouvrage qui permet de le comprendre : on doit le lire une fois sans perdre son temps avec les transformations algébriques, mais en conservant dans l'esprit la signification physique des résultats. Dans quelques cas, comme dans les développements harmoniques (où toutes les transformations sont semblables), je crois que l'étudiant doit se contenter de suivre une transformation algébrique et d'accepter les autres comme valables.

J'ai hésité longtemps avant de décider s'il fallait inclure ou non le chapitre IV : Mouvements de la lune et du soleil. Réflexion faite, j'ai opté pour son inclusion, car le sujet est essentiel pour bien comprendre le développement harmonique de la *marée d'équilibre*. De plus, j'ai agi ainsi pour éviter aux étudiants les difficultés que j'avais moi-même rencontrées, lorsque j'étais jeune officier; j'avais été forcé de consulter divers ouvrages d'astronomie supérieure pour essayer de me faire une idée simple et claire des mouvements de la lune et du soleil. Le fait d'avoir inclus ce sujet me donna la possibilité d'étudier ces mouvements pour en faire le point de départ réel du développement harmonique de la *marée d'équilibre* et pour obtenir les formules de base de ce développement.

Il m'a été assez difficile de rédiger le chapitre V : Développement harmonique, car je n'avais aucun choix possible entre les développements de DARWIN ou de DOODSON. Le premier était plus simple et pouvait faire partie d'un traité, mais il était incomplet et moins précis que celui de DOODSON. Par contre, le développement de DOODSON basé sur les tables complètes de BROWN pour la lune était trop étendu pour un manuel. J'ai donc essayé une nouvelle façon d'obtenir de meilleurs résultats qu'avec le développement de DARWIN, sans le rendre pour autant plus complexe. En partant des formules fondamentales de DOODSON mon premier objectif était d'obtenir des termes exprimés en fonction de la longitude vraie de la lune (me-

surée sur l'écliptique). En réalité, ce fut un atout précieux pour l'explication des règles fondamentales de l'*Admiralty Tide Predicting Method* qui sont aussi basées sur des termes en fonction de la longitude vraie de la lune. Puis j'en vins à la conclusion que la simplicité du développement de DARWIN reposait sur l'emploi de la longitude vraie de la lune mesurée sur l'orbite lunaire. Je fis ainsi les substitutions appropriées, mais en évitant l'emploi encombrant de l'inclinaison de l'orbite de la lune. Tout le développement fut effectué numériquement et les coefficients finaux des composantes sont trouvés plus proches des coefficients de DOODSON que de ceux de DARWIN.

Je dois maintenant dire quelques mots au sujet des marées de petits fonds (chapitre VI). En 1956, le Bureau Hydrographique International me fit l'honneur de publier dans le N° 1, volume XXXIII de son excellente Revue, un de mes articles intitulé : *Marées en eaux peu profondes*. Avec quelques légers changements, le chapitre VI de ce manuel est une réimpression de cet article, à l'exception d'une erreur qui figurait dans l'article original et qui fut corrigée dans l'ouvrage. En ce qui concerne cet article, j'aimerais attirer votre attention sur le fait qu'en utilisant l'*artifice* puissant de Lord RAYLEIGH et les simples lois de conservation de volume et d'énergie, j'ai réussi à obtenir la formule de DE SAINT-VENANT pour la vitesse de propagation des ondes en eaux peu profondes, y compris ses coefficients numériques. Ce sera encore plus surprenant si nous comparons les méthodes que j'ai choisies avec celles que nous voyons dans l'ouvrage : *Théorie des Marées* de Maurice LÉVY (1889).

Je dois dire au sujet des méthodes abrégées de prédiction que les vieilles méthodes furent jetées par-dessus bord. Maintenant, la *Diretoria de Hidrografia e Navegação* a adopté la méthode de l'Amirauté Britannique, mais non sous sa forme originale pour combiner les composantes de même espèce; elle a employé dans ce but un diagramme très intéressant inventé par le Capitaine de Frégate Paulo MOREIRA DA SILVA de la Marine Brésilienne dont l'explication complète est fournie dans l'ouvrage. Nous avons ainsi les hauteurs horaires (en temps civil) de la marée astronomique. On doit porter sur la courbe astronomique les corrections totales des petits fonds qui — comme expliqué dans le chapitre VI — sont données pour des intervalles horaires de temps lunaire avant et après la pleine mer de M_2 . Pour faire face à ces intervalles horaires de temps lunaire, j'ai introduit une échelle spéciale sur la minute de construction des courbes de marées pour pouvoir introduire très facilement les corrections.

Bien que je pense que le meilleur usage du diagramme du Capitaine de Frégate MOREIRA DA SILVA soit lié à la méthode de l'Amirauté Britannique, on doit dire qu'il fut conçu pour combiner autant de composantes de même espèce que l'on désire.

En ce qui concerne les méthodes d'analyse, j'ai simplement négligé les anciennes et j'ai expliqué en détail les méthodes de DOODSON en faisant avancer en même temps la théorie et la pratique.

En procédant ainsi, il est beaucoup plus facile d'établir la corrélation entre la théorie et ses applications. Malheureusement, l'ouvrage n'est pas à jour des techniques d'analyse des marées. En fait, au Département d'Hydrographie du Brésil, on a étudié le moyen d'analyser des séries inférieures à 15 jours, sans faire d'hypothèses sur les relations locales qui existent

entre les principales composantes. J'ai réussi à obtenir des résultats utiles en adaptant la méthode d'analyse de l'Amirauté Britannique pour l'analyse d'un enregistrement horaire de sept jours. Pour isoler M_2 j'ai été forcé d'admettre la relation théorique de l'équilibre qui existe entre M_2 et N_2 . Mais je pense que la meilleure solution pour analyser les courtes séries est la méthode conçue par le Capitaine de Frégate MOREIRA DA SILVA, qui a obtenu de très bons résultats avec des séries de 5 jours et 18 heures seulement. Sa méthode est basée sur l'analyse de la surface comprise entre la courbe de la marée et l'axe des abscisses. Pour simplifier l'emploi de sa nouvelle méthode, le Capitaine de Frégate MOREIRA DA SILVA a demandé au Département des Recherches de la Marine Brésilienne un nouveau marégraphe qui donne directement la surface horaire à partir d'un instant initial. Je suis sûr qu'il sera facile avec ce nouveau marégraphe d'analyser les enregistrements de hauteurs horaires de durées habituelles pour arriver à isoler parfaitement les composantes harmoniques.

Je dois dire maintenant quelques mots du niveau de référence des cartes marines brésiliennes. Lorsque j'ai rédigé le chapitre XII, il a été décidé, contre mon gré, que le niveau de référence serait choisi après avoir classé les marées en deux types seulement. Pour éviter les dissensions, j'ai donné seulement mon opinion au chapitre qui nous concerne et je l'ai fait suivre d'une explication pour justifier le point de vue officiel. Par la suite, les hydrographes brésiliens trouvèrent après en avoir fait personnellement l'expérience, que le niveau des cartes choisi n'était pas bon. En fait, si nous admettons que le « zéro des cartes ... doit être un plan situé à un niveau tel que la marée ne descendra que très rarement en-dessous », on doit changer l'ancien critère brésilien. En conclusion, on admit qu'il serait préférable de choisir le zéro des cartes d'après une classification des marées effectuée suivant les formules de COURTIER. En procédant ainsi, on peut employer les formules approximatives de COURTIER pour exprimer le zéro des cartes en fonction des composantes harmoniques. Comme au Brésil il y a des marées classées dans trois des quatre définitions de COURTIER, j'espère que le nouveau choix du zéro des cartes sera préférable à l'ancien. Comme on peut le constater, cette très récente résolution doit être introduite dans le chapitre XII de l'ouvrage.

Le dernier chapitre du manuel concerne les courants de marée. J'ai donné à ce sujet une explication tout à fait différente de celles que l'on trouve généralement dans les ouvrages classiques. J'ai fait une corrélation entre les composantes horizontales des forces génératrices de la marée et les courants engendrés par ces forces, de sorte que j'ai pu mettre en relief l'interaction réelle des marées et des courants de marée. J'ai donné en outre les divers types de marées et de courants de marée que l'on peut s'attendre à trouver dans la réalité; j'en ai fait une étude mathématique pour éviter toute méprise. J'ai expliqué l'analyse des courants de marées et je l'ai illustrée d'un exemple pratique d'observations de 25 heures.

Dans l'annexe au manuel se trouvent quelques tables utiles pour la prédiction et l'analyse des marées.

J'espère que j'ai pu donner à cette illustre assemblée l'impression qu'au Brésil nous essayons de faire de notre mieux.