

PROCEEDINGS OF SEVENTH CONFERENCE
ON
COASTAL ENGINEERING

THE HAGUE, NETHERLANDS
AUGUST 1960

Edited by
J. W. JOHNSON
Professor of Hydraulic Engineering

UNIVERSITY OF CALIFORNIA
BERKELEY

VOLUME 2

PUBLISHED BY
COUNCIL ON WAVE RESEARCH
THE ENGINEERING FOUNDATION

1961

COPYRIGHTED 1961
COUNCIL ON WAVE RESEARCH
Building 159
Richmond Field Station
University of California
Richmond, California

Lithographed in the United States of America
The National Press, Palo Alto, California

CONTENTS

VOLUME 1

ACKNOWLEDGMENTS.....	iii
----------------------	-----

PART 1

WAVE THEORY AND MEASUREMENTS

CHAPTER 1 WIND WAVES AND SWELL.....	1
R. L. Wiegel	
CHAPTER 2 THE QUALITY OF TABULATED DECK LOG SWELL OBSERVATIONS.....	41
Marvin D. Burkhart and Clifford H. Cline	
CHAPTER 3 WAVE RECORDING ON THE IJSSELMEER.....	53
P. W. Roest	
CHAPTER 4 THE USE OF RADAR IN HYDRODYNAMIC SURVEYING....	59
H. M. Oudshoorn	
CHAPTER 5 AN INSTRUMENTATION SYSTEM FOR WAVE MEASUREMENTS, RECORDING AND ANALYSIS.....	77
H. G. Farmer and D. D. Ketchum	
CHAPTER 6 SPLASHNIK—THE TAYLOR MODEL BASIN DISPOSABLE WAVE BUOY.....	100
Wilbur Marks	
CHAPTER 7 WAVE HEIGHT MEASURING EQUIPMENT.....	114
E. H. Boiten	
CHAPTER 8 ETUDE THEORIQUE DE L'EXPLOITATION DES ENREGISTREMENTS DE HOULE.....	126
P. Caseau	
CHAPTER 9 A THEORY FOR WAVES OF FINITE HEIGHT.....	146
Charles L. Bretschneider	
CHAPTER 10 FIFTH ORDER GRAVITY WAVE THEORY.....	184
Lars Skjelbreia and James Hendrickson	

CONTENTS

PART 2

BEACH AND SHORELINE PROCESSES

CHAPTER 11	
THEORETICAL FORMS OF SHORELINES.....	197
W. Grijm	
CHAPTER 12	
WAVE EFFECT ON THE COAST FORMATION	
AND EROSION.....	203
Walenty Jarocki	
CHAPTER 13	
MOUVEMENTS DES MATERIAUX DE FOND SOUS	
L'ACTION DE LA HOULE.....	211
P Lhermitte	
CHAPTER 14	
THE RELATIONSHIP BETWEEN WAVE ACTION AND	
BEACH PROFILE CHARACTERISTICS.....	262
P. H. Kemp	
CHAPTER 15	
RESEARCH ON WAVE ACTION ON	
LAKE SHORES AND UNLINED SLOPES	
OF ARTIFICIAL EARTH STRUCTURES.....	278
A. A. Pichoughkin	
CHAPTER 16	
EXPERIMENTAL RESEARCH IN FORMATION BY WAVES	
OF STABLE PROFILES OF UPSTREAM FACES OF	
EARTH DAMS AND RESERVOIR SHORES.....	282
I J Popov	
CHAPTER 17	
ESSAI D'ANALYSE DES PHENOMENES INTERVENANT	
DANS LA FORMATION D'UN ESTUAIRE.....	294
M. Banal	
CHAPTER 18	
ETUDE SUR MODELE DU TRANSPORT LITTORAL	
CONDITIONS DE SIMILITUDE.....	307
J. Valembois	
CHAPTER 19	
SCALE EFFECTS IN MODELS WITH	
LITTORAL SAND-DRIFT.....	318
R. Reinalda	
CHAPTER 20	
LITTORAL TRANSPORT IN THE GREAT LAKES.....	326
L Bajorunas	

CONTENTS

CHAPTER 21	
SEDIMENT MOVEMENT AT INDIAN PORTS.....	342
Madhav Manohar	
CHAPTER 22	
SUR L'EVALUATION DE CERTAINES CARACTERISTIQUES DU TRANSPORT LITTORAL A LA BASE DES DONNEES METEOROLOGIQUES.....	375
Pawel Slomianko	
CHAPTER 23	
STABILITY OF COASTAL INLETS.....	386
P. Bruun and F. Gerritsen	
CHAPTER 24	
THE USE OF FLUORESCENT TRACERS FOR THE MEASUREMENT OF LITTORAL DRIFT.....	418
R. C. H. Russell	
CHAPTER 25	
USE OF A RADIO-ACTIVE TRACER FOR THE MEASUREMENT OF SEDIMENT TRANSPORT IN THE NETHERLANDS.....	445
J. N. Svasek and H. Engel	
CHAPTER 26	
REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES.....	455
Louis Greslou	

VOLUME 2

PART 3

TIDES, TIDAL FLOW, AND STORM SURGES

CHAPTER 27	
DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE.....	485
F. Gohin	
CHAPTER 28	
ESTUARINE CURRENTS AND TIDAL STREAMS.....	510
Roderick Agnew	
CHAPTER 29	
A STUDY OF DIFFUSION IN AN ESTUARY.....	536
W. E. Maloney and C. H. Chne	

CONTENTS

CHAPTER 30	
HURRICANE TIDE PREDICTION FOR NEW YORK BAY.	548
Basil W. Wilson	
CHAPTER 31	
HURRICANE STORM SURGE CONSIDERED AS	
A RESONANCE PHENOMENON.....	585
G. Abraham	
CHAPTER 32	
INVESTIGATIONS OF THE TIDES AND STORM SURGES	
FOR THE DELTAWORKS IN THE SOUTHWESTERN	
PART OF THE NETHERLANDS.. .. .	603
J. J. Dronkers	
CHAPTER 33	
ON THE USE OF FREQUENCY CURVES	
OF STORMFLOODS.....	617
P. J. Wemelsfelder	
PART 4	
DYNAMIC ACTION OF WAVES	
CHAPTER 34	
ON THE STABILITY OF RUBBLE-MOUND BREAKWATERS	633
José Joaquim Reis de Carvalho e Daniel Vera-Cruz	
CHAPTER 35	
EXPERIMENTAL STUDIES OF SPECIALLY SHAPED	
CONCRETE BLOCKS FOR ABSORBING WAVE ENERGY	659
Shoshichiro Nagai	
CHAPTER 36	
EXPERIMENTAL DATA ON THE OVERTOPPING	
OF SEAWALLS BY WAVES.....	674
A. Paape	
CHAPTER 37	
DETERMINATION OF THE WAVE ATTACK ANTICIPATED	
UPON A STRUCTURE FROM LABORATORY	
AND FIELD OBSERVATIONS.....	682
W. A. Venis	
CHAPTER 38	
LA PRESSION DES VAGUES CONTRE LA PAROI ABRUPTE	695
M. E. Plakida	
CHAPTER 39	
THE CLAMP-ON WAVE FORCE METER.....	701
Lars Skjellbrea	

CONTENTS

CHAPTER 40	
MODEL TESTS ON THE MOTION OF MOORED SHIPS PLACED ON LONG WAVES....	723
F. A. Kilner	
CHAPTER 41	
THE DYNAMICS OF A SUBMERGED MOORED SPHERE IN OSCILLATORY WAVES..	746
Donald R F Harleman and William C Shapiro	
CHAPTER 42	
MODEL INVESTIGATIONS OF WIND-WAVE FORCES....	766
J. E. PIRNS	
CHAPTER 43	
MODEL STUDY OF AN ISOLATED LIGHTHOUSE PLATFORM AT SEA (PRINCE SHOAL, QUEBEC).....	778
G. E. Jarlan	

PART 5

COASTAL ENGINEERING PROBLEMS

CHAPTER 44	
SAND TRANSFER, BEACH CONTROL, AND INLET IMPROVEMENTS, FIRE ISLAND INLET TO JONES BEACH, NEW YORK ..	785
Thorndike Saville	
CHAPTER 45	
ISLAND HARBOURS AND THEIR INFLUENCE ON ADJACENT SHORES.....	808
Leon Shirdan	
CHAPTER 46	
SAFETY OF SEA-WALLS.	817
Ir T Edelman	
CHAPTER 47	
MODERN DESIGN AND CONSTRUCTION OF DAMS AND DIKES BUILT WITH THE USE OF ASPHALT.....	819
Baron W F Van Asbeck	
CHAPTER 48	
THE DEVELOPMENT OF COAST PROFILES ON A RECEDING COAST PROTECTED BY GROYNES...	836
Torben Sorensen	
CHAPTER 49	
BEACH-REHABILITATION BY USE OF BEACH FILLS AND FURTHER PLANS FOR THE PROTECTION OF THE ISLAND OF NORDERNEY.....	847
Johann Kramer	

CONTENTS

CHAPTER 50 SHORELINE ADVANCEMENT BY SEA WALL AND GROYNES AT COCHIN.....	860
M. G. Hiranandani and C. V. Gole	
CHAPTER 51 LA DEFENSE ET LE MAINTIEN DES PLAGES BELGES ENTRE ZEEBRUGGE ET LA FRONTIERE NEERLANDAISE.....	872
J. E. L. Verschave	
CHAPTER 52 THE DIKES OF THE POLDERS IN THE IJSSELMER.....	893
M. Klasema and C. H. de Jong	
CHAPTER 53 COASTAL PROTECTION WORKS AND RELATED PROBLEMS IN JAPAN.....	904
Masashi Hom-ma and Kiyoshi Horikawa	
CHAPTER 54 A BRIEF OUTLINE OF THE ISE-WAN TYPHOON.....	931
Hiroji Otao	
CHAPTER 55 INVESTIGATION OF DESTROYED STRUCTURES AND THE RECONSTRUCTION PROGRAM; ISE-WAN TYPHOON.....	942
Senri Tsuruta	
CHAPTER 56 WAVES ON THE PACIFIC COAST AND ON THE COAST OF ISE BAY CAUSED BY THE ISE-WAN TYPHOON.....	949
Takeshi Ijima, Shoji Sato and Hisashi Aono	
CHAPTER 57 THE DAMAGES OF COASTAL DIKES AND RIVER LEVEES AND THEIR RESTORATION.....	964
Masanobu Hosoi, Yasuteru Tominaga and Hiroshi Mitsui	
CHAPTER 58 ON THE EFFECT OF CONFIGURATIONS OF THE COAST ON THE STORM SURGES IN THE ISE BAY.....	987
Kiyoshi Tanaka and Akira Murota	
CHAPTER 59 A SYSTEM OF RADIO-LOCATION USED IN THE DELTA AREA.....	994
R. H. J. Morra	



VEERE-GAT DAM

PART 3
TIDES, TIDAL FLOW, AND STORM SURGES

HARINGVLIET SLUICE



CHAPTER 27

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

Par F. GOHIN - Ingénieur à SOGREAH - GRENOBLE

I - INTRODUCTION

I.1 HISTORIQUE

Les premiers résultats positifs obtenus dans la prévision des amplitudes de la marée dans les ports datent de plusieurs siècles ; depuis fort longtemps les courants de marée dans les mers côtières sont familiers aux navigateurs.

Rappelons simplement qu'encore de nos jours, la prévision des marées (différence de niveau entre pleine et basse mer) et des phases (décalages de la pleine mer par rapport au passage de la lune au méridien) s'appuie sur l'analyse harmonique des enregistrements de marégraphes. Cette analyse diffère de celle de FOURIER: les périodes des différentes composantes ne sont pas des sous-multiples entiers d'une même période élémentaire, mais ont des valeurs connues avec toute la précision désirée. La composante principale, dans nos régions européennes du moins, représente la marée qui serait due à une lune fictive tournant à distance constante de la terre et à vitesse constante dans le plan de l'équateur (marée dite M_2).

Depuis la fin du siècle dernier des recherches très nombreuses ont été faites parmi lesquelles il faut citer celles de POINCARÉ (méthode théorique de détermination des amplitudes et courants), HARRIS (tracé des lignes cotidales - c'est-à-dire équiphasés - de la marée M_2), HANSEN (détermination des dénivellations et courants en Mer du Nord), DOODSON (détermination des lignes cotidales et équiamplitudes dans les mers bordant la GRANDE BRETAGNE).

I.2 DEFINITIONS et HYPOTHESES

Depuis la dernière guerre l'apparition des machines à calculer permet d'aborder le calcul des amplitudes et des courants (Vantroys). Il faut cependant bien saisir dès l'abord que tout calcul numérique pratique suppose le problème largement schématisé et simplifié.

Imaginons un observateur, disposant d'appareils parfaits et parfaitement appropriés, situé en un point géographiquement fixe - latitude φ , longitude G - de la mer. Cet observateur constatera que par rapport à lui l'eau se déplace verticalement et horizontalement ; nous admettrons que cet observateur est capable d'éliminer ceux de ces mouvements qui n'ont pas pour période la période de la marée semi-diurne lunaire - ou toute autre période de la force génératrice.

COASTAL ENGINEERING

Nous noterons :

h : la profondeur de la mer en un point M (φ, G)

ζ : la dénivellation (variation du niveau de l'eau autour de la valeur moyenne h)

\vec{V} : le courant : vecteur vitesse de l'eau situé dans le plan local tangent en M à la terre.

Il est clair que ζ et \vec{V} sont des fonctions du temps t et du point M ; pour préciser nous les noterons $\zeta_M(t)$ et $\vec{V}_M(t)$ - cf. figure 1.

Ces définitions étant posées, nous admettrons - sans en discuter le bien-fondé, les hypothèses simplificatrices suivantes :

a/ - la terre est sphérique, la pesanteur est constante,

b/ - les vitesses et accélérations verticales sont négligeables. De plus, de la surface au fond, en tous points d'une verticale, les vitesses horizontales sont identiques.

c/ - la force d'inertie spatiale - expression du type $\overline{\vec{V} \text{ grad } \vec{V}}$ est négligeable.

I.3 PRINCIPES DE L'ETUDE

Imaginons-nous provisoirement mis en face du problème suivant :

- déterminer les dénivellations et les courants de marée due à la composante M_2 , dans l'Océan Indien.

Nous appellerons «domaine maritime» l'océan donné, et «solution (ζ, \vec{V}) du problème posé» l'ensemble de toutes les fonctions $\zeta_M(t)$ et de tous les hodographes $\vec{V}_M(t)$ de période \mathcal{T}_{M_2} .

Dans les méthodes classiques on résoud le problème comme suit (cf. par exemple HANSEN) :

a/ - on introduit certaines hypothèses simplificatrices permettant de linéariser les équations.

b/ - on admet a priori que la solution stable est une fonction sinusoïdale du temps.

c/ - on ramène éventuellement le nombre d'inconnues pour chaque point M à deux - par exemple amplitude et phase de la dénivellation.

d/ - on résoud un système d'équations linéaires à 2ν inconnues (ν est le

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

nombre des points M).

La solution est obtenue sous la forme simple et claire suivante :

$$\begin{aligned} \text{dénivellation } \zeta_M(t) &= \text{sinusoïde définie par} && \begin{cases} \text{\{ son amplitude ou «marnage»} \\ \text{\{ sa phase} \end{cases} \\ \\ \text{courant } \vec{V}_M(t) &= \text{ellipse définie par} && \begin{cases} \text{\{ l'azimut du grand axe} \\ \text{\{ la longueur du grand axe} \\ \text{\{ l'excentricité} \\ \text{\{ le sens de parcours} \end{cases} \end{aligned}$$

ceci pour les v points M .

Mais le temps de calcul est proportionnel à $(2v)^3$ au moins et devient prohibitif dès que v dépasse quelques dizaines.

Pour éviter cet écueil majeur, nous avons été amenés à utiliser une méthode nouvelle particulièrement bien adaptée au calcul électronique.

Dans cette méthode, soulignons-le :

a/ - aucune hypothèse particulière n'est faite pour linéariser les équations - on sait que les frottements en particulier s'écartent de la loi linéaire.

b/ - aucune discrimination, du moins en principe, n'est faite entre les composantes de la marée : la force génératrice due à l'attraction des astres pouvant être prise en compte directement. Cependant nous nous sommes limités dans tout le travail présenté ici à l'étude de la seule composante M_2 afin d'aborder le problème posé et d'en présenter les solutions de la façon la plus claire possible.

La méthode employée consiste essentiellement à reproduire sur un véritable «modèle mathématique» - dont nous donnons ci-dessous la description - l'évolution du mouvement dans un océan à partir d'un état origine arbitraire - état de repos par exemple où toutes les dénivellations et tous les courants sont nuls.

Les équations dynamiques et de continuité permettent de suivre pas à pas l'évolution du phénomène sans qu'il soit besoin de résoudre un système d'équations simultanées.

Ce procédé reproduit toute une phase transitoire qu'il faut laisser s'écouler avant d'obtenir le régime permanent définitif cherché, sous la forme pratique suivante :

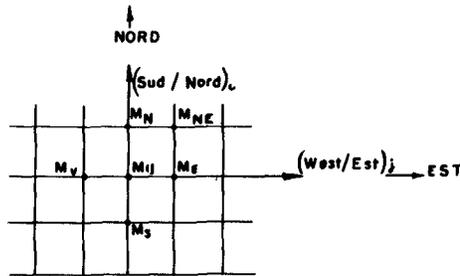
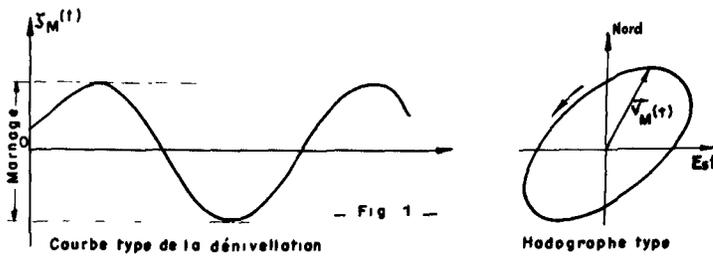
$$\text{en } M_1 \begin{cases} \{ \zeta_{M_1}(t_0), \zeta_{M_1}(t_0+T), \dots, \zeta_{M_1}(t_0+mT), \dots, \zeta_{M_1}(t_0+\mathcal{T}) = \zeta_{M_1}(t_0) \\ \{ \vec{V}_{M_1}(t_0), \vec{V}_{M_1}(t_0+T), \dots, \vec{V}_{M_1}(t_0+mT), \dots, \vec{V}_{M_1}(t_0+\mathcal{T}) = \vec{V}_{M_1}(t_0) \end{cases}$$

COASTAL ENGINEERING

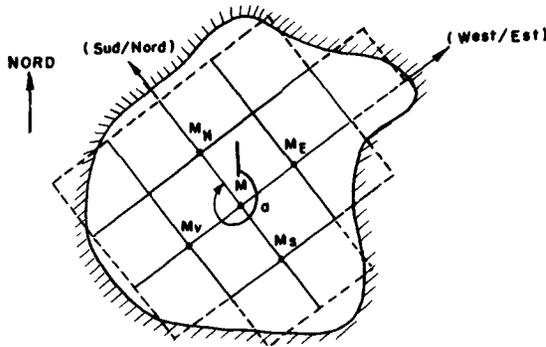
$$\text{en } M \begin{cases} \{ \text{-----}, \zeta_{M_i}(t_0+mT), \text{-----} \\ \{ \text{-----}, \vec{V}_M(t_0+mT), \text{-----} \end{cases}$$

$$\text{en } M_V \begin{cases} \{ \zeta_{M_V}(t_0), \zeta_{M_V}(t_0+T), \text{---}, \zeta_{M_V}(t_0+mT), \text{---}, \zeta_{M_V}(t_0+T) = \zeta_{M_V}(t_0) \\ \{ \vec{V}_{M_V}(t_0), \vec{V}_{M_V}(t_0+T), \text{---}, \vec{V}_{M_V}(t_0+mT), \text{---}, \vec{V}_{M_V}(t_0+T) = \vec{V}_{M_V}(t_0) \end{cases}$$

c'est-à-dire en bref que pour les v points du domaine nous obtiendrons la solution $\zeta_M(t)$, $V_M(t)$, à des instants séparés d'une durée fixe, que nous appellerons «pas de temps» et noterons T .



- Fig. 2 -



- Fig 3 -

II - BASES THEORIQUES

II.1 CANEVAS DES POINTS DE CALCUL

Nous appellerons «point de calcul» l'un quelconque des points M où nous recherchons la solution élémentaire (∇_M) du problème posé.

Nous indiquerons ici brièvement comment s'effectue la mise en place sur la carte des points M .

Imaginons très provisoirement que la terre soit parfaitement plane, et le domaine sans frontière définie. nous tracerons alors sur la carte un double réseau de droites orthogonales équidistantes, (damier) orientées les unes vers le haut de la feuille (cf. figure 2), nous les appellerons (Sud/Nord) les autres vers la droite, nous les appellerons (Ouest/Est). L'intersection de la ligne (Sud/Nord)₁ et de la ligne (Ouest/Est)₁ détermine le point de calcul M_{ij} . Omettons l'indice de position pour noter M le point courant du canevas ; ce point est «entouré» de quatre points que nous noterons : au Nord : M_n , à l'Est : M_e , au Sud : M_s , à l'Ouest : M_w .

Le tracé de nos lignes est tel que, quel que soit M , $MM_n = MM_e = MM_s = MM_w = L$.

Nous appellerons «pas d'espace» cette longueur L . c'est une donnée fondamentale du canevas.

Prolongeons notre dessin en faisant apparaître le point M_{ne} : le polygone $MM_nM_{ne}M_e$ est un carré.

Nous appellerons «contour relatif à M » un polygone, formé par une ligne brisée constituée de segments tels que M_nM_{ne} , tel que M soit à l'intérieur ou sur ce contour.

Serrons de plus près et progressivement la réalité :

a/ - le domaine est limité - soit par des côtes, soit par des hauts fonds, soit arbitrairement par un segment joignant deux ports - il est clair que les lignes de notre damier ne peuvent suivre de près la frontière du domaine : par endroits le damier sortira du domaine, par endroits au contraire la frontière sera extérieure au damier.

Transformons, par une transformation conforme, le réseau de droites orthogonales en un réseau de coordonnées curvilignes orthogonales : dès lors, le pourtour extérieur du

COASTAL ENGINEERING

réseau pourra serrer de très près la frontière.

b/ - la terre est sphérique :

La transformation conforme est valable pour la sphère : les coordonnées curvilignes sont des arcs de grands ou petits cercles. Notons que le pas d'espace est alors variable.

c/ - la côte est découpée, les fonds sont variables :

Nous modifierons le pas d'espace obtenu par la transformation conforme de telle sorte que le tracé des côtes soit suivi d'aussi près que possible. Nous nous efforcerons également de lier ce pas d'espace à la profondeur locale de l'Océan - Cf. ci-dessous paragraphe II.4.

Le réseau de coordonnées curvilignes obtenues forme un ensemble de carreaux. Nous continuerons à appeler (Sud/Nord) et (Ouest/Est) les lignes de coordonnées. Nous numérotions ces lignes - par des nombres entiers - à partir d'une origine arbitraire : le point M - de coordonnées géographiques φ, G - a pour coordonnées «réseau» les nombres x et y . (Cf. Fig. 3)

La quasi totalité des points M est située à l'intérieur ou sur la frontière du domaine et le tracé répond aux conditions suivantes :

a/ - Les lignes des réseaux sont orthogonales.

b/ - Le canevas couvre par un nombre limité de petits carreaux curvilignes le domaine donné.

c/ - Le pas d'espace L varie lentement (ou pas) et régulièrement d'un point à un autre.

Notons M_v l'un quelconque des points de calcul entourant M (c'est-à-dire M_n ou M_e ou M_s ou M_w), nous poserons $L =$ valeur moyenne des MM_v .

Nous appellerons profondeur moyenne locale h la valeur moyenne des sondes portées sur la carte dans un contour relatif à un point M donné.

En tout point M on repèrera ou l'on déterminera :

- La latitude φ
- La longitude G
- Le pas d'espace local L
- La profondeur h
- L'angle α de la tangente orientée s/n par rapport au Nord vrai.

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

II.2 EQUATIONS DIFFERENTIELLES DU PROBLEME

Nous utiliserons les deux équations fondamentales suivantes :

- l'équation de continuité
- l'équation dynamique

L'écriture de ces équations est trop connue pour qu'il soit besoin de s'y arrêter longuement. Nous nous bornerons à préciser ici nos simplifications et nos notations.

a - Equation de continuité

Soit (C) un contour, relatif à M, d'aire s . En tout point à l'intérieur de (C) les dénivellations, au même instant t , ne sont pas exactement les mêmes - si petit que soit s - . Nous noterons $\bar{\zeta}$ la valeur moyenne de ces dénivellations à l'instant t , nous admettrons que ζ est la dénivellation en un certain point M situé à l'intérieur de (C).

Soit N un point de (C) où nous connaissons : la dénivellation ζ_N , la profondeur h_N , la composante V_{1N} de la vitesse sur la normale intérieure (cf figure 4).

L'équation de continuité s'écrit :

$$s \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} = \int_{(c)} (h_N + \zeta_N) V_{1N} dl$$

Nous poserons :

$$\hat{O}_1 = \int_{(c)} h_N V_{1N} dl$$

Nous noterons enfin \bar{h} la valeur moyenne des sondes portées sur la carte dans la zone limitée par (C).

Assimilant $\left(\frac{\zeta}{h}\right)_N$ à $\frac{\bar{\zeta}}{h}$ nous écrivons l'équation de continuité sous la forme :

$$s \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} = \left(1 + \frac{\bar{\zeta}}{h}\right) \hat{O}_1 \quad (1)$$

Précisons comment nous obtenons la vitesse V_1 implicitement contenue dans (1) :

COASTAL ENGINEERING

1/ - Cas général

V_{\perp} est inconnue. L'équation dynamique est alors utilisée pour le déterminer.

2/ - Cas «bateur»

Dans un modèle hydraulique la marée pourrait être engendrée par un bateur : la vitesse u_{\perp} normale au plan du bateur serait une donnée.

Par analogie, nous appellerons «bateur» tout élément du contour où $V_{\perp} = u_{\perp}$ est donnée.

3/ - Cas «absorbeur»

Dans un modèle hydraulique il est d'usage courant d'utiliser des dispositifs propres à éliminer les mouvements parasites dûs aux réflexions sur les parois. Ces dispositifs absorbent une certaine fraction de l'énergie transportée par l'onde incidente.

Par analogie nous appellerons «absorbeur» tout élément du contour où une fraction de l'énergie est absorbée. Les absorbeurs que nous utiliserons seront définis par la relation :

$$V_{\perp N} = -k \sqrt{\frac{g}{h_N}} \zeta_N$$

où k est un facteur constant arbitraire ou non - cette expression correspond bien à une absorption d'énergie.

b - Equation dynamique

Avec les simplifications indiquées (cf paragraphe 1.2), l'équation dynamique s'écrit :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -g \vec{\text{grad}} \zeta - 2 \vec{\Omega} \wedge \vec{v} + \vec{F} - \vec{R}$$

où : $\vec{\Omega}$ est le vecteur instantané de rotation terrestre porté par la ligne des pôles.

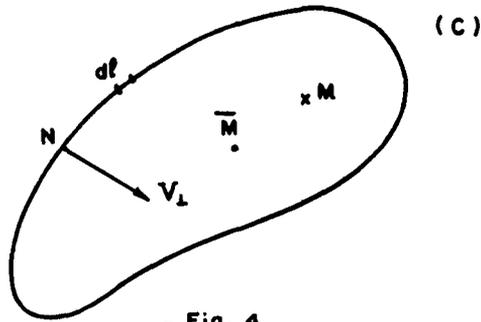
\vec{F} la «force génératrice de la marée»

\vec{R} la force de frottement.

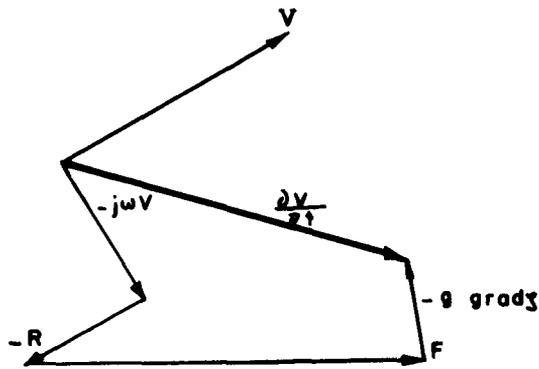
Tous les vecteurs considérés sont situés dans le plan horizon local et il est commode d'introduire l'écriture complexe (cf figure 5).

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \text{grad} \zeta - j\omega v + F - R$$

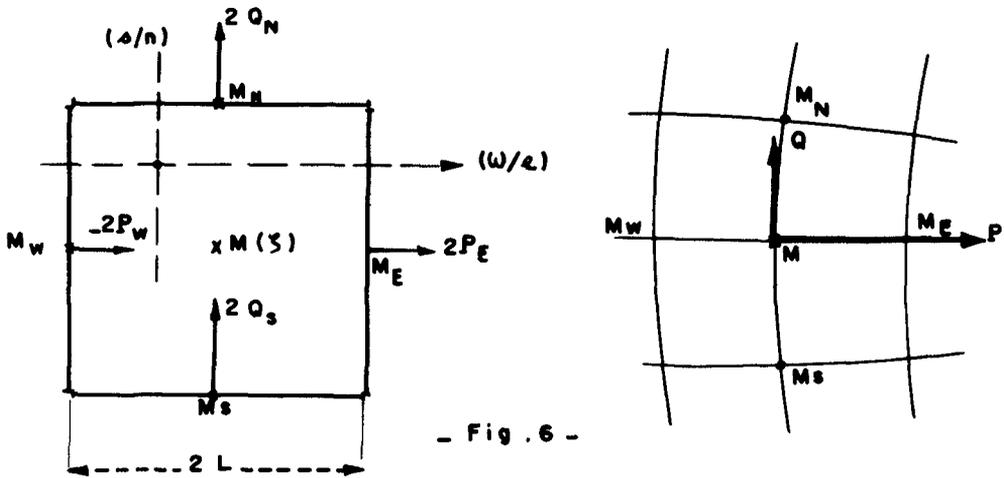
DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE



- Fig. 4 -



- Fig. 5 -



- Fig. 6 -

COASTAL ENGINEERING

dans cette écriture \vec{V} représente le vecteur \vec{V} , $-j\vec{V}$ représente le vecteur $-j\vec{V}$ déduit du vecteur \vec{V} par une rotation de 90° dans le sens de la rose des vents.

Explicitons très succinctement les quatre quantités du deuxième membre :

1/ - De même que nous avons noté M_{1j} le point de calcul intersection de la ligne $(s/n)_j$ et de la ligne $(w/e)_j$, appelons x, y le point intersection des lignes fictives $(s/n)_x$ et $(w/e)_y$. Dans tout le domaine la dénivellation à un instant t , est une fonction $\zeta(x, y)$ où x et y sont des nombres purs :

$$\text{grad } \zeta = \left[\frac{\partial \zeta}{\partial x} + j \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right] \frac{1}{2L}$$

2/ - Le vecteur instantané de rotation terrestre $\vec{\Omega}$ a pour intensité :

$$\Omega = \frac{2\pi}{24 \times 3600} \text{ sec}^{-1}$$

Sa composante sur la direction zénithale locale est :

$$\frac{\omega}{2} = \Omega \sin \varphi$$

3/ - Il est d'usage de décomposer la force génératrice de la marée en termes sinusoïdaux représentés par un indice k . Chaque composante - il faudrait dire plutôt chaque «marée indicielle» - est caractérisée par :

- sa période T_k
- son coefficient ... C_k

dont les valeurs sont déterminées par les lois de la mécanique céleste. En projetant la force correspondante sur les axes curvilignes locaux on obtient en utilisant des notations exponentielles usuelles :

$$F_k = X_k + jY_k = C_k \left[A_{xk} e^{i\left(\frac{2\pi t}{T_k} + \alpha_{xk}\right)} + jA_{yk} e^{i\left(\frac{2\pi t}{T_k} + \alpha_{yk}\right)} \right]$$

où C_k et T_k sont des quantités tabulées (cf par exemple «Admiralty annual of Tides»

où $A_{xk}, \alpha_{xk}, A_{yk}, \alpha_{yk}$ sont des constantes pour un lieu donné et un groupe de composantes bien défini, constantes obtenues par un calcul simple de trigonométrie sphérique.

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

Dans ce qui suit nous ne considérerons qu'une composante M_2 correspondant rappelons-le à une lune fictive tournant à vitesse et distance constantes dans le plan de l'équateur. Pour alléger l'écriture nous omettrons l'indice k et poserons :

$$F = X + jY$$

4/ - Il est d'usage courant d'utiliser pour la force de frottement l'expression :

$$R = f [h + \zeta]^{-n} |V| V$$

où n est un exposant dépendant de la loi choisie

f est un coefficient dépendant de la loi choisie et de la nature du fond.

Nous introduisons le débit complexe $D = LhV$ et écrivons finalement l'équation dynamique sous la forme :

$$\frac{\partial D}{\partial t} = - \frac{gh}{2} \left[\frac{\partial \zeta}{\partial x} + j \frac{\partial \zeta}{\partial w} \right] - j\omega D + Lh (X + jY) - \frac{f |D| D}{Lh (h + \zeta)^n} \quad (2)$$

II.3 EQUATIONS PRATIQUES DU PROBLEME

Rappelons que nous cherchons une solution (ζ, \vec{V}) formée par l'ensemble des :

$$\zeta_M (t_0 + mT), \quad \vec{V}_M (t_0 + mT)$$

pour $m = 0, 1, \dots, \frac{\zeta}{T}$

$$M = M_1, \dots, M_V$$

Nous avons indiqué comment déterminer les points de calcul et souligné l'importance du «pas d'espace» local L , et du pas de temps T .

Les équations différentielles (1) et (2) doivent être mises sous forme de différences finies.

a - Equation de continuité

Le contour (C) est formé par une ligne brisée fermée, constituée par des élé-

COASTAL ENGINEERING

ments de segments des réseaux (s/n) , (w/e) .

Le point de calcul M est :

à l'intérieur de (C) si M est à l'intérieur du champ de calcul,
sur le contour (C) si M est sur la frontière.

Le point \bar{M} est par définition un point fictif à l'intérieur de (C) où la dénivellation est à chaque instant la dénivellation moyenne $\bar{\zeta}$ du domaine d'aire s limité par (C) .

Nous calculerons $\bar{\zeta}$ à des instants multiples pairs, par exemple, de T par

$$s \frac{\bar{\zeta}_{2m+2} - \bar{\zeta}_{2m}}{2T} = \left[1 + \frac{\bar{\zeta}_{2m+2} + \bar{\zeta}_{2m}}{2\bar{\pi}} \right] \Omega_{2m+1}$$

Pour passer de $\bar{\zeta}$ à la dénivellation cherchée ζ nous utilisons des formules de lissage que nous ne précisons pas ici.

b - Equation dynamique

Nous poserons $LhV = D = P + jQ$ et calculerons le débit aux temps multiples impairs de T . Après quelques simplifications il vient :

$$\begin{aligned} \frac{(P+jQ)_{2m+1} - (P+jQ)_{2m-1}}{2T} &= - \frac{gh}{2} [\Delta_x \zeta + j\Delta_y \zeta]_{2m} \\ &+ \frac{\omega}{2} [(Q-jP)_{2m+1} + (Q-jP)_{2m-1}] \\ &+ Lh [X+Y]_{2m} \\ &- \frac{f \sqrt{P^2_{2m-1} + Q^2_{2m-1}}}{2Lh[h+\zeta_{2m}]^n} [(P+jQ)_{2m+1} + (P+jQ)_{2m-1}] \end{aligned} \quad (2')$$

Nous n'explicitons pas ici les expressions précises en différences finies des $\Delta_x \zeta$, $\Delta_y \zeta$, et ζ ; bornons-nous à indiquer que nous utilisons des formules de lissage.

En définitive partant du temps $m = 0$ et supposant par exemple que tous les $\zeta_M(0)$ et tous les $\bar{V}_M(0)$ (sauf naturellement les vitesses éventuellement données) sont nulles, on applique la force astronomique et l'on calcule tous les V_{M_1} ($m = 1$), ..., \bar{V}_{M_V} ($m = 1$) par (2'). Puis par (1') tous les ζ_{M_1} ($m = 2$), ..., ζ_{M_V} ($m = 2$), etc ...

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

à partir d'un certain temps on peut admettre que le régime stable est obtenu : la période suivante fournit alors la solution cherchée sous la forme :

$$(\zeta, \vec{v}) = \text{ensemble des } \zeta_M(m), \vec{v}_M(m)$$

II.4 CARACTERES DU MODELE MATHEMATIQUE

Nous entendons par «Modèle mathématique» l'ensemble des éléments nécessaires à l'étude c'est-à-dire :

1/ - Les données déduites du tracé du canevas, de la carte et des documents spécialisés.

2/ - Le programme de calcul, c'est-à-dire la séquence des ordres de calcul, permettant de résoudre le système des équations (1') et (2').

L'exploitation de ce modèle s'effectue à l'aide d'une machine à calculer.

a - Condition de stabilité du modèle

Seule en définitive la solution stable nous intéresse ; cette solution ne peut être obtenue qu'après extinction du régime transitoire. Pour que cette extinction ait lieu il faut qu'existe une certaine relation entre les pas de temps T et L .

(x le numéro d'ordre d'une des lignes (s/n)
soient (
(y le numéro d'ordre d'une des lignes (w/e).

Prenons le système (1) + (2) sous la forme très simplifiée suivante :

$$s \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0_1$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = - gh \text{ grad } \zeta - j\omega D$$

La solution stable, si elle existe, est de la forme :

$$\zeta = z e^{\alpha x L + \beta y L + \gamma m T}$$

$$D = LhV = P_1 + jQ = (p+jq) e^{\alpha x L + \beta y L + \gamma m T}$$

où α, β, γ sont des nombres imaginaires purs.

COASTAL ENGINEERING

Nous n'avons pas pris en compte la force astronomique et la force de frottement.

Pour fixer l'écriture considérons les schémas de la figure 6.

En différences finies notre système s'écrit :

$$(1'') : \quad \zeta_{x=0} - \zeta_{x=0} = \frac{T}{L^2} \begin{bmatrix} P & -P & +Q & -Q \\ x=-1 & x=1 & x=0 & x=0 \\ y=0 & y=0 & y=-1 & y=1 \\ m=2\mu+1 & m=2\mu+1 & m=2\mu+1 & m=2\mu+1 \end{bmatrix}$$

$$(2'') \quad \begin{cases} \{ P & -P \\ x=0 & x=0 \\ y=0 & y=0 \\ m=2\mu+1 & m=2\mu-1 \end{cases} = ghT \begin{bmatrix} \zeta & -\zeta \\ x=-1 & x=1 \\ y=0 & y=0 \\ m=2\mu & m=2\mu \end{bmatrix} + \omega T \begin{bmatrix} Q & +Q \\ x=0 & x=0 \\ y=0 & y=0 \\ m=2\mu+1 & m=2\mu-1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \{ Q & -Q \\ x=0 & x=0 \\ y=0 & y=0 \\ m=2\mu+1 & m=2\mu-1 \end{cases} = ghT \begin{bmatrix} \zeta & -\zeta \\ x=0 & x=0 \\ y=-1 & y=1 \\ m=2\mu & m=2\mu \end{bmatrix} - \omega T \begin{bmatrix} P & +P \\ x=0 & x=0 \\ y=0 & y=0 \\ m=2\mu+1 & m=2\mu-1 \end{bmatrix}$$

Dans le système (1'') + (2'') portons la solution stable ; il vient après simplification :

$$p \frac{T}{L^2} \text{sh } \alpha L + q \frac{T}{L^2} \text{sh } \beta L + z \text{sh } \gamma T = 0$$

$$p \text{sh } \gamma T - q \omega T \text{ch } \gamma T + z ghT \text{sh } \alpha L = 0$$

$$p \omega T \text{ch } \gamma T + q \text{sh } \gamma T + z ghT \text{sh } \beta L = 0$$

D'où la condition :

$$\begin{vmatrix} \frac{T}{L^2} \text{sh } \alpha L & \frac{T}{L^2} \text{sh } \beta L & \text{sh } \gamma T \\ \text{sh } \gamma T & -\omega T \text{ch } \gamma T & ghT \text{sh } \alpha L \\ \omega T \text{ch } \gamma T & \text{sh } \gamma T & ghT \text{sh } \beta L \end{vmatrix} = 0$$

c'est-à-dire :

$$\text{sh}^2 \gamma T + (\omega T)^2 \text{ch}^2 \gamma T = \frac{ghT^2}{L^2} [\text{sh}^2 \alpha L + \text{sh}^2 \beta L]$$

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

en posant $\alpha = ia$ $\beta = ib$ $\gamma = ic$ il vient :

$$1 - [1 + (\omega T)^2] \cos^2 CT = \frac{ghT^2}{L^2} [\sin^2 aL + \sin^2 bL]$$

cette relation entraîne immédiatement :

$$\frac{ghT^2}{L^2} [\sin^2 aL + \sin^2 bL] \leq 1$$

Par conséquent, et dans le cas très simplifié où le système (1') + (2') se ramènerait au système (1'') + (2'') ; la condition de stabilité, - cette condition est en fait une condition nécessaire - α, b, c , réels, s'écrit :

$$T \leq \frac{L}{\sqrt{2gh}}$$

En pratique le système employé est (1') + (2') et non (1'') + (2'') ; d'autre part on utilise des formules de lissage ; finalement l'expression ci-dessus n'est qu'une indication.

On remarque que L et h sont variables d'un point de calcul à un autre, par conséquent seule la valeur minimum

$$\left(\frac{L}{\sqrt{h}}\right)_{\text{mini}} \text{ du rapport } \frac{L}{\sqrt{h}}$$

est à considérer.

b - Temps de calcul

Soient : ν le nombre des points de calcul, \bar{L}^2 la valeur moyenne du carré du step d'espace, Σ l'aire du champ de calcul.

$$\text{On a approximativement : } \nu = \frac{\Sigma}{\bar{L}^2}$$

Soit : $\bar{\tau}$ le temps de calcul moyen d'un point-résolution du système (1') + (2') ; à la durée nature $2T$ correspond le temps de calcul $\nu \bar{\tau}$, par conséquent le temps de calcul θ correspond à une période τ :

$$\theta = \nu \bar{\tau} \cdot \frac{\tau}{2T} = \Sigma \tau \cdot \frac{g}{2} \cdot \frac{\bar{\tau}}{L^2} \cdot \frac{1}{(Lh^{-1/2})_{\text{mini}}}$$

COASTAL ENGINEERING

donc :

$$\theta \text{ est proportionnel à } \frac{\Sigma \tau \sqrt{h_{\max i}}}{[L^2]^{3/2}}$$

ou encore puisque la surface moyenne \bar{s} est proportionnel à L^2 :

$$\frac{\theta}{\tau} \text{ est proportionnel à } \Sigma \sqrt{h_{\max i}} \cdot \frac{1}{(\bar{s})^{3/2}}$$

dans cette expression on distinguera :

- Le facteur $\Sigma \sqrt{h_{\max i}}$: donnée du problème
- Le facteur $(\bar{s})^{3/2}$: dépendant du tracé du réseau
- Le facteur τ : dépendant de l'écriture du programme de calcul et de la machine utilisée.

Admettons par exemple que nous disposons d'un modèle mathématique établi pour l'Atlantique Nord et comportant en particulier 200 points environ. La célérité relative du calcul $\frac{\theta}{\tau}$ est, disons de 1/25, la durée du régime transitoire est $\theta \tau$.

Le temps de calcul total - régime transitoire + régime permanent - est :

$$\theta = \frac{1}{25} \times 10 \times 12,5 \approx 5 \text{ heures}$$

Admettons que nous voulions étudier la marée semi-diurne sur le globe terrestre entier et utilisons un canevas ayant le même pas d'espace moyen. La surface Σ' est très approximativement 10 fois supérieure : le nombre de points ν' sera d'environ 2.000.

La durée du régime transitoire pourra être, disons de l'ordre de 50 τ et par suite le temps de calcul sera d'environ :

$$\theta' = \frac{2.000}{200} \cdot \frac{50}{1} \cdot 5 = 250 \text{ heures}$$

Revenons alors aux méthodes de résolution classiques - recherche directe de la solution d'un système d'équations simultanées.

Pour 200 points de calcul il y a 400 inconnues. La résolution d'un système de 400 équations à 400 inconnues exige par exemple 50 heures de calcul.

La résolution d'un système de 4000 équations à 4000 inconnues exige au moins :

$$\left(\frac{4000}{400}\right)^3 \times 50 = 50.000 \text{ heures}$$

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

La comparaison des deux valeurs :

50.000 heures : méthode classique

250 heures : méthode décrite ici

est parlante d'elle-même.

Sans même supposer que nous disposions d'une machine à calculer du tout dernier modèle, il est possible d'envisager par la méthode proposée d'obtenir les dénivellations et amplitudes de la marée M_2 , et des autres composantes essentielles. C'est là une oeuvre de longue haleine certes mais c'est possible.

NB - Nous comptons effectivement effectuer ce calcul pour l'ensemble des mers du globe.

c - Comparaison d'un modèle mathématique et d'un modèle hydraulique

Il n'est pas possible dans le cadre limité de cet exposé d'établir une comparaison précise entre un modèle mathématique et un modèle hydraulique destinés à étudier le même problème. Une telle comparaison demanderait d'ailleurs à être très nuancée, car selon que l'on donne la priorité à tel ou tel point de vue les éléments à comparer diffèrent.

Bornons-nous à quelques indications :

1er point : Il est clair que plus un modèle hydraulique est à grande échelle, mieux le terrain sera représenté et plus le modèle sera fidèle. Un certain rapprochement peut être fait entre l'échelle d'un modèle hydraulique et le pas d'espace d'un modèle mathématique : toutes choses égales d'ailleurs, la précision des résultats et le prix de réalisation de ces modèles croissent soit avec l'échelle, soit avec le nombre de points.

2ème point : Sur un modèle hydraulique la disposition des organes produisant (bateur) et contrôlant (absorbeurs, éléments rugueux) la marée doit être effectuée avec soin. De même sur un modèle mathématique le choix de l'emplacement des batteurs et des absorbeurs, le choix de loi précise de frottement doivent être étudiés soigneusement.

3ème point : Sur un modèle hydraulique, on ne peut modifier notablement certaines parties (bateur par exemple) sans dépense importante. Sur un modèle mathématique au contraire les modifications sont en général peu coûteuses.

4ème point : Lorsque l'on veut étudier des domaines de grandes dimensions (océans) le modèle hydraulique est nécessairement surclassé par le modèle mathématique : seul ce dernier peut tenir compte de la distribution des forces - force de Coriolis et force génératrice particulièrement - et de la topographie sphérique de la terre.

Pour des domaines de quelques centaines ou dizaines de kilomètres (mers littorales) les modèles physiques doivent être réalisés sur plaque tournante pour prendre en compte la force de Coriolis. Le coût de la réalisation est alors très élevé ; l'échelle, donc la fidélité, est limitée.

Par contre pour des domaines de quelques kilomètres (baies) les études peuvent s'exécuter sur des modèles hydrauliques fixes qui sont alors vraisemblablement toujours supérieurs aux modèles mathématiques.

COASTAL ENGINEERING

III - APPLICATIONS

Nous avons effectué, et nous poursuivons actuellement, différentes études de marée. Nous rendrons compte, ici partiellement de deux d'entre elles :

en premier lieu de l'étude de la reproduction sur modèle mathématique de la marée semi-diurne lunaire M_2 en Manche.

en second lieu du calcul des amplitudes-intensités et phases- de la marée semi-diurne lunaire en Atlantique Nord.

Dans l'un et l'autre cas nous avons utilisé une machine à calculer électronique IBM 650.

Nota - Nous comptons effectuer la détermination des dénivellations et des courants de marée à la surface du globe - par la méthode préconisée - à l'aide d'une machine à calculer d'un modèle plus perfectionné.

III.1 ETUDE DE LA MAREE SEMI-DIURNE LUNAIRE EN MANCHE

Ce modèle a été utilisé pour des études de la SEUM, qui a bien voulu nous permettre de divulguer certains des résultats obtenus pour leur compte.

L'on sait qu'en Manche la composante principale de la force génératrice de la marée est le terme dit " M_2 " de période 12 H. 24 mn. L'action de cette force sur la surface de La Manche est négligeable vis-à-vis de son action sur la surface de l'Atlantique.

Nota - En fait on a cherché à reproduire une marée ayant pour période 12 h.24 mn et pour amplitude l'amplitude de la marée de vive-eau moyenne.

III.1.1 Tracé du canevas

Les côtes bordant La Manche sont très découpées, les fonds sont très variables : le canevas des points de calcul doit être à mailles serrées, le rapport L/\sqrt{gh} donc le pas de temps, sera faible et le temps relatif de calcul θ/ζ important.

Pour établir le canevas des points de calcul, nous avons adopté pour base l'île de JERSEY : pour que cette île figure dans le modèle mathématique le pas d'espace local doit être de l'ordre de 10^4 mètres. Il atteint la moitié de cette valeur dans la région de St-MALO et le quadruple aux limites Ouest-et-Est.

Les profondeurs faibles du Golfe de St-MALO, nous ont conduit à adopter finalement pour le pas de temps la valeur :

$$T = 250 \text{ sec}$$

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

Dans ces conditions, le nombre des points de calcul est en gros de 200 et le rapport θ/ζ est de l'ordre de 1/6.

III.1.2 Forme des équations

- a/ - La marée est engendrée par un «bateur» situé sur la ligne Ouessant/Land's End : nous nous sommes donné les courants u_1 , normaux à la ligne indiquée, d'après les indications contenues dans le document N° 426 A du Service Hydrographique de la Marine Française.
- b/ - Nous avons admis qu'au Pas de Calais le courant était en phase avec la dénivellation. Les documents maritimes nous ont conduit à adopter :

$$k = - \frac{V_1}{\zeta \sqrt{g/h}} = 0,5$$

- c/ - Nous avons admis comme loi de frottement :

$$|R| = 2,75 \cdot 10^{-3} \frac{|V|^2}{h}$$

en nous basant sur l'expression utilisée par le Dr HANSEN en Mer du Nord.

- d/ - Dans l'essai, dont il est ici rendu compte, nous avons admis que $\zeta/h \ll 1$: cette hypothèse exclue toute dissymétrie entre les dénivellations positives et négatives.

III.1.3 Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont représentés sur les plans 1 et 2 joints.

Le plan N° 1 représente les amplitudes et phases calculées par le modèle. Il est à rapprocher du plan N° 1 bis représentant les amplitudes et cotidates établies par Mr. DOODSON . En fait la seule comparaison probante consiste à rapprocher les résultats obtenus par le calcul et les résultats mesurés. Le plan N° 1 ter condense cette comparaison.

Le plan N° 2 représente quelques ellipses de courant.

Nous sommes conduits à penser que des modifications de détail permettraient d'améliorer la concordance entre les résultats de calcul et les mesures. Parmi ces améliorations citons :

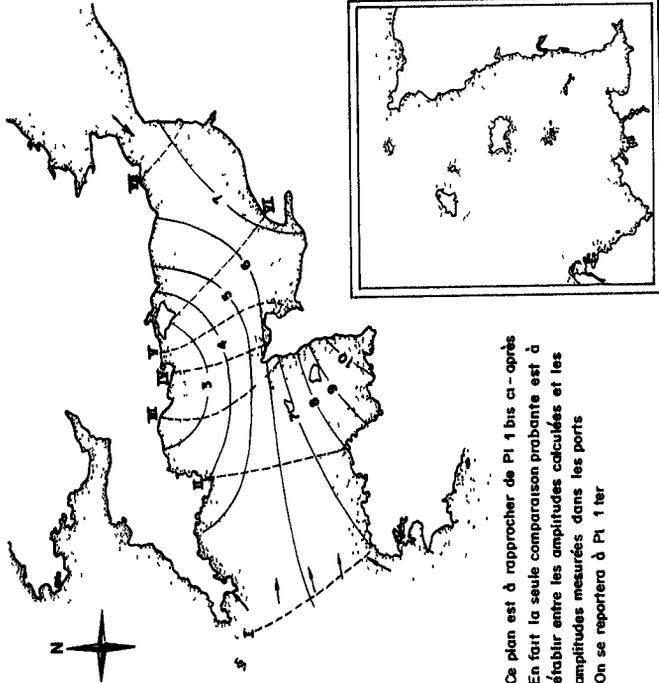
- a/ - La prise en compte du terme correctif ζ/h - dans l'équation de continuité et dans l'expression de la force de frottement.

PL 1

Marée semi-diurne lunaire

Résultats calculés

--- Catidale : *différence en heures entre les instants de la P.M. locale et de la P.M. à BREST*
 — Marnage en mètres



Ce plan est à rapprocher de Pl 1 bis ci-après
 En fait la seule comparaison probante est à
 établir entre les amplitudes calculées et les
 amplitudes mesurées dans les ports
 On se reportera à Pl 1 ter

Plate 1

Marée semi-diurne lunaire

Lignes cotidales selon Doodson et Corkon (1931)

--- 150
 — 14
 Catidale : *Différence entre l'heure de la P.M. et l'heure de passage de la lune au méridien de Greenwich*
 Marnage en pieds de la Marée M2

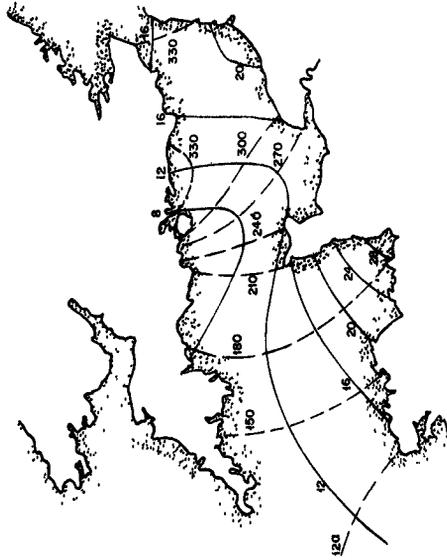
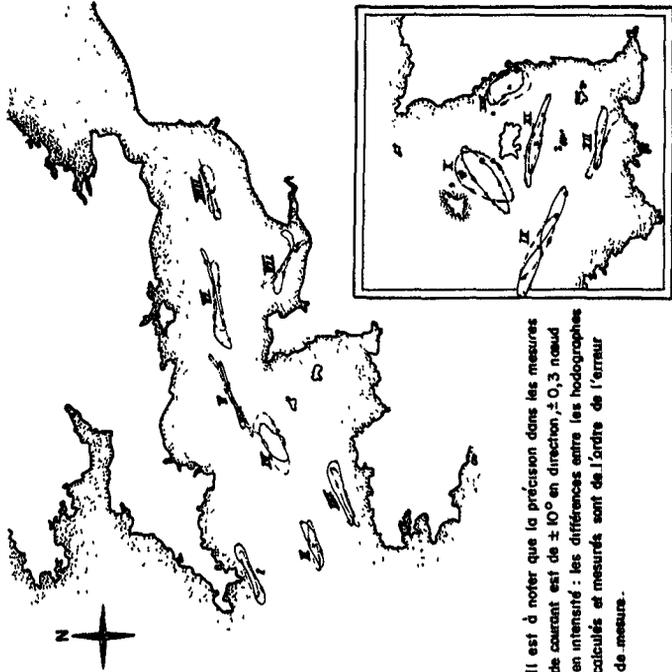


Plate 1 bis

Pl. 2

Marée semi-diurne lunaire

Résultats calculés



- Il est à noter que la précision dans les mesures de courant est de $\pm 10^\circ$ en direction, $\pm 0,3$ nœud en intensité : les différences entre les hodographes calculés et mesurés sont de l'ordre de l'erreur de mesure.

Plate 2

Pl 1 ter

Marée semi-diurne lunaire

— Comparaison Marnages Modèles / Nature —
pour différents ports de la Manche

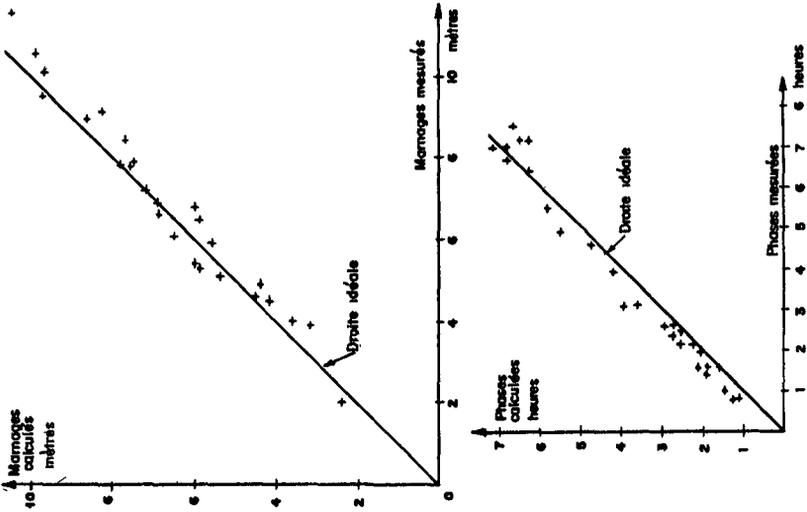


Plate 1 ter

Pl. 4

Marée semi-diurne lunaire

— Résultats calculés et Amplitudes mesurées —

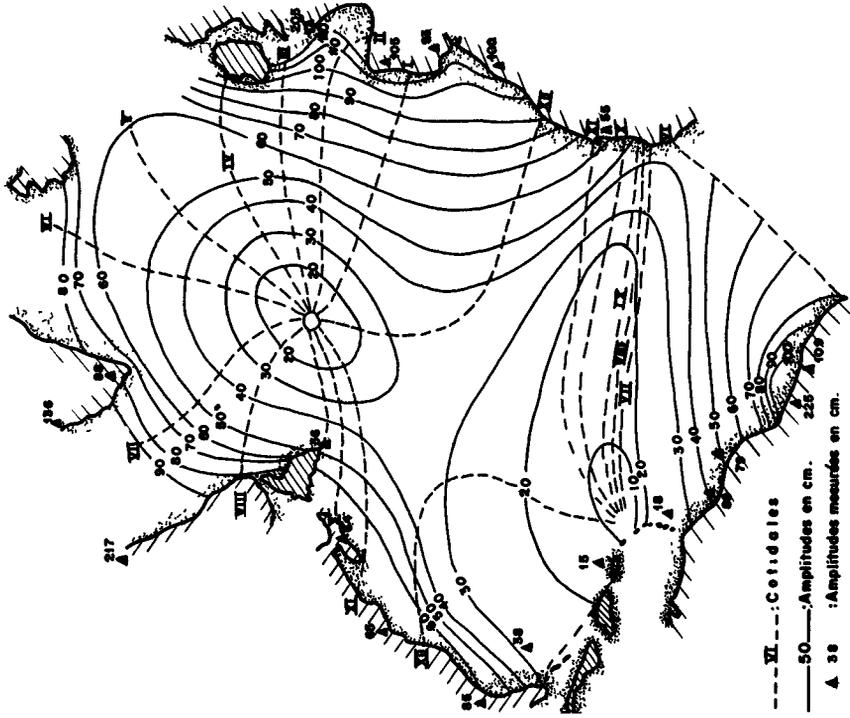


Plate 4

Pl. 3

Marée semi-diurne lunaire

Réseau des points de calcul

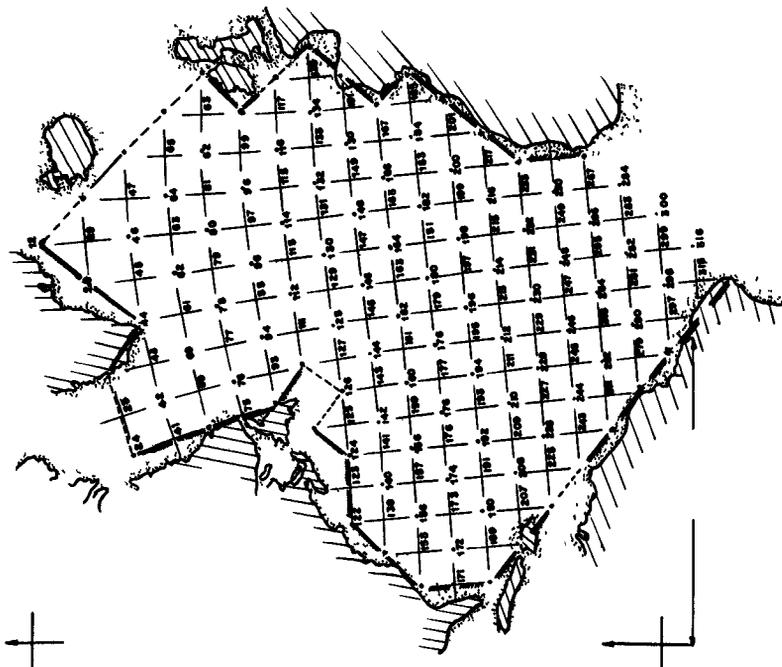


Plate 3

Marée semi-diurne lunaire

— Cotidales selon HARRIS —

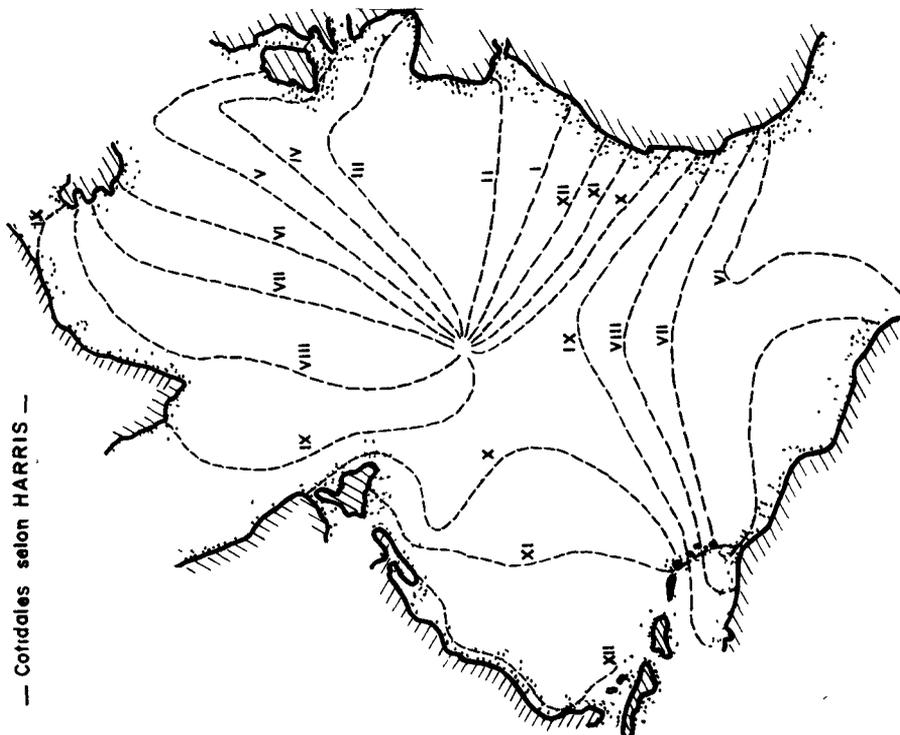


Plate 4 bis

Marée semi-diurne lunaire

— Comparaison des marnages mesurés et calculés pour différents ports de l'Atlantique Nord —

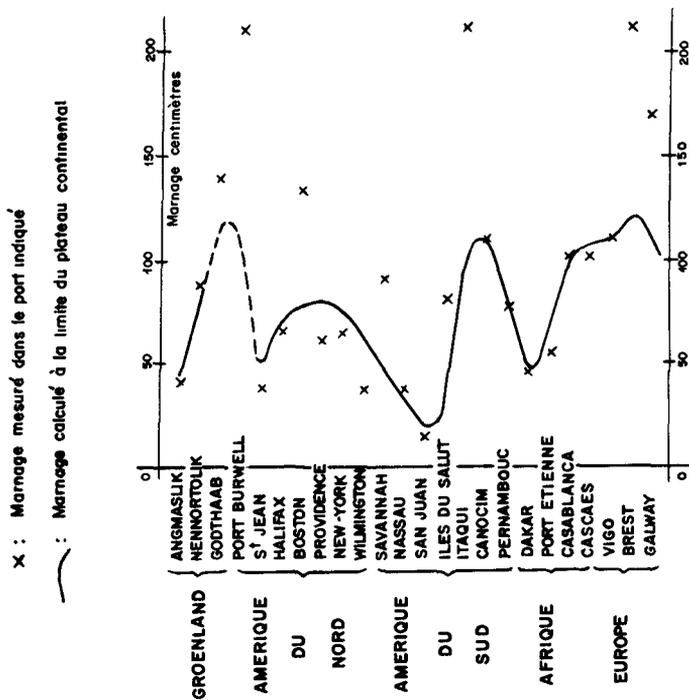


Plate 4 fer

COASTAL ENGINEERING

b/ - La prise en compte de l'estuaire de la Seine.

En outre on pourrait envisager d'augmenter le nombre de points de calcul pour inclure expressément dans le modèle certains détails géographiques importants (îles de Wight, de Guernesey, etc ...).

III.2 ETUDE DE LA MAREE SEMI-DIURNE EN ATLANTIQUE NORD

Cette étude a été effectuée dans le cadre des recherches générales de la SOGREAH ; les résultats obtenus montrent que l'on peut espérer arriver à déterminer les lignes cotidales et équiamplitudes de toutes les composantes importantes de la marée réelle sur l'ensemble des océans.

III.2.1 Tracé du canevas

Le domaine considéré a été borné :

- au Nord par la ligne Angmassalik (Groenland) / Erest
- au Sud par la ligne Dakar / Pernambuco.

Nous nous sommes limités, à 200 points de calcul : la valeur moyenne \bar{L} du pas d'espace est d'environ 450 kilomètres, et le pas de temps $T = 750$ sec.

III.2.2 Forme des équations

L'expérience nous a montré qu'il fallait, en raison de la valeur élevée du pas d'espace, améliorer les écritures aux différences finies des équations dynamique et de continuité : en particulier le point \bar{M} de chaque contour (C) doit être précisé.

La marée est engendrée :

- a/ - par un batteur situé sur la limite Sud : les mesures de courants faisant défaut nous nous sommes donné les dénivellations le long de la ligne Dakar / Pernambuco.
- b/ - par l'action de la force génératrice dans le domaine.

Les fonds étant de plusieurs kilomètres la force de frottement est négligeable : pour obtenir une solution stable nous avons introduit des absorbeurs sur certaines portions de la frontière du modèle -(limite Nord, détroit de Davis, Banc de Terre Neuve, Petites Antilles).

III.2.3 Résultats obtenus

Nous présentons ici :

- a/ - Le tracé des points de calcul (plan N° 3). On remarquera en particulier :

DETERMINATION DES DENIVELLATIONS ET DES COURANTS DE MAREE

1 - que le tracé est assez souple pour bien suivre le bord du plateau continental, sans qu'il soit nécessaire de courber exagérément les lignes du réseau.

2 - que, (la déformation des longueurs due à la projection mercator le masque), le pas d'espace est près de deux fois plus élevé au Sud - grands fonds du Sud Ouest de l'Atlantique Nord - qu'au Nord : ceci permet de conserver au rapport $L / \sqrt{2gh}$ une valeur sinon constante du moins comprise entre deux limites voisines.

b/ - Le tracé des cotidales et des courbes «équi-amplitudes» (plan N° 4).

Ce plan est à rapprocher du plan N° 4 bis représentant les cotidales établies par Harris. On remarquera que les cotidales calculées sont proches de celles de Harris au voisinage des côtes. Par contre on ne manquera pas de constater la différence du tracé au centre de l'Atlantique Nord. Nous estimons pour notre part que cette différence souligne la valeur du modèle mathématique.

Les courbes de Harris ne suffisent pas pour apprécier la validité du modèle. Afin de compléter la comparaison nous présentons sur le plan N° 4 ter un rapprochement entre les amplitudes mesurées et les amplitudes calculées dans certains ports. Cette comparaison peut sembler peu satisfaisante. En fait il faut bien saisir que :

1 - Le modèle est systématiquement limité au bord du plateau continental, et ne peut par suite représenter les amplitudes dans les ports situés sur un large plateau continental (Brest, Pasquamydy).

2 - La côte est schématisée et l'influence de détails - Floride par exemple - n'est pas sensible sur le modèle.

De toutes manières il est possible de prolonger le modèle sur le plateau continental par un canevas à mailles fines. On peut aussi étudier pour telle mer littorale, tel golfe, un nouveau modèle dont les conditions à la limite « haute mer » seraient données par le modèle de l'Atlantique Nord.

CONCLUSION

Les machines à calculer électroniques modernes permettent de réaliser et d'exploiter des modèles mathématiques adaptés à la détermination des dénivellations et des courants de marée dans un domaine maritime quelconque. Cette détermination s'effectue non pas brutalement - c'est-à-dire en recherchant directement les solutions sinusoïdales - mais en suivant de près la propagation des ondes - c'est-à-dire en serrant la réalité physique.

Pour un domaine restreint, où la force génératrice de la marée est négligeable, des modèles hydrauliques peuvent être réalisés, mais souvent le modèle mathématique constituera une approche efficace et sûre du projet définitif de modèle hydraulique. Il permettra en particulier de prévoir l'implantation des batteurs, des absorbeurs et évitera en grande partie les tâtonnements et les réglages. Après réalisation du modèle hydraulique, le modèle mathématique permettra de contrôler les résultats, de prévoir les modifications, bref guidera et assurera l'exploitation du premier.

Pour un domaine vaste où l'action locale de la force génératrice de la marée est prépondérante nous estimons que seul un modèle mathématique peut être conçu - ce modèle donnera, rappelons-le pour finir, non seulement les dénivellations - sur lesquelles HARRIS et DOODSON ont déjà donné des résultats d'importance majeure - mais aussi les courants.