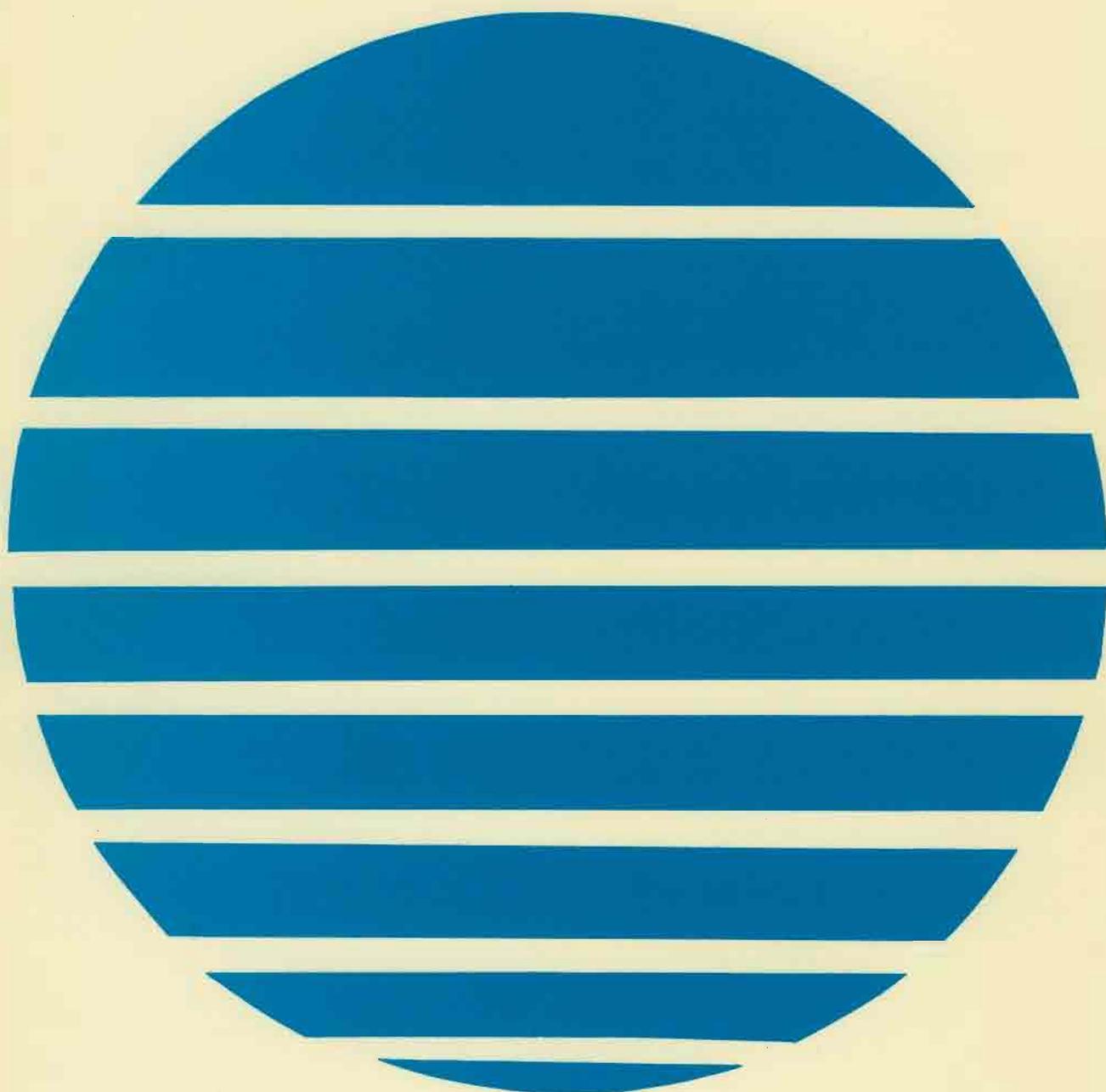


ANNALES HYDROGRAPHIQUES

5ème Série - Vol. 5, fasc. 2 - 1977

No 747



Service Hydrographique
et Océanographique de la Marine - Paris

- Toute correspondance relative au contenu de cette publication, et notamment à l'insertion d'articles, doit être adressée au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 3, avenue Octave-Gréard, 75200 Paris Naval.
- Toute correspondance relative au service de cette publication doit être adressée à l'Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 13, rue du Chatellier, 29283 Brest Cedex.

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

TABLE DES MATIÈRES

Première partie

	Pages
Mesures du gradient de vitesse au voisinage du fond en Manche, par MM. J. LE FLOCH et Y. DENIAUD, Laboratoire d'Océanographie Physique, Université de Bretagne occidentale	5
Quelques aspects de la structure thermique sur le plateau continental breton (Thermocline, Front thermique), par M. J. RAILLARD, Laboratoire d'Océanographie Physique, Faculté des Sciences de Brest	11
Le bruit dans les analyses de marée, par M. Y. DESNOËS, Ingénieur de l'Armement (hydrographe)	31
Analyse et prédiction de la marée. Application aux marées du Havre et de Brest, par MM. Y. DESNOËS, Ingénieur de l'Armement (hydrographe) et B. SIMON, Ingénieur Civil sous contrat	47

Deuxième partie

Mission hydrographique de Dragage (septembre 1969 - février 1972), par M. L. PIÉRETTI, Ingénieur de l'Armement (hydrographe)	65
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----



5^{ème} Série, Vol. 5, Fasc. 2 1977

N° 747

PREMIÈRE PARTIE

MESURES DU GRADIENT DE VITESSE AU VOISINAGE DU FOND EN MANCHE

par

MM. J. LE FLOCH et Y. DENIAUD

Laboratoire d'Océanographie Physique
Université de Bretagne Occidentale (*)

RÉSUMÉ

Nous présentons ici quelques-uns des résultats obtenus par des mesures de courants au voisinage du fond en Manche, au voisinage du point :

50°13' N 01°53' W

sur la radiale Cherbourg - Saint Alban.

La profondeur à cette station est de 58 m. Les enregistrements portent sur une durée de 48 heures du 9 au 11 mars 1976. Le matériel utilisé, posé sur le fond, est le développement d'une instrumentation plus ancienne (1967) modernisée à l'aide de composants produits dans l'industrie, mais assemblés dans un dispositif construit au laboratoire.

Pour des raisons techniques, les résultats que nous présentons ici portent seulement sur les enregistrements de vitesse à 10, 28 et 80 centimètres du fond, la direction des courants étant enregistrée à 60 et 195 cm du fond.

La cadence des mesures est de 2 minutes.

Parmi les résultats présentés ici, nous noterons principalement :

1 — Les courants de marée à trois niveaux (fig. 1) après filtrage des fluctuations.

2 — Un bref examen des fluctuations de vitesse, car ceci n'apporte que peu d'informations nouvelles à l'exception de la mise en évidence d'un pic d'énergie pour la période 40 minutes, ce que nous avons déjà eu l'occasion d'observer.

3 — Une étude de la représentation de la distribution verticale des courants en faisant appel à la loi logarithmique de Prandtl.

Ce dernier point est le plus important de la présente communication.

Nous avons d'abord utilisé les résultats d'enregistrement après élimination des fluctuations à courte période, et employé uniquement les moyennes des vitesses maximales du courant aux trois niveaux, et calculé à partir de ces données la longueur de rugosité z_0 , la vitesse de tension tangentielle v^* , et les valeurs de la viscosité virtuelle N_e .

Ensuite une étude semblable a été entreprise à partir des profils réels de vitesses, ce qui a conduit à une quarantaine de déterminations du paramètre z_0 .

Le courant de marée étant ici de caractère alternatif, nous avons pu montrer que les valeurs de z_0 dépendent de la direction du courant, et que les différences observées sont significatives.

ABSTRACT

We present here some of the results obtained by measurements near the sea bed in a point :

50°13' N 01°53' W

(between Cherbourg and St Alban), at a depth of 58 meters. These observations have been done during 48 hours from 9th till 11th of March 1976, with use of an apparatus designed and constructed by our laboratory.

For technical reasons we only use here the results obtained at 10, 28, 80 cm from the sea bottom (for the velocity), the direction of the current being recorded at 60 and 195 cm from the bottom.

The measurements are made (and recorded upon magnetic tape) every 2 minutes.

Among the results presented here we can notice mainly :

1 — The tidal currents at 3 levels (fig. 1) after smoothing (the fluctuations of the velocity are suppressed).

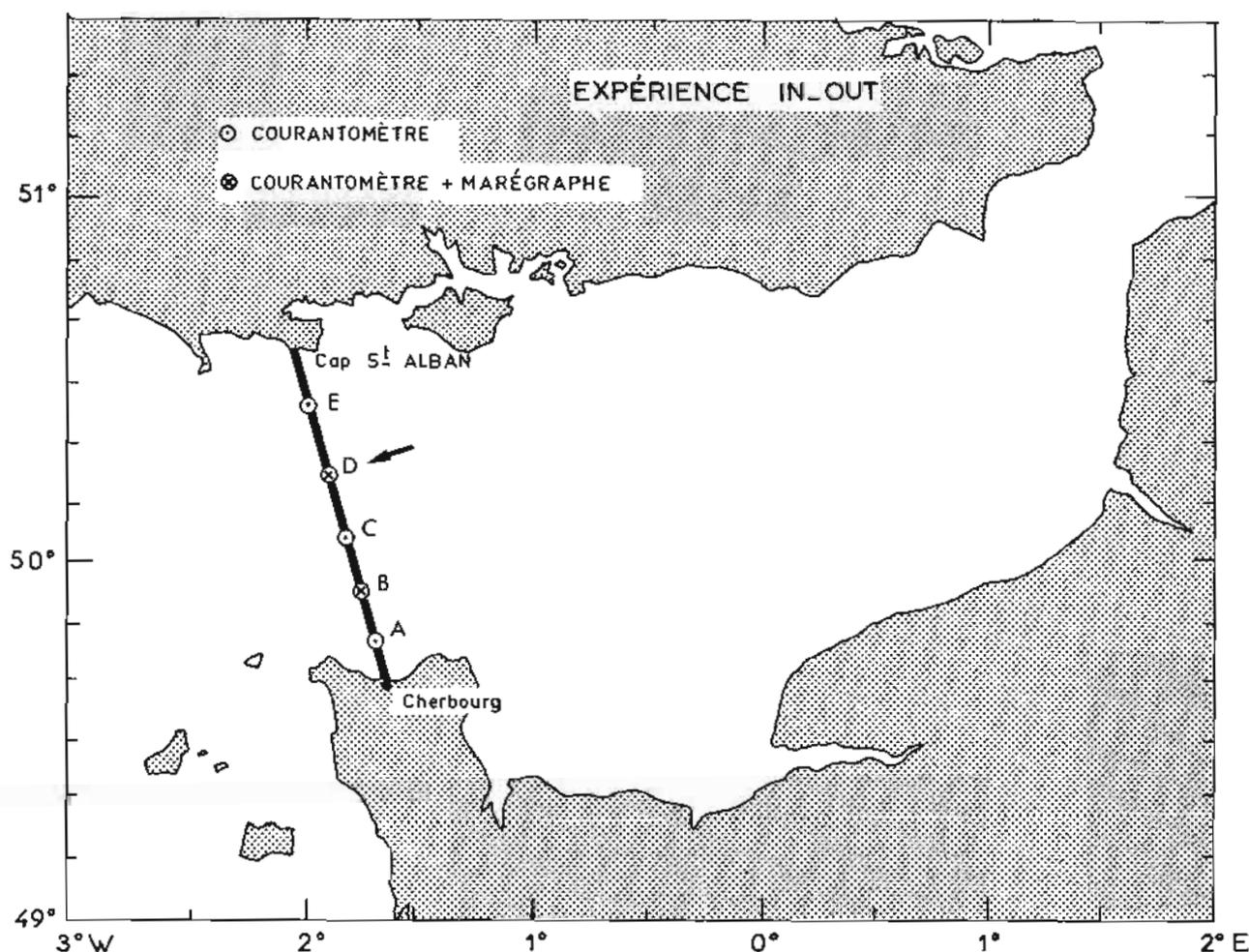
2 — A short examination of the velocity fluctuations. The calculated energy spectras don't give much new information, if we except the evidence for a periodicity of 40 minutes that we had already observed offshore of Brittany.

3 — A study of the logarithmic law for the velocity profile.

This is the main point of the present paper. For this study we used the tidal current records after smoothing (filtering the short fluctuations). We started with the mean of the highest speeds of the current, and calculated the roughness length z_0 , the frictional velocity v^* , and the values of the eddy viscosity N_e .

After wards a similar study as been done with use of « real » velocities. This allows 40 determinations of z_0 and v^* . The tidal current being of alternating character we have been able then to show that the value of z_0 depends upon the direction of the current, the difference between the values of the roughness parameter z_0 is significant.

(*) Manuscrit reçu en juillet 1976.



INTRODUCTION

Au cours de la première partie de l'opération JONSDAP (*) (mesures de courants) sur la radiale Cherbourg - St-Alban, depuis la gabare « La Cigale », nous avons pu effectuer des mesures de gradient de vitesse au voisinage du fond avec l'instrumentation mise au point au laboratoire.

Ces mesures ont été faites pendant 48 heures du 9 au 11 mars 1976 au point $\Phi = 50^{\circ} 13' N$, $G = 01^{\circ} 53' W$ sur fond de 58 m.

Le matériel utilisé a déjà été décrit.

Rappelons seulement qu'il s'agit d'une « colonne » de mesures posée sur le fond permettant :

- l'enregistrement des vitesses à 5 niveaux : 10 cm du fond, 28 cm, 80 cm, 160 cm et 215 cm ;
- la direction du courant : à 60 cm et 195 cm du fond ;
- la température ;
- la pression.

(*) JONSDAP est le sigle de Joint Oceanographic North Sea Data Acquisition Program.

La cadence des mesures de vitesse était d'une mesure toutes les deux minutes, ces mesures étant stockées sur un enregistreur magnétique Aanderaa à 12 voies, adapté au cas particulier posé par l'acquisition des données fournies par les différents capteurs.

Nous présentons ci-après certains aspects des résultats obtenus et de leur interprétation :

1. Les courants de marée après lissage (élimination des fluctuations de vitesse). En fait il a été possible, pour des raisons techniques, de n'utiliser que les 3 premiers niveaux.
2. Le courant général résultant après filtrage du courant de marée.
3. Etude des fluctuations de vitesse.
4. Représentation des profils verticaux de vitesse par la loi logarithmique de Prandtl. Cette dernière tentative faite d'abord sur les valeurs maximales des vitesses lissées, ayant conduit à des résultats prometteurs, a ensuite été poursuivie de façon plus détaillée. Ceci a permis de mettre en évidence quelques aspects significatifs des variations du paramètre de rugosité z_0 , ce qui nous semble un résultat digne d'intérêt.

Ce sont ces points que nous examinons dans ce qui suit, en insistant sur la détermination des paramètres de rugosité qui nous paraît être le résultat le plus important de ce travail.

I. LES COURANTS DE MARÉE

Les enregistrements aux niveaux 1, 2, 3, c'est-à-dire à 10 cm, 28 cm et 80 cm du fond ont été obtenus

dans les conditions suivantes :

- début d'enregistrement effectif du courant sur le fond : 13 h 30 T.U. + 1 le 9 mars 1976;
- fin d'enregistrement : 12 h 00 T.U. + 1 le 11 mars 1976.

Pendant ces observations les heures de Pleine-Mer et Basse-Mer à Brest (T.U. + 1) et les coefficients de marée étaient les suivants :

Dates	Coeff.	Pleine-mer				Basse-mer			
		Heure	Hauteur	Heure	Hauteur	Heure	Hauteur	Heure	Hauteur
9.3.76	40 37	9 58	5,6	22 34	5,6	3,56	3,0	16 28	3,1
10.3.76	35	11 16	5,4			5 07	3,2	17 50	3,2
11.3.76	36 40	00 03	5,5	12 49	5,5	6 35	3,1	19 19	3,0

La cadence d'acquisition des données était de 2 minutes.

Dans une première étape nous avons fait un lissage des données brutes de façon à éliminer les fluctuations de vitesse, celles-ci étant étudiées à part.

La technique utilisée pour le lissage était la suivante : moyennes sur une heure avec glissement de demi-heure en demi-heure.

La figure 1 représente ces résultats :

- en 1 a sont portées les valeurs absolues de la vitesse;
- en 1 b sont représentées les directions également après lissage, mais il faut noter à ce propos que les fluctuations de direction sont très faibles même si l'on tient compte de la réponse de l'enregistreur. Le courant apparaît comme purement alternatif.

En ce qui concerne l'analyse de la courbe de marée nous nous sommes demandés s'il existait un terme quart diurne. Après filtrage de la composante semi diurne et des fluctuations à courte période, il s'est avéré que la composante quart diurne était ici inexistante.

Les diagrammes polaires cumulés ont également été tracés, mais il n'est pas utile de les reproduire ici étant donné le caractère purement alternatif du courant. Par contre, la résultante du courant général après élimination du courant de marée est intéressante.

Le résultat de ce calcul donne pour cette « composante continue » un centimètre par seconde portant Ouest, ce qui est très faible, et les différences observées entre les différents niveaux ne sont pas significatives.

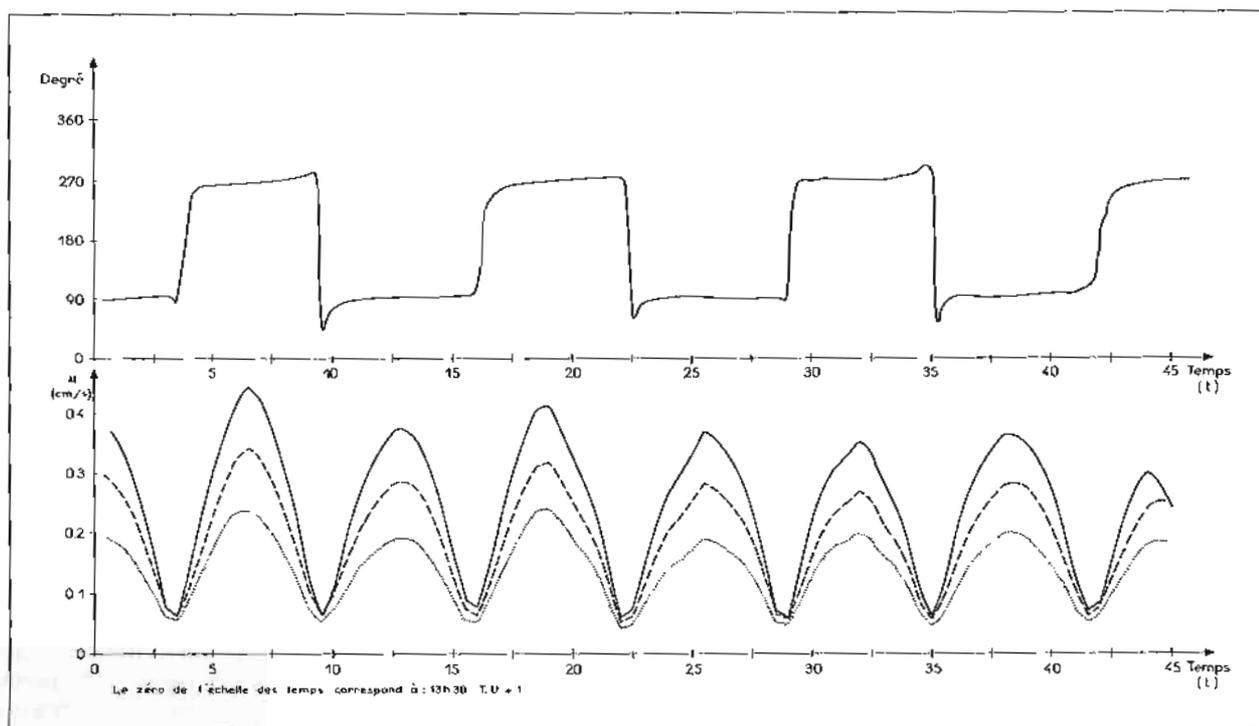


FIG. 1

2. LES FLUCTUATIONS DE VITESSE

Pour chaque niveau de mesures nous avons calculé les fluctuations de vitesse. Le tracé de ces fluctuations au cours du temps n'a fait apparaître aucune périodicité particulière directement observable.

Afin de poursuivre plus avant notre analyse des fluctuations, nous avons calculé les densités spectrales énergétiques aux trois niveaux étudiés. Il n'apparaît pratiquement pas de périodicité remarquable si ce n'est celle à 40 mn qui est observée de façon générale. En outre, un pic d'énergie se produit pour une période de 12 mn mais pour le moment nous n'avons aucune explication satisfaisante à donner pour expliquer sa présence.

Ainsi les fluctuations ne présentent que peu d'intérêt et nous avons rapidement abandonné leur étude au profit de celle de la représentation des profils verticaux de vitesse par la loi logarithmique de Prandtl.

3. ÉTUDE DE LA LOI LOGARITHMIQUE

Les mesures de courant que nous avons faites ont eu lieu au voisinage du fond et on peut s'attendre à y vérifier en moyenne la loi logarithmique de Prandtl :

$$v = \frac{v^*}{k} \text{Log} \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (3.1)$$

($k = 0,4$: constante de Karman, Log . logarithme népérien)

où v est la vitesse à la cote z par rapport au fond, z_0 l'épaisseur de rugosité et v^* la vitesse de friction reliée à la viscosité virtuelle N_z par la relation :

$$v^{*2} = \frac{\tau}{\rho} = N_z \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.2)$$

ρ et τ représentant respectivement la densité de l'eau et la force de tension tangentielle rapportée à l'unité de surface.

Dans le cas du profil logarithmique de Prandtl, et d'après la relation (3.2), on peut exprimer la viscosité virtuelle N_z à partir de la relation suivante :

$$v^{*2} = N_z \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = N_z \cdot \frac{v^*}{k} \cdot \frac{1}{z + z_0} \quad (3.3)$$

$$N_z = 0,4 \cdot v^* \cdot (z + z_0)$$

où on a remplacé la constante de Karman : k par sa valeur.

Pour étudier la représentation des profils verti-

caux de vitesse par la loi logarithmique de Prandtl, nous avons procédé de la façon suivante :

a) Nous avons testé d'abord la loi logarithmique sur les maximums des courants de marée représentés par la figure 1 a.

b) Ensuite, nous avons fait une étude statistique sur le couple (v^*, z_0) de la loi de Prandtl à partir des vitesses instantanées, sans utiliser toutefois les vitesses faibles (des précisions à cet égard sont données ci-dessous).

c) Nous avons comparé cycle par cycle, puis sur l'ensemble de l'enregistrement des mesures, l'ordre de grandeur de l'épaisseur de rugosité z_0 suivant le sens de la marée (courant alternatif).

Afin de vérifier la loi logarithmique nous avons tracé pour chaque couple (v, z) d'une même verticale les courbes de Prandtl $f(v^*, z_0) = 0$. L'unicité du point de concours de ces courbes pour l'ensemble des 3 niveaux envisagés vérifie la loi logarithmique et nous donne les valeurs correspondantes de la vitesse de friction v^* et de l'épaisseur de rugosité z_0 . Le schéma 2 illustre cette méthode.

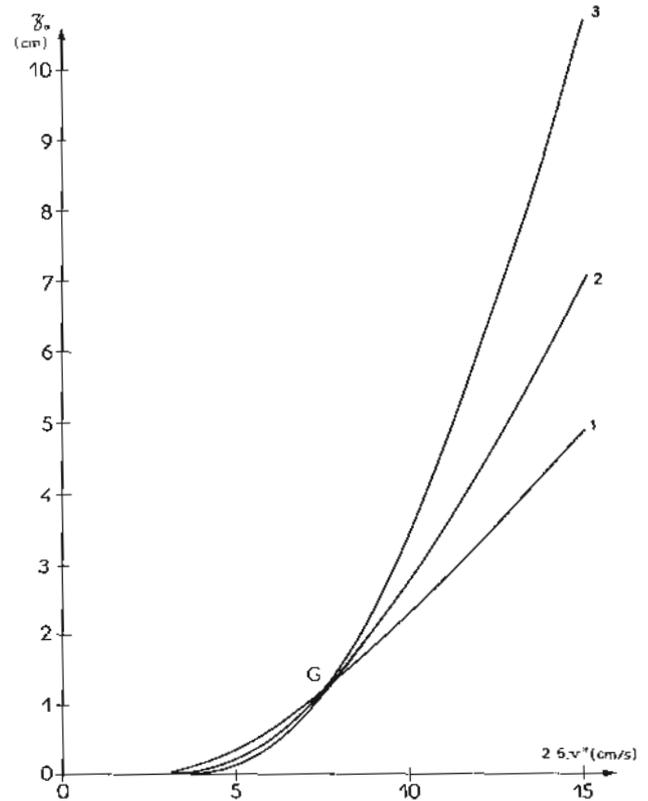


FIG. 2

Dans une première partie, nous avons recherché l'existence de la loi logarithmique de Prandtl sur les valeurs maximales des courants de marée. Les valeurs représentent les vitesses moyennes du courant aux maximums du cycle, sachant que le lissage utilisé (moyenne glissante sur 15 points) s'applique à des données qui sont pratiquement stationnaires dans la région du sommet. Cette étude s'appliquant sur 3 cycles, c'est-à-dire 6 sommets (en valeur ab-

solue) nous avons vérifié la loi logarithmique de Prandtl et en avons déterminé les paramètres essentiels : z_0 , l'épaisseur de rugosité et v^* la vitesse de friction.

Ainsi la valeur moyenne de l'épaisseur de rugosité nous donne :

$$E \{z_0\} = 1,30 \text{ cm} \pm 0,36.$$

La vitesse de friction moyenne correspondante étant :

$$E \{v^*\} = 3,70 \text{ cm/s} \pm 0,36.$$

La viscosité virtuelle moyenne déduite de l'équation (3.3) donne pour les 3 niveaux de mesure :

$$N_z = 17,20 \text{ cm}^2/\text{s} \pm 2,15 \text{ pour } z = 10 \text{ cm.}$$

$$N_z = 42,90 \text{ cm}^2/\text{s} \pm 4,75 \text{ pour } z = 28 \text{ cm.}$$

$$N_z = 120,00 \text{ cm}^2/\text{s} \pm 29,50 \text{ pour } z = 80 \text{ cm.}$$

Dans une seconde partie, nous avons refait une étude analogue à la précédente mais à partir des vitesses instantanées. Les vitesses instantanées considérées sont celles prises dans un voisinage du sommet où l'on peut considérer que l'amplitude du bruit de fond attaché à la mesure est négligeable par rapport à l'intensité de la vitesse du courant.

L'étude statistique, que nous avons faite sur ces mesures instantanées, porte sur 40 déterminations de coupes (v^* , z_0) par cycle de marée (dans le voisinage des sommets). De par le caractère alternatif (cf. figure 1-b) des cycles de marée, nous avons comparé suivant le sens du courant les valeurs moyennes de z_0 et v^* , et ce, cycle par cycle puis sur l'ensemble des trois cycles considérés.

Les estimations de la moyenne et de l'écart-type de l'épaisseur de rugosité sur ces échantillons (les 3 cycles de marée) permettent de déterminer la valeur moyenne de z_0 sur la population totale pour un intervalle de confiance à 90 %.

Si on appelle :

A = l'intervalle de confiance à 90 % attaché à l'estimation de l'épaisseur de rugosité moyenne pour un courant de marée portant à l'Est;

B = l'intervalle de confiance à 90 % attaché à l'estimation de l'épaisseur de rugosité moyenne pour un courant de marée portant à l'Ouest.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus cycle par cycle et sur l'ensemble de l'enregistrement :

z_0	A	B	A \cap B
1 ^{er} cycle	$0,79 \leq \bar{z}_0 \leq 1,16 \text{ cm}$	$1,26 \leq \bar{z}_0 \leq 1,69 \text{ cm}$	\emptyset
2 ^{ème} cycle	$0,63 \leq \bar{z}_0 \leq 0,97 \text{ cm}$	$1,38 \leq \bar{z}_0 \leq 1,72 \text{ cm}$	\emptyset
3 ^{ème} cycle	$0,75 \leq \bar{z}_0 \leq 1,08 \text{ cm}$	$1,06 \leq \bar{z}_0 \leq 1,36 \text{ cm}$	$\sim \emptyset$
1 + 2 + 3 cycles	$0,71 \leq \bar{z}_0 \leq 1,09 \text{ cm}$	$1,21 \leq \bar{z}_0 \leq 1,60 \text{ cm}$	\emptyset

L'intersection des 2 intervalles de confiance étant toujours vide (\emptyset), il ressort de ce tableau que les populations dont sont issues les enregistrements (suivant le sens du courant) sont indépendantes et que par conséquent, l'épaisseur de rugosité varie de façon appréciable suivant ce sens.

Ainsi, sur la totalité de l'enregistrement, nous pouvons en déduire la viscosité virtuelle N_z suivant le sens du courant :

— courant portant à l'Est :

$$N_z \text{ (cm}^2/\text{s)} = 1,2 (z + 0,90);$$

— courant portant à l'Ouest :

$$N_z \text{ (cm}^2/\text{s)} = 1,3 (z + 1,41);$$

où z est la cote par rapport au fond.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par J. C. Salomon (*) en Loire-Maritime.

Par fort débit fluvial :

$$z_0 = 1,6 \text{ cm en flot et } 0,6 \text{ cm en jusant.}$$

Par faible débit :

$$z_0 = 1,3 \text{ cm en flot et } 2,1 \text{ cm en jusant.}$$

Pour conclure nous constatons donc que le paramètre z_0 est fonction de la direction de l'écoulement. Ceci revient donc à mettre en évidence le fait suivant : le facteur de rugosité n'est pas seulement fonction des conditions locales au fond, mais également du « passé » des particules en mouvement et des conditions de turbulence qu'elles ont connues. Et nous l'avons pu montrer nettement dans ce qui précède.

(*) J.C. SALOMON : Contribution à l'étude de la structure verticale des courants de marée en Loire Maritime. Thèse de 3^e cycle. Brest, 1972.

QUELQUES ASPECTS DE LA STRUCTURE THERMIQUE SUR LE PLATEAU CONTINENTAL BRETON

(Thermocline – Front thermique)

par

M. Jacques RAILLARD

Laboratoire d'Océanographie de la Faculté des Sciences de Brest (*)

RÉSUMÉ

Il existe, au large de Brest, en saison estivale, un front thermique présentant des variations de la température de surface de la mer pouvant atteindre plus de quatre degrés en moins de 10 milles. Pour mieux connaître les caractères principaux de la structure thermohaline en général sur la plateau breton et celle du front plus particulièrement, le laboratoire d'Océanographie Physique de la Faculté des Sciences de Brest a effectué, du 18 septembre au 28 octobre 1975, une campagne de mesures à bord du B.O. *Capricorne*. Nous présentons ici les résultats obtenus avec une sonde T.S.D. *in situ*.

Pour la période s'étendant du 19 au 27 septembre, nous avons mis en évidence l'existence d'une zone frontale bien marquée, orientée globalement Nord-Sud au Nord du 48° parallèle et s'incurvant, au Sud de ce parallèle, vers la pointe de Penmarc'h et la Bretagne Sud. Cette zone se caractérise par deux fronts, l'un de surface, l'autre de fond. Au cours de deux autres périodes (1^{er} au 4 octobre et 22 au 28 octobre) nous avons observé la diminution de l'intensité du front en surface puis sa disparition complète, associée à un recul général de la thermocline vers le Sud avec persistance du front de fond.

ABSTRACT

There is, abreast Brest, in summer time, a thermal front with differences in the sea surface temperature which may reach more than four degrees C within a distance less than ten nautical miles. To reach a better knowledge of the main features of the general thermohalin structure of the breton shelf and of the front more particularly, the « Laboratoire d'Océanographie Physique de l'Université de Brest » made measurements on board the Research Vessel « Capricorne » with a T.S.D. equipment, from 18 September to 28 October 1975.

For the period between 19 to 27 September, the results reveal a well marked frontal zone which is, in the North of the 48° parallel, roughly oriented North-South. South of this limit, the frontal zone curves in the direction of the East toward Penmarc'h Head and the South of Brittany. This region shows two fronts, one at the sea surface, and the other at the bottom.

During two other periods (1-4 October and 22-28 October) we observed the loss of the frontal intensity and its full disappearance, associated with a general draw-back of the thermocline towards the South with the only persistence of front near the bottom.

INTRODUCTION

Il est curieux de remarquer que malgré l'importance du trafic maritime à la pointe de Bretagne certains aspects de la structure thermique sur le plateau breton, et en Mer d'Iroise en particulier, soient encore assez mal connus. Il existe notamment, au large de Brest, en saison estivale, un véritable front thermique avec des variations de la température de surface de la mer pouvant atteindre plus de

quatre degrés en moins de 10 milles. Or, malgré l'importance d'une telle zone frontale, elle n'a fait jusqu'à présent l'objet que de très peu d'études systématiques. C'est pour remédier à ce manque de données que le laboratoire d'Océanographie Physique de la Faculté des Sciences de Brest a effectué aux mois de septembre et octobre 1975, à bord du B.O. *Capricorne*, une campagne axée principalement sur ce thème de recherche. Ce sont quelques résultats de cette campagne que nous nous proposons de présenter ici.

(*) Manuscrit reçu en juillet 1976.

TRAVAUX ANTÉRIEURS

C'est dans un article de Dietrich daté de 1950 que nous avons trouvé pour la première fois la constatation qu'il existe, à l'entrée de la Manche, en saison d'été, deux zones bien distinctes quant à leur structure thermique. A l'Ouest se trouve une zone stratifiée séparée en trois couches :

1° — Une zone mélangée de surface dont l'épaisseur pouvant atteindre une quarantaine de mètres au large, diminue progressivement quand on pénètre en Manche.

2° — Une couche homogène au fond dont la température toujours relativement basse augmente très lentement au cours de la période de réchauffement estival.

3° — Entre les deux une couche assez mince, de dix à vingt mètres d'épaisseur, ayant un fort gradient vertical de température.

A l'Est, par contre, on trouve une masse d'eau pratiquement homotherme de la surface au fond et jamais stratifiée.

C'est la première fois aussi que nous avons trouvé une allusion à la corrélation qui existe entre la position de la limite entre ces deux zones et la ligne d'isovitesse de deux nœuds pour les courants de marée.

Au cours des deux décennies suivantes beaucoup de travaux ont été publiés concernant les eaux de la Mer Celtique. Citons par exemple les travaux de Cooper et de Bary qui ont tenté de comprendre un peu mieux l'origine et le comportement des différentes masses d'eaux que l'on y trouve. Mais dans ces articles il n'est fait que peu ou pas du tout allusion à l'existence d'une zone frontale. Notons toutefois l'existence d'un article de Southward (1962) qui s'est intéressé plus particulièrement à la répartition de certains animaux planctoniques dans la Manche et ses abords.

Plus récemment l'observation du front a pu être faite par Grall et Le Fèvre qui établissent un lien entre la présence du front et la concentration d'œufs de poissons flottant en surface dans son voisinage.

Parmi les travaux réalisés sur le plateau par notre laboratoire nous citerons ceux de Gilles Hénaff qui l'ont conduit à émettre une hypothèse sur la formation du « bourrelet dense » que l'on rencontre collé sur le fond parallèlement à la côte, et ceux d'Alain Le Magueresse concernant la structure thermique dans le secteur Ouest-Bretagne et son évolution annuelle ainsi que quelques aspects de sa variabilité dans la zone frontale.

Citons également les travaux récents de Pingrée sur les zones frontales dans le secteur qui nous intéresse ici.

FORMATION DU FRONT

De tous les travaux cités précédemment ainsi que de ceux de Simpson et Hunter pour la mer d'Irlande, de ceux de Fearnhead et de ceux que nous effectuons actuellement dans notre laboratoire, il ressort que le mécanisme de formation du front peut à quelques détails près être décrit de la façon suivante.

Au large nous avons deux couches homogènes, l'une en surface, l'autre au fond. Celle de surface est produite par l'action du vent qui a pour effet de reporter dans toute cette couche l'apport calorifique dû au rayonnement solaire. Au fond nous trouvons de l'eau dont les caractéristiques ont été créées pendant les mois d'hiver.

En se rapprochant de la côte et de l'entrée de la Manche, deux phénomènes se superposent, tout d'abord la diminution de la profondeur et d'autre part, l'augmentation de la vitesse des courants de marée, augmentation elle-même liée à la remontée du fond. La turbulence due au frottement des courants de marée sur le fond devient alors importante. Il arrive alors un moment où les deux couches se rejoignent, la disparition de la thermocline permettant à la chaleur incidente de se répartir sur toute la couche de la surface au fond. La turbulence de surface due à l'action du vent et celle due au frottement sur le fond voient leurs effets s'additionner pour former une masse d'eau homotherme de la surface au fond. Cette eau est plus froide que les eaux de surfaces mais plus chaude que les eaux de fond situées à l'Ouest du front puisque la quantité de chaleur doit se répartir sur une couche plus épaisse. Toutes les coupes effectuées perpendiculairement au front auront donc l'aspect très général de la figure 1.

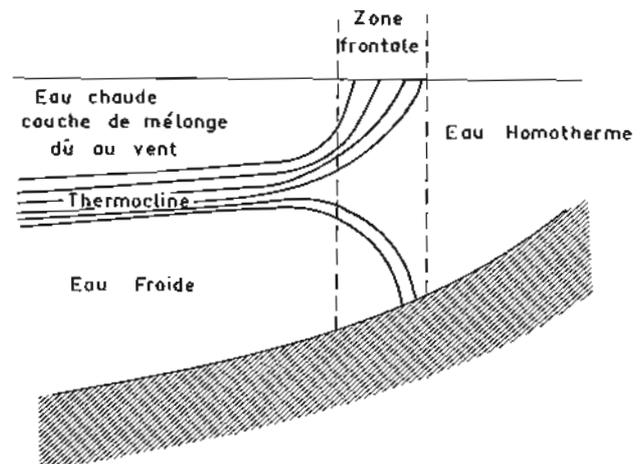


FIG. 1. — Aspect schématique d'une zone frontale.

Ce mécanisme que nous avons envisagé précédemment dans un rapport interne (1975) semble bien correspondre à la réalité et est en bon accord avec la remarque de Dietrich, concernant la concordance entre le fond et la ligne d'iso-vitesse de deux nœuds pour les courants de marée.

Des tentatives de quantification simple du phénomène ont été proposées par Simpson et Hunter pour la mer d'Irlande d'une part et par Fearnhead d'autre part. Ils définissent un « paramètre de stratification » par des méthodes assez voisines de la détermination du nombre de Richardson. Ceci permet à Fearnhead de déterminer des zones probables d'occurrence de tels fronts qui sont en bon accord avec les observations faites par divers auteurs (fig. 2).

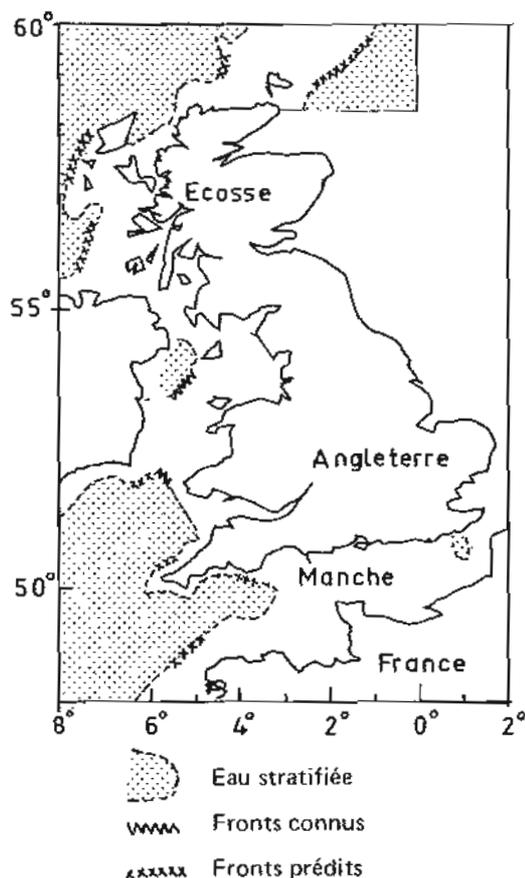


FIG. 2. — Emplacements probables de fronts (d'après Fearnhead).

CAMPAGNE DE SEPTEMBRE-OCTOBRE 1975

1. Répartition horizontale des propriétés et évolution.

Les figures 3, 7 et 11 montrent les températures de surfaces obtenues aux dates indiquées.

La figure 3 faite du 19 au 27 septembre met en évidence un front thermique bien marqué avec un

gradient horizontal de température atteignant 3 degrés en moins de huit milles dans une zone située à une quinzaine de milles dans le Sud-Ouest d'Ouessant par 48°15' Nord et 5°20' Ouest. Au Sud de cette zone le gradient est plus faible mais encore significatif et on met clairement en évidence un mouvement de rotation du front vers l'Est en direction de la pointe de Penmarc'h. Au Nord de cette zone les isothermes s'évasent en forme d'éventail et il est difficile alors de parler de front. Ces aspects sont bien mis aussi en évidence sur la figure 4, présentant les différences de température entre la surface et le fond. Cette carte montre bien la séparation entre une zone stratifiée à l'Ouest au Sud-Ouest et au Sud et une zone non stratifiée à la pointe Nord de la Bretagne et dans la Manche. La carte des salinités de surface (non représentée ici) ne présente aucune discontinuité dans la répartition des salinités qui diminuent de façon pratiquement régulières depuis le bord du plateau et parallèlement à celui-ci en direction de la pointe de Bretagne et de la Manche. Nous avons donc un front thermique et non thermohalin, avec bien entendu répercussion sur la densité de surface (fig. 6) qui présente de fortes analogies avec la figure 3.

Sur la figure 7 (1^{er} au 4 octobre), nous voyons les températures de surface au voisinage de la zone où l'on avait à la période précédente un gradient maximum. Nous constatons que le front existe toujours mais qu'il est beaucoup moins marqué. Il y a eu par rapport à la période précédente un élargissement du front, les isothermes 13 et 16° s'étant décalées, la première vers l'Est, la seconde vers l'Ouest. Le trait caractéristique qui persiste est la rotation du front, dans le Sud de la zone, en direction de la pointe de Penmarc'h.

Par contre un phénomène intéressant se révèle, c'est l'apparition à l'Ouest et au Sud de deux poches d'eau plus froides qui sembleraient s'être détachées de la zone frontale. Il serait fort tentant de voir là un mécanisme de disparition du front par formation de méandres devenant occlus, ces occlusions se séparant du front pour pénétrer dans les eaux plus chaudes et les refroidissant progressivement. Ceci n'est bien sûr qu'une hypothèse qui demanderait à être vérifiée. La carte des différences de température entre la surface et le fond (fig. 8) nous permet de constater que ces deux poches correspondent bien à des zones où cette différence est plus faible que pour les eaux environnantes tandis que la carte des températures au fond (fig. 9) ne présente à ce sujet aucun trait particulier. Mais elle présente un aspect intéressant c'est le réchauffement des eaux de fond près de la côte et plus particulièrement dans la baie d'Audierne entre la pointe du Raz et la pointe de Penmarc'h. Nous y notons une augmentation de température supérieure à 3°5. Ceci résulte de deux phénomènes distincts. Nous notons tout d'abord dans cette zone un réchauffement très net des eaux de surface dont la température moyenne passe de 14°25 à plus de 15°. Ceci est dû à une arrivée d'eaux de surface plus chaudes du plateau de Sud Bretagne qui contour-

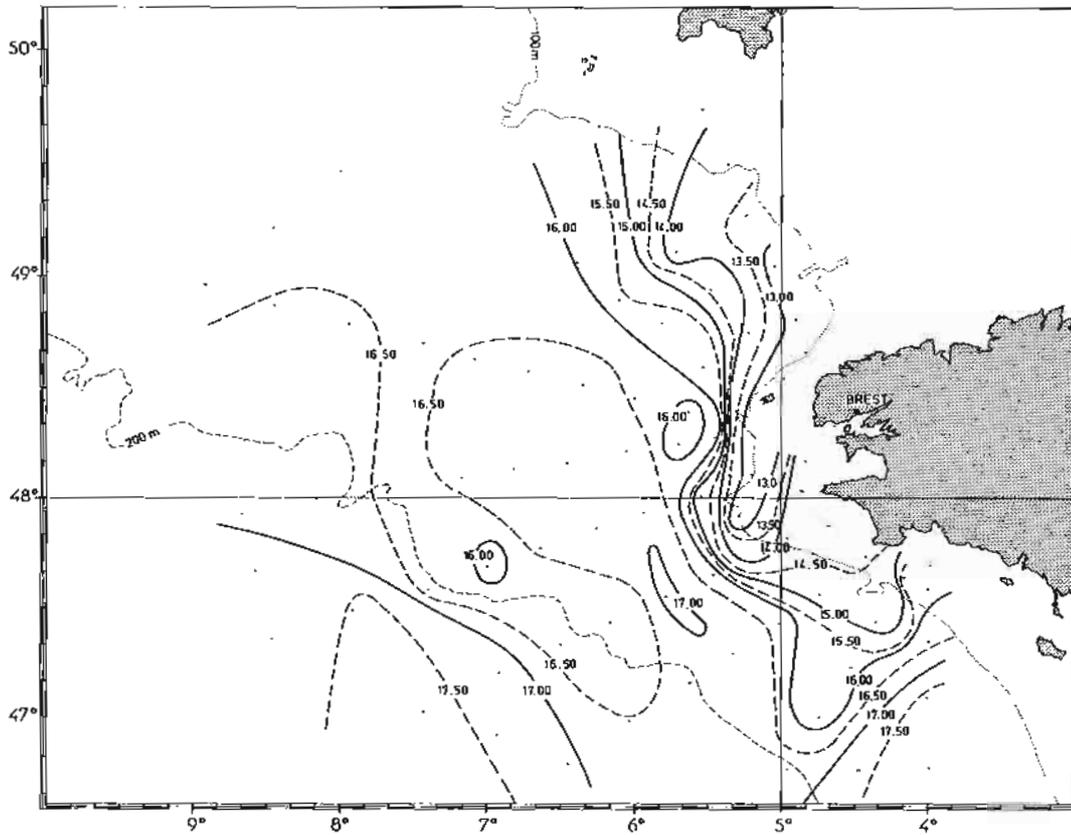


FIG. 3. — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Température de surface.

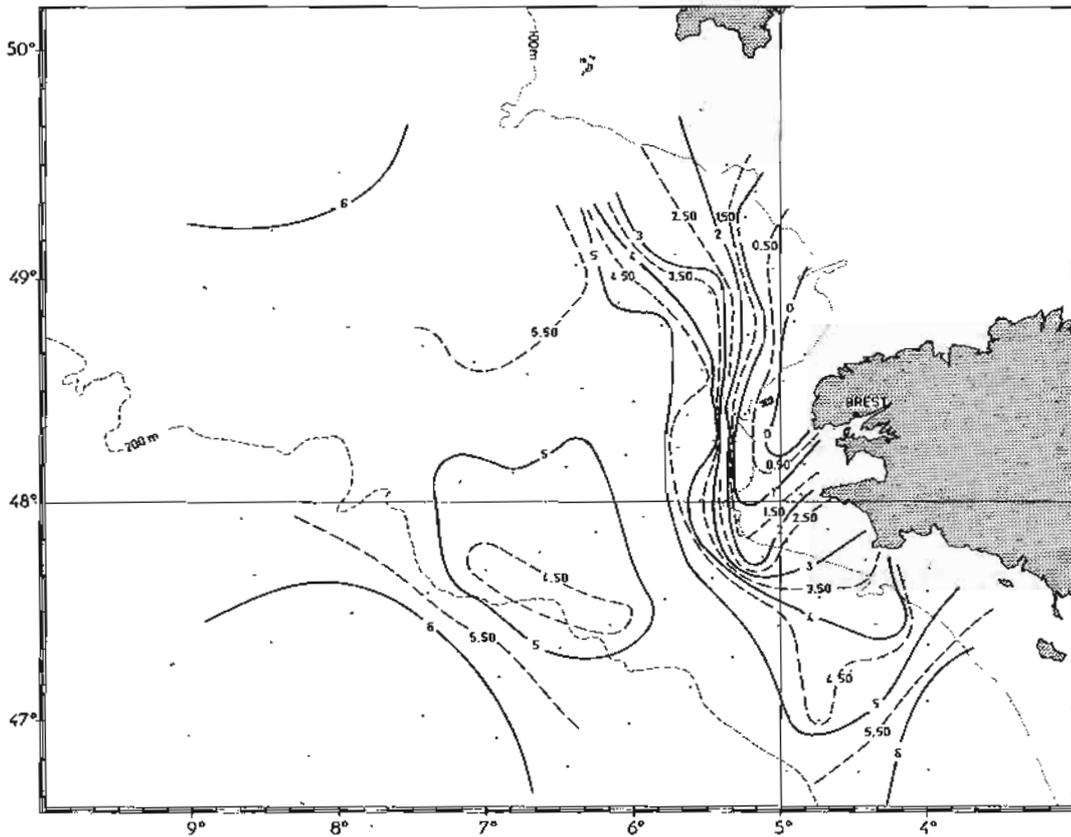


FIG. 4. — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Différence de température entre la surface et le fond (ou 150 m).

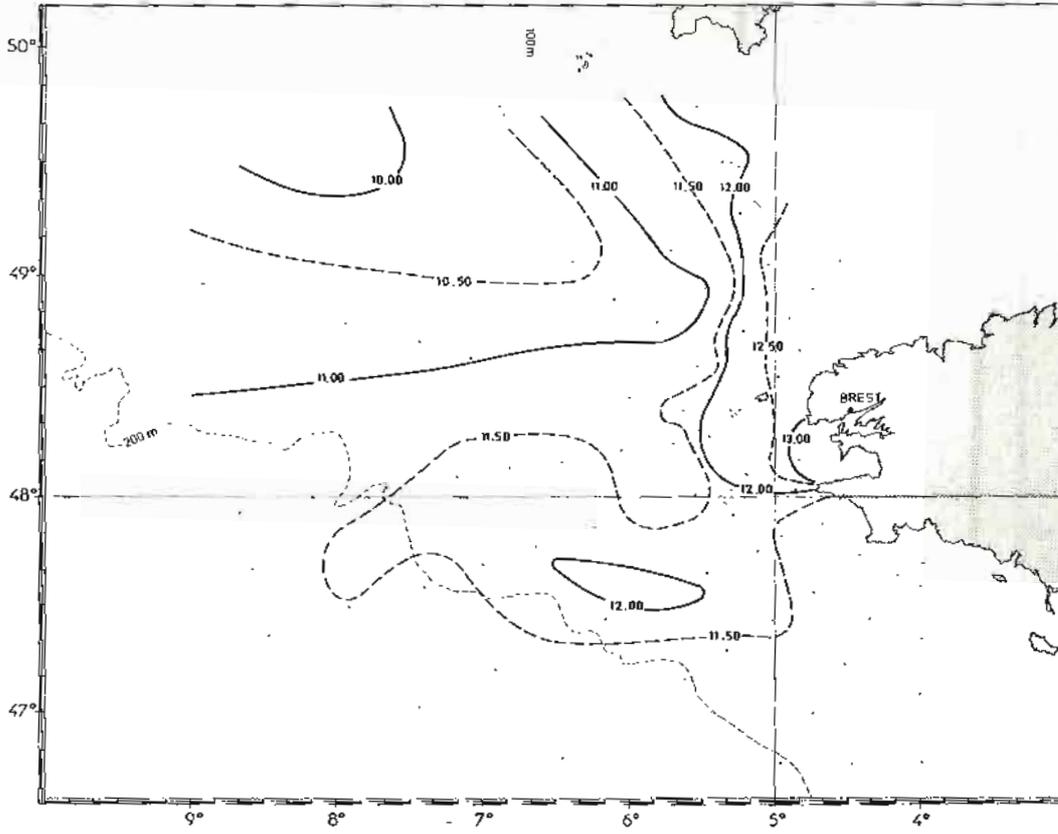


FIG. 5. — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Température au fond (ou à 150 m).

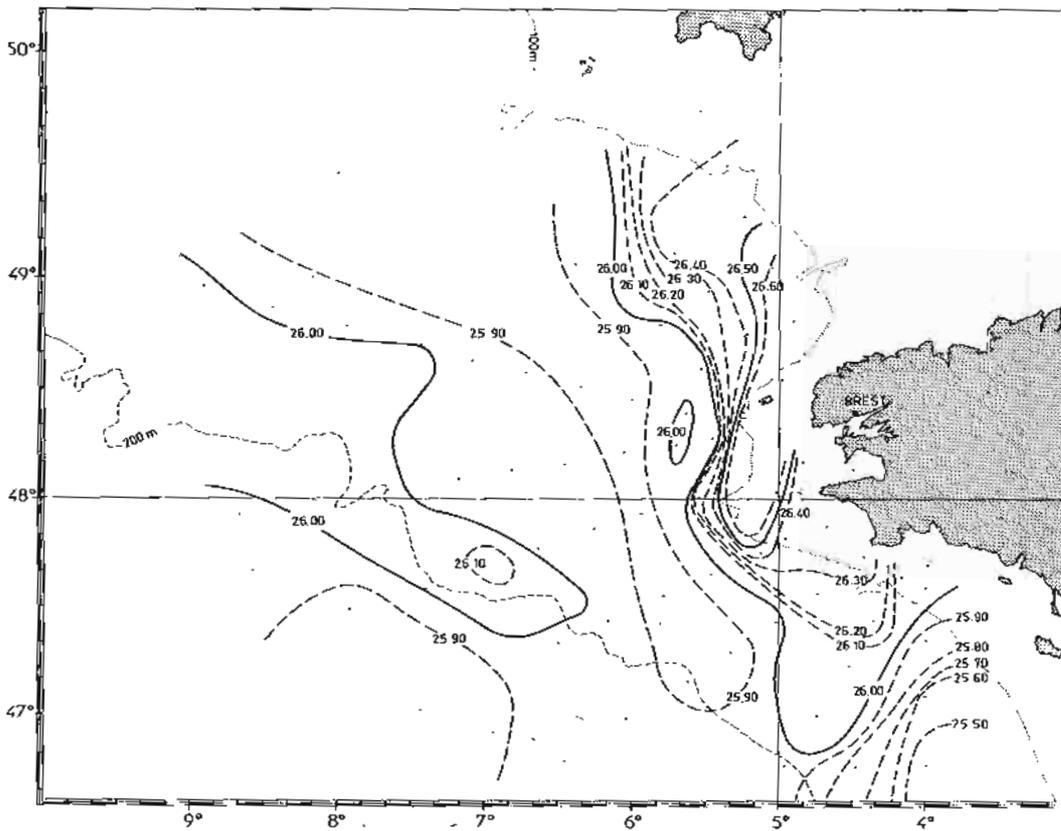


FIG. 6. — CAPRIROISE (1^{re} Partie). SIGMA T de surface.

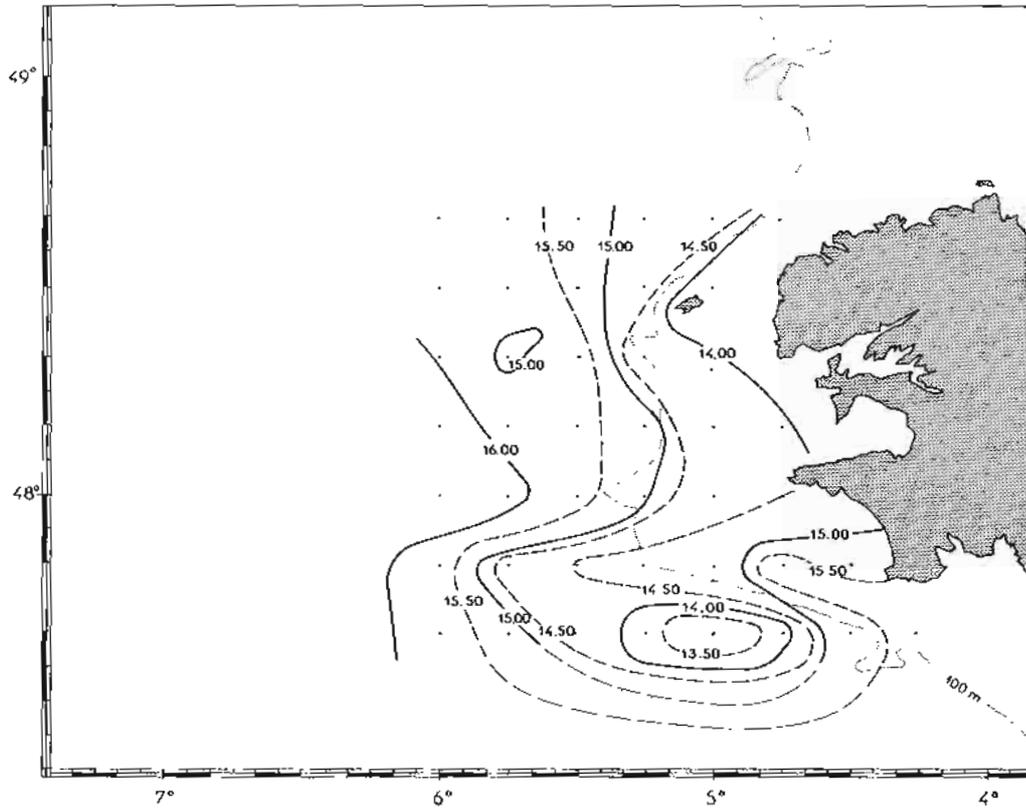


FIG. 7. — CAPRIROISE (2^e Partie). Température de surface.

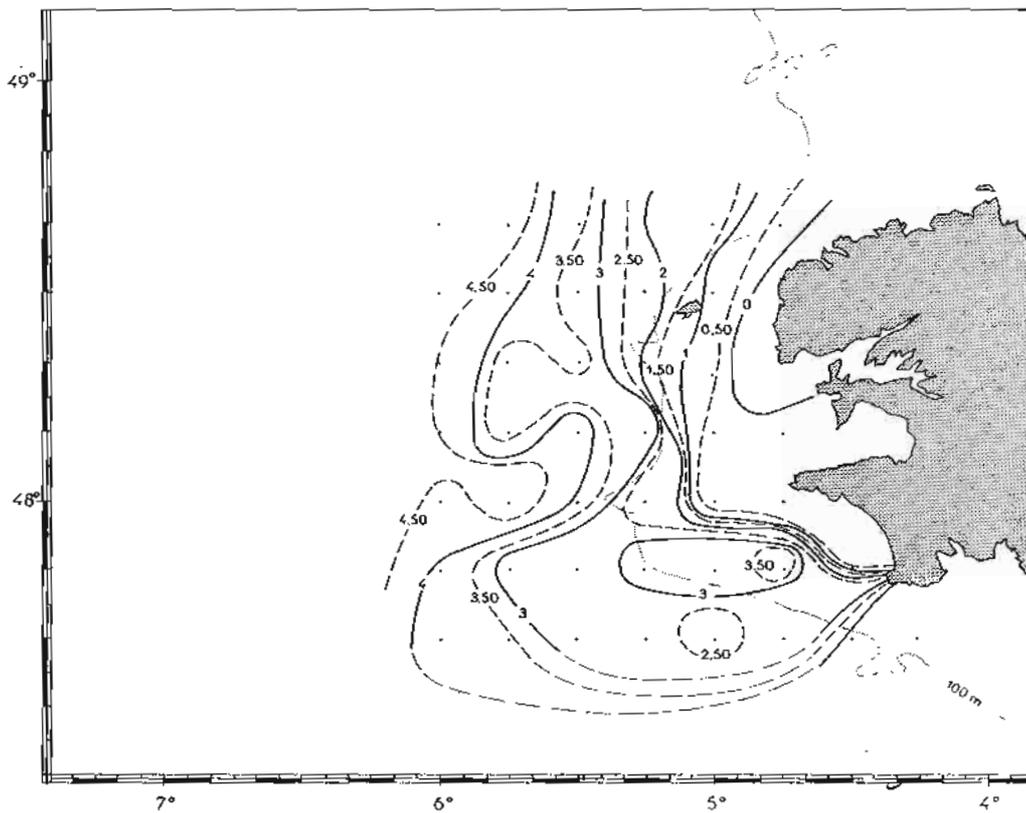


FIG. 8. — CAPRIROISE (2^e Partie). Différence de température entre la surface et le fond.

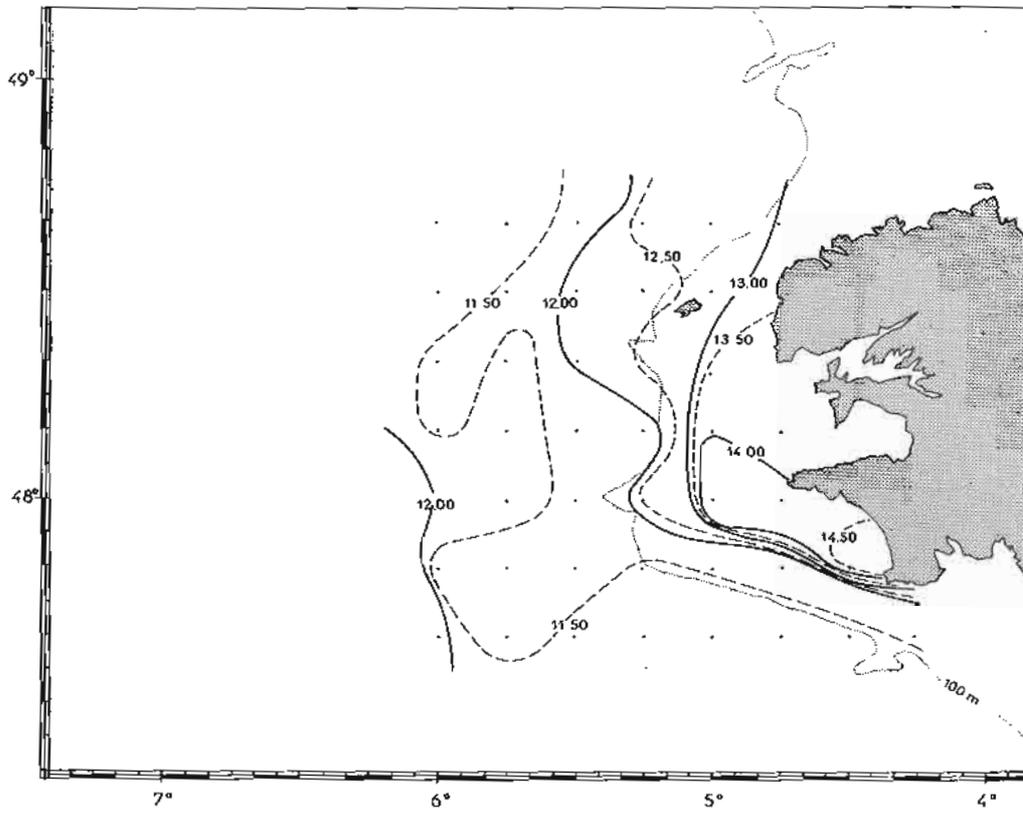


FIG. 9. — CAPRIROISE (2^e Partie). Température au fond.

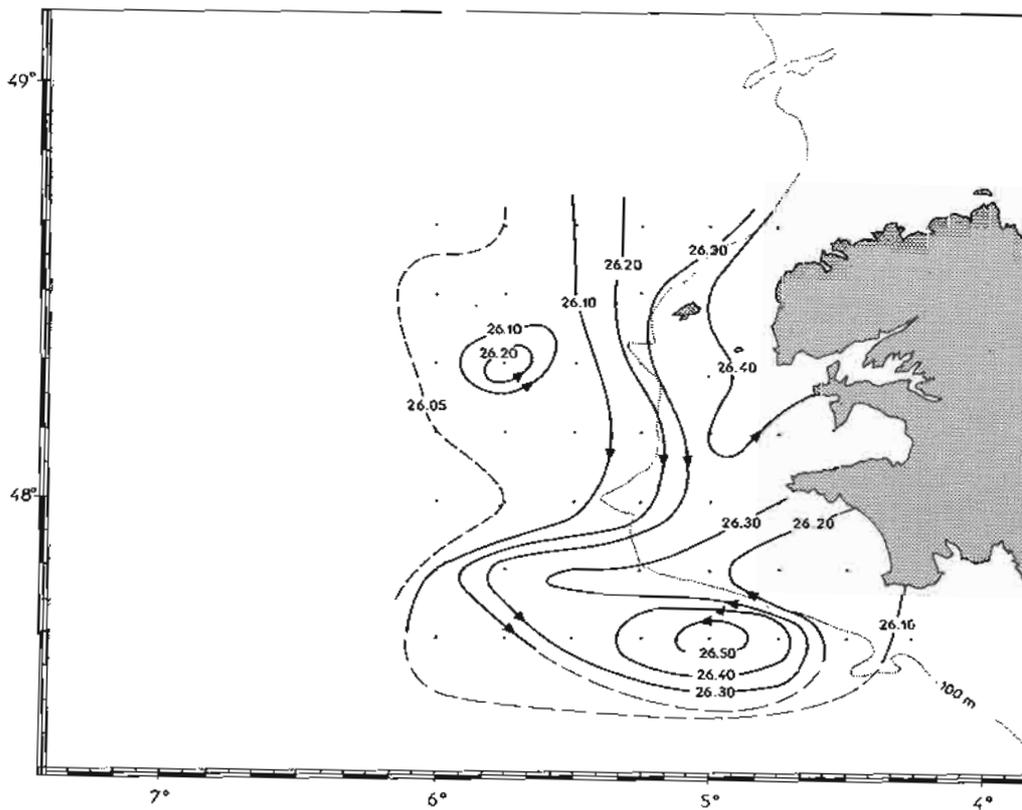


FIG. 10. — CAPRIROISE (2^e Partie). SIGMA T de surface.

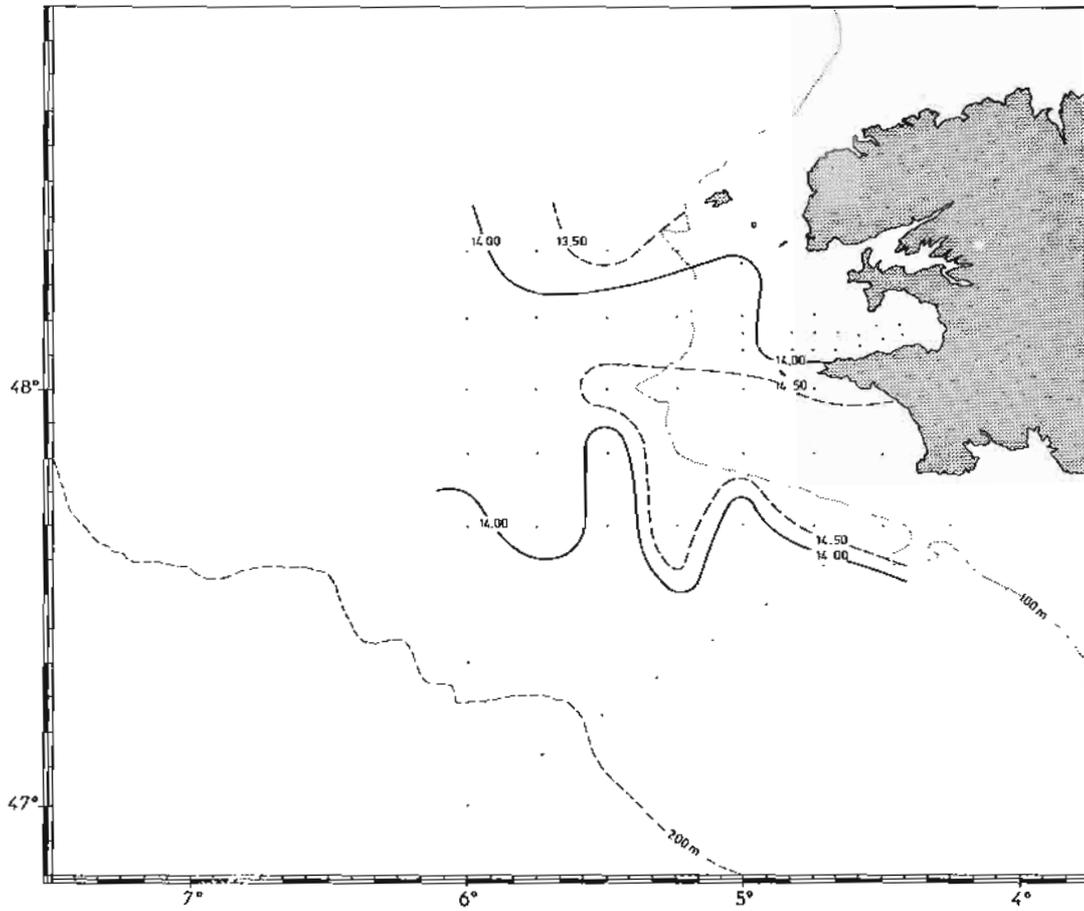


FIG. 11. — CAPRIROISE (3^e Partie). Température de surface.

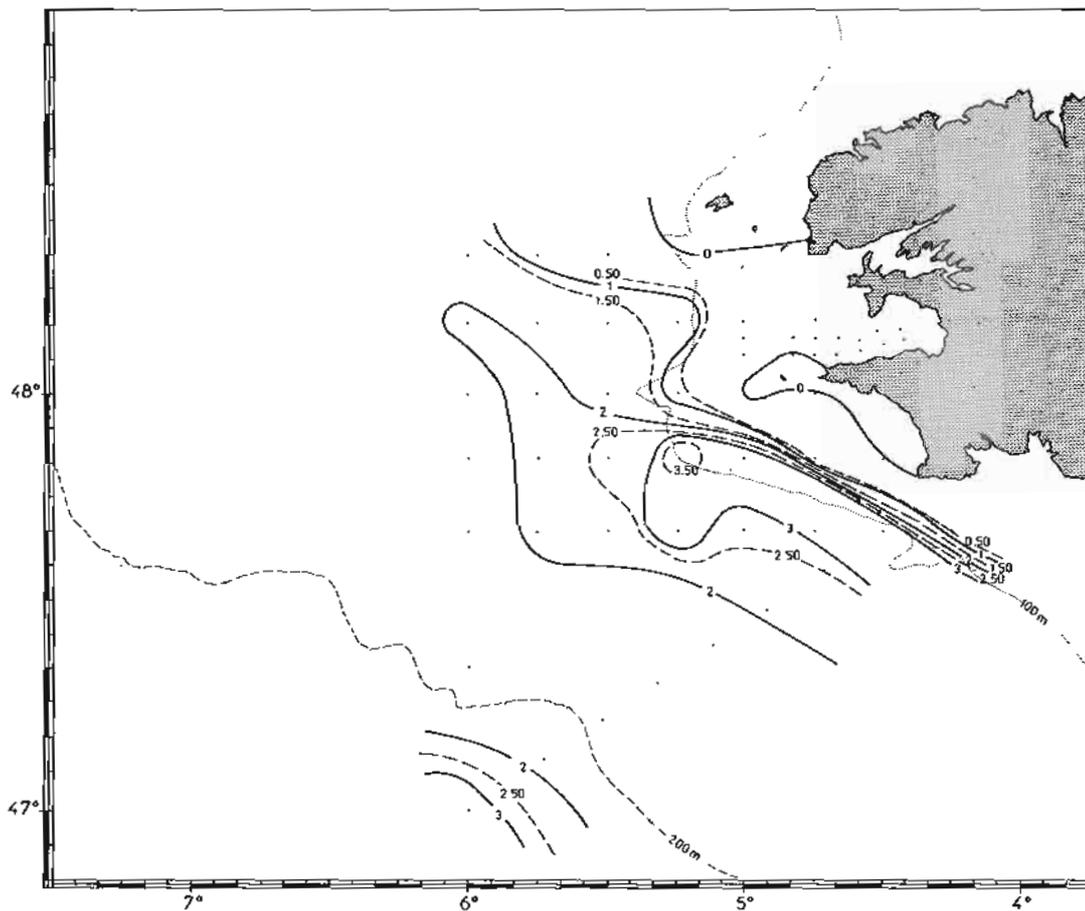


FIG. 12. — CAPRIROISE (3^e Partie). Différence de température entre la surface et le fond.

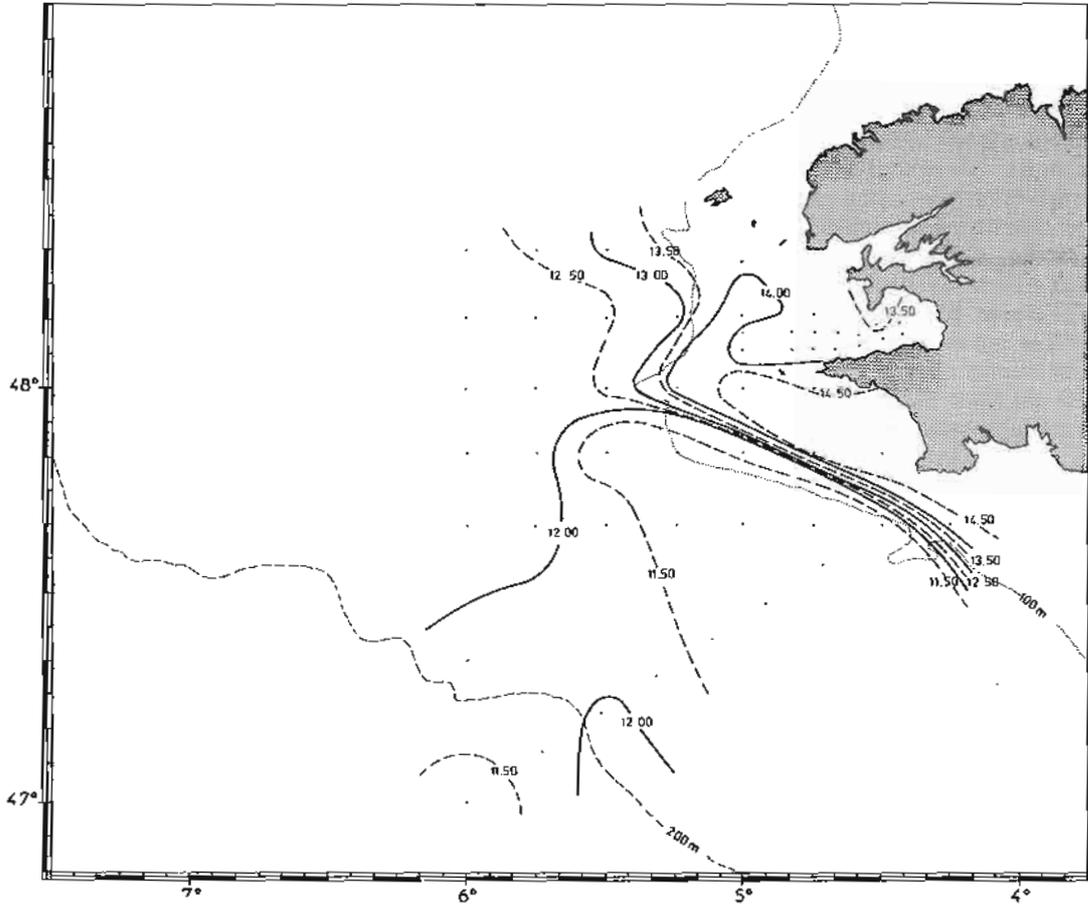


FIG. 13. — CAPRIROISE (3^e Partie). Température au fond.

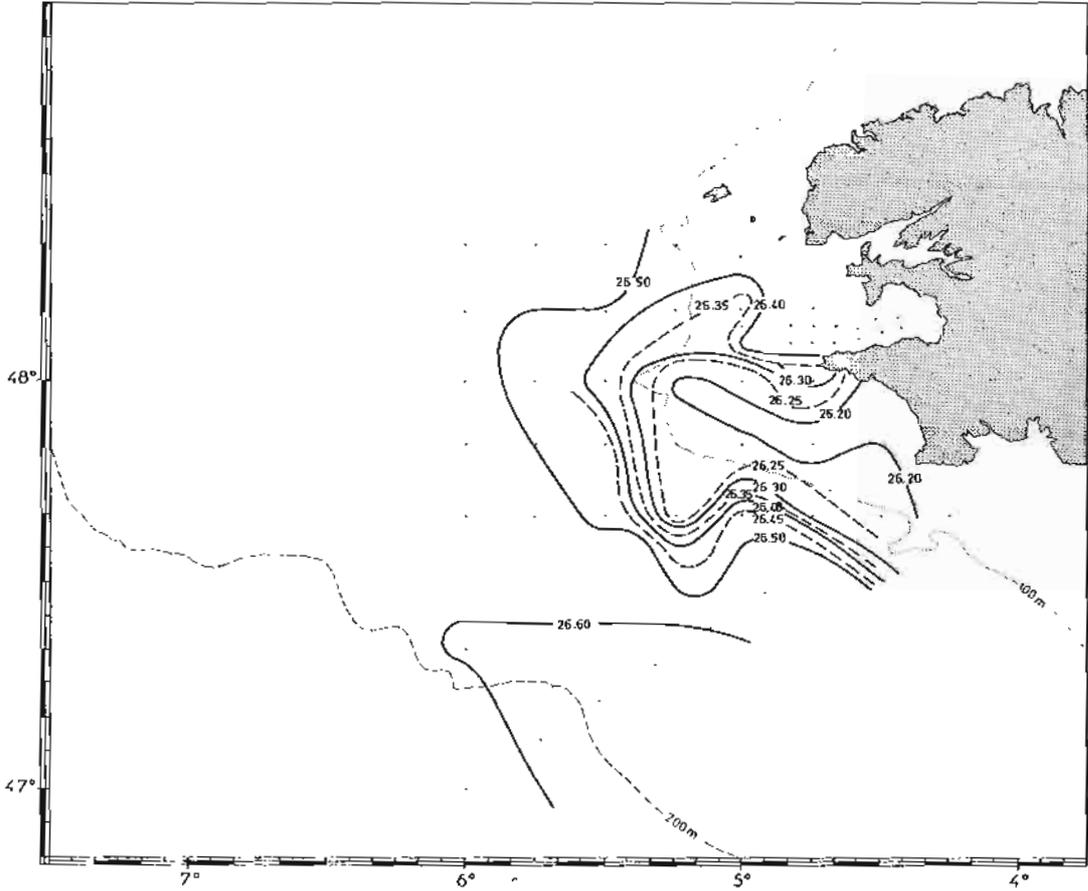


FIG. 14. — CAPRIROISE (3^e Partie). SIGMA T. de surface.

nent la pointe de Penmarc'h. D'autre part, nous constatons que la différence de température entre la surface et le fond qui était comprise entre 2°5 et 3°5 n'est plus maintenant que 0° à 0°5. Il y a donc eu simultanément apport de chaleur depuis le Sud et répartition de cette chaleur sur toute la couche. Les causes profondes de ces modifications sont sans doute, d'une part le coup de vent qui a soufflé à la pointe de Bretagne les derniers jours du mois d'octobre. D'autre part l'augmentation du coefficient de la marée au début du mois de septembre. Il est par contre difficile de dire si la diminution de l'intensité du front est une cause ou une conséquence de cette remontée des eaux plus chaudes du Sud.

Pour la 3^e période du 22 au 28 octobre nous avons tracé les mêmes cartes de température de surface (fig. 11), différence de température, surface/fond (fig. 12), température fond (fig. 13) et σ_t de surface (fig. 14).

La figure 11 nous permet de constater la disparition totale du front avec l'intrusion encore plus marquée d'eau chaude en provenance du plateau Sud breton. En baie d'Audierne la température a encore augmenté pour être maintenant de l'ordre de 14°75 en moyenne sur une zone s'étendant jusqu'à plus de 35 milles de la côte. Près de celle-ci les eaux homothermes se sont étendues et on ne trouve plus de zone stratifiée qu'au Sud-Ouest et au Sud de la zone ainsi que le montre la figure 12. La figure 13 des températures

sur le fond montre qu'il y a eu un réchauffement global de ces températures sur toute la zone, réchauffement qui est particulièrement net près de la côte. Nous constatons aussi que si le front de surface à disparu il persiste encore au fond où l'on note des gradients horizontaux de l'ordre de 4 degrés en moins de 5 milles dans la baie d'Audierne, les eaux les plus chaudes étant à la côte et les plus froides au large. Ceci est donc à relier aux observations de Gilles Hénaff concernant ce qu'il appelait le « bourrelet froid ».

En ce qui concerne l'évolution des densités de surface nous nous contenterons dans ce premier aperçu de constater que l'aspect des isopycnes est très voisin de celui des isothermes pour les deux premières parties, aux cours desquelles l'aspect thermique est prépondérant. Ce n'est plus du tout le cas pour la 3^e partie (fig. 14) où il semble y avoir eu inversion totale de la répartition des densités de surface par refroidissement des eaux de surface au large, et arrivée d'eau plus chaude par le Sud-Est.

2. Répartition verticale des propriétés.

Les figures 15, 16 et 17 présentant les positions des stations permettront au lecteur de positionner les quelques coupes que nous nous proposons de commenter maintenant.

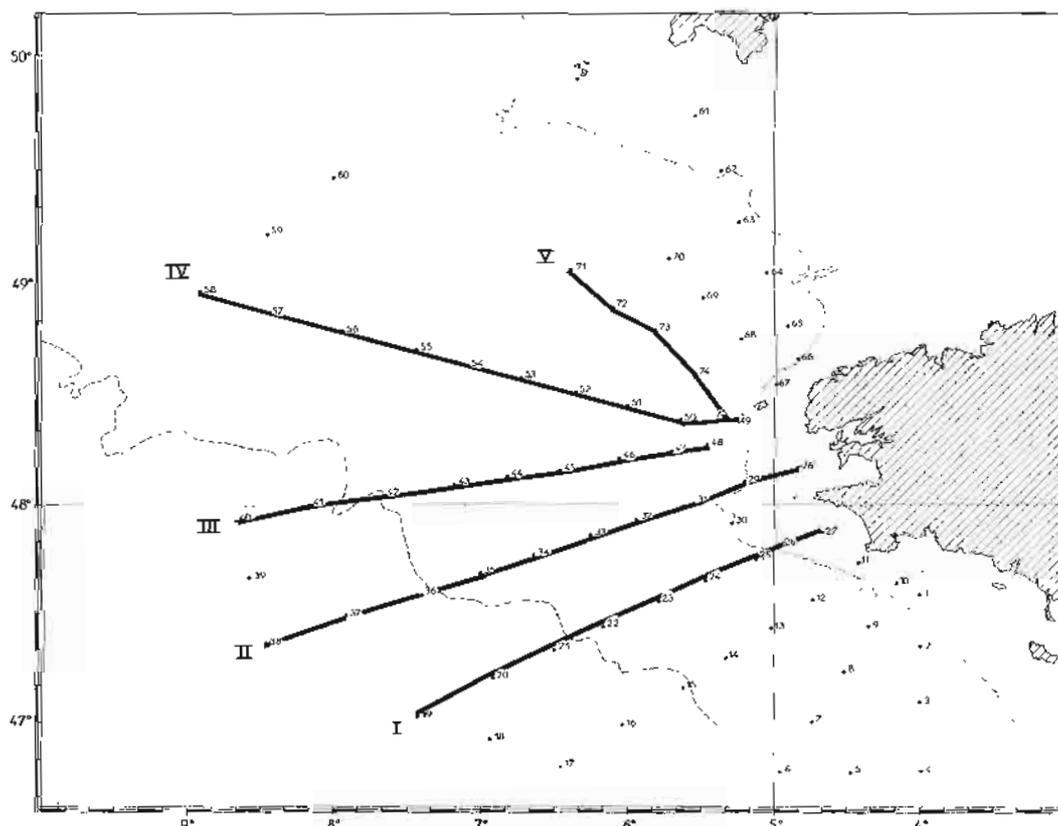
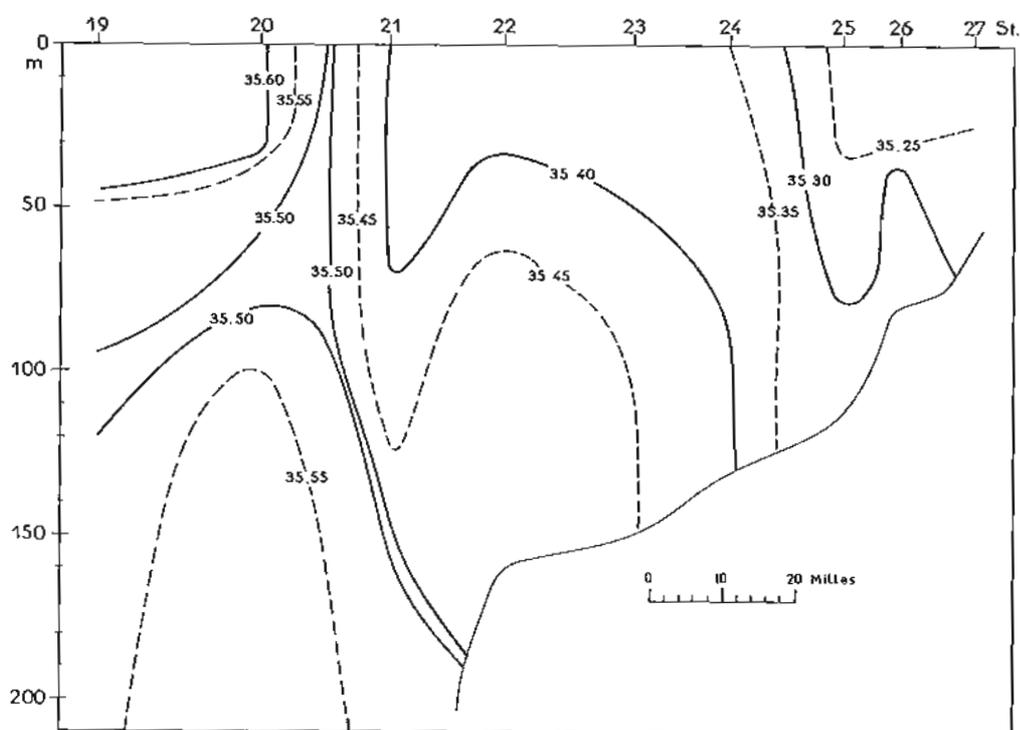
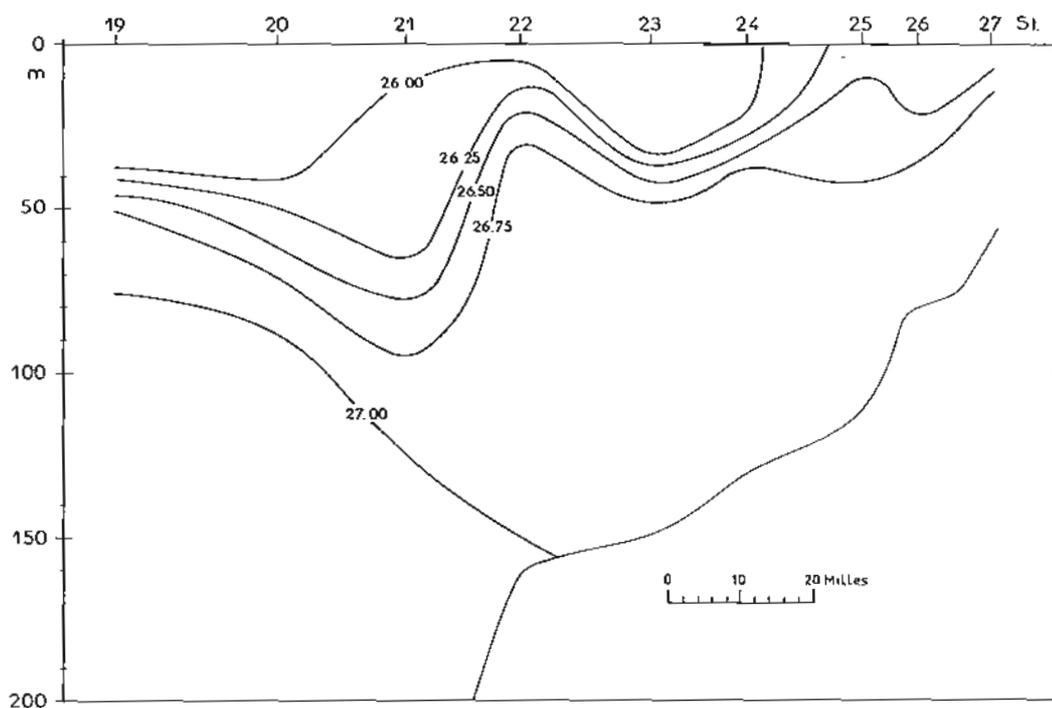


FIG. 15. — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Position des stations et des coupes I à V.



COUPE I (b). — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Salinité stations 19 à 27.



COUPE I (c). — CAPRIROISE (1^{re} Partie). SIGMA T. stations 19 à 27.

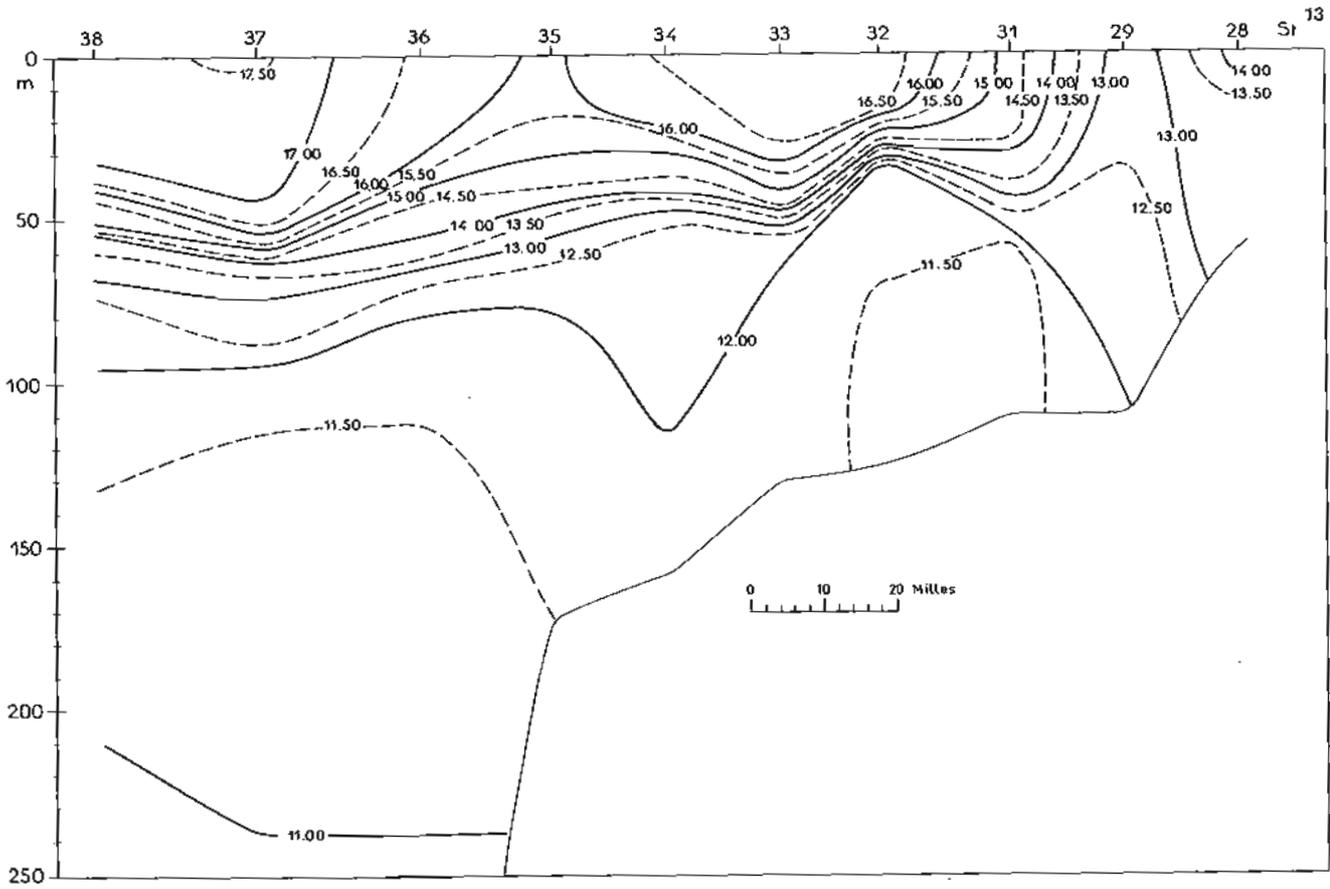
avons encore une eau stratifiée avec toutefois un gradient vertical faible. En supposant le front en équilibre géostrophique l'application de la méthode de Margules :

$$\Delta V = \frac{g}{f} \frac{\Delta \rho}{\rho} \operatorname{tg} \alpha$$

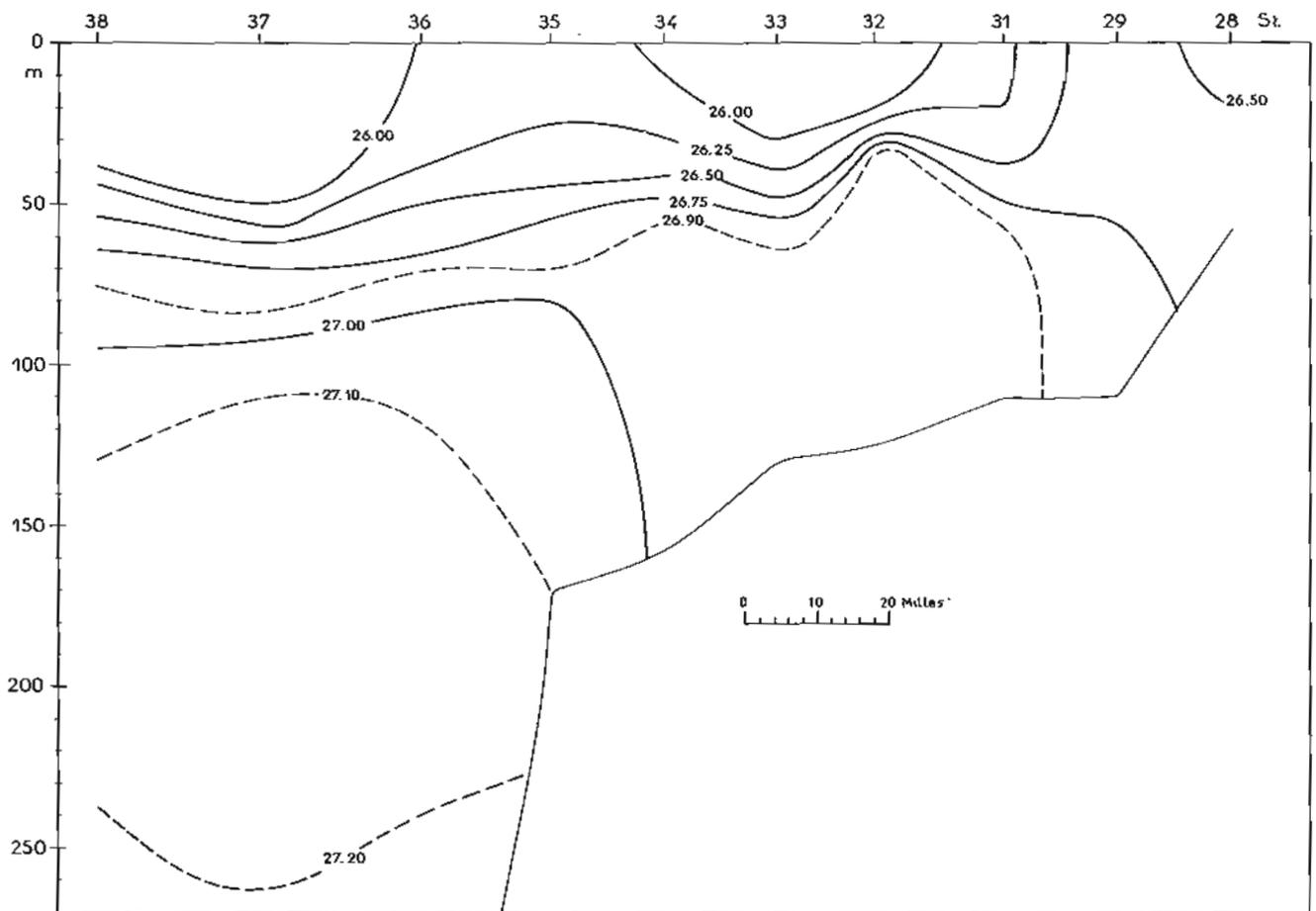
conduit à une valeur $\Delta V = 10 \text{ cm/s}$. Dans cette for-

mule ΔV est la différence de vitesse de part et d'autre du front, g l'accélération de la pesanteur, f le paramètre de Coriolis $= 2 \omega \sin \Phi$, Φ étant la latitude, $\operatorname{tg} \alpha$ est la pente du front qui est ici de 30 mètres pour 14 milles.

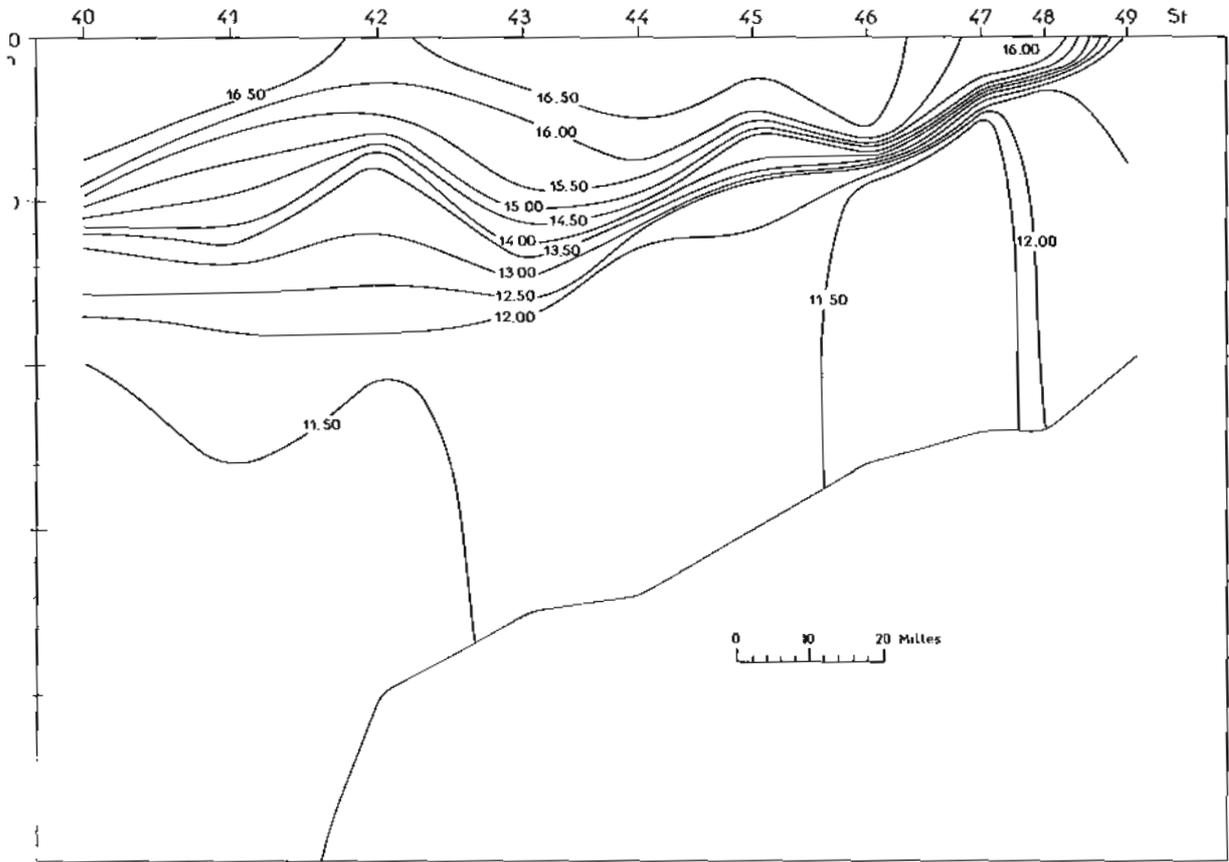
La coupe présente d'autre part un aspect fort intéressant de la thermocline. Celle-ci subit en effet une variation moyenne de niveau de près de 60 m



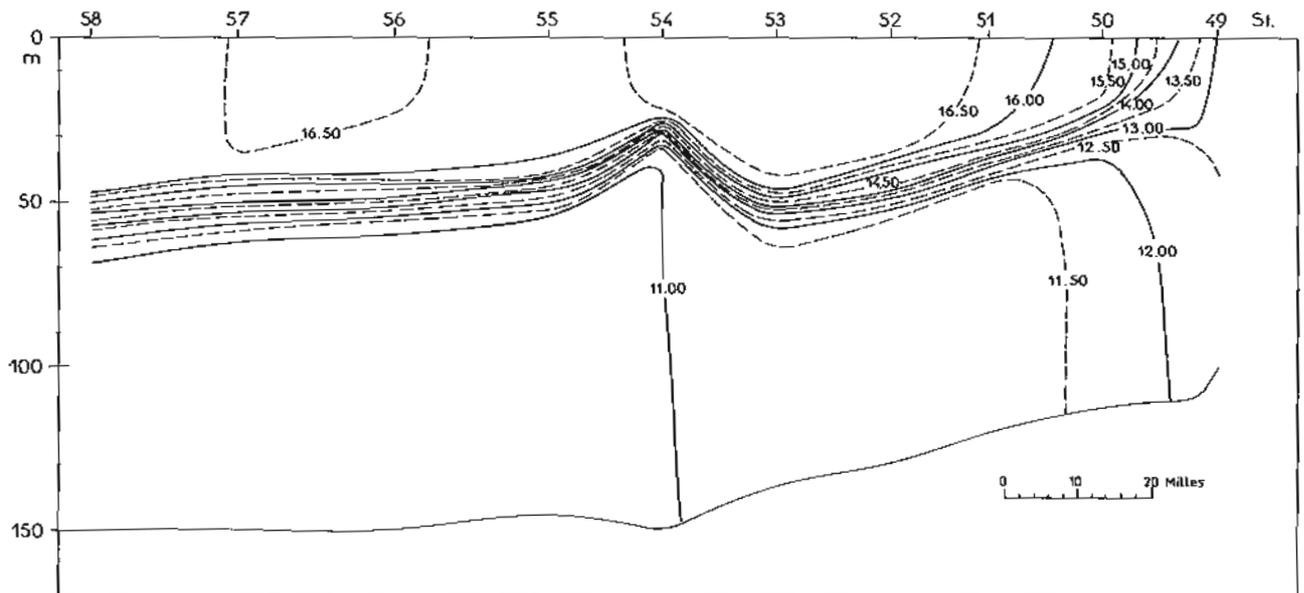
COUPE II (a). — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Température stations 28 à 38 (sauf 30).



COUPE II (b). — CAPRIROISE (1^{re} Partie). SIGMA T. stations 28 à 38 (sauf 30).



COUPE III. — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Temperature stations 40 à 49.

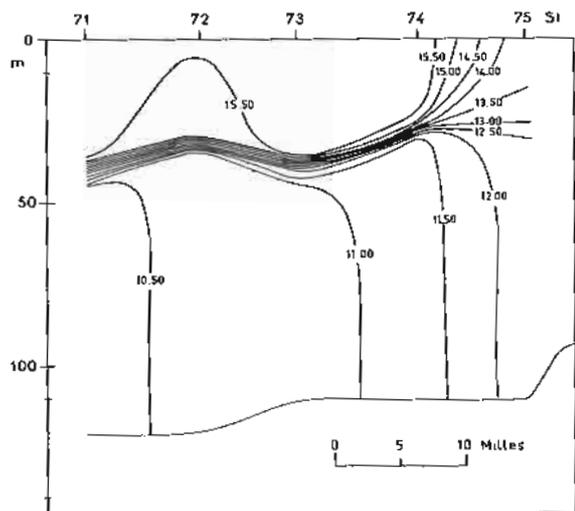


COUPE IV. — CAPRIROISE (1^{re} Partie). Température stations 49 à 58.

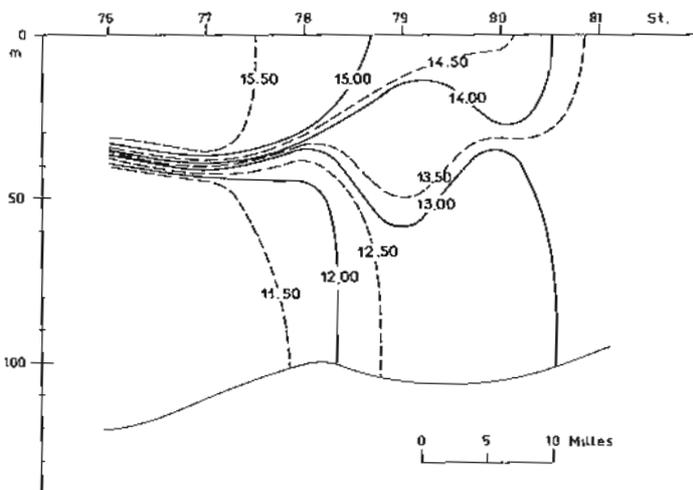
entre les stations 21 et 22, cette remontée brutale étant géographiquement reliée à la limite du plateau continental mais sans que l'on puisse mettre en évidence de mouvement d'upwelling le long du talus continental. Par contre ce phénomène est sans doute

à relier au bourrelet froid qui d'après les études de Gilles Hénaff se maintient sur le plateau continental pratiquement sans évoluer pendant toute la période estivale.

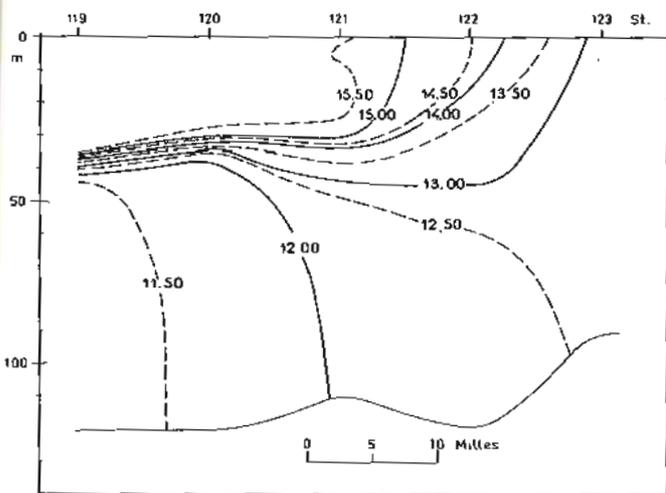
Pour la radiale II notons un mouvement analogue



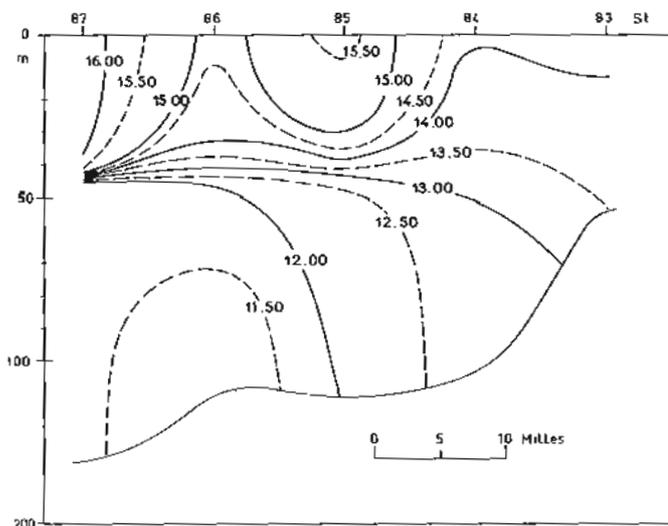
COUPE V. — CAPRIROISE (1^{re} Partie).
Température stations 71 à 75.



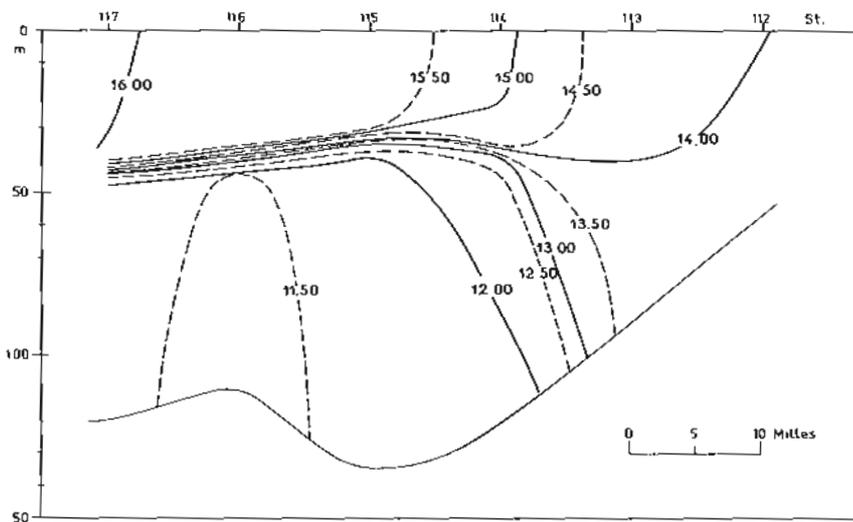
COUPE VI. — CAPRIROISE (2^e Partie).
Température stations 76 à 81.



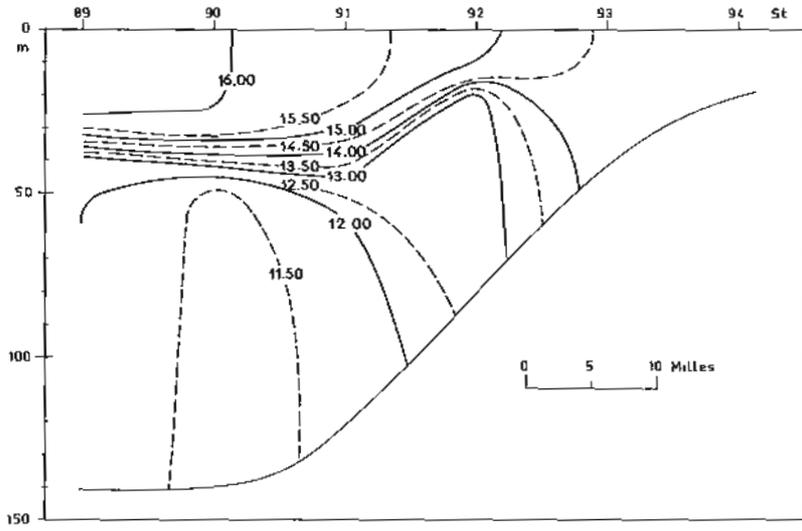
COUPE VII. — CAPRIROISE (2^e Partie).
Température stations 119 à 123.



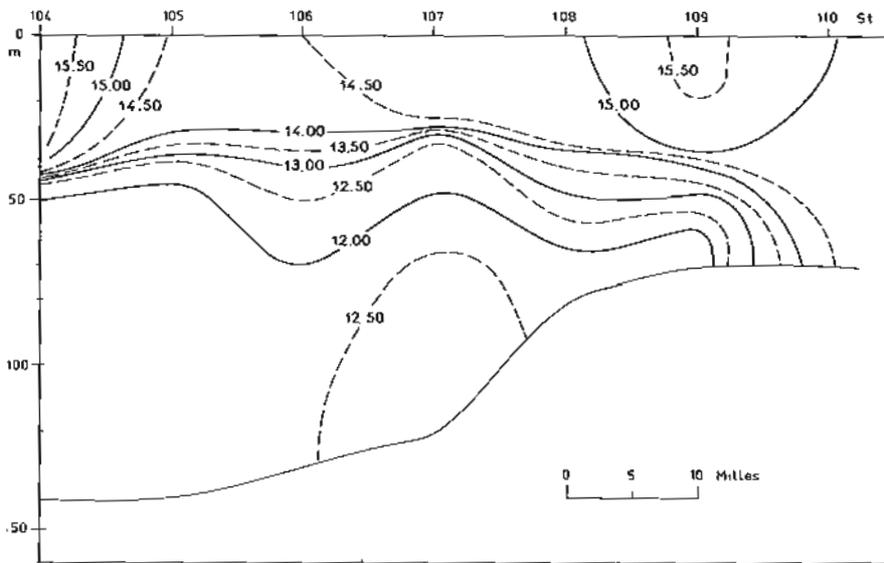
COUPE VIII. — CAPRIROISE (2^e Partie).
Température stations 83 à 87.



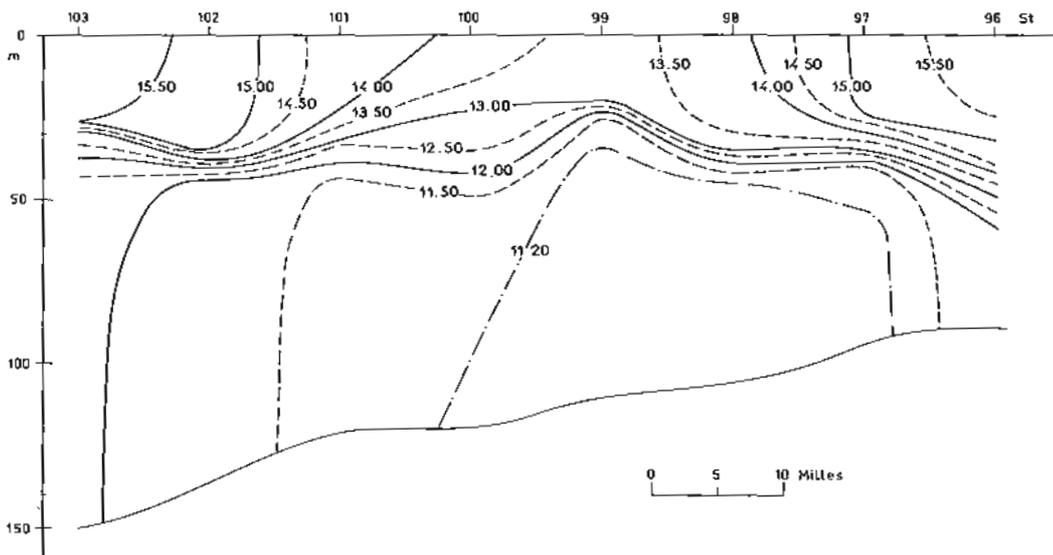
COUPE IX. — CAPRIROISE (2^e Partie).
Température stations 112 à 117.



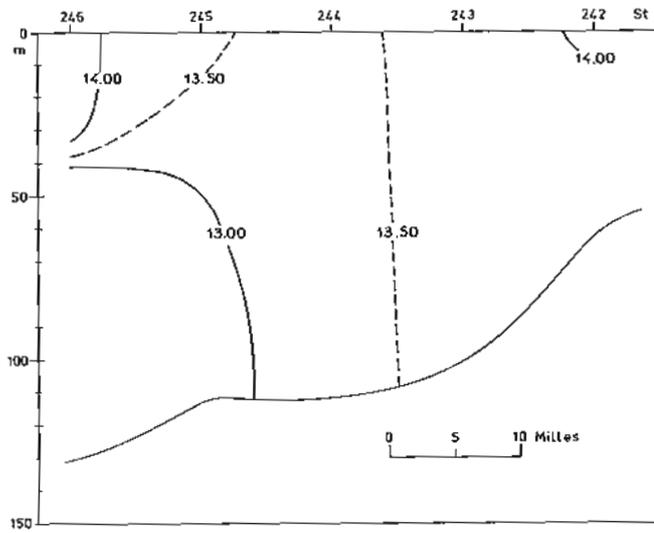
COUPE X. — CAPRIROISE (2^e Partie). Température stations 89 à 94.



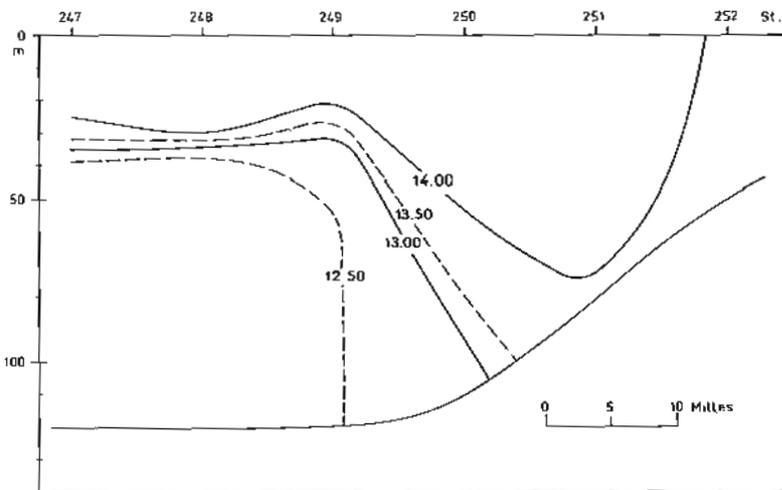
COUPE XI. — CAPRIROISE (2^e Partie). Température stations 104 à 110.



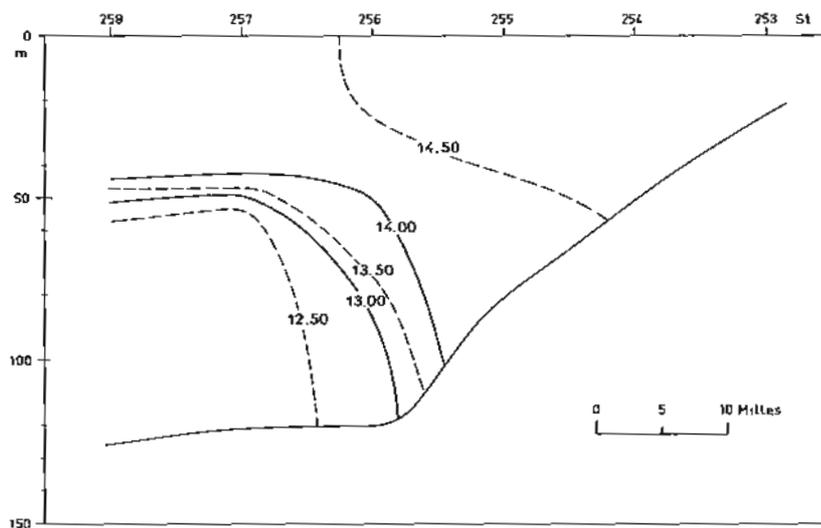
COUPE XII. — CAPRIROISE (2^e Partie). Température stations 96 à 103.



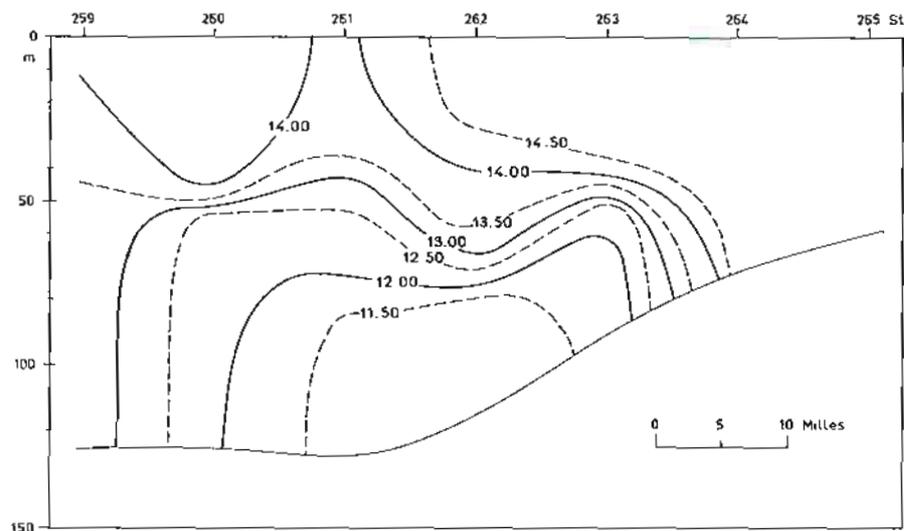
COUPE XIII. — CAPRIROISE (3^e Partie). Température stations 242 à 246.



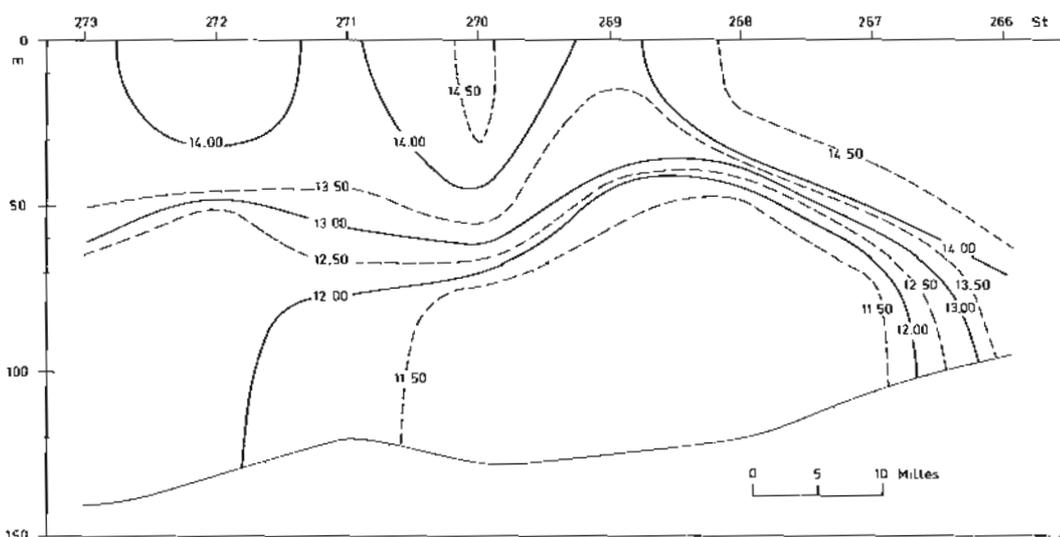
COUPE XIV. — CAPRIROISE (3^e Partie). Température stations 247 à 252.



COUPE XV. — CAPRIROISE (3^e Partie). Température stations 253 à 258.



COUPE XVI. — CAPRIROISE (3° Partie). Température stations 259 à 265.



COUPE XVII. — CAPRIROISE (3° Partie). Température stations 266 à 273.

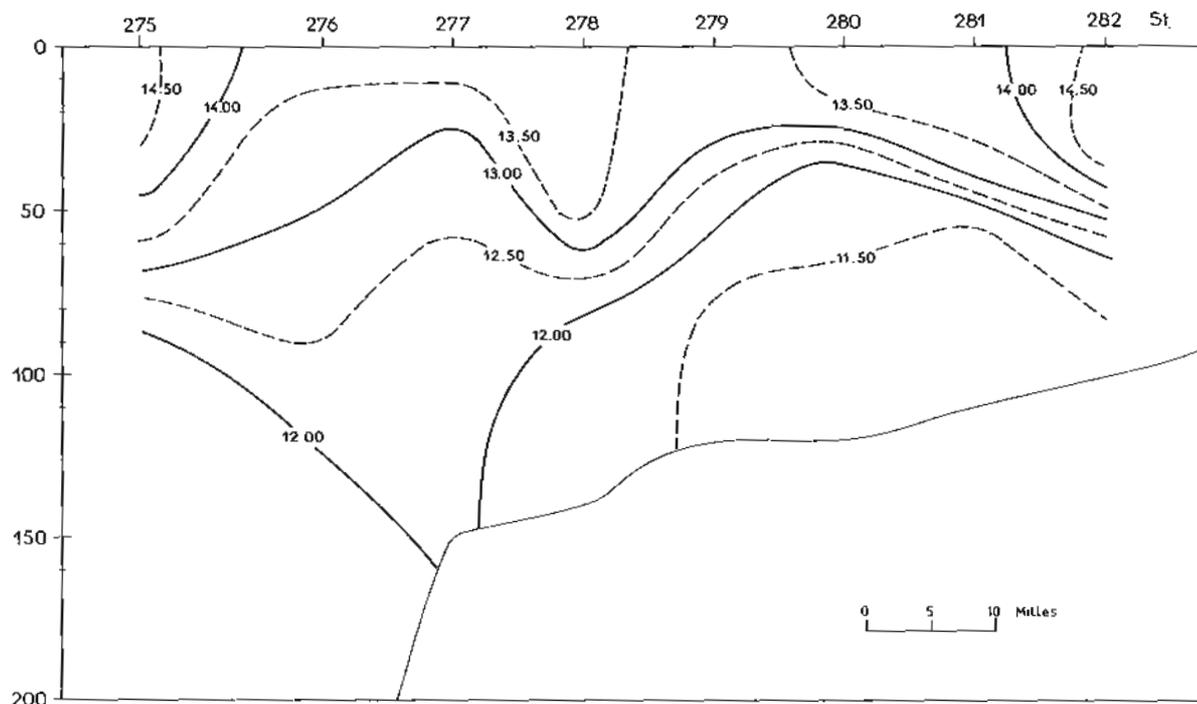
mais beaucoup moins ample entre les stations 33 et 32 associé lui aussi au bourrelet froid délimité assez clairement ici par l'isotherme 11°50. Le front coupe la surface presque tout de suite avec un gradient horizontal moyen de 1°25 pour 10 milles entre les stations 32 et 29. Le calcul pour cette station de la différence de vitesses par l'équation de Margules nous donne une vitesse de 12 cm/s. Pour la partie Ouest de la coupe nous constatons que l'épaisseur de la thermocline varie notablement d'une station à l'autre sans que l'on puisse mettre en évidence de période spatiale déterminée.

Pour la radiale III nous observons de même des élargissements et rétrécissements de la thermocline et remontée de celle-ci en pente assez douce vers la surface (remontée de 40 mètres à la surface en 86 milles. Le gradient horizontal de température est par contre plus important puisqu'il est maintenant de 3° sur 10 milles entre les stations 48 et 49. La pente plus faible nous donne une vitesse qui n'est

que de 5 cm/s. La radiale IV qui a été effectuée totalement sur le plateau avec des fonds inférieurs ou égaux à 150 mètres présente un aspect beaucoup plus régulier pour l'épaisseur de la thermocline qui est tout le temps de l'ordre d'une vingtaine de mètres sauf un accident à la station 54 pour laquelle nous avons un rétrécissement de la largeur qui n'est plus que de 10 mètres, associé à une remontée de la thermocline de l'ordre de vingt mètres. Nous n'avons pas actuellement d'hypothèses à proposer pour un tel « accident ».

La radiale V, elle aussi entièrement sur le plateau présente de même une grande irrégularité de l'épaisseur de la thermocline jusqu'à son épaississement en éventail entre les stations 74 et 75 où le front de surface présente un gradient de 1°5 sur 10 milles. La pente moyenne du front étant de 35 mètres sur 22 milles correspond à une vitesse de 7,5 cm/s.

Les coupes suivantes ont été faites au cours de



COUPE XVIII. — CAPRIROISE (3^e Partie). Température stations 275 à 282.

la 2^e période sur une zone plus restreinte et avec un maillage plus serré et plus régulier (tous les 10 milles au Nord-Sud et Est-Ouest. Elles ont donc un caractère beaucoup plus instantané que les précédentes ayant été faites dans un laps de temps plus court. On les trouvera ci-après classées de VI à XII dans l'ordre géographique du Nord vers le Sud et non dans l'ordre chronologique. Leur aspect évolue progressivement. Les coupes les plus au Nord présentent une thermocline bien marquée qui s'épanouit en éventail en formant une zone frontale avec front de surface et front vers le fond. Elles ressemblent bien au schéma général que nous avons donné à la figure 1. Mais lorsque l'on descend vers les coupes les plus Sud, ce caractère bien marqué s'atténue pour disparaître presque complètement sur les coupes XI et XII. Sur la coupe XI le front au fond est bien marqué délimitant le bord du bourrelet froid. Sur la coupe XII, si nous avons encore un front au fond il est situé plus à l'Est que la station 96 comme semble le suggérer l'aspect de la thermocline entre les stations 97 et 96. Sur le plan général, quand le front existe, il est moins intense que pour la période précédente.

Les coupes XIII à XVIII ont été faites au cours de la 3^e période. Les coupes XIII à XVII correspondent géographiquement aux coupes VIII à XII de la période précédente mais cette fois-ci elles se suivent géographiquement et chronologiquement. Leur simple comparaison permet de constater la disparition totale sur toute la zone du front de surface et quand elle existe encore, l'atténuation très nette de la thermocline, surtout pour les radiales les plus Nord. Le front au fond subsiste encore au Sud mais est très atténué.

CONCLUSION

Dans ce rapport préliminaire de campagne nous avons voulu mettre en relief les caractères principaux de la structure thermohaline au large des côtes de Bretagne en fin de période estivale et au début de la période de refroidissement. Pour cela nous avons présenté les résultats obtenus au cours de 3 périodes différentes (du 19 au 27 septembre, du 1^{er} au 4 octobre et du 22 au 28 octobre), réparties sur un intervalle de temps de plus d'un mois.

Nous avons mis en évidence, pour la première période, l'existence d'une zone frontale thermique bien marquée, orientée globalement Nord-Sud au Nord du 48^e parallèle et s'incurvant, au Sud de ce parallèle vers la pointe de Penmarc'h et Sud Bretagne. Cette zone se caractérise par deux fronts, l'un de surface, l'autre de fond.

Elle met en présence 3 masses d'eau. A l'Ouest une couche mélangée de surface séparée d'une couche mélangée de fond pour une thermocline dont l'épaisseur moyenne varie entre 10 et 20 mètres et dont la profondeur augmente vers le large. La couche mélangée de fond prend dans certaines zones un aspect de « bourrelet froid » déjà décrit par Gilles Hénaff. A l'Est de la zone frontale, de la pointe de Bretagne et à l'entrée de la Manche se trouve une masse d'eau homotherme de la surface au fond. Elle est séparée des deux masses d'eau précédentes par le front de surface et le front de fond qui sont créés par l'épanouissement

en éventail de la thermocline. La structure haline montre que la salinité ne joue pas de rôle important dans la différenciation de ces masses d'eau et que le régime général est gouverné principalement par les échanges de chaleur entre la mer et l'atmosphère.

Au cours des deux autres périodes nous avons pu constater la perte d'intensité du front en surface puis sa disparition complète, associé à un recul général de la thermocline vers le Sud où elle forme encore, près de la côte un front au fond. Cette disparition du front est associée à une remontée vers le Nord, le long de la côte, d'eau plus chaude provenant du plateau continental de Nord Gascogne, ce qui produit un réchauffement général des eaux près de la côte.

Il nous reste encore beaucoup de points particuliers à étudier de plus près. Nous avons notamment fait des mesures de courants dont les résultats semblent prometteurs. D'autre part, le Laboratoire de l'Ecole Polytechnique a fait au cours des 2 dernières périodes des mesures de température de surface par le radiomètre infra-rouge Ariès, embarqué à bord d'un DC 3. Pendant le même temps le Laboratoire de Microphysique de l'Atmosphère a effectué sur la zone entre le 1^{er} et le 4 octobre des mesures aérologiques très poussées. Toutes ces mesures sont encore au stade de l'analyse préliminaire et feront l'objet de rapports ultérieurs.

BIBLIOGRAPHIE

BARY B. Mck., 1963. — Temperature, salinity and plankton in the Eastern North Atlantic and Coastal waters of Britain, 1957. I. The characterisation and distribution of surface waters. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **20**, n° 3, 1963.

- COOPER L.H.N., 1960. — Some theorems and procedures in shallow-water oceanography applied to the Celtic Sea. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **39**, p. 155-171.
- COOPER L.H.N., 1967. — The physical oceanography of the Celtic Sea. *Ocean. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **5**, p. 99-110.
- DIETRICH G., 1950. — Die anomale Jahreschwankung des Wärmehalts im Englischen Kanal, ihre Ursachen und Auswirkungen. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Band 3, Heft 3/4*, p. 184-201 (plus planches).
- DIETRICH G., 1951. — Influence of tidal streams on oceanographic and climatic conditions in the sea as exemplified by the English Channel. *Nature*, vol. 168, juillet 1951, p. 8-11.
- FEARNHEAD P.G., 1975. — On the formation of fronts by tidal mixing around the British Isles. *Deep Sea Res.*, vol. 22, p. 311-321.
- GRALL J.R., LE FÈVRE G. et J., 1971. — Observations sur la distribution du plancton à proximité d'Ouessant en juin 1969 et ses relations avec le milieu physique. *Cahiers Océanographiques*, XXIII, 2, p. 145-170.
- HÉNAFF G., 1973. — Contribution à l'étude de l'océanographie physique du secteur Nord Gascogne. *Thèse de 3^e Cycle*, 25 juin 1973, Université de Bretagne occidentale, Brest.
- LE MAGUERESSE A., 1974. — La structure thermique sur le plateau continental dans le secteur Ouest Bretagne. *Thèse de 3^e Cycle*, 27 avril 1974, Université de Bretagne occidentale, Brest.
- PINGREE R.D., FORSTER G.R., MORRISON G.K., 1974. — Turbulent convergent tidal fronts. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **54**, p. 469-479.
- PINGREE R.D., 1975. — The advance and retreat of the thermocline on the Continental shelf. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **55**, p. 965-974.
- PINGREE R.D., PENNYCUICK L., 1975. — Transfer of eat, fresh water and nutrients through the seasonal thermocline. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **55**, p. 261-274.
- RAILLARD J., 1975. — Les zones frontales dans le Nord du golfe de Gascogne et en mer Celtique. Septembre 1974. Publication interne. Université de Bretagne Occidentale, Brest.
- SIMPSON J.H., HUNTER J.R., 1974. — Fronts in the Irish sea. *Nature*, vol. 250, 2 août 1974.
- SOUTHWARD A.J., 1962. — The distribution of some plankton animal in the English Channel and approaches. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **42**, p. 275-375.

LE BRUIT DANS LES ANALYSES DE MARÉE

par

M. Yves DESNOËS

Ingénieur de l'Armement (hydrographe) (*)

RÉSUMÉ

Nous avons essayé dans la présente étude d'interpréter les principaux types de bruits que l'on rencontre dans les analyses de marée; seules des représentations spectrales, tracées à partir de calculs effectués par ordinateur, permettent de déterminer l'origine des anomalies observées.

Pour l'établissement de schémas théoriques, l'idée de base est que l'estimateur de la série de Fourier est égal à la racine carrée de l'estimateur de la densité spectrale (power spectrum) divisé par la période d'observation. Cette méthode permet, à partir de bruits théoriques approchant au mieux la réalité, de calculer les séries de Fourier correspondantes. L'application a été faite principalement aux marégraphes à tambour.

1. Résolution de la mesure.

Elle a peu d'importance, mais il est nécessaire que le zéro soit le mieux défini possible si l'on s'intéresse aux longues périodes.

2. Mauvais calage en temps des marégrammes.

L'effet de ce type d'erreur (au premier ordre) est une augmentation du niveau de bruit dans une bande de largeur $1/Z$ (Z est la durée moyenne des marégrammes) de part et d'autre de chaque onde marée, cette augmentation étant proportionnelle au module de l'onde considérée; l'effet est donc particulièrement sensible au voisinage de M_{Δ} .

3. Mauvais calage en hauteur des marégrammes.

Cet effet est analogue au précédent mais ne concerne qu'une bande de fréquence de largeur $1/Z$ (même définition de Z) autour de la fréquence.

4. Défauts instrumentaux.

Ces défauts provoquent des erreurs qui peuvent être considérées comme des bruits particuliers; le plus fréquent semble être la non régularité de l'entraînement du tambour qui provoque l'apparition de raies parasites aux fréquences des ondes marées augmentées ou diminuées d'un nombre entier de fois la fréquence de 1 cycle par jour (les tambours ont en général une circonférence correspondant à une durée de 24 h). S1 et S3, par exemple, peuvent être notablement perturbées par les parasites de S2. Cet effet a été mis en évidence à Brest et dans d'autres ports.

a. GÉNÉRALITÉS

Rappel de quelques notions mathématiques; définitions.

Les notations et sigles employés sont rappelés en annexe III.

Nous avons appelé série de Fourier Généralisée (S.F.G.) le module de la transformée de Fourier divisé par la période d'observation T ; les coefficients de la série de Fourier sont égaux aux valeurs de la S.F.G. pour des fréquences multiples de $1/T$ lorsque T est une période exacte du phénomène.

L'estimateur de la S.F.G. s'écrit :

$$\hat{M}_F(\nu) = \frac{1}{2N} \left| \sum_{n=-N}^{N-1} M(n\Delta) e^{-j2\pi\nu n\Delta} \right| \quad (j^2 = -1)$$

— L'estimateur du spectre de puissance (traduction de l'anglais "power spectrum"; le terme français généralement employé est « densité spectrale ») est :

$$\hat{M}_S^2(\nu) = \frac{\Delta}{2N} \left[\sum_{n=-N}^{N-1} M(n\Delta) e^{-j2\pi\nu n\Delta} \right]^2$$

C'est également la transformée de Fourier de l'autocovariance \hat{C}_M

— On remarque que

$$\hat{M}_F(\nu) = \sqrt{\frac{\hat{M}_S^2(\nu)}{T}} \quad T = 2N\Delta$$

(*) Manuscrit reçu en septembre 1976.

Si $\hat{M}_s(v)$ est fini, on voit que $\hat{M}_r(v)$ tend vers 0 lorsque T tend vers l'infini.

Observation de la marée.

La marée est en général observée sur des marégraphes à tambour. Les feuilles de marégrammes ont le plus souvent une durée de un jour, ces marégrammes sont changés assez régulièrement à des intervalles de plusieurs jours; les courbes journalières se recouvrent, ce qui n'est pas gênant lorsque l'influence lunaire est prépondérante.

Ces marégrammes sont contrôlés plus ou moins régulièrement; de toutes façons, lorsque le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant, on adopte pour l'ensemble du marégramme un calage en hauteur et un calage en heure (tenant compte d'une marche éventuelle de l'horloge).

Les schémas théoriques de bruit étudiés ci-dessous essaient de traduire au mieux ce mode opératoire.

b. BRUIT CAUSÉ PAR LA LIMITE DE RÉOLUTION DE LA MESURE

Nous raisonnerons d'abord sur la mesure d'une grandeur fixe, puis sur la mesure d'une grandeur variable (nous considérerons des longueurs pour fixer les idées).

b.1. Résolution de la mesure d'une grandeur fixe.

Nous dirons que la limite de résolution de la mesure est atteinte lorsque, sur un segment d'une certaine longueur l , il est impossible de dire où se trouve l'extrémité de la longueur à mesurer (l'origine étant supposée bien calée). Nous appellerons la longueur l de ce segment « intervalle de résolution ».

Cette définition peut sembler peu rigoureuse. Nous donnons en annexe I, une justification par une approche légèrement différente. Nous pouvons supposer que nous n'avons que des valeurs entières et que l'intervalle de résolution est d'une unité (on peut toujours se ramener à ce cas par une multiplication par un facteur approprié).

Si nous faisons la mesure avec un tel instrument, nous trouverons n avec la probabilité 0,5 et $n+1$ avec également la probabilité 0,5. L'espérance mathématique de la moyenne sera donc $n+0,5$, qui n'a aucun rapport avec la valeur réelle que nous appellerons $n+d$.

La densité de probabilité pour une mesure peut donc être considérée comme deux impulsions de Dirac de poids 0,5 espacées de 1 et d'abscisses inconnues: variable aléatoire (γ). La moyenne de ces abscisses peut être a priori considérée comme une variable aléatoire à valeurs comprises entre $-0,5$ et $+0,5$ et à densité de probabilité continue et constante sur cet intervalle (car pour l'observateur la valeur réelle de la grandeur mesurée peut être n'importe où dans l'intervalle de résolution): V.A. (β).

b.2. Résolution de la mesure de la moyenne d'une grandeur variable.

Nous ferons ici l'hypothèse supplémentaire que la partie décimale de la grandeur dont nous cherchons la valeur moyenne est une V.A. du type (β)

On peut alors considérer le bruit de résolution comme la somme des deux variables aléatoires (α) et (β) que nous avons définies ci-dessus.

Dans le cas d'une grandeur fixe, nous n'avons qu'un échantillon de la variable (β), et il est donc impossible d'améliorer la précision.

Dans le cas d'une grandeur variable, la densité de probabilité du bruit de résolution, obtenue par le théorème des probabilités composées, est continue et égale à 0,5 sur le segment $[-1, +1]$. La V.A. correspondante (γ) est centrée, et la moyenne d'un nombre croissant d'échantillons tendra donc vers sa valeur moyenne, c'est-à-dire zéro.

Ceci suppose bien entendu qu'il n'y a pas d'erreur systématique de zéro et que l'instrument de mesure est bien étalonné et fidèle, c'est-à-dire que, par exemple, une variation de 100 de la grandeur à mesurer donnera toujours une variation de 100 ± 1 de la mesure.

Si l'on a des variations du zéro instrumental, leur spectre s'ajoutera à celui du signal.

b.3. S.F.G. du bruit de résolution.

Nous ferons encore une hypothèse supplémentaire, à savoir que les erreurs à deux instants d'échantillonnage différents ne sont pas corrélées.

La variance de la V.A. γ est :

$$\int_{-1}^{+1} x^2 \times 0,5 dx = \frac{1}{3}$$

Si l'intervalle de résolution est A , la variance est $\frac{A^2}{3}$.

L'autovariance est donc :

$$C_\gamma(k) = 0 \quad k \neq 0$$

$$C_\gamma(k) = \frac{A^2}{3} \quad k = 0$$

Tableau 1

Analyse de la prédiction à laquelle est superposée un bruit de coefficient A = 30 cm.

Nota : les valeurs portées à droite dans les colonnes « rayon » et « G » sont celles de la prédiction

Onde	Vitesse angulaire	Rayon	Phase "G"	
22 M6	86.9523	0.4 0.2	353.3 322.4	346.7
23 2MN6	86.4079	0.4 0.1	277.8 39.2	271.2
24 2SKM4	61.0980		81.8	77.4
25 3SM4	61.0159	0.3	100.4	96.0
26 2SMN4	60.5444	0.4	262.8	258.4
27 SK4	60.0821	0.1	1.0	356.6
28 S4	60.0000	0.5	24.5	20.1
29 2MSN4	59.5285	0.4	272.1	267.7
30 2SNM4	59.4556	0.6	72.0	67.6
31 MK4	59.0662	0.2	26.0	21.6
32 MS4	58.9841	1.5 1.6	90.1 109.5	85.7
33 2SMK4	58.9020	0.1 0.3	151.1 153.1	146.7
34 3MN4	58.5126	0.6 0.7	266.4 229.5	261.9
35 SN4	58.4397	0.5	353.4	349.0
36 2MK4	58.0503	0.4	226.5	222.1
37 M4	57.9682	8.2 7.9	357.0 356.1	352.6
38 2MSK4	57.8861	0.1	110.9	106.5
39 MN4	57.4238	3.2 3.3	311.0 315.5	306.6
40 3MS4	56.9523	0.3	165.0	160.6
41 3MK4	56.8702	0.2	205.6	201.2
42 2MNS4	56.4079	0.5	323.1	318.7
43 K3	45.1232	0.3	247.2	243.9
44 SK3	45.0411	0.4 0.5	140.0 65.2	136.7
45 S3	45.0000	0.5 0.2	34.4 120.9	31.1
46 SP3	44.9589	0.3	274.7	271.4
48 MK3	44.0252	0.3 0.3	196.0 227.8	192.7
49 SO3	43.9430	0.2	330.6	327.3
50 M3	43.4762	2.0 1.8	351.7 343.7	348.4
52 2MK3	42.9271	0.3	123.5	120.2
53 MQ3	42.3828	0.1	131.0	127.7
55 2SN2	31.5803	0.4	180.3	178.1
57 2SM2	31.0159	1.7 1.0	330.3 338.9	328.1
58 KJ2	30.6265	0.2 0.3	110.5 95.2	108.3
59 MSN2	30.5444	0.1 0.3	168.0 278.5	165.8
61 K2	30.0821	14.8 14.9	138.6 138.1	136.4
62 R2	30.0411	0.3	203.5	201.3
63 S2	30.0000	51.5 51.8	140.9 141.0	138.7
64 T2	29.9589	2.0 2.0	123.9 126.6	121.7
68 L2	29.5285	6.9 6.8	110.6 108.3	108.4
69 LAMBDA2	29.4556	2.2 2.1	109.2 116.1	107.0
70 MKS2	29.0662	0.8 0.9	263.8 277.3	261.6
71 M(KS)2	29.0252	0.6	313.2	311.0
72 M2	28.9841	155.7 155.5	108.2 108.1	106.0
73 M(SK)2	28.9430	0.1	281.5	279.3
74 OP2	28.9020	1.1 0.8	32.5 38.8	30.3
75 NU2	28.5126	6.5 6.4	86.6 88.5	84.4
76 N2	28.4397	30.5 30.7	91.6 91.2	89.4
78 MU2	27.9682	1.8 1.4	92.9 103.9	90.7
79 2N2	27.8953	4.0 4.0	58.1 56.5	55.9
81 MNS2	27.4238	0.7 1.1	25.2 340.6	23.0
82 OO2	27.3417	0.9 0.8	157.1 133.6	154.9
83 KO1	16.6835	0.1	44.2	43.1
84 OO1	16.1391	0.1	258.2	257.1
87 SO1	16.0570	0.3	189.4	188.3
89 J1	15.5854	0.2	89.6	88.5
90 THETA1	15.5126	0.4	128.9	127.8
91 PHI1	15.1232	0.5	319.9	318.8
92 PSI1	15.0821	0.4	258.8	257.7
93 K1	15.0411	5.6 5.7	84.4 80.1	83.3
94 S1	15.0000	1.2 1.1	24.8 36.7	23.7
95 P1	14.9589	2.2 2.1	63.5 70.3	62.4
96 PI1	14.9179	0.6	184.1	183.0
97 CHI1	14.5695	0.1	216.7	215.6
98 M1	14.4967	0.1 0.1	223.6 320.5	222.5
100 MP1	14.0252	0.2	240.4	239.3
103 O1	13.9430	6.8 6.5	329.8 330.6	328.7
104 RHO1	13.4715	0.1	35.3	34.2
105 O1	13.3987	1.9 1.9	301.7 293.8	300.6
107 SIGMA1	12.9271	0.1	81.0	79.9
108 ZO1	12.8543	0.2	238.6	237.5
115 MF	1.0980	2.3 2.4	222.5 223.6	222.5
118 MSF	1.0159	2.8 2.6	33.9 30.1	33.9
121 MM	0.5444	1.9 1.7	342.5 328.6	342.5
122 MSM	0.4715	2.1 2.1	148.5 144.7	148.5
124 SSA	0.0821	2.9 3.0	177.9 182.0	177.9
125 SA	0.0411	6.7 6.7	208.5 209.6	208.5

NIVEAU MOYEN 317.841 CENTIMÈTRES

D'où la S.F.G.

$$\hat{\gamma}_F(\nu) = \frac{A}{\sqrt{3N}}$$

N étant le nombre d'intervalles d'échantillonnage.

Application numérique.

Une simulation du bruit de résolution a été faite sur une prédiction d'un an de marée à l'aide d'un générateur de nombres aléatoires. Les constantes employées dans la prédiction figurent sur le tableau 1.

Le tableau 1 donne également le résultat de l'analyse de la prédiction à laquelle est superposé un bruit de coefficient $A = 30$ cm.

La valeur théorique du bruit est : 3,5 mm.

La valeur estimée de $\hat{\gamma}_r$ a été déduite par moyenne quadratique des valeurs trouvées pour les ondes qui n'ont pas été introduites :

$$\hat{\gamma}_r(\nu) = 3,4 \text{ mm.}$$

L'accord peut être considéré comme bon.

La comparaison des valeurs introduites dans la prédiction et des valeurs trouvées dans l'analyse confirme cet accord.

On en déduit que, pour des observations de longue durée, une résolution de 10 cm peut être acceptable, à condition que soient respectées les conditions de fidélité et de stabilité du zéro mentionnées en 2.b.2).

c. BRUIT CAUSÉ PAR LE MAUVAIS CALAGE EN TEMPS DES MARÉGRAMMES

Les V.A. traitées dans ce paragraphe seront considérées comme centrées (espérance mathématique nulle).

c.1. Calage constant sur tout le marégramme.

Nous supposons les marégrammes de durée constante Z.

Ce type d'erreur peut être assimilé à une modulation en phase de chaque composante par une fonction aléatoire dont nous déterminerons la S.F.G. La linéarité de la T.F. permet de procéder de cette manière.

Il devient alors évident que seules les composantes importantes seront modulées de façon sensible.

Nous écrivons une composante :

$$S(t) = A e^{j(\omega t + K\varphi(t))}$$

$\varphi(t)$ représentant la modulation et K étant un coefficient ramenant $\varphi(t)$ à l'unité convenable.

Nous supposons $K\varphi(t)$ petit devant la période $2\pi/\omega$ de la composante et ferons un développement au premier ordre. Ceci est justifié pour les ondes principales de la marée en supposant que les calages ne sont pas trop faux (de l'ordre de la dizaine de minutes). Notre approximation devient évidemment de plus en plus grossière à mesure que l'on considère des fréquences plus élevées.

On en déduit :

$$S(t) = A e^{j\omega t} e^{jK\varphi(t)} \simeq A e^{j\omega t} (1 + jK\varphi(t))$$

d'où la T.F.

$$\begin{aligned} S^*(\nu) &= A [\delta^*(\nu) + jK\varphi^*(\nu)] \otimes \delta^*(\nu - \nu_0) \\ &= A\delta^*(\nu - \nu_0) + jAK\varphi^*(\nu - \nu_0) \end{aligned}$$

La T.F. est donc constituée d'une raie à la fréquence ν_0 à laquelle se superpose la T.F. de φ multipliée par KjA centrée sur cette fréquence.

Cette propriété est conservée lorsqu'on échantillonne.

Nous supposons les erreurs de calage sur des marégrammes successifs indépendantes. Si σ^2 est la variance de la V.A. représentant l'erreur de calage, la fonction d'autocovariance de $\varphi(t)$ s'obtient par le théorème des probabilités composées et est égale à :

$$C_\varphi(k) = \sigma^2 \left(1 - \frac{|k|}{N}\right) \text{ en posant } Z = N\Delta$$

$$k = 0 \dots N$$

à condition que Z soit petit devant la période d'observation T.

La S.F.G. est alors égale à

$$\hat{\varphi}_F(\nu) = \sigma \sqrt{\frac{Z}{T}} \left| \frac{\sin(\pi N \Delta \nu)}{N \sin(\pi \Delta \nu)} \right|$$

Le tracé de cette fonction figure sur la figure 2.

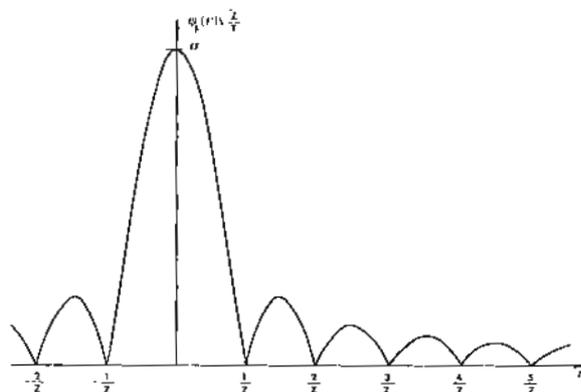


FIG. 2. — S.F.G. d'un bruit de calage constant sur chaque marégramme.

La S.F.G. théorique du bruit sera donc en module égale à

$$AK\sigma \sqrt{\frac{Z}{T} \left| \frac{\sin(\pi N \Delta(\nu - \nu_0))}{N \sin(\pi \Delta(\nu - \nu_0))} \right|}$$

cette quantité diminue lentement lorsque la période d'observation T augmente.

Nous ne pouvons par cette méthode estimer la phase de $\hat{\varphi}(\nu)$. On peut cependant estimer que, sur un grand nombre de périodes différentes, la phase de $\hat{\varphi}_F(\nu)$ et celle d'une composante de la marée prendront des valeurs dont les différences seront à peu près uniformément réparties sur $[0, 2\pi]$.

Le bruit $\hat{\varphi}_F(\nu)$ s'ajoutera alors vectoriellement aux composantes de la marée.

Ceci explique pourquoi les composantes de faible amplitude voisines de M_2 (OP_2 , $M(KS)_2$, $M(SK)_2$, etc.) sont en général mal déterminées.

On voit à cela deux remèdes :

a) Faire autant d'estimations qu'il est possible et en faire la moyenne, le bruit finissant par s'éliminer ; ceci demande de très longues périodes d'observation si l'on veut une séparation satisfaisante.

Exemple : analyse de Brest sur 19 ans.

Ondes $M(KS)_2$ et $M(SK)_2$.

Onde	Analyse de 19 ans		Moyenne de 19 analyses de 1 an		Valeur déduite de celle de M par rapports des coefficients astronomiques (Doodson)	
	Amplitude	Phase (G)	Amplitude	Phase (G)	Amplitude	Phase (G)
$M(KS)_2$	1,06 cm	157,6°	0,5 cm	134,6°	0,6 cm	108°
$M(SK)_2$	1,52 cm	153,7°	0,8 cm	129,7°	0,7 cm	108°

Il semble que ces ondes sont à Brest d'origine à peu près purement astronomique.

b) Recaler chaque journée au moyen de la différence des phases du groupe semi-diurne obtenues par l'analyse journalière selon la méthode des hauteurs réduites (voir [2]) d'une prédiction approchée et de la marée observée ; l'influence du bruit sur les phases des ondes principales calculées par une première analyse des observations est en effet assez faible, et la phase (déterminée surtout par les phases de ces ondes) du groupe semi-diurne obtenu par prédiction à partir de cette analyse sera plus

exacte que celle des observations pour une même journée.

Cette idée est due à M. Simon.

Nous donnons à titre d'exemple sur les figures 3 et 4 les S.F.G. de la marée au Havre (observée en 1963 et 1964) avant et après recalage. Les résultats obtenus se passent presque de commentaire. Remarquons simplement que les modules de $M(KS)_2$ et $M(SK)_2$ se rapprochent de leurs valeurs théoriques qui sont respectivement 0,8 cm et 0,9 cm. Il convient de remarquer que les calages de ces observations étaient particulièrement imprécis.

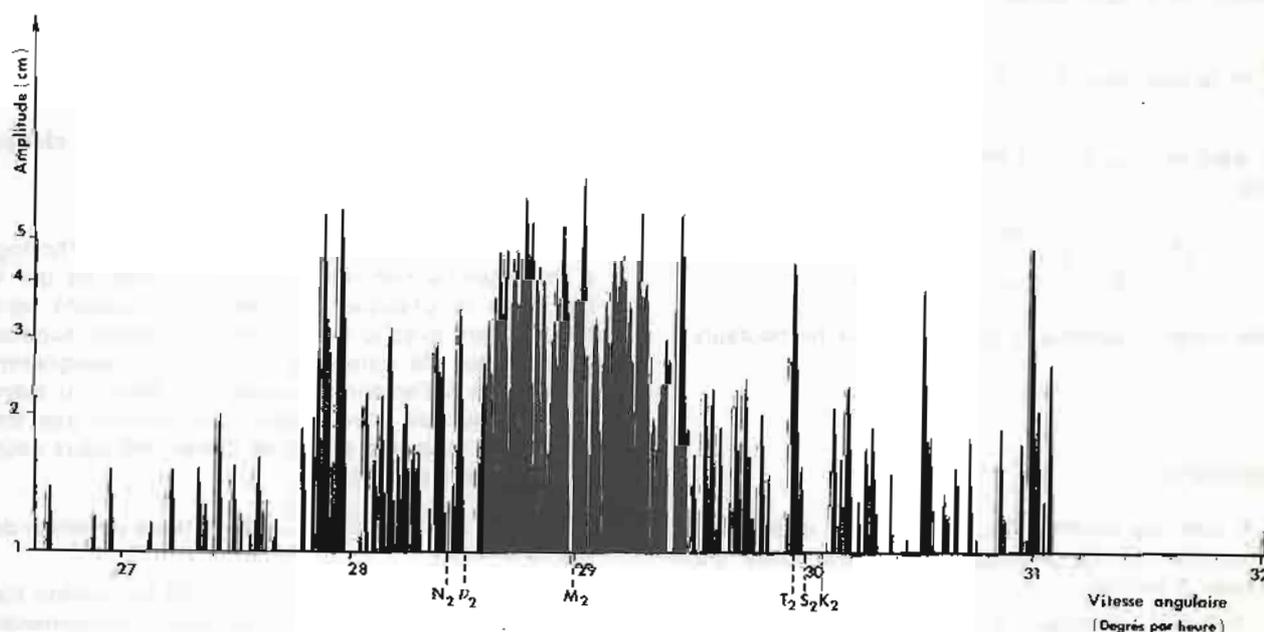


FIG. 3. — S.F.G. avant recalage.

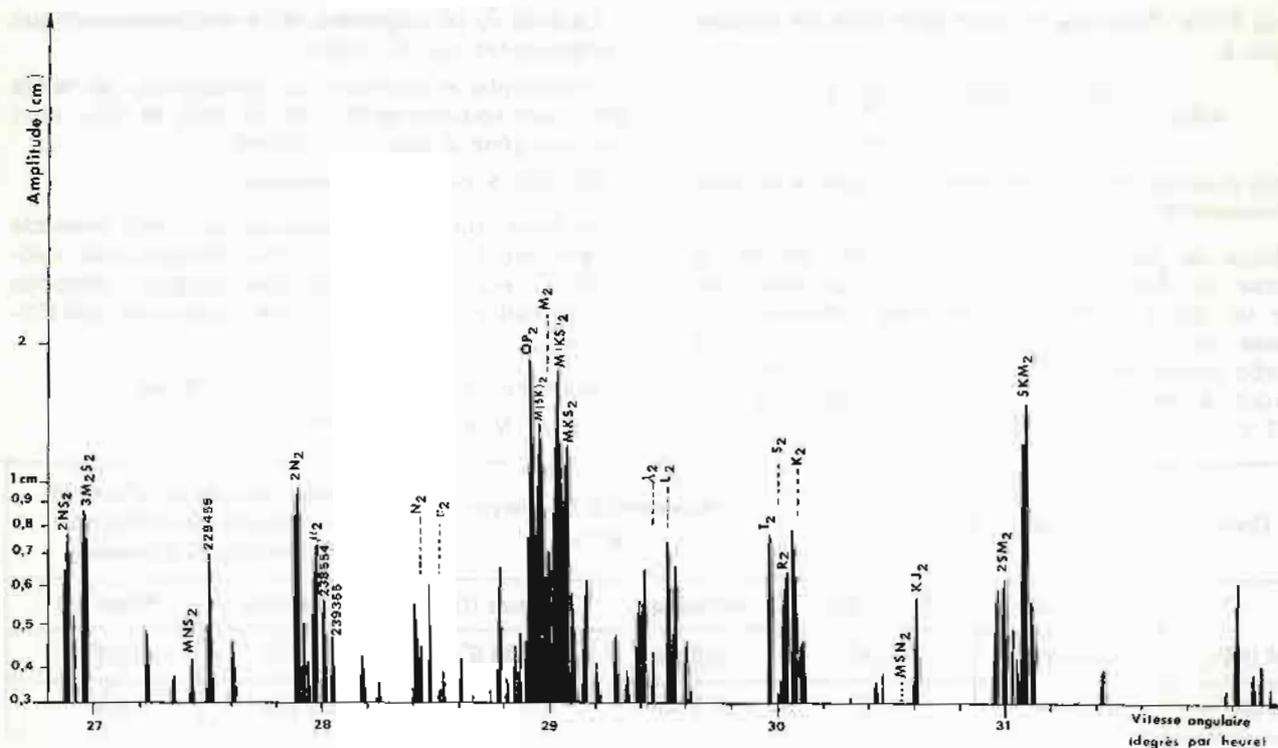


FIG. 4. — S.F.G. après recalage.

Effet du bruit de calage en heure sur les hauteurs.

On l'obtient par application du théorème de Parseval-Plancherel :

$$\int [\varphi(t)]^2 dt = \int [\varphi^*(\nu)]^2 d\nu$$

les intégrales étant prises au sens de Lebesgue.

Appliquons la relation sur une période T .

En divisant par la période d'observation T et en remplaçant par les estimateurs, nous obtenons :

$$\sigma_\varphi^2 = \text{variance de } \varphi(t) = \int \hat{\varphi}_s^2(\nu) = \int_{-1/2\Delta}^{1/2\Delta} \hat{\varphi}_s^2(\nu) d\nu,$$

en supposant $\hat{\varphi}_s^2(\nu)$ nul en dehors de $[-1/2\Delta, 1/2\Delta]$ d'où

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{\Delta \sigma^2}{N} \int_{-1/2\Delta}^{1/2\Delta} \frac{\sin^2(\pi N \Delta \nu)}{N \sin^2(\pi \Delta \nu)} d\nu = \sigma^2$$

d'où l'écart quadratique moyen σ_M sur les hauteurs :

$$\sigma_M = A \cdot K \sigma$$

Vérification.

A titre de vérification, nous avons effectué une simulation de ce phénomène sur une onde d'amplitude 2 mètres.

La S.F.G. obtenue à partir de cette simulation est représentée sur la figure 5.

On a superposé en trait plein la S.F.G. théorique calculée de la manière suivante :

— $N = 120$ (marégrammes de 5 jours)

— $T = 1$ an

— le décalage simulé était uniformément réparti sur $[-30 \text{ mm}, +30 \text{ mm}]$, ce qui donne $\sigma = \frac{30}{\sqrt{3}}$

$$\sqrt{\frac{Z}{T}} AK \sigma = \frac{2\pi \times 30 \times 200}{\sqrt{74} \times \sqrt{3} \times 720} = 3,5 \text{ cm}$$

L'accord est très bon.

c.2. Calage variant linéairement sur chaque marégramme.

Ce cas est celui d'un marégramme dont l'horloge a une marche non nulle. On a supposé (ce qui se fait dans la pratique) que le calage adopté varie linéairement avec le temps. On a également supposé que l'erreur de calage à la fin d'un marégramme était égale à l'erreur de calage au début du marégramme suivant (ceci n'est certainement pas toujours vrai, mais une partie de l'erreur est sans doute toujours de ce type).

Soit nZ , $(n+1)Z$ etc... les instants de calage des marégrammes ;

Soit φ_n , φ_{n+1} etc... les valeurs de la fonction (qui est la même que celle que nous avons précédemment définie) à ces instants.

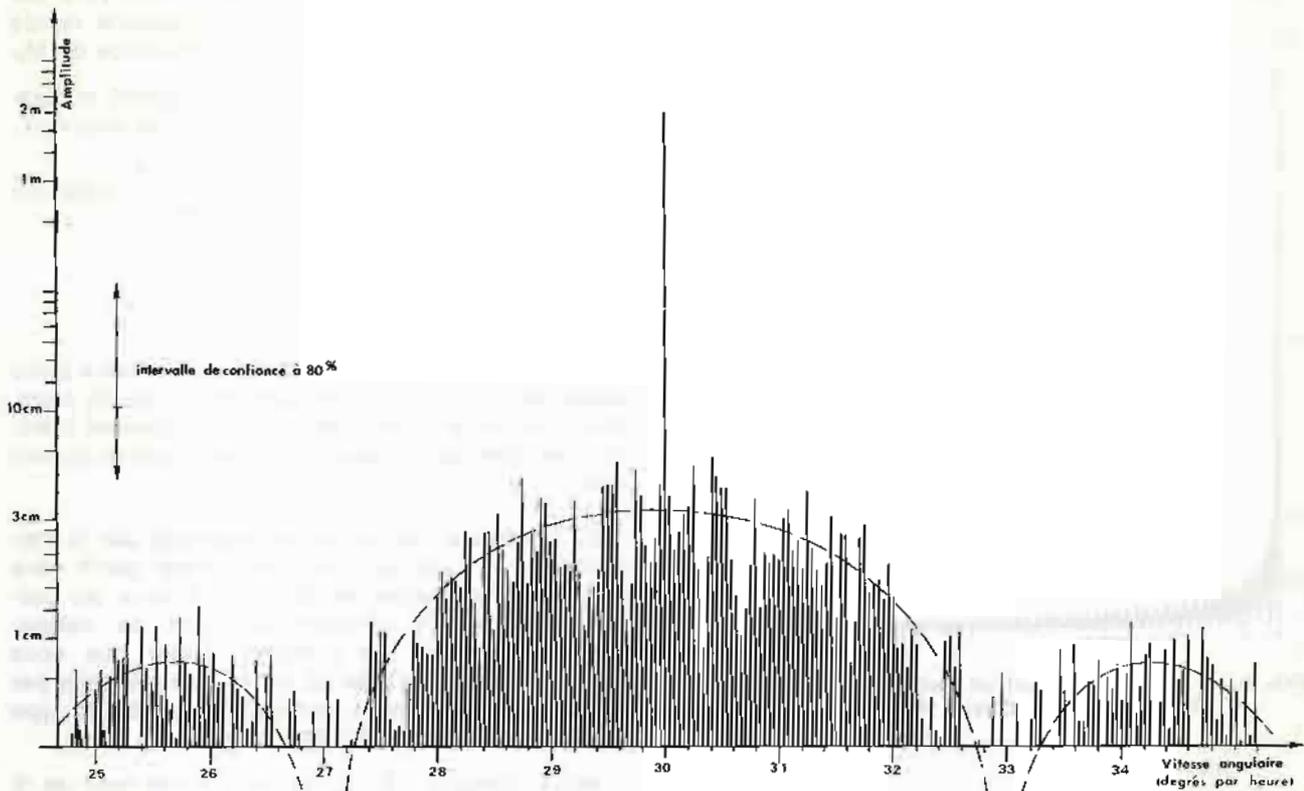


FIG. 5. — S.F.G. de la simulation d'un bruit de calage en heure.
— — — S.F.G. théorique.

Soit $\varphi_{[n,n+1]}^{(t)}$ la fonction représentant l'erreur à l'instant t compris entre nZ et $(n+1)Z$.

Nous avons

$$\varphi_{[n,n+1]}^{(t)} = \varphi_n + (t - nZ) \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{Z}$$

Nous calculerons $C_\varphi(k)$ en nous servant du théorème des probabilités composées (sans oublier notre hypothèse de stationnarité qui permet d'intégrer séparément dans le temps et dans l'espace de probabilité).

Nous calculerons sur des valeurs continues et positives de k , ce qui donne une nouvelle variable que nous appellerons τ . Il est évident que

$$C_\varphi(\tau) = C_\varphi(-\tau)$$

Le détail du calcul figure en annexe II.

On trouve :

$$C_\varphi(\tau) = C_{1\varphi}(\tau) + C_{2\varphi}(\tau)$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_{1\varphi}^{(\tau)} = \frac{\sigma^2}{6Z^3} (2Z - \tau)^3 & \tau < 2Z \\ = 0 & \tau \geq 2Z \\ C_{2\varphi}^{(\tau)} = \frac{2\sigma^2}{3Z^3} (\tau - Z)^3 & \tau < Z \\ = 0 & \tau \geq Z \end{array} \right.$$

Les calculs de T.F. de C_φ sont longs et peu intéressants. Il nous a semblé préférable d'effectuer un calcul numérique sur ordinateur.

Nous avons calculé directement

$$\hat{\varphi}_F(\nu) \sqrt{\frac{T}{Z}}$$

Il est intuitif que, lorsque N est grand, $\hat{\varphi}_F(\nu)$ avec $Z = Z_0$ sera sensiblement égal à $\hat{\varphi}_F(\nu/2)$ avec $Z = 2Z_0$. Nous l'avons vérifié numériquement pour $Z_0 = 5$ jours.

Sur la figure 6 est représenté le tracé de la S.F.G. de la fréquence de 0 à la fréquence de Nyquist. Nous voyons que, lorsque ν augmente,

$$\hat{\varphi}_F(\nu) \sqrt{\frac{T}{Z}}$$

tend rapidement vers une valeur moyenne de 0,025 avec des maximums de l'ordre de 0,035.

Sur la figure 7 est représenté un agrandissement de ce tracé au voisinage de la fréquence 0 (échelle des fréquences dix fois plus grande). Nous lui avons superposé le tracé approximatif de la S.F.G. du bruit traité au paragraphe c.1).

Nous voyons que, bien que la S.F.G. du bruit que nous venons de traiter (c.1) ne tende pas vers 0, celui-ci est bien plus avantageux que le bruit traité au paragraphe précédent (c.1).

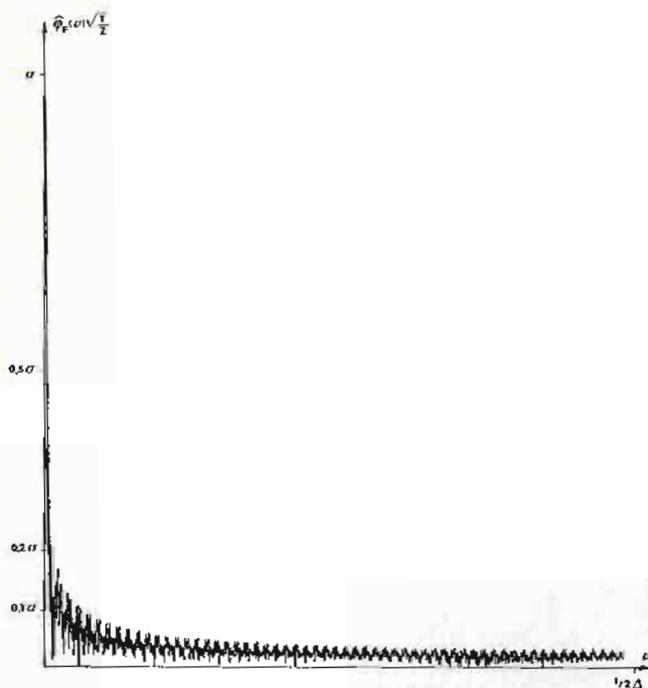


FIG. 6. — S.F.G. d'un bruit de calage en heure variant linéairement sur chaque marégramme.

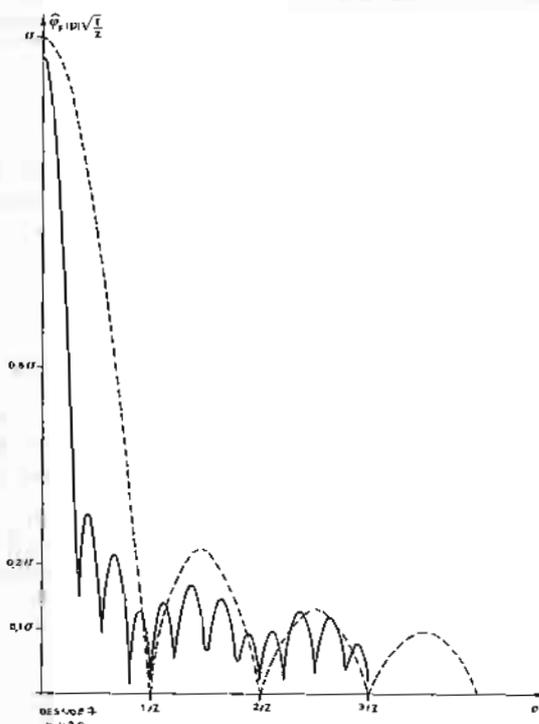


FIG. 7

- S.F.G. d'un bruit de calage variant linéairement sur chaque marégramme.
 - - - S.F.G. d'un bruit de calage constant sur chaque marégramme.

Remarque. Il est à peu près certain que la S.F.G. du bruit C.2. passe par zéro pour

$$\nu = \frac{1}{4Z}, \frac{2}{4Z}, \dots, \frac{k}{4Z}, \dots$$

Vérifications. a) Fréquence. Nous observons sur le spectre de la figure 5 une décroissance rapide du bruit à environ 0,4°/heure de la fréquence de M_2 .

Si nous supposons que ceci correspond au premier zéro de la S.F.G. du bruit C.2., nous obtenons :

$$\frac{1}{4Z} \simeq 0,4^\circ/h = 24 \times 0,4^\circ/\text{jour} = \frac{24 \times 0,4}{360} \text{ cycles/jour}$$

d'où

$$Z \simeq \frac{360}{24 \times 0,4 \times 4} = \frac{15}{1,6} = 9,4 \text{ jours}$$

Or la période moyenne des marégrammes à partir desquels a été calculé le spectre est de 10 jours. Bien que notre détermination de la fréquence 0,4°/h soit peu précise, on peut considérer l'accord comme bon.

b) Amplitude. Les recalages effectués par la méthode du 2 c.1.b) sur les observations ayant servi au calcul du spectre de la figure 3 nous ont permis d'estimer la variance du bruit de calage; l'écart-type serait de 11,63 mn, valeur que nous divisons par la période de H_2 (≈ 745 mn) puis par $\sqrt{3/2}$ puisque le bruit semble être plutôt de type C2 et enfin par $\sqrt{36,5/(200 \times 2\pi)}$.

Nous obtenons 2,6 cm, ce qui, compte tenu de la variance de l'estimateur, correspond assez bien au bruit observé sur la S.F.G.

d. BRUIT CAUSÉ PAR LE MAUVAIS CALAGE EN HAUTEUR DES MARÉGRAMMES

La S.F.G. de ce bruit se calcule comme celle des bruits traités au paragraphe c). Notons que, en général, le calage en hauteur est considéré comme constant sur tout un marégramme. Nous n'aurons qu'un bruit du type C₁.

Si nous appelons σ l'écart quadratique moyen de l'erreur sur le calage en hauteur, la S.F.G. du bruit sera :

$$\hat{\psi}_F(\nu) = \sigma \sqrt{\frac{Z}{T}} \left| \frac{\sin(\pi N \Delta \nu)}{N \sin(\pi \Delta \nu)} \right|$$

Cette S.F.G. sera bien sûr centrée sur la fréquence 0. On en tire les conclusions suivantes :

— le niveau moyen ne pourra être déterminé à mieux que $\sigma \sqrt{Z/T}$ près;

— les marégrammes les plus courts ayant une durée de un jour, les fréquences des ondes de marée diurnes, semi-diurnes et supérieures ne seront jamais dans le pic central et ne seront donc pas trop perturbées. Par contre, les ondes à longue période (M_2 , MS_2 , M_m , MS_m , S_a , SS_a) seront en général dans le pic central et seront donc perturbées par ce type de bruit (en plus du bruit météorologique bien entendu).

e. DÉFAUTS INSTRUMENTAUX

Il est impossible de prévoir tous les défauts possibles. Nous n'avons examiné que celui qui semble le plus fréquent dans les marégraphes à tambour.

e.1. Détection d'une erreur systématique.

Une étude 19 années d'observations de marée à Brest (1953-1972) a fait apparaître des composantes diurnes et tiers-diurnes à des fréquences inexistantes dans le développement du potentiel de la marée et pouvant difficilement être expliquées par des interactions. Ces fréquences sont exactement, aux erreurs de mesure près, d'une part, les différences $QM_2 - QS_1$ et $QN_2 - QS_1$ pour les diurnes, d'autre part les sommes $QM_2 + QS_1$ et $QN_2 + QS_1$ pour les tiers-diurnes (en notant Q_1 la fréquence de l'onde P); la composante de fréquence $QN_2 - QS_1$ est mal séparée du bruit qui est plus fort dans les fréquences diurnes que dans les fréquences tiers-diurnes. Les figures 8, 9, 10, 11 représentent les parties d'une S.F.G. calculée sur 19 ans où ces ondes apparaissent. On remarque de plus qu'à Brest l'amplitude des ondes S_1 et S_3 est anormale-

ment forte (1,04 cm et 0,71 cm respectivement, alors qu'au Havre, par exemple, on trouve 0,47 cm et 0,18 cm).

e.2. Explication du phénomène.

Une analyse de l'année 1865 a montré :

a) que S_1 et S_3 avaient à cette époque des valeurs plus faibles (0,6 cm et 0,3 cm);

b) que l'onde de fréquence $QM_2 - QS_1$ était pratiquement inexistante (les autres ondes mentionnées au paragraphe e.1) n'ont pas été recherchées).

Il était donc à peu près certain que ce phénomène était d'origine instrumentale. Nous avons étudié la forme d'une modulation de phase éventuelle en comparant heure par heure le déphasage entre la marée observée et une marée prédite à l'aide des constantes calculées par analyse harmonique des années 1953 à 1972; pour une même heure de la journée, les déphasages ont été moyennés sur un an. Les résultats sont présentés sur la figure 12 pour les années 1953, 1964 et 1972, et sur la figure 13 pour les années 1865 et 1939 (le marégraphe actuellement en service a été mis en place vers 1952).

Pour les années 1953, 1964 et 1972, il apparaît nettement une variation diurne de la phase, la marée observée étant en retard de 1,5 mm environ le matin, et en avance de 1,5 mm environ l'après-midi; la

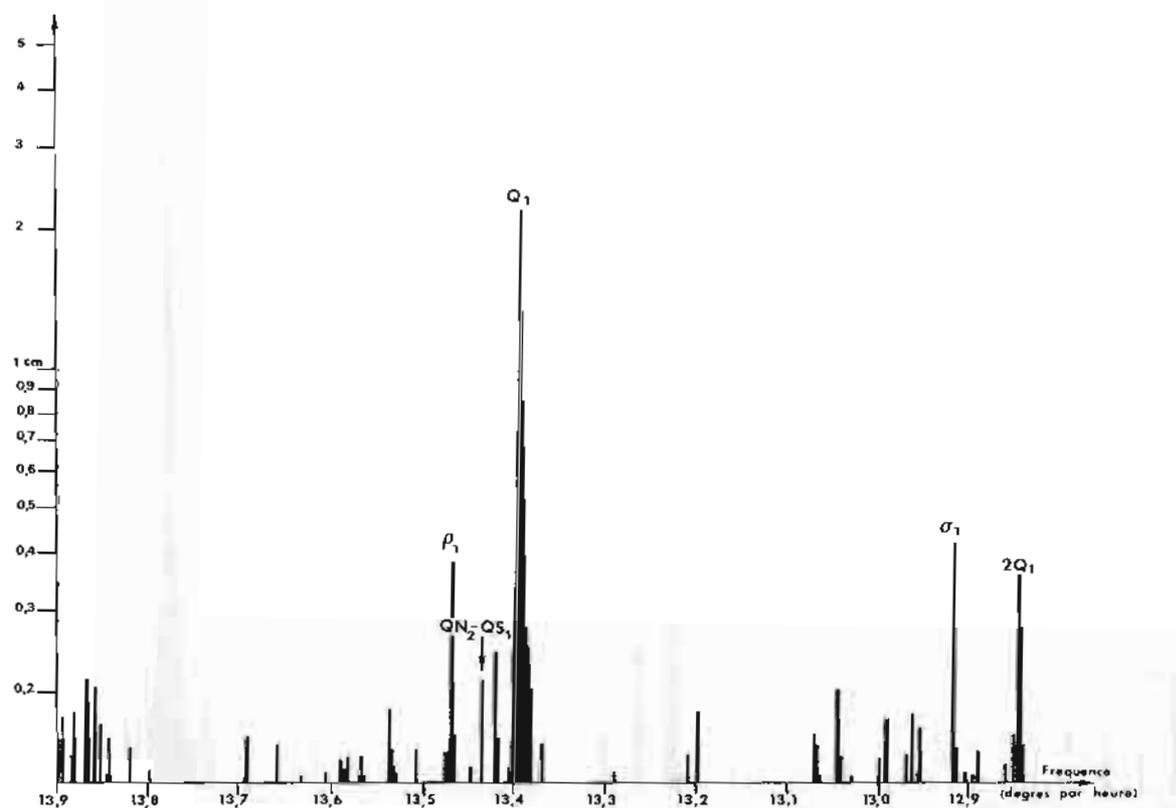


FIG. 8

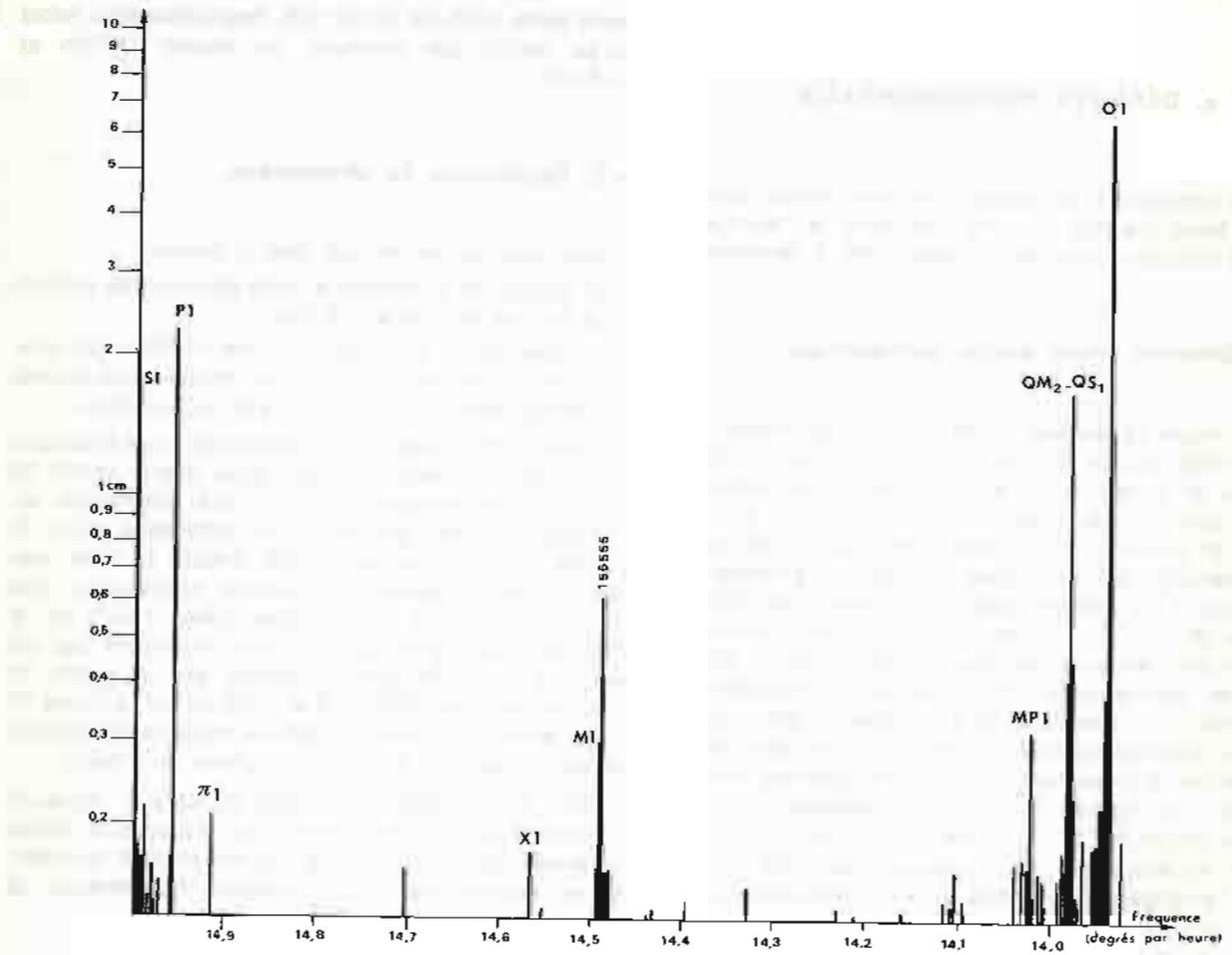


FIG. 9

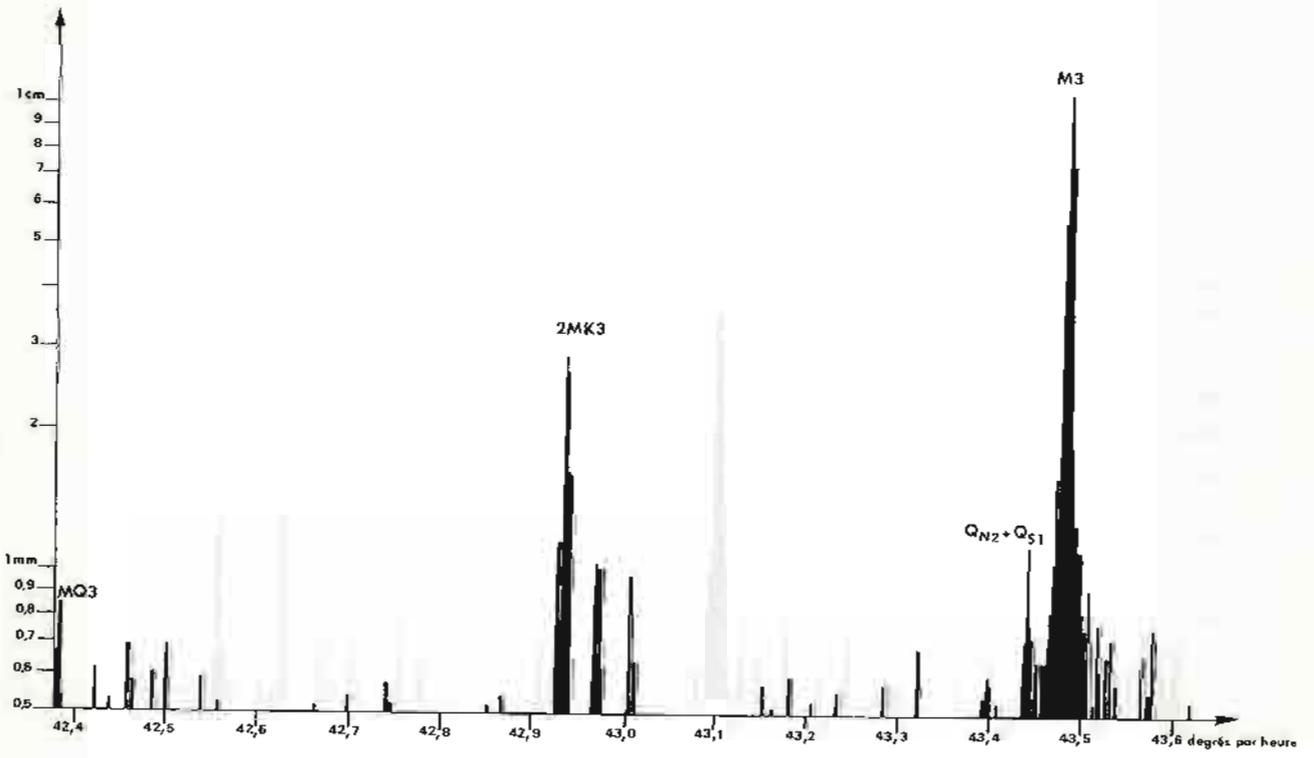


FIG. 10

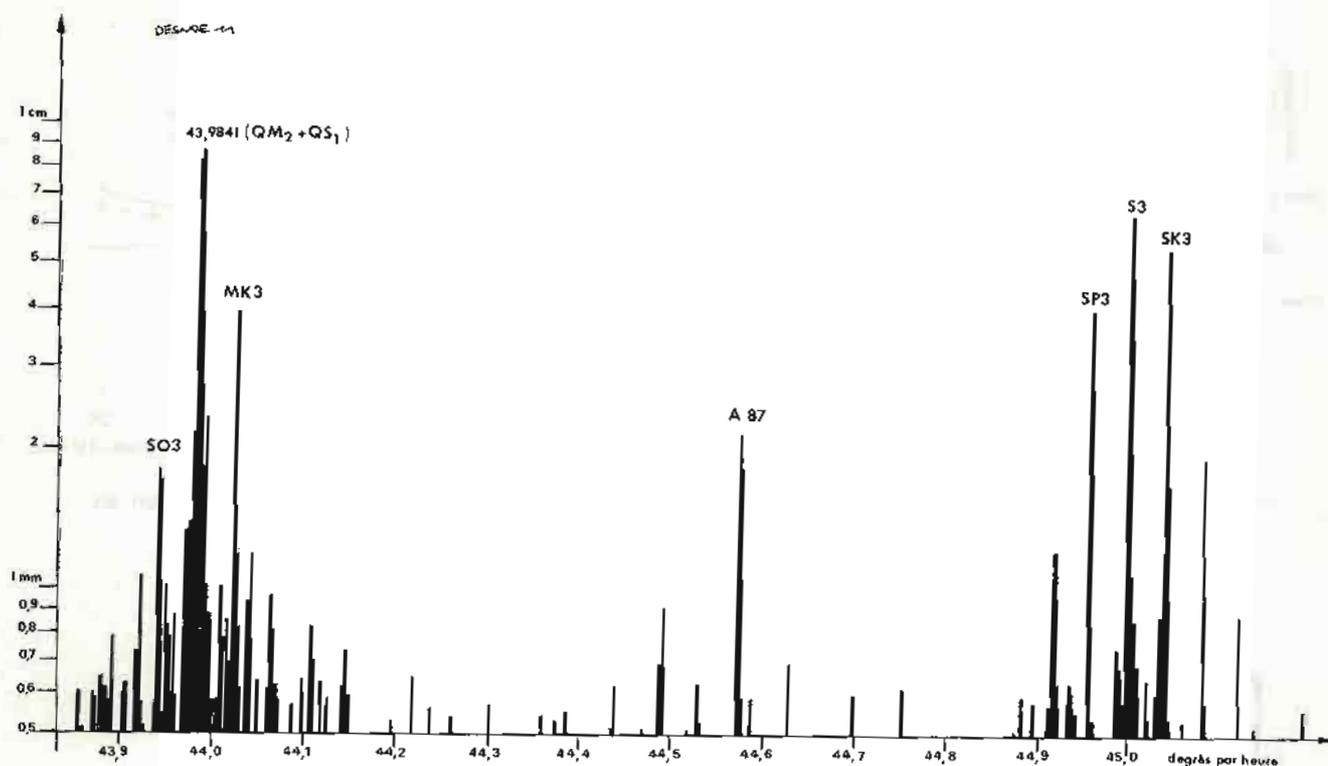


FIG. 11

valeur moyenne du décalage sur les 19 années (1953 à 1972) est certainement nulle puisque les constantes employées dans la prédiction ont été calculées sur ces 19 années. Il en résulte que, les calages des marégrammes étant faits en général vers 8 h du matin, les phases G calculées dans les analyses sont plus faibles que les phases réelles.

Par exemple, la phase de M_2 doit être corrigée de + 0,75 pour obtenir la valeur réelle.

Cette variation diurne de la phase a été attribuée à un défaut du pignon solidaire du tambour du marégraphe.

Remarque. — Si nos hypothèses sont exactes, nous devons trouver non seulement la modulation de l'onde de fréquence QM_2 , mais la modulation de l'onde de fréquence $-QM_2$; on peut le vérifier sur la figure 14 où est montrée la S.F.G. au voisinage de la fréquence $3QS_1 - QM_2$.

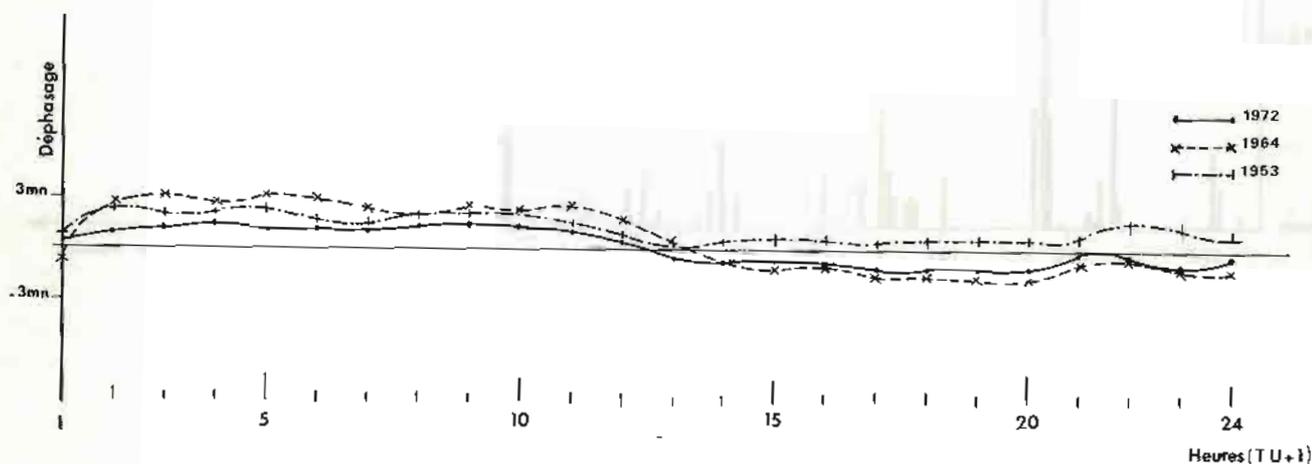


FIG. 12. — Déphasage entre observation et prédiction pour chaque heure de la journée, moyenné sur un an.

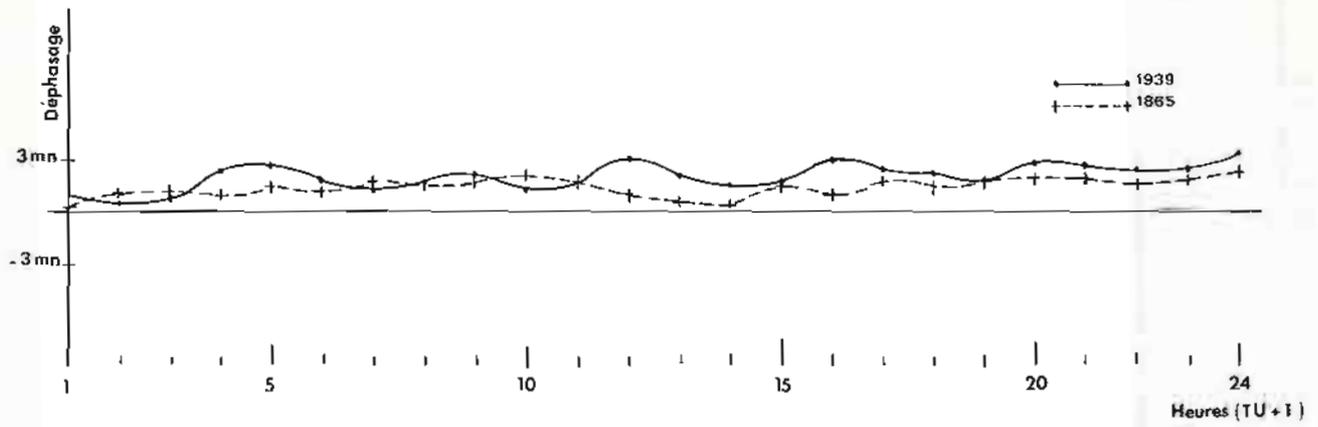


FIG. 13. — Déphasage entre observation et prédiction pour chaque heure de la journée, moyenné sur un an.

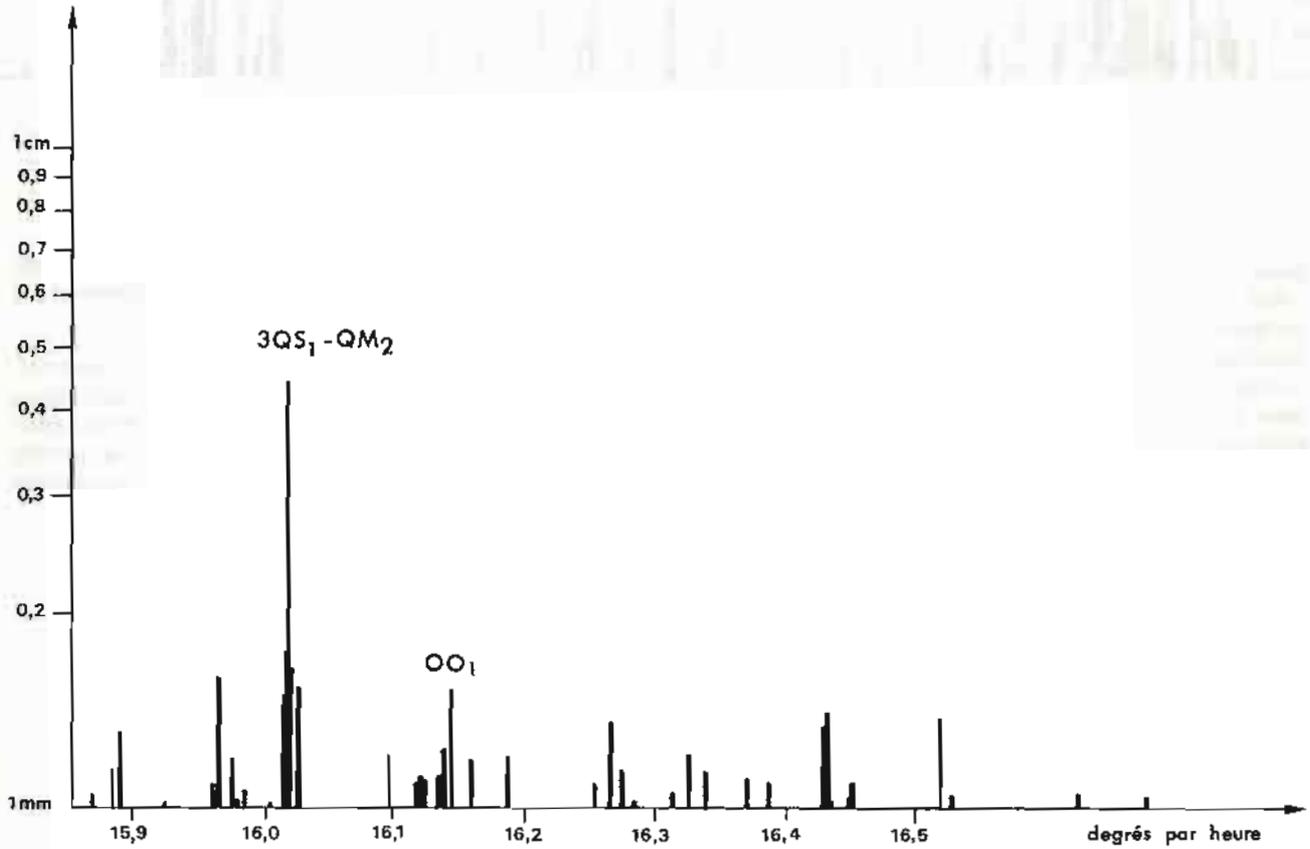


FIG. 14

ANNEXE I

INTRODUCTION DE LA NOTION DE RÉOLUTION DANS LA MESURE D'UNE GRANDEUR

Nous raisonnerons sur des longueurs pour fixer les idées et sur un exemple numérique pour simplifier l'exposé.

1) Mesure parfaite.

Supposons par exemple que nous voulions mesurer une distance de 2,75 cm, mais que nous ne disposions que d'une règle graduée en centimètres.

Il est aisé de pallier cet inconvénient (si l'on a le temps). Il suffit de placer au hasard la règle le long du segment à mesurer et de compter le nombre de graduations entre les deux extrémités de ce segment.

Dans 75 % des cas nous en compterons 3; dans 25 % des cas nous en compterons 2. Sur un nombre d'essais assez grand nous aurons n_1 fois 2 et n_2 fois 3

La moyenne sera égale à $2 + d$ avec

$$d = \frac{n_1 \times 2 + n_2 \times 3}{n_1 + n_2}$$

$$\frac{n_1}{n_1 + n_2} \xrightarrow{n_1 + n_2 \rightarrow \infty} 0,25 \quad \frac{n_2}{n_1 + n_2} \xrightarrow{n_1 + n_2 \rightarrow \infty} 0,75$$

On a bien $2,75 = 2 \times 0,25 + 3 \times 0,75$

On démontre aisément que cette moyenne suit une loi binômiale. Qu'est-ce qui limite la précision ? C'est tout simplement la précision de la règle et la précision avec laquelle est définie le segment à mesurer.

2) Mesure réelle.

Supposons par exemple que nous ne puissions distinguer s'il y a deux graduations ou trois lorsque la graduation litigieuse est située dans une fourchette de 1/10 de millimètre autour d'une extrémité du segment à mesurer.

Nous aurons alors 2 % de cas douteux.

Ceci revient à dire que, si nous faisons n essais, nous trouverons n_1 fois 2, n_2 fois 3 et n_3 cas douteux où nous supposons que nous choisirons 2 ou 3 au hasard.

$n_3 = n'_1 + n'_2$, n'_1 et n'_2 étant le nombre de fois où nous aurions dû trouver respectivement 2 et 3. Ces nombres sont évidemment inconnus.

L'espérance mathématique de la moyenne de nos mesures devient alors :

$$E\left(\frac{2n_1 + 3n_2 + 2,5n_3}{N}\right) \quad N = n_1 + n_2 + n_3$$

Nous pouvons raisonner sur la partie décimale $d = 0,75$ de notre mesure.

$$d = E\left(\frac{n_2 + n'_2}{N}\right) \quad n'_2 \text{ inconnu}$$

L'espérance mathématique de l'erreur commise ϵ est :

$$\begin{aligned} \epsilon &= E\left(\frac{n_2 + 0,5n_3}{N} - d\right) = E\left(\frac{n_2 + 0,5n_3 - n_2 - n'_2}{N}\right) \\ &= E\left(\frac{0,5n_3 - n'_2}{N}\right) \end{aligned}$$

$$\text{Or} \quad 0 < E\left(\frac{n'_2}{N}\right) < 2\%$$

$$E\left(\frac{0,5n_3}{N}\right) = 1\%$$

$$\text{D'où} \quad -0,01 < \epsilon < +0,01$$

Si nous ne tenons pas compte des cas douteux, nous trouverions :

$$E\left(\frac{n_2}{N} - d\right) = E\left(-\frac{n'_2}{N}\right)$$

Nous aurions alors un minorant de la valeur réelle. La méthode consistant à prendre indifféremment 2 ou 3 lorsqu'on a un doute est donc la meilleure. Il revient au même de faire entrer le nombre de cas douteux affecté du coefficient 0,5.

Nous voyons sur cet exemple que l'incertitude sur la moyenne ne dépend pas du nombre d'expériences; sur un nombre d'expériences très grand, on arrivera simplement à montrer que la valeur réelle est comprise entre 2,74 et 2,76, mais qu'elle peut se trouver n'importe où entre ces deux valeurs.

La généralisation à des valeurs quelconques est immédiate.

ANNEXE II

CALCUL DE L'AUTOCOVARIANCE DU BRUIT DE CALAGE EN HEURE

LORSQUE CELUI-CI VARIE LINÉAIREMENT AVEC LE TEMPS SUR CHAQUE MARÉGRAMME

Rappelons que

$$\varphi_{[n,n+1]}(t) = \varphi_n + (t - nZ) \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{Z}$$

Posons

$$\alpha = t - nZ$$

1) $Z < \tau < 2Z$

$$\begin{aligned} C_{\varphi}^{+}(\tau) &= E \left\{ \left[\varphi_n + \alpha \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{Z} \right] \left[\varphi_{n+1} + (\alpha + \tau - Z) \frac{\varphi_{n+2} - \varphi_{n+1}}{Z} \right] \right\} \\ &= E \left\{ \left[\alpha \frac{\varphi_{n+1}^2}{Z} - \alpha \frac{\varphi_{n+1}}{Z} (\alpha + \tau - Z) \frac{\varphi_{n+1}}{Z} \right] \right\} \\ &= \frac{1}{Z} \int_0^{2Z-\tau} \left[\sigma^2 \frac{\alpha}{Z} - \sigma^2 \frac{\alpha(\alpha + \tau - Z)}{Z^2} \right] d\alpha \end{aligned}$$

$$C_{\varphi}^{+}(\tau) = \frac{\sigma^2}{6Z^3} (2Z - \tau)^3 \quad Z < \tau < 2Z$$

On a bien

$$C_{\varphi}^{+}(\tau) = 0 \quad \text{pour} \quad \tau = 2Z$$

$$C_{\varphi}^{+}(Z) = \frac{\sigma^2}{6}$$

$$C_{\varphi}^{+'}(\tau) = -\frac{\sigma^2}{2Z^3} (2Z - \tau)^2 \Rightarrow C_{\varphi}^{+'}(Z) = -\frac{\sigma^2}{2Z}$$

$$C_{\varphi}^{+''}(\tau) = \frac{\sigma^2}{Z^3} (2Z - \tau) \Rightarrow C_{\varphi}^{+''}(Z) = \frac{\sigma^2}{Z^2}$$

2) $0 < \tau < Z$

$$\begin{aligned} C_{\varphi}^{-}(\tau) &= E \left\{ \left[\varphi_n + \alpha \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{Z} \right] \right. \\ &\quad \left. \left[\varphi_n + (\alpha + \tau) \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{Z} \right] \right\} \quad \alpha < Z - \tau \\ &+ E \left\{ \left[\varphi_n + \alpha \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{Z} \right] \right. \\ &\quad \left. \left[\varphi_{n+1} + (\alpha + \tau - Z) \frac{\varphi_{n+2} - \varphi_{n+1}}{Z} \right] \right\} \\ &\quad Z - \tau < \alpha < Z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\varphi}^{-}(\tau) &= \frac{1}{Z} \left\{ (Z - \tau) \sigma^2 - \int_0^{Z-\tau} (\alpha + \tau) \frac{\sigma^2}{Z} d\alpha - \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{Z-\tau} \alpha \frac{\sigma^2}{Z} d\alpha + \int_0^{Z-\tau} \alpha(\alpha + \tau) \frac{2\sigma^2}{Z^2} d\alpha \right\} \quad (I) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{1}{Z} \left\{ \int_{Z-\tau}^Z \sigma^2 \frac{\alpha}{Z} d\alpha - \right. \\ &\quad \left. - \int_{Z-\tau}^Z \frac{\alpha(\alpha + \tau - Z)}{Z^2} \sigma^2 d\alpha \right\} \quad (II) \end{aligned}$$

$$(II) = \frac{\sigma^2}{Z} \left[\frac{\alpha^2}{2Z} \Big|_{Z-\tau}^Z - \frac{\alpha^3}{3Z^2} \Big|_{Z-\tau}^Z - (\tau - Z) \frac{\alpha^2}{2Z^2} \Big|_{Z-\tau}^Z \right]$$

$$= \frac{\tau \sigma^2}{6Z^3} (6Z^2 - 6\tau Z + \tau^2)$$

$$(I) = \frac{\sigma^2}{Z} \left[(Z - \tau) - \frac{1}{Z} \frac{(\alpha + \tau)^2}{2} \Big|_0^{Z-\tau} - \frac{1}{Z} \frac{\alpha^2}{2} \Big|_0^{Z-\tau} + \frac{2}{Z^3} \frac{\alpha^3}{3} \Big|_0^{Z-\tau} + \frac{2}{Z^2} \tau \frac{\alpha^2}{2} \Big|_0^{Z-\tau} \right]$$

$$= \frac{\sigma^2}{3Z^3} (Z - \tau)^2 (2Z + \tau)$$

d'où

$$\begin{aligned} C_{\varphi}^{-}(\tau) &= \frac{\sigma^2}{3Z^3} (Z - \tau)^2 (2Z + \tau) + \\ &\quad + \frac{\tau \sigma^2}{6Z^3} (6Z^2 - 6\tau Z + \tau^2) \end{aligned}$$

$$C_{\varphi}^{-}(\tau) = \frac{\sigma^2}{6Z^3} [4Z^3 - 6\tau^2 Z + 3\tau^3] \quad 0 < \tau < Z$$

$$C_{\varphi}^{-}(0) = \frac{2}{3} \sigma^2 \quad ; \quad C_{\varphi}^{-}(Z) = \frac{\sigma^2}{6}$$

La fonction $C_\varphi(\tau)$ est continue au point $\tau = Z$

$$C_\varphi^{\prime-}(\tau) = \frac{\sigma^2}{6Z^3} [-12\tau Z + 9\tau^2] = \\ = \frac{\sigma^2}{2Z^3} \tau(3\tau - 4Z)$$

$$C_\varphi^{\prime-}(Z) = -\frac{\sigma^2}{2Z}$$

La dérivée première de $C_\varphi(\tau)$ est continue au point $\tau = Z$

$$C_\varphi^{\prime\prime-}(\tau) = \frac{\sigma^2}{2Z^3} (6\tau - 4Z)$$

$$C_\varphi^{\prime\prime-}(\tau) = \frac{\sigma^2}{Z^2}$$

La dérivée seconde de $C_\varphi(\tau)$ est également continue au point $\tau = Z$

$$C_\varphi^{\prime\prime-}(\tau) \text{ s'annule pour } \tau = 2/3(Z)$$

Il y aura un point d'inflexion pour cette valeur.

$$C_\varphi(2/3 Z) = \frac{10}{27} \sigma^2 \quad ; \quad C_\varphi'(2/3 Z) = -\frac{2}{3} \sigma^2$$

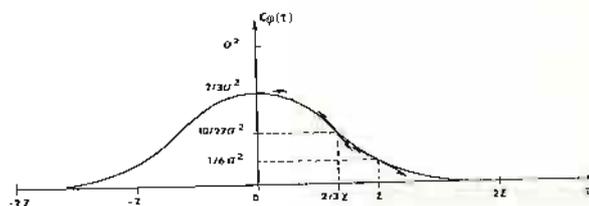


FIG. 15. — Autocovariance d'un bruit de calage en heure variant linéairement sur chaque marégramme.

On peut maintenant construire la courbe représentative de C_φ (fig. 15).

On peut également représenter $C_\varphi(\tau)$ comme somme de deux fonctions :

1) Une fonction définie sur $[0, 2Z]$ et nulle en dehors :

$$C_{1\varphi}(\tau) = \frac{\sigma^2}{6Z^3} (2Z - \tau)^3 \quad \tau \leq 2Z$$

$$C_{1\varphi}(\tau) = 0 \quad \tau > 2Z$$

2) Une fonction définie sur $[0, Z]$ et nulle en dehors :

$$C_{2\varphi}(\tau) = \frac{2}{3} \frac{\sigma^2}{Z^3} (\tau - Z)^3 \quad \tau \leq Z$$

$$C_{2\varphi}(\tau) = 0 \quad \tau > Z$$

ANNEXE III

SIGLES EMPLOYÉS

T.F.	Transformée de FOURIER
S.F.	Série de FOURIER
S.F.G.	Série de FOURIER généralisée
V.A.	Variable aléatoire
S.P.	Spectre de puissance

NOTATIONS

$M(t)$	Fonction du temps
$M^*(\nu)$	Transformée de FOURIER de $M(t)$; la fréquence est ν
M_k	Coefficients de la série de FOURIER
$\tilde{M}(\nu)$	T.F. de la fonction échantillonnée

$\hat{M}(\nu)$	Estimateur de la T.F. de la fonction (échantillonnée)
$M_F(\nu)$	S.F.G. de la fonction $M(t)$
$\hat{M}_F(\nu)$	Estimateur de $M_F(\nu)$
$M_S^2(\nu)$	S.P. de $M(t)$
$\hat{M}_S^2(\nu)$	Estimateur de $M_S^2(\nu)$
$\tilde{M}_F(\nu)$	Valeur estimée de $M_F(\nu)$ sur une réalisation de $M(t)$
\otimes	Symbole du produit de convolution
$\overline{M^*(\nu)}$	Conjugué de $M^*(\nu)$
Δ	Pas d'échantillonnage

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JENKINS G.M., WATTS D.G. — Spectral analysis and its applications. (Holden Day éditeur).
 [2] DEMERLIAC A. — Séparation des différentes familles

d'ondes de mer. Application au calcul des constantes harmoniques (à paraître dans les Annales Hydrographiques).

ANALYSE ET PRÉDICTION DE LA MARÉE

APPLICATION AUX MARÉES DU HAVRE ET DE BREST

par

MM. Yves DESNOËS, Ingénieur de l'Armement (hydrographe)
et Bernard SIMON, Ingénieur Civil sous contrat (*)

RÉSUMÉ

La méthode décrite ne peut se résumer en un simple programme de calcul; elle consiste en une suite d'opérations nécessitant chacune le jugement d'un spécialiste.

Une prédiction faite à l'aide de constantes approchées permet tout d'abord la détection des erreurs d'observation les plus grossières, ainsi que l'élimination presque totale des erreurs de calage en temps des marégrammes. Il est ensuite indispensable de se pencher sur les spectres et d'essayer d'en interpréter toutes les particularités avant d'effectuer l'analyse finale dont les résultats peuvent conduire à modifier certaines hypothèses et éventuellement à reprendre tout le processus.

L'application de cette méthode au Havre et à Brest a permis de préciser la détermination de certaines ondes de faible amplitude; la précision de la prédiction pour le Havre peut être notablement améliorée par la prise en compte de ces ondes.

INTRODUCTION

Nous présentons ci-dessous une méthode d'analyse harmonique de la marée qui permet d'atteindre une bonne précision dans la détermination des ondes de faible amplitude; cette amélioration est principalement obtenue par une élimination partielle du bruit dû au mauvais calage en heure des observations.

De plus, l'application de la méthode dite « des hauteurs réduites » (cf. ref. [1]) permet d'accélérer le calcul tout en traitant des périodes d'observation

de longue durée (jusqu'à 19 ans sur un ordinateur IBM 360-30 de 64 K de mémoire).

Nous avons utilisé le développement du potentiel générateur de Doodson (cf. réf. [2]) en tenant compte des ondes d'interaction les plus probables.

Les observations doivent être sous forme de hauteurs horaires.

On aura en général intérêt à filtrer les basses fréquences, ce qui facilitera la détection d'erreurs sur les hauteurs par comparaison avec une prédiction approchée. Il serait alors absurde de chercher à déterminer les composantes à longue période.

Les différentes étapes de la chaîne de traitement sont décrites l'une après l'autre dans l'ordre chronologique.

(*) Manuscrit reçu en septembre 1976.

CHAPITRE I

ANALYSE

La première analyse permet une prédiction servant à la détection des erreurs grossières et au recalage en temps des observations si les erreurs trouvées ne sont pas trop nombreuses ; si l'on possède déjà des constantes convenables pour le point considéré, on peut passer directement à l'étape suivante (cf. Chapitre II).

1.1. Analyse journalière.

On sait que la marée est la somme d'un certain nombre d'ondes dont les vitesses angulaires en degrés par heure sont voisines de $15k$ où $k = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8$.

Définition. — Nous dirons qu'une onde appartient à la famille k si sa vitesse angulaire est voisine de $15k$ degrés par heure. (Ces familles sont aussi appelées groupes).

Soit $\mathcal{H}(t)$ la hauteur d'eau à l'instant t :

$$\mathcal{H}(t) = \frac{1}{2} [H(t) + \bar{H}(t)]$$

avec

$$H(t) = \sum_k \sum_i h_{ik} e^{2jn \frac{Q_{ik}}{360} t} \quad (j^2 = -1)$$

$$\bar{H}(t) \text{ conjugué de } H(t)$$

$$h_{ik} = r_{ik} e^{-j\varphi_{ik}}$$

où

r_{ik} est le rayon de l'onde i de la famille k et φ_{ik} sa phase (en radians) à l'instant $t = 0$

Q_{ik} est sa vitesse angulaire en °/heure :

$$Q_{ik} = 15k + \epsilon_{ik}$$

Pour alléger l'écriture, nous prendrons le jour comme unité de temps :

$$T = \frac{t}{24} = \text{instant de l'observation compté en jours}$$

$$v_{ik} = \frac{\epsilon_{ik}}{15} = \text{écart de fréquence en cycle par jour}$$

$H(T)$ peut alors s'écrire :

$$H(T) = \sum_k e^{2j\pi k T} \sum_i h_{ik} e^{2j\pi v_{ik} T}$$

v_{ik} étant petit, la quantité $C_{ik}(T) = e^{2j\pi v_{ik} T} \times h_{ik}$ varie lentement avec T .

On suppose (*) que cette quantité peut être assimilée à un polynôme du second degré pendant une période de 2 jours.

Soit τ un temps que l'on considère pour l'instant comme arbitraire, compris entre $T - \frac{1}{2}$ et $T + \frac{1}{2}$.

θ est défini par :

$$T = \tau + \theta$$

On cherche un développement de $C_{ik}(T)$ au voisinage de l'instant τ :

$$\begin{aligned} h_{ik} e^{2j\pi v_{ik} T} &= h_{ik} e^{2j\pi v_{ik} (\tau + \theta)} = \\ &= e^{2j\pi v_{ik} \tau} (h_{ik} + \alpha_{ik} \theta + \beta_{ik} \theta^2) \end{aligned}$$

d'où

$$\left\{ \begin{aligned} H(T-1) &= \sum_k e^{2j\pi k T} \sum_i e^{2j\pi v_{ik} \tau} \\ &\quad [h_{ik} + \alpha_{ik} (\theta - 1) + \beta_{ik} (\theta - 1)^2] \\ H(T) &= \sum_k e^{2j\pi k T} \sum_i e^{2j\pi v_{ik} \tau} \\ &\quad [h_{ik} + \alpha_{ik} \theta + \beta_{ik} \theta^2] \\ H(T+1) &= \sum_k e^{2j\pi k T} \sum_i e^{2j\pi v_{ik} \tau} \\ &\quad [h_{ik} + \alpha_{ik} (\theta + 1) + \beta_{ik} (\theta + 1)^2] \end{aligned} \right.$$

Posons

$$R(\tau, T) = \sum_k e^{2j\pi k T} \sum_i h_{ik} e^{2j\pi v_{ik} \tau}$$

$$P(\tau, T) = \sum_k e^{2j\pi k T} \sum_i \alpha_{ik} e^{2j\pi v_{ik} \tau}$$

$$S(\tau, T) = \sum_k e^{2j\pi k T} \sum_i \beta_{ik} e^{2j\pi v_{ik} \tau}$$

(*) La validité de cette approximation a été vérifiée pour toutes les ondes composant la marée.

Notons que, pour la fréquence nulle (donc $k = 0$ et $m = 0$), $J_k = 2 h_{00}$.

Le niveau moyen obtenu devra donc être divisé par deux (h_{00} est le niveau moyen).

La méthode de calcul utilisée est l'algorithme de Cooley-Tukey (« Fast Fourier Transform » ou F.F.T.) qui fournit $N = 2^l$ valeur de F_m aux fréquences

$$0, \frac{1}{Z}, \dots, \frac{m}{Z}, \dots, \frac{N-1}{Z}$$

La fréquence de Nyquist étant égale à $N/2Z$, les coefficients F_m pour $m > N/2$ correspondent aux fréquences inférieures à la fréquence de stroboscopie (c'est-à-dire une fréquence inférieure à 0, 15"/h, 30"/h, etc.).

1.3. Calcul des constantes harmoniques.

Nous avons établi que

$$F_m = \sum_i A_{im} h_i$$

avec

$$A_{im} = e^{j\pi \frac{N-1}{N} (\nu_i Z - m)} \frac{\sin \pi (Z \nu_i - m)}{N \sin \frac{\pi}{N} (Z \nu_i - m)}$$

où F_m est la transformée de Fourier d'ordre m de $C_k(\tau)$.

N valeurs de F_m ont été calculées. Les h_i sont les inconnues du problème.

Soit l le nombre d'ondes recherchées de fréquences ν_m de la famille k ; on dispose de N équations à l inconnues. Plusieurs solutions à ce problème peuvent être envisagées. Celle qui a été retenue semble la moins coûteuse en temps de calcul.

Soit l la valeur de m telle que

$$-1/2 < Z \nu_n - l < +1/2$$

Le critère de séparation est choisi de telle manière que pour l donné, il n'y ait pas plus d'une onde vérifiant cette double inégalité : il suffit pour cela, que la différence des fréquences de deux ondes recherchées soit supérieure à $1/Z$

$$F_l = \sum_i A_{il} h_i$$

La contribution de l'onde de fréquence ν_n à la valeur de F_l est prépondérante, les autres ondes ayant une contribution d'autant plus faible que $|Z \nu_i - l|$ est grand.

Si le nombre de composantes recherchées dans un même groupe est trop important, compte tenu de la taille de l'ordinateur, il est possible de décomposer ce groupe en sous-groupes, à condition que les résidus dans un sous-groupe des autres sous-

groupes puissent être considérés comme négligeables.

Si l' est le nombre de composantes recherchées dans un sous-groupe, on forme le système de l' équation (l' valeur de l) à l' inconnue

$$F_l = \sum_{i=1}^{l'} A_{il} h_i$$

dont la résolution fournit les valeurs (complexes) de h_i recherchées.

Le calcul est effectué dans trois programmes successifs dont les notices et les listages sont donnés en annexe I.

1.4. Emploi des termes f et u .

On utilise habituellement des développements du potentiel sous la forme :

$$\mathcal{F} = \sum_A f_A \mathcal{F}_A \cos(V_A + u_A - G_A) \quad (\text{cf. réf. [3]})$$

avec :

$$V_A = \omega_A t + V_{0A}$$

les termes u_A et f_A sont fonctions périodiques de \mathcal{N} (longitude du nœud ascendant lunaire), p (longitude du périégée lunaire) et p_1 (longitude du périégée solaire) ; la plupart sont uniquement fonction de \mathcal{N} . Il en découle que le développement de \mathcal{F} en série de Fourier peut être poussé plus loin, c'est-à-dire en termes rigoureusement périodiques (aux variations séculaires près), de pulsations égales à :

$$\omega_A + x \mathcal{X} + y p + z p_1 \quad x, y, z$$

étant des entiers à calculer. Ces termes peuvent être interprétés comme des perturbations de l'onde A.

On obtient alors le développement de Doodson (aux approximations près).

L'emploi des termes f et u est quand même indispensable lorsque ces ondes perturbatrices ne sont pas séparées sur la période d'observation.

Il nous a semblé beaucoup simple, et d'emploi plus souple, de les calculer à partir du développement de Doodson ; nous avons vérifié que les f et u ainsi calculés étaient pratiquement égaux à ceux donnés par Schureman (cf. réf [3]).

1.5. Procédé de calcul des termes f et u .

Soit une onde A non séparée des ondes perturbatrices a_j ; dans le programme j est au plus égal à 2, valeur suffisante dans la pratique.

L'analyse donne pour l'onde de pulsation ω_A une valeur

$$h_A = f_A r_A e^{iV_{0A}} e^{iu_A} e^{-iG_A} \quad (i^2 = -1)$$

où r_A est le rayon de l'onde A et V_{0A} sa phase au début de la période d'observation.

Posons :

$$H'_A = f_A r_A e^{iu_A} e^{-iG_A}$$

$$H_A = r_A e^{-iG_A}$$

On peut écrire :

$$h_A = H'_A e^{iV_{0A}} = H_A e^{iV_{0A}} + \sum_j H_{aj}^* e^{iV_{0aj}} =$$

$$= f_A H_A e^{iV_{0A}} e^{iu_A}$$

où H_{aj}^* est la valeur moyenne de $H_{aj} e^{i\omega_{aj}t}$ sur la période d'observation.

$$H_{aj}^* = H_{aj} e^{i \frac{N-1}{2N} \Delta\omega Z} \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \Delta\omega Z\right)}{N \sin\left(\frac{1}{2N} \Delta\omega Z\right)}$$

avec $\Delta\omega = \omega_{aj} - \omega_A$

$$\text{Donc } f_A e^{iu_A} = 1 + \frac{\sum H_{aj}^* e^{iV_{0aj}}}{H_A e^{iV_{0A}}}$$

On a admis que l'onde A et les ondes voisines a_j ont même situation G_A :

$$H_{aj} = r_{aj} e^{-iG_A}$$

Le développement de Doodson supprime u et f et le potentiel s'écrit

$$\mathfrak{F} = \sum_A \left[\mathfrak{F}_A \cos(V_A - G_A) + \sum_j \mathfrak{F}_{aj} \cos(V_{aj} - G_A) \right]$$

On a admis que

$$\frac{r_{aj}}{r_A} = \frac{\mathfrak{F}_{aj}}{\mathfrak{F}_A}$$

Ce qui permet d'écrire

$$f_A e^{iu_A} = 1 + \frac{\sum \mathfrak{F}_{aj}^* e^{iV_{0aj}}}{\mathfrak{F}_A e^{iV_{0A}}}$$

d'où l'on déduit immédiatement f_A et u_A (\mathfrak{F}_{aj}^* est la valeur moyenne de $\mathfrak{F}_{aj} \cos \omega_{aj} t$).

Remarque. — Ce procédé est rigoureux, donc préférable à la méthode habituelle consistant à prendre f et u du milieu de la période d'observation.

CHAPITRE II

CORRECTION DES ERREURS SUR LES OBSERVATIONS

Nous allons maintenant employer une prédiction utilisant les constantes approchées (cf. Chapitre I ci-dessus) pour détecter et essayer de corriger les principales erreurs entachant les observations ; on aura bien sûr toujours intérêt à se reporter aux observations brutes, c'est-à-dire le plus souvent à des marégrammes.

II.1. Comparaison des hauteurs observées et prédites.

Dans cette phase, nous calculons heure par heure la différence (hauteur prédite - hauteur observée), puis la moyenne quadratique journalière de cette différence, puis la moyenne quadratique sur la période d'observation. De plus, un test permet de détecter les différences supérieures à une valeur arbitraire (que nous avons choisie égale à 80 cm).

Remarque. — Cette méthode permet également d'estimer la valeur d'une prédiction, et donc de comparer différentes méthodes de prédiction.

Certaines erreurs dont la cause est évidente peuvent dès maintenant être corrigées.

II.2. Contrôle graphique des erreurs.

Un tracé automatique sur une même planche de l'observation et de la prédiction jour par jour facilite l'interprétation des erreurs détectées en II.1. qui peuvent alors être corrigées. Il peut être ensuite nécessaire de refaire une analyse approchée.

II.3. Elimination partielle des erreurs de calage en temps des marégrammes.

Si l'on trace maintenant un spectre (S.F.G. en réf. [4]) de la marée, on observera la plupart du

temps un niveau de bruit relativement élevé au voisinage des ondes les plus importantes, en particulier M_2 . Ce bruit peut en général être attribué aux mauvais calages en temps des marégrammes (cf. réf. [4]).

Une estimation de l'erreur de calage peut être faite pour chaque journée par la différence $\phi(\tau)$ des phases des complexes $C_2(\tau)$ et $C'_2(\tau)$ calculés respectivement sur la prédiction approchée et l'observation. En effet, la phase de $C_2(\tau)$ est principalement déterminée par les phases des ondes les plus importantes (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , etc.), phases qui sont relativement bien estimées ; car la précision de la détermination de la phase d'une onde, à bruit constant, est inversement proportionnelle à son amplitude.

Dans la pratique nous avons calculé $\Phi(\tau)$ chaque jour à midi moyen ; les hauteurs observées ont alors été corrigées par interpolation parabolique, $\Phi(\tau + h)$, étant estimée par interpolation linéaire entre $\Phi(\tau)$ et $\Phi(\tau + 1)$; $0 \leq h \leq 1$.

Il est intéressant de calculer la moyenne simple et la moyenne quadratique des écarts $\Phi(\tau)$ sur la période d'observation : ces éléments permettent d'apprécier la précision du calage en heure des observations, et par conséquent la précision de la détermination des phases des ondes principales.

II.4. Contrôle.

Il est souhaitable de contrôler le recalage effectué en appliquant la méthode II.1. aux hauteurs recalées et prédites.

CHAPITRE III

TRAITEMENT FINAL

A. TRACÉ DU SPECTRE

INTERPRÉTATION

Ce tracé est destiné à repérer les ondes à rechercher. Les ondes principales étant évidemment recherchées et pouvant gêner la détection d'ondes plus petites, on tracera le spectre de la marée observée à laquelle on aura retranché la marée prédite approchée.

1. Définition du spectre.

La représentation la plus significative de la marée dans le domaine des fréquences est, à condition de supposer le phénomène parfaitement périodique sur la période d'observation, la série de Fourier. Si le signal est presque périodique ou si la période d'observation n'est pas au moins égale à une période complète du phénomène, le développement en série de Fourier ne peut être rigoureusement atteint. Il n'en reste pas moins que la transformée de Fourier et le spectre de puissance sont toujours mal adaptés, puisqu'ils conduisent à des valeurs dépendant de la période d'observation. On est donc amené à définir une série de Fourier généralisée qui est le quotient de la transformée de Fourier par la période d'observation (cf. réf. [4]). C'est cette dernière représentation que nous avons adoptée, seuls les modules étant considérés.

2. Calcul et tracé du spectre.

Il est calculé à l'aide de l'algorithme F.F.T. utilisé au chapitre I (§ 2). Le calcul doit être effectué, non seulement pour les valeurs de fréquence multiples de $1/Z$, mais pour les fréquences intermédiaires ; dans la pratique on constate qu'il suffit de partager l'intervalle $1/Z$ en 5 et donc de calculer quatre spectres supplémentaires.

A cet effet, on multiplie les $C_k(\tau)$ par

$$e^{2\pi j \frac{\lambda \tau}{5Z}}$$

(λ entier variant de 1 à 4), et on applique l'algorithme F.F.T. aux séries ainsi obtenues. Les spectres successifs sont tracés sur la même planche, chaque spectre étant décalé par rapport au précédent d'un intervalle de fréquence égale à $1/5Z$.

3. Interprétation.

Il est impossible d'être exhaustif sur ce sujet. Chaque analyse doit être considérée comme un cas particulier, et le spectre des observations correspondantes examiné avec attention.

Les spectres tracés après élimination partielle de l'erreur de calage en heure des marégrammes présentent un niveau de bruit notablement réduit (inférieur à 3 mm en général). Si l'on ne dispose pas de dix neuf années d'observations, il faut alors faire des hypothèses sur l'origine astronomique des pics observés ; la connaissance a priori de certaines ondes (de module en général supérieur à quelques centimètres) permet assez souvent de trouver les fréquences les plus vraisemblables pour ces pics.

Il n'y a pas de méthode parfaite pour effectuer cette recherche ; on est le plus souvent amené à chercher des lois empiriques, permettant soit de déduire des ondes directement du potentiel, soit d'estimer les interactions entre les ondes d'origine purement astronomique.

B. ANALYSE

Lorsque l'interprétation est considérée comme satisfaisante, on peut effectuer l'analyse par la méthode exposée au chapitre I sur la marée recalée, et, éventuellement, recorrectée après le dernier contrôle (cf. § II.4.).

CHAPITRE IV

APPLICATION A LA MARÉE DU HAVRE

L'analyse a été effectuée sur les années 1963 et 1964. Une évaluation de la prédiction faite à l'aide des constantes harmoniques ainsi obtenues a été faite sur l'année 1938.

1. Analyse et prédiction approchées.

A ce stade on a tracé un spectre des observations brutes auxquelles a été retranchée une prédiction

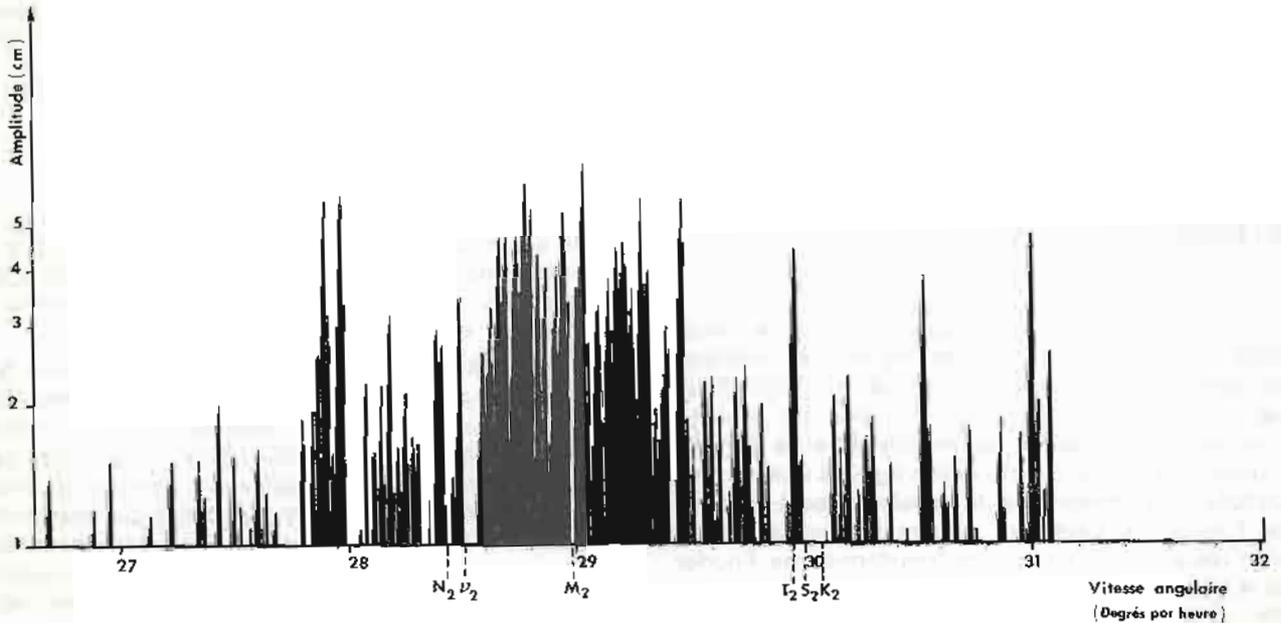


FIG. 1. — Spectre avant recalage.

approchée faite à l'aide des principales constantes obtenues. Ce tracé n'est pas inclus dans la chaîne-type de calcul, mais a servi à sa mise au point, et montre bien l'effet des diverses corrections appliquées. Le spectre du groupe semi-diurne est présenté sur la figure 1. On remarque un niveau de bruit supérieur à 4 cm au voisinage de M_2 .

Une autre prédiction, comportant plus d'ondes que la précédente a été alors effectuée ; la première prédiction approchée n'a pas été incluse dans la chaîne-type de traitement.

2. Correction des erreurs sur les observations.

a. Comparaison des hauteurs observées et prédites.

Les observations se sont avérées de fort mauvaise qualité. Un exemple des erreurs observées est donné sur le tableau II a, sous forme d'extrait du listage

obtenu. On y remarque un exemple type de marégramme mal calé en heure. L'écart quadratique moyen sur les deux années était de 26 cm.

b. Le contrôle graphique n'a apporté aucun élément particulier.

3. Elimination partielle des erreurs de calage.

Un exemple des décalages observés est donné sur la figure III sous forme d'un graphique donnant les décalages en fonction du temps exprimé en jours. On remarque pour la période correspondant à celle du listage du tableau II b, des décalages variant linéairement avec le temps et atteignant 55 minutes.

La comparaison des hauteurs recalées et prédites a donné un écart quadratique moyen de 14,5 cm, à

Tableau II a
Ecart horaire en cm.

0 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h	18 h	19 h	20	21 h	22 h	23 h
9	39	48	36	15	23	6	-25	-82	-49	5	-3	-6	32	59	52	28	25	21	14	-61	-64	4	11
-10	20	55	58	40	27	27	-7	-72	-104	-30	9	-16	9	57	69	50	24	27	5	-34	-96	-55	-4
-9	-6	36	59	62	33	30	24	-15	-76	-84	-8	9	-7	14	48	76	52	29	27	-4	-55	-94	-44
-2	-18	-16	18	43	41	19	7	-12	-58	-123	-99	-38	-32	-35	-8	25	47	27	9	-10	-37	-88	-97
-41	-16	-22	-11	24	46	42	21	3	-20	-64	-100	-68	-36	-33	-28	-8	21	42	31	6	-18	-50	-90
-90	-46	-29	-25	-17	2	33	37	13	-9	-37	-69	-99	-92	-50	-24	7	18	61	79	62	17	-27	-77
-127	-121	-72	-27	-3	12	49	84	84	50	1	-41	-89	-128	-117	-72	-31	-13	8	48	79	73	41	-1
-41	-80	-108	-85	-41	-12	-1	25	61	80	70	36	0	-32	-81	-113	-86	-37	-12	5	36	70	82	61
27	-5	-52	-106	-111	-58	-37	-22	7	48	76	71	44	12	-36	-84	-127	-107	-60	-31	-10	27	64	81
65	39	6	-50	-106	-110	-61	-25	-8	19	68	101	91	62	35	-19	-70	-114	-80	-35	-9	19	50	83
95	71	48	4	-55	-101	-86	-37	-10	6	40	81	95	82	60	33	-23	-76	-102	-65	-18	4	31	66
86	84	69	46	-6	-63	-105	-70	-16	3	19	56	86	93	74	54	15	-51	-103	-99	-42	-6	6	38
70	77	71	52	33	-31	-83	-108	-48	-2	1	21	59	80	71	54	45	-11	-60	-98	-73	-20	-9	3
40	60	63	44	31	7	-39	-74	-72	-13	9	8	34	62	68	51	32	16	-23	-55	-84	-35	3	0

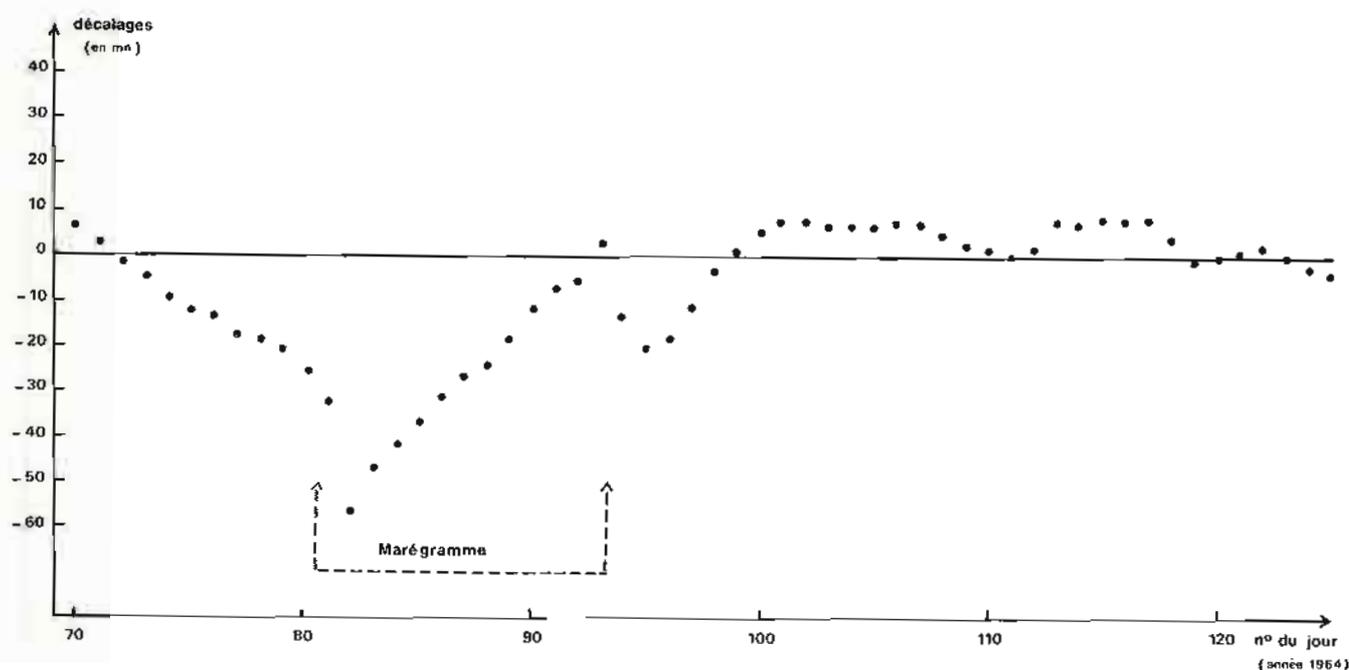


FIG. III. — Exemple de décalages en temps observés.

comparer aux 26 cm trouvés précédemment. Un exemple du listage obtenu est donné sur le tableau IV pour la même période que l'exemple du tableau II b.

4. Spectres.

Les spectres des ondes semi-diurnes, quart-diurnes et sixième-diurnes sont présentés respectivement sur les figures V, VI et VII.

La comparaison des figures I et V met clairement en évidence l'abaissement du niveau de bruit obtenu par le recatage en heure (il faut bien noter que le spectre de la figure I n'est tracé que lorsque les valeurs dépassent 1 cm, tandis que celui de la figure V est tracé pour toutes les valeurs dépassant 3 mm).

On remarque que plusieurs ondes non recherchées habituellement et qui étaient auparavant plus ou moins noyées dans le bruit, apparaissent nettement, par exemple SKM_2 , $M_{\nu 4}$, MT_1 , $2NM_6$, $2M_{\nu 6}$, $3MSN_6$.

Tableau II b

Comparaison de hauteurs observées et prédites
avant recalage.

Année	N° du jour	Ecart quadratique moyen journalier
64	60	25.0
64	61	15.6
64	62	15.3
64	63	18.7
64	64	16.6
64	65	21.4
64	66	26.8
64	67	29.3
64	68	32.3
64	69	21.3
64	70	16.9
64	71	10.6
64	72	14.4
64	73	10.2
64	74	22.7
64	75	33.2
64	76	37.1
64	77	46.8
64	78	46.1
64	79	49.7
64	80	42.8
64	81	51.3
64	82	70.0
64	83	61.8
64	84	64.4
64	85	64.6
64	86	62.5
64	87	63.4
64	88	58.1
64	89	45.6
64	90	29.8
64	91	18.9
64	92	18.4
64	93	26.7
64	94	32.9
64	95	30.0
64	96	27.5
64	97	19.6
64	98	19.3
64	99	25.3
64	100	21.8
64	101	21.1
64	102	22.3
64	103	18.1
64	104	16.4
64	105	16.8
64	106	18.1
64	107	17.3

Tableau IV

Comparaison de hauteurs observées et prédites
après recalage.
(même période que tableau II b).

Année	N° du jour	Ecart quadratique moyen journalier
64	60	8.5
64	61	6.6
64	62	6.4
64	63	8.5
64	64	7.9
64	65	9.3
64	66	7.2
64	67	9.0
64	68	9.3
64	69	7.9
64	70	12.1
64	71	8.9
64	72	10.7
64	73	7.8
64	74	5.1
64	75	12.2
64	76	10.6
64	77	12.7
64	78	13.2
64	79	12.1
64	80	10.8
64	81	13.2
64	82	14.0
64	83	7.5
64	84	9.0
64	85	12.9
64	86	15.9
64	87	9.9
64	88	8.6
64	89	8.5
64	90	8.5
64	91	7.8
64	92	9.4
64	93	19.9
64	94	14.7
64	95	8.5
64	96	7.7
64	97	7.7
64	98	9.4
64	99	11.3
64	100	10.0
64	101	6.7
64	102	7.7
64	103	7.7
64	104	7.1
64	105	8.1
64	106	9.5
64	107	11.6
64	108	9.1

5. Analyse, résultats.

L'analyse a été faite sur les années 1963 et 1964 séparément selon les hypothèses sur les vitesses angulaires des ondes faites d'après les spectres (cf. III-3) ; certains choix des fréquences ont été repris au vu des résultats, les constantes obtenues

étant instables si les vitesses angulaires sont mal choisies. On a ensuite fait l'analyse de 1938, ce qui a conduit à modifier encore quelques hypothèses.

On a enfin effectué l'analyse de 1963 et 1964 ensemble et considéré les constantes ainsi obtenues comme provisoirement adoptées.

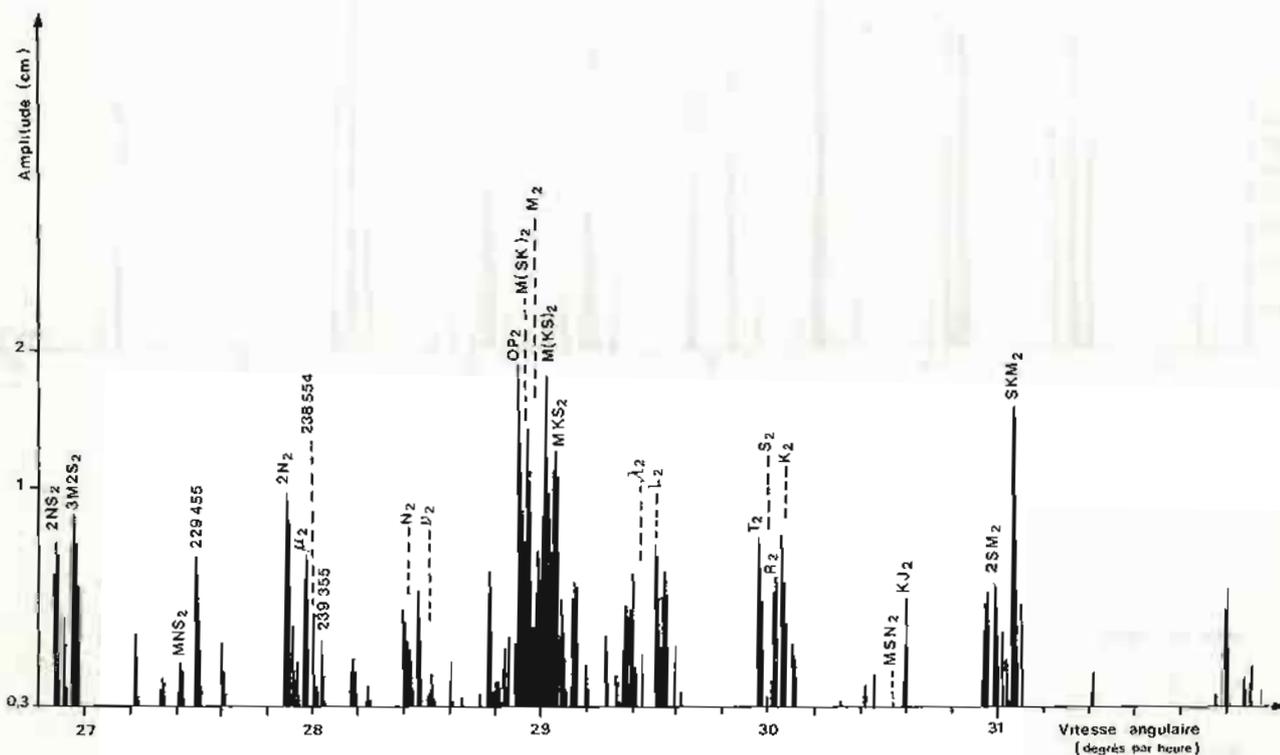


FIG. V. — Spectre après recalage.

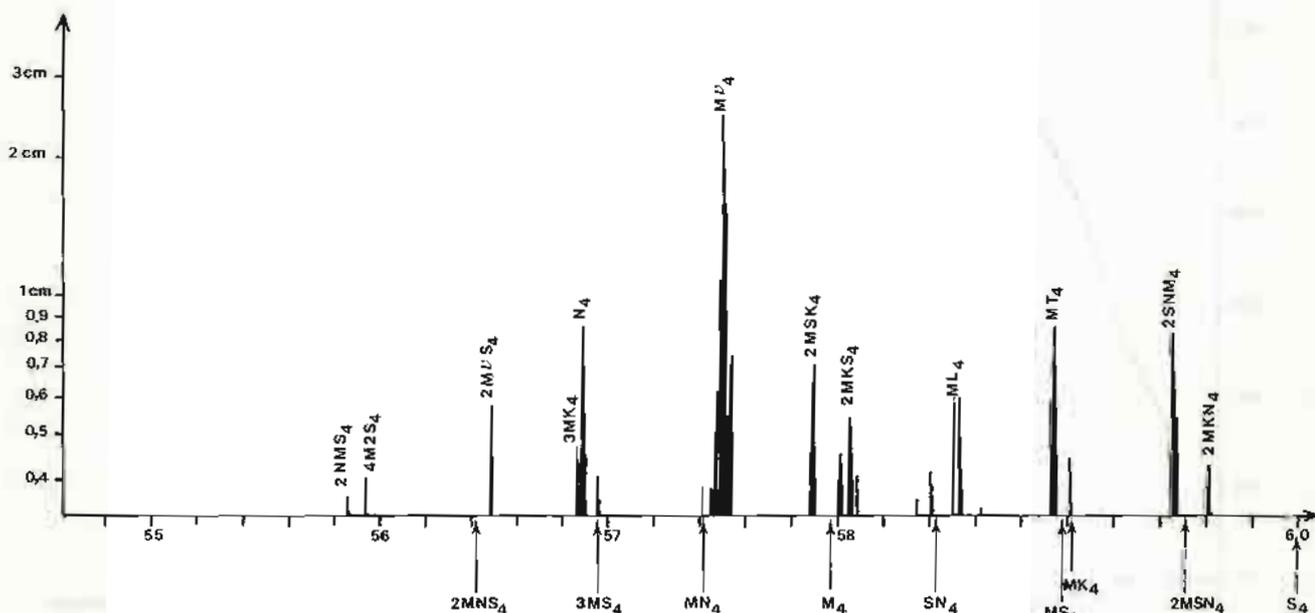


FIG. VI. — Groupe quart-diurne.

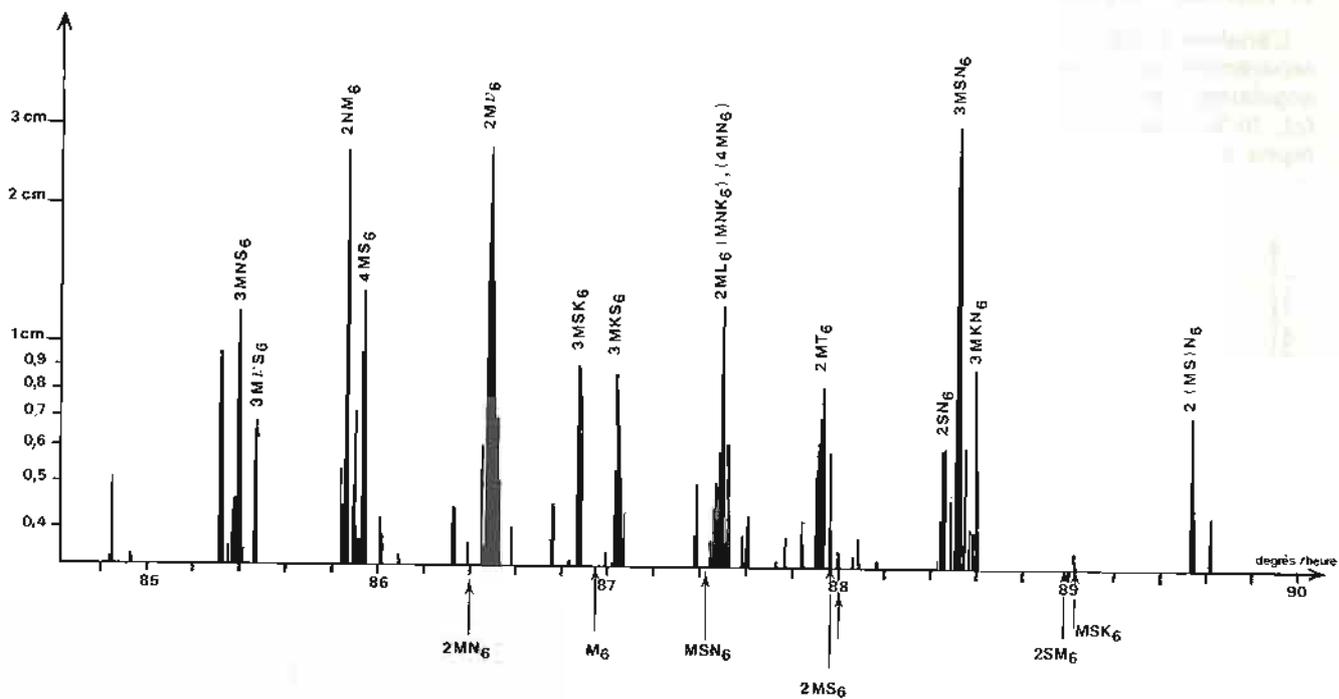


FIG. VII. — Groupe sixième-diurne.

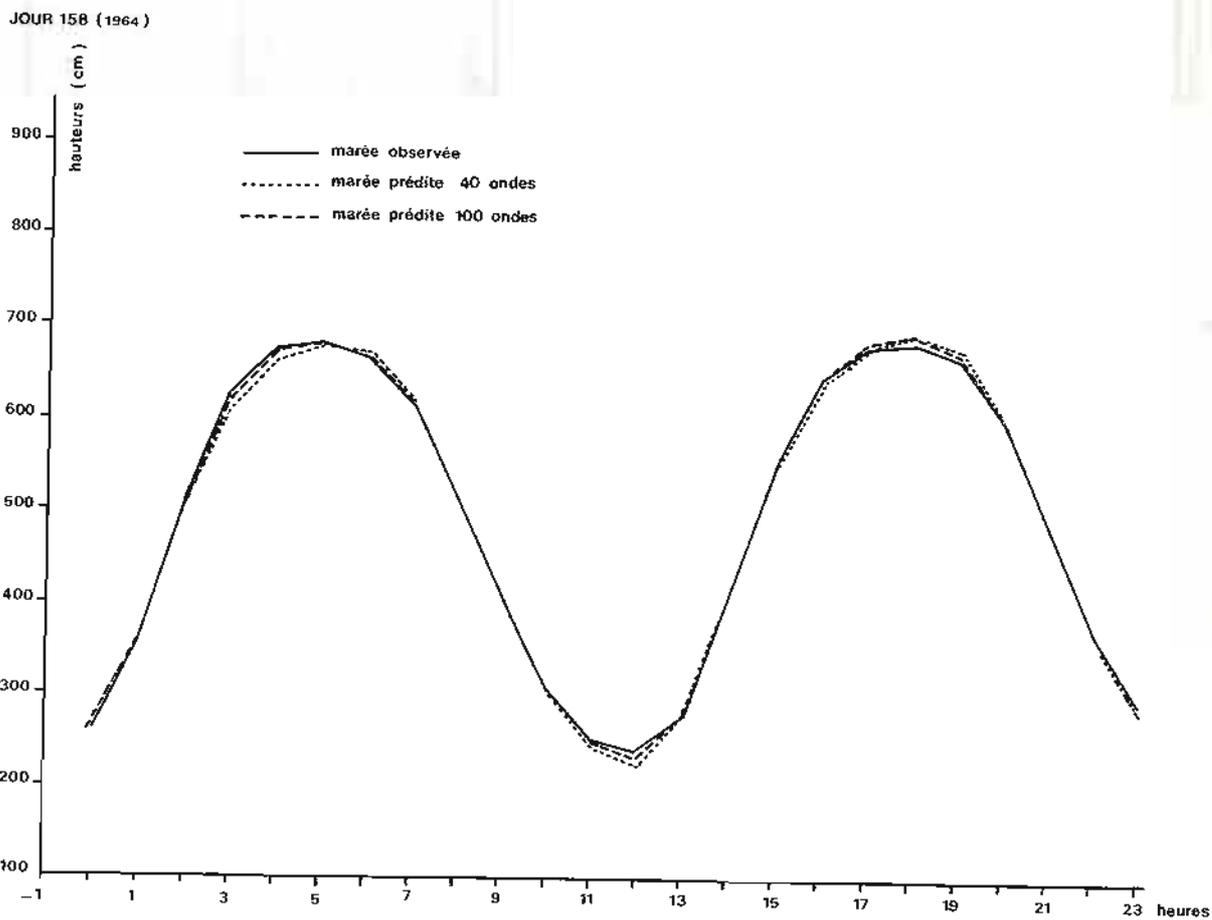


FIG. IX

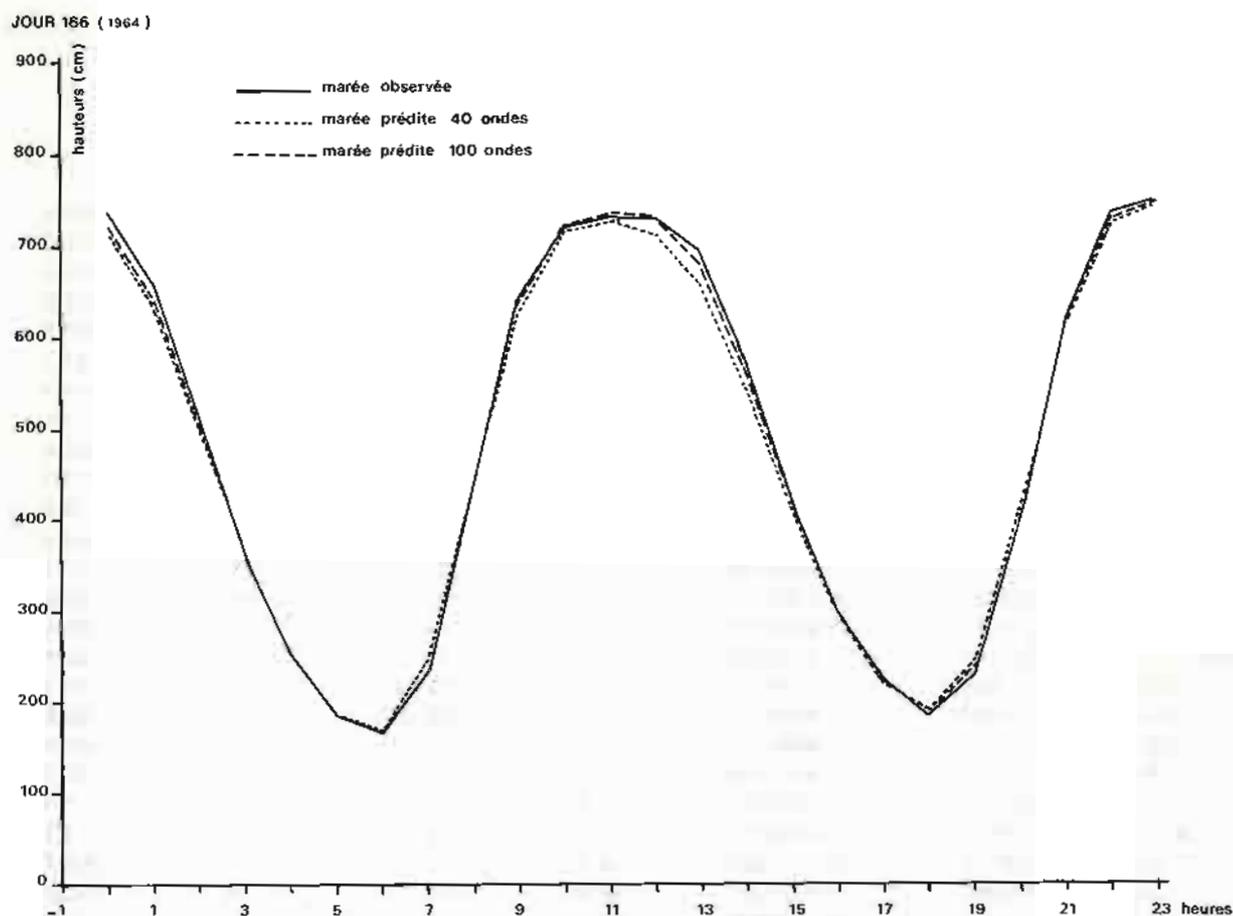


FIG. X

Les hypothèses vérifiées à peu près correctement par les observations sont énumérées ci-dessous.

Ondes diurnes. Aucune hypothèse nouvelle n'a semblé nécessaire ; il faut remarquer que le bruit d'origine météorologique est beaucoup plus important dans les ondes diurnes et empêche la détection d'ondes de faibles amplitudes (de l'ordre de quelques millimètres).

Ondes semi-diurnes.

- a) $3 M_2 S_2$, onde d'interaction, existe.
- b) Les ondes ayant pour nombre argument (cf. réf. [2]). 229455, 238554 et 239355 existent avec un module et une phase compatibles avec celles des ondes principales. Par contre, l'onde 244656, qui a un module comparable sur le spectre tracé, n'a pu être mise en évidence, elle est probablement perturbée par une onde d'interaction de vitesse légèrement différente.
- c) MSK_2 (généralement interprétée comme OP_2) existe.
- d) $M(SK)_2$ et $M(KS)_2$ existent, mais sont probablement en grande partie d'origine astronomique, surtout $M(SK)_2$;
- e) MKS_2 existe.
- f) R_2 est bien déterminée.
- g) SKM_2 existe.

Ondes tiers-diurnes. Aucune hypothèse nouvelle. Sauf S_3 , toutes ces ondes sont assez bien déterminées.

Ondes quart-diurnes. Les ondes $2 NMS_4$, $2 M\mu S_4$, $2 M\nu S_4$, N_4 , $M\nu_4$, MT_4 , $2 MKN_4$ existent et, bien que ne figurant pas sur les listes habituelles, sont bien déterminées ; en particulier $M\nu_4$ dont l'amplitude est supérieure à 2 cm. $3 MK_4$, habituellement recherchée n'est pas séparée de N_4 si l'on ne dispose pas de 4 ans d'observations. N_4 ayant une amplitude supérieure, c'est cette onde qu'il sera préférable de rechercher dans les analyses annuelles.

Ondes sixièmes-diurnes. Les ondes $3 MNK_6$, $3 MNS_6$, $2 NM_6$, $4 MS_6$, $2 M\nu_6$, $3 MSK_6$, $2 ML_6$, $2 MT_6$, $3 MSN_6$ sont correctement déterminées, bien que ne figurant pas sur les listes habituelles ; $2 ML_6$, séparée de MNK_6 sur 4 ans, lui sera préférée dans les analyses annuelles.

Ondes huitième-diurnes. Toutes ces ondes sont assez bien déterminées, sauf $2 MNK_8$ que l'on aurait vraisemblablement intérêt à remplacer par $3 ML_8$ et $MSNK_8$ que l'on a remplacée par $2 MSL_8$.

La liste des ondes recherchées et des constantes harmoniques calculées est présentée sur le tableau VIII.

Tableau VIII

Liste des constantes harmoniques du Havre résultant de l'analyse des années 1963 et 1964.

Onde	Argument	Vitesse	R	G	f	$V_0 + u$
2Q1	125755	12.8542862	0.11	187.53	0.979	355.6
Q1	135655	13.3986609	1.63	345.08	0.979	258.8
O1	145555	13.9430356	5.59	8.98	0.985	162.0
MP1	147555	14.0251729	1.38	235.01	1.065	181.9
AI9	153655	14.4145567	0.66	153.99	1.000	86.5
M1	155655	14.4966939	0.63	186.70	0.994	137.7
KHI1	157455	14.5695476	0.32	38.22	0.979	109.3
PI1	162556	14.9178647	0.54	77.02	1.000	352.0
P1	163555	14.9589314	3.34	108.04	1.002	350.4
S1	164555	15.0000000	0.47	109.66	1.000	270.0
K1	165555	15.0410686	9.19	118.04	0.988	19.1
J1	175455	15.5854433	1.02	215.54	0.979	284.9
SO1	183555	16.0569644	1.29	289.44	1.000	187.1
OO1	185555	16.1391017	0.52	261.94	0.942	64.9
3M2S2	219555	26.9523127	0.82	139.71	1.000	189.5
MNK2 OQ2	225655	27.3416965	0.90	39.30	1.000	262.6
MNS2	227655	27.4238337	1.57	356.50	1.000	103.1
229455	229455	27.4966873	0.56	338.35	1.000	92.8
2MK2	235555	27.8860712	1.35	37.01	1.004	165.8
2N2	235755	27.8953548	5.56	236.23	1.000	16.7
MU2 2MS2	237555	27.9682084	6.99	338.91	1.000	6.4
238554	238554	28.0092751	0.33	286.90	1.000	4.1
239355	239355	28.0410620	0.46	186.85	1.000	356.1
N2	245655	28.4397295	49.58	265.03	1.009	282.2
NU2	247455	28.5125831	11.51	261.23	1.008	271.7
OP2 MSK2	253555	28.9019669	1.38	32.16	1.000	342.6
	253755	28.9112506	0.57	191.93	1.000	193.5
M(SK)2	254556	28.9430375	1.24	328.27	0.864	353.7
M2	255555	28.9841042	262.09	285.45	1.008	185.3
M(KS)2	256554	29.0251709	1.78	47.02	1.000	181.0
MKS2	257555	29.0662415	1.08	161.63	1.000	23.7
LAMBDA2	263655	29.4556253	7.14	274.84	1.008	278.7
L2	265455	29.5284789	13.60	289.32	1.000	266.4
	265655	29.5377626	1.38	291.87	1.007	322.5
T2	272556	29.9589333	4.67	323.25	1.000	2.2
S2	273555	30.0000000	87.00	332.07	1.000	359.9
R2	274554	30.0410667	0.51	338.11	1.240	182.9
K2	275555	30.0821373	25.23	329.46	0.952	217.5
MSN2	283455	30.5443747	3.98	161.01	1.000	263.3
KJ2	285455	30.6265120	0.69	62.15	0.960	128.8
2SM2	291555	31.0158958	4.80	171.68	1.000	176.8
SKM2	293555	31.0980331	1.43	181.06	0.983	34.5
MQ3	335655	42.3827651	0.55	236.84	1.000	92.8
2MK3	345555	42.9271398	1.47	272.90	1.000	356.1
M3	355555	43.4761563	0.82	190.64	1.000	184.8
SO3	363555	43.9430356	0.49	343.00	1.000	172.9
MK3	365555	44.0251729	0.97	49.47	1.000	193.4
A87	375555	44.5741894	0.16	135.17	1.000	22.1
SP3	381555	44.9589314	0.24	350.20	1.000	349.7
S3	382555	45.0000000	0.18	75.22	1.000	270.0
SK3	383555	45.0410686	0.33	239.62	1.000	190.3
2MMUS4	419555	55.9364169	0.40	265.57	1.029	18.8
2MNS4	427655	56.4079380	1.13	132.46	1.028	292.4
2MNUS4	429455	56.4807916	0.54	132.74	1.001	276.0
3MK4	435555	56.8701754	0.53	232.05	0.980	338.3
N4	435755	56.8794590	1.32	33.09	1.000	199.8
3MS4	437555	56.9523127	2.33	139.52	1.029	195.6
MN4	445655	57.4238337	8.81	54.39	1.018	107.2

Tableau VIII (suite)

Liste des constantes harmoniques du Havre résultant de l'analyse des années 1963 et 1964.

MNU4	447455	57.4966873	2.48	43.07	1.018	96.9
M4	455555	57.9682084	24.66	77.42	1.018	10.5
SN4	463655	58.4397295	2.33	148.48	1.008	282.0
3MN4 ML4	465455	58.5125831	2.71	261.61	1.033	273.7
MT4	472556	58.9430375	0.89	133.79	1.008	187.5
MS4	473555	58.9841042	16.74	130.87	1.008	185.2
MK4	475555	59.0662415	4.69	126.20	1.003	42.7
2SNM4	481655	59.4556253	0.79	321.26	1.015	96.7
2MSN4	483455	59.5284789	2.12	311.43	1.023	88.5
2MKN4	485455	59.6106162	0.47	295.30	1.016	305.7
S4	491555	60.0000000	1.82	202.67	1.000	360.0
SK4	493555	60.0821373	1.09	190.65	0.982	217.7
3MNK6	625655	85.3099049	0.82	67.33	1.042	276.9
3MNS6	627655	85.3920422	1.18	44.82	1.041	117.5
3MNUS6	629455	85.4648958	0.56	32.89	1.041	107.2
2NM6	635755	85.8636633	3.07	224.09	1.029	29.1
4MS6	637555	85.9364169	1.06	50.38	1.041	20.7
2MN6	645655	86.4079380	8.32	265.91	1.028	292.4
2MNU6	647455	86.4807916	2.64	271.94	1.029	282.1
3MSK6	653555	86.8701754	0.95	120.35	0.979	338.4
M6	655555	86.9523127	15.34	289.16	1.028	195.6
MSN6	663655	87.4238337	3.69	319.87	1.018	107.2
2ML6	665455	87.4966873	2.14	325.89	1.000	272.8
2MT6	672556	87.9271418	0.82	332.67	1.018	12.7
2MS6	673555	87.9682084	15.51	334.30	1.018	10.5
2MK6	675555	88.0503457	4.07	331.17	1.021	227.7
2SN6	681655	88.4397295	0.74	161.16	1.008	282.0
3MSN6	683455	88.5125831	2.84	174.59	1.033	273.7
3MKN6	685455	88.5947204	0.72	166.84	1.035	130.6
2SM6	691555	88.9841042	3.52	21.69	1.008	185.2
MSK6	693555	89.0662415	2.20	20.18	1.003	42.7
2 (MN)8	835755	114.8476675	0.42	48.05	1.041	214.2
3MN8	845655	115.3920422	1.11	101.61	1.041	117.5
M8	855555	115.9364169	1.60	118.99	1.040	20.8
2MSN8	863655	116.4079380	1.04	160.45	1.029	292.4
2MKN8	865655	116.4900752	0.26	110.95	1.042	149.3
3MS8	873555	116.9523127	2.34	169.08	1.028	195.6
3MK8	875555	117.0344499	0.58	149.02	1.043	52.6
2SMN8	881655	117.4238337	0.14	303.24	1.018	107.2
2MSL8	883455	117.4966873	0.64	12.15	1.000	92.8
2 (MS)8	891555	117.9682084	0.97	216.36	1.018	10.5
2MSK8	893555	118.0503457	0.67	214.77	1.022	227.7

La prédiction faite à l'aide de ces constantes pour l'année 1938 a donné, sur les différences avec les observations, un écart quadratique moyen de 11,2 cm. Pour la même année, une prédiction faite à l'aide des 48 ondes principales donne un écart quadratique moyen de 13 cm.

Les figures IX et X donnent deux exemples de l'amélioration apportée par l'introduction des ondes supplémentaires.

La prédiction de l'annuaire des marées de 1963 a donné, sur les différences avec les observations, un

écart quadratique moyen de 27,9 cm. Avec les observations recalées en heure, on trouve 20,5 cm.

La prédiction harmonique apporte donc une amélioration notable par rapport à l'ancienne méthode.

Les 11,2 cm sont relativement importants, surtout si l'on compare à Brest où, sans précautions particulières, nous avons obtenu 7 cm (à partir d'une analyse sur 19 ans).

Cela doit s'expliquer en partie par une influence des conditions météorologiques sur le niveau de la mer, plus grande au Havre qu'à Brest.

CHAPITRE V

POUVOIR DE RÉOLUTION DE LA MÉTHODE. APPLICATION AU HAYRE ET A BREST

Plusieurs des ondes recherchées étaient théoriquement séparées sur quatre ans seulement, par exemple $2MK_2$ et $2N_2$, $3MK_4$ et N_4 , OP_2 et l'onde de nombre argument (Doodson) 253755, L_2 et l'onde de nombre argument 265655.

Nous avons essayé de séparer ces ondes sur les deux années d'observation ; les valeurs trouvées semblent à peu près en accord avec les valeurs du potentiel correspondantes ou avec les lois empiriques d'interaction déduites des ondes connues. Nous en avons donc tenu compte et avons effectué, à titre d'essai, une recherche de ces ondes à Brest, sur les années 1972 et 1973 ; pour les semi-diurnes, nous avons pu comparer les valeurs obtenues à celles données par une analyse sur les années 1953 à 1972. On obtient les valeurs suivantes :

	1972-1973		1953-1972	
	Amplitude	Phase (G)	Amplitude	Phase (G)
$2MK_2$	0,68	184°	0,98	159°
$2N_2$	5,40	68°	5,52	70°
OP_2	0,92	61°	1,1	359°
253755	0,93	135°	0,92	99°
L_2	6,82	104°	6,70	104°
265655	1,48	111°	1,41	140°

En conclusion, on peut dire que la séparation est à peu près correcte sauf pour OP_2 et 253755. Mais il faut remarquer que l'analyse sur 19 ans a été faite sans le recalage horaire décrit ci-dessus ; OP_2 , étant voisine de M_2 , se trouve dans la zone où l'on peut s'attendre à trouver le maximum de bruit.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DEMÉRLIAC A. — Séparation des différentes familles d'ondes de marée. Application au calcul des constantes harmoniques (à paraître dans les *Annales Hydrographiques*).
- [2] DOODSON A.T. — Tidal Institute. The university of Liverpool. Extrait des "Proceedings of the Royal Society of London". Série A, vol. C, mars 1922.
- [3] SCHUREMAN P. — Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides.
- [4] DESNOËS Y. — Le Bruit dans les analyses de marée. *Annales Hydrographiques*, n° 747.

DEUXIÈME PARTIE

MISSION HYDROGRAPHIQUE DE DRAGAGE

(Septembre 1969 — Février 1972)

par

M. Léandre PIÉRETTI

Ingénieur en Chef de l'Armement (hydrographe)

SOMMAIRE

Chapitre I. — GÉNÉRALITÉS.

Moyens. Personnel.
Matériel.
Travaux effectués.
Localisation.

Chapitre II. — TRAVAUX SUR LES CÔTES SUD DE BRETAGNE.

Nature des travaux.
Localisation.
Levé bathymétrique régulier.
Recherches de hauts-fonds.
Topographie — Triangulation.
Nature du fond.
Exploration sonar.
Marée — Courants.
Documents établis.
Annexe I (Coordonnées des points repérés).
Annexe II (Epaves).

Chapitre III. — TRAVAUX SUR LA CÔTE NORD DU COTENTIN.

Généralités — Localisation.
Levé bathymétrique.
Exploration sonar.
Topographie — Triangulation — Nature du fond.
Marée.
Courantométrie.
Documents établis.
Annexe I (Epaves).
Annexe II (Coordonnées des points repérés).

Chapitre IV. — TRAVAUX EN IROISE

Généralités — Localisation.
Exploration sonar — Bathymétrie.
Recherches de concentrations.
Marée.
Documents établis.
Annexe (Epave).

Chapitre V. — TRAVAUX A BELLE-ILE.

Nature des travaux — Localisation.
Travaux effectués.
Marée — Courants.
Documents établis.

Chapitre VI. — TRAVAUX EN BAIE DE SEINE.

Nature des travaux.
Localisation.
Travaux de la première phase.
Deuxième phase.
Marée.
Documents établis.

Chapitre VII. — TRAVAUX DIVERS.

Travaux devant Biscarosse.
Recherche du haut-fond de « La Chimère ».
Travaux dans le port de Cherbourg.

NOTES TECHNIQUES.

Marégraphe autonome à corde vibrante.
Recherche d'épaves au sonar.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

Appelée en Méditerranée au cours de l'été 1968, pour apporter son concours aux opérations de recherche du sous-marin *La Minerve* (*), la Mission Hydrographique de Dragage (M.H.D.) a rallié au mois d'août 1969 les côtes de Manche et d'Atlantique.

1. MOYENS

1.1. Personnel.

— Les fonctions de Chef de la Mission ont été, du mois de septembre 1969 au mois de février 1972, assurées par l'Ingénieur en Chef Piéretti.

— Deux ingénieurs, alors élèves à l'École Nationale Supérieure des Techniques de l'Armement, ont été embarqués du mois d'avril au mois de septembre 1970 :

L'Ingénieur de l'Armement Le Guen ;

L'Ingénieur des Travaux Publics (de nationalité malgache) Rajonhson.

— *La Recherche* a été commandée par l'Officier Principal des Equipages (O.P.E.) Redon jusqu'en juillet 1971, puis par l'O.P.E. Placet.

— Les Commandants des bâtiments hydrographiques de 2^e Classe (B.H. 2) *Octant* et *Alidade* ont été :

Pour *L'Octant*, le Maître Principal Lagathu, sauf pendant une indisponibilité de quelques mois au cours de laquelle il fut remplacé par le Maître Principal Larreur.

Pour *L'Alidade*, le Maître Principal Alonso jusqu'au mois d'avril 1971, puis le Premier Maître Guillemot.

— Le plan d'armement en gradés hydrographes (9) a rarement été honoré et on a fonctionné en général avec un déficit d'une unité, voire même de deux, ce qui a entraîné des difficultés, des retards et même des lacunes dans le déroulement des opérations.

— Le personnel équipage était composé d'appelés à près de 80 %, c'est-à-dire de personnel extrêmement instable surtout après la réduction du service militaire, à un an. Ceci aurait pu avoir des

(*) Mission Hydrographique de Dragages, mars 1967, mars 1969, par l'Ingénieur en chef de l'Armement Pasquay, *Annales Hydrographiques*, 4^e série, tome 17, p. 161.

conséquences graves pour l'exécution des travaux. Cependant, on n'eut en général qu'à se féliciter de ce personnel. On eut en particulier la chance d'avoir pour la conduite des vedettes de sonde d'excellents patrons, manœuvriers engagés de la Marine Nationale et surtout inscrits maritimes du Commerce ou de la Pêche, tous très bons marins, qualité encore primordiale que devrait avoir la plus grande partie du personnel d'une Mission Hydrographique.

1.2. Matériel.

Les bâtiments affectés à la Mission sont restés les mêmes que les années précédentes : B.H. 1 *La Recherche*, B.H. 2 *L'Octant* et *L'Alidade*.

Les équipements spécifiques, de la Mission, sont également restés inchangés à une exception près : le remplacement du vieux Sonar Sgema de *La Recherche* par un Sonar Duba1B simplifié et le débarquement du Sonar de chasse aux mines Anuqs 1D.

Les bâtiments étaient bien adaptés en général aux travaux demandés :

— Petite et moyenne sonde en ce qui concerne les B.H. 2 :

— Moyenne sonde, recherche d'obstructions au sonar, mise en œuvre des vedettes, rédaction à bord (grâce à une salle de dessin spacieuse), en ce qui concerne *La Recherche*.

Il convient cependant de noter que, par manque de moyens de levage, ces bâtiments ne peuvent guère se livrer à d'autres tâches que celles énumérées ci-dessus ; cette lacune s'est faite particulièrement sentir quand il s'est agi d'expérimenter deux marégraphes autonomes à corde vibrante, attribués à la M.H.D. pour essais et pesant de l'ordre de 200 kg dans l'air, 100 kg dans l'eau.

2. TRAVAUX EFFECTUÉS

La M.H.D. a eu, pendant toute cette période, deux zones d'action principales :

— La côte Nord du Cotentin, de Cherbourg à la pointe de Saire.

— La côte Sud de Bretagne, de la pointe de Penmarc'h à l'archipel de Glénan.

A ces deux chantiers principaux, il faut ajouter des travaux de moindre envergure :

Iroise, baie de Seine, Belle-Ile, Biscarosse et, pour mémoire, des travaux de détail dans le port militaire de Cherbourg.

3. LOCALISATION

A de très rares exceptions près, la localisation a toujours été assurée, tant à bord des bâtiments que des embarcations par le radiolocalisateur Trident 1 (*) de la M.H.D. (2 interrogateurs, 4 balises).

Pour une mission comme la M.H.D., appelée à faire des travaux côtiers variés, un ensemble comme le Trident constitue un équipement idéal :

— Légèreté et donc fiabilité d'implantation du matériel à terre.

— Matériel à bord assez peu encombrant pour pouvoir être installé rapidement sur tout bâtiment ou embarcation.

— Exploitation commode et sûre.

— Grande facilité de calcul et de tracé des réseaux (lieux circulaires).

Il convient de noter à ce sujet qu'il peut être précieux quand on exécute des travaux côtiers, principalement dans des zones dangereuses, de pouvoir porter rapidement le point obtenu par un radiolocalisateur sur la carte marine. C'est là un aspect souvent oublié mais à mon sens important, des

avantages d'un système circulaire : sécurité accrue de la navigation, contrôle immédiat des travaux effectués, comparaison immédiate aussi des résultats obtenus avec les données anciennes, etc.

Ainsi équipée de son Trident, la M.H.D. était une Mission particulièrement opérationnelle, apte à agir dans les moindres délais dans un vaste champ d'action (toutes les côtes françaises de la Manche et de l'Atlantique, par exemple).

Enfin, l'utilisation d'un radiolocalisateur apporte un gain de temps considérable dans l'exécution des travaux à la mer, le seul phénomène météorologique à prendre en compte étant l'état de la mer, mais non la visibilité, pour peu qu'elle soit suffisante pour acquies à la M.H.D., il ressort que, même en embarcation, l'avenir est au radiolocalisateur et que l'ère des moyens optiques est, sauf rares exceptions, définitivement close. Ceci devrait amener des modifications importantes dans la conception des vedettes de sonde jusqu'à présent conçues autour du cercle hydrographique, c'est-à-dire d'un instrument nécessitant des vues entièrement dégagées dans toutes les directions. Les vedettes de sonde modernes elles, tout en gardant la visibilité nécessaire à la sécurité de la navigation, doivent offrir l'abri le meilleur aux intempéries tant pour le personnel que pour le matériel.

(*) Cours de radiolocalisation par l'Ingénieur en chef de l'Armement Milard, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées, 1972.

CHAPITRE II

TRAVAUX SUR LA CÔTE SUD BRETAGNE, DE PENMARC'H A L'ARCHIPEL DE GLÉNAN

1. NATURE DES TRAVAUX

Ces travaux, qui avaient pour objet de compléter jusqu'à la côte des levés effectués antérieurement jusqu'aux fonds de 50 m, se sont déroulés deux années consécutives du mois de juillet au mois d'octobre.

Ils ont comporté :

- Un levé bathymétrique régulier à l'échelle de 1/10 000 complété par des recherches de hauts-fonds.
- Des opérations de topographie.
- Des opérations annexes (triangulation, courants, nature du fond).

Il a été effectué en outre, au large de ce levé hydrographique et jusqu'aux fonds de 100 m, une exploration Sonar destinée à assurer la sécurité de la navigation sous-marine; cette exploration s'est également déroulée en deux temps : juillet 70 et avril 71.

2. LOCALISATION (voir planche 1)

La localisation a été assurée par le Trident dont les balises occupaient simultanément 3 à 4 des positions suivantes :

	Coordonnées Lambert II		Campagne
	X	Y	
Clocher de Plouhinec	91 599,4	357 053,5	1970
Phare d'Eckmühl	97 959,4	332 414,1	1970 et Sonar
Clocher du Guilvinec	104 542,4	331 542,4	"
Château d'eau de Lesconil	109 031,5	332 136,4	1970
Château d'eau de Pont-L'Abbé	109 748,5	340 244,4	1971
Château d'eau de Fouesnant (Kerouguen)	125 360,7	340 653,1	1970-1971 Sonar
Château d'eau de Beuzec (Poteau Vert)	133 429,4	340 649,3	1971 et Sonar
Château d'eau de Kergantic	165 054,9	320 130,3	Sonar

Les implantations utilisées en 1970, et au cours de l'exploration Sonar, ont donné entière satisfaction. Il n'en fut pas de même en 1971 où il fallut réaliser un compromis permettant de faire travailler à la fois les B.H. 2 et les embarcations et de choisir chaque jour la zone de travail en fonction des conditions météorologiques.

3. LEVÉ BATHYMÉTRIQUE RÉGULIER

(voir planches 2 et 3).

Ce levé, à l'échelle de 1/10 000, a été exécuté en partie par les B.H. 2 *Octant* et *Alidade*, en partie par les vedettes de *La Recherche*. Les routes suivies, espacées de 100 m ont été des cercles de distance perpendiculaires à la côte. Autour de la pointe de Penmarc'h cependant, en raison de la configuration topographique (cas général de toutes les pointes), l'embarcation de sonde fut radioguidée à partir du vieux phare.

Au levé général au 1/10 000, il faut ajouter :

— Un levé à l'échelle de 1/25 000 d'une mince bande à l'Ouest de Penmarc'h destinée à combler une lacune entre les levés Mannevy 1959-60 (*) et Roubertou 1963 (**).

b) Un levé à l'échelle de 1/5 000 dans l'anse du Trez (Bénodet), exécuté entièrement en radioguidage.

4. RECHERCHES DE HAUTS-FONDS.

Les recherches de hauts-fonds dans une telle zone constituèrent une activité au moins aussi importante que le levé régulier lui-même.

(*) Mission Hydrographique des Côtes de France et d'Afrique du Nord, 1959-1960, par l'ingénieur en chef de l'Armement, Mannevy, *Annales Hydrographiques*, 4^e série, tome 17, p. 303.

(**) Mission Hydrographique de Dragage, mars 1963 - mars 1965, par l'ingénieur en chef de l'Armement, Roubertou, *Annales Hydrographiques*, 4^e série, tome 15, p. 85.

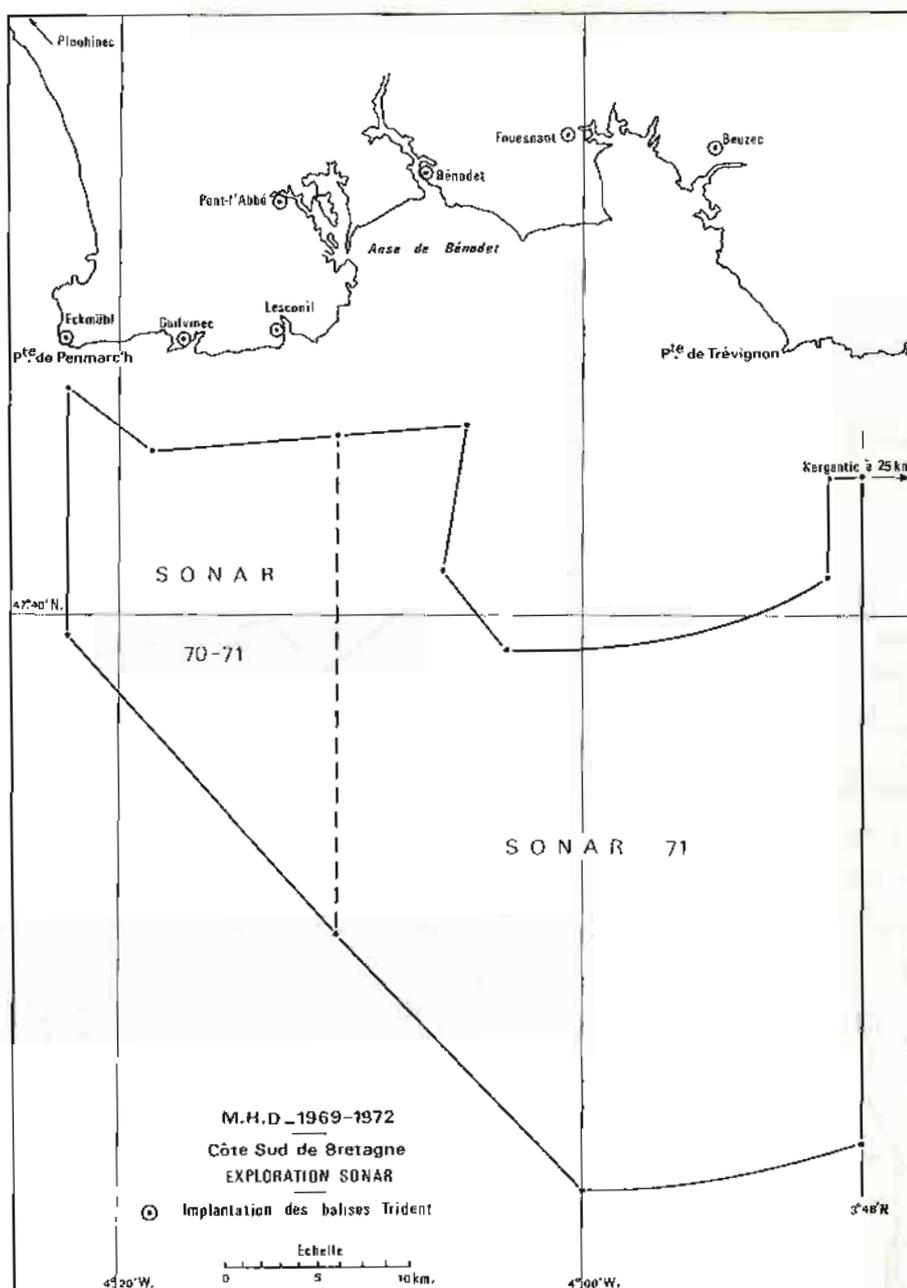


PLANCHE 1

Tous les hauts-fonds dans une telle zone constituèrent une activité au moins aussi importante que le levé régulier lui-même.

Tous les hauts-fonds déjà portés sur les cartes en service et situés dans les zones navigables ont été systématiquement recherchés à quelques rares exceptions près, c'est-à-dire :

- Les roches voisines du chenal des Bluiniers.
- Les roches situées sur l'alignement Men-Gol-Folavoalh (Sud-Glénan).
- Deux hauts-fonds isolés : 7,7 à 600 m au Sud de Reissant, et 9,0 à 400 m au Sud de Rousse-ar-Veil.

Les cotes portées sur les cartes en service ont été, en général, améliorées ou au moins égalées; dans les rares cas contraires, il convient de conser-

ver les cotes anciennes, les têtes correspondantes étant toujours extrêmement fines. A titre d'exemple, à l'occasion d'une recherche par plongeurs, il a été constaté une différence de cote de près de 10 m pour une distance horizontale de l'ordre de 5 m.

On a étudié également avec soin, afin d'en préciser les cotes, toutes les remontées apparues au cours du levé régulier et qui auraient pu constituer un danger pour la navigation.

Ces recherches ont été effectuées au Trident qui, avec des patrons bien entraînés, permet de faire des passages espacés d'une dizaine de mètres sans aucune difficulté. Elles ont été en général très ardues en raison de la finesse extrême de certaines

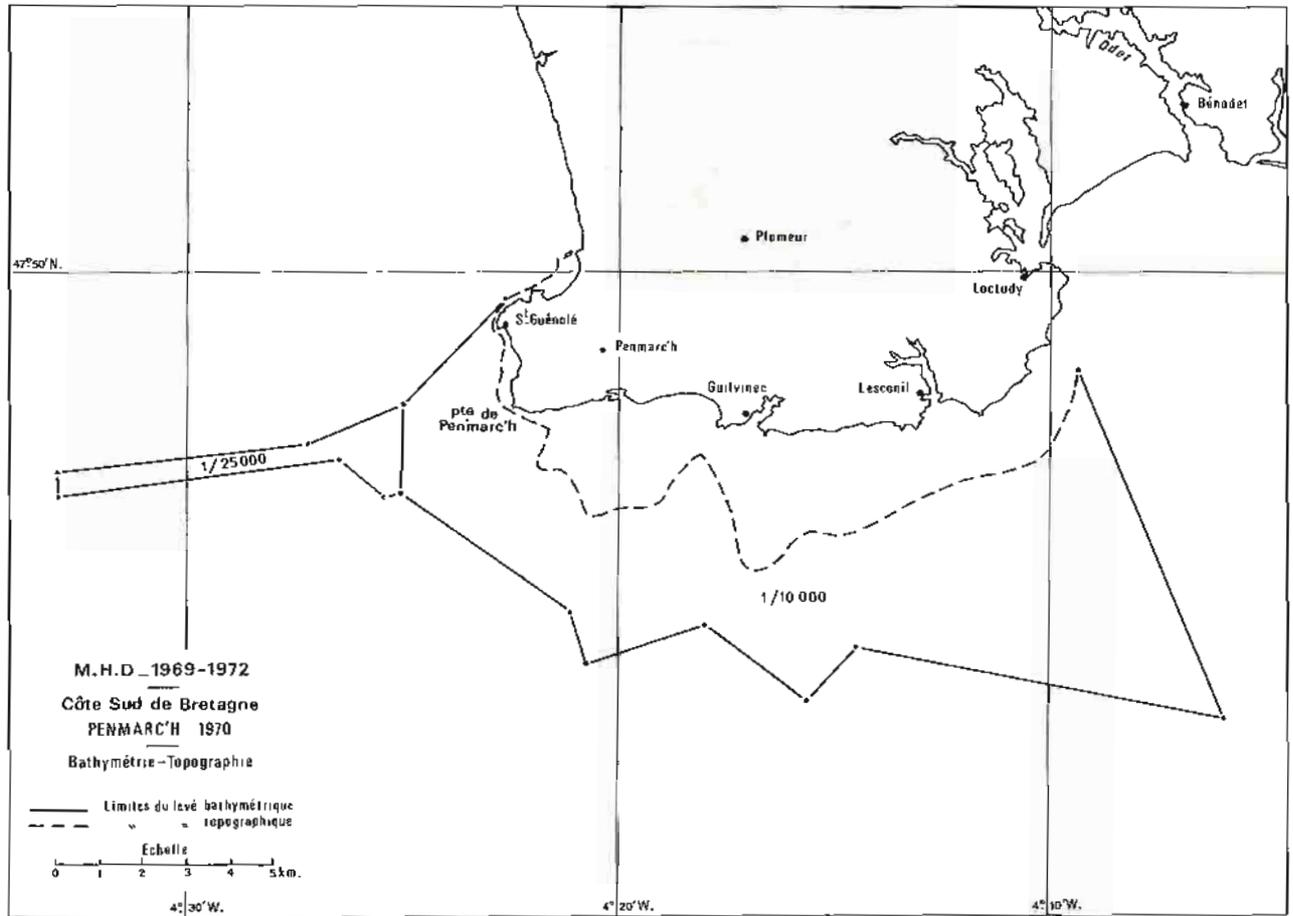


PLANCHE 2

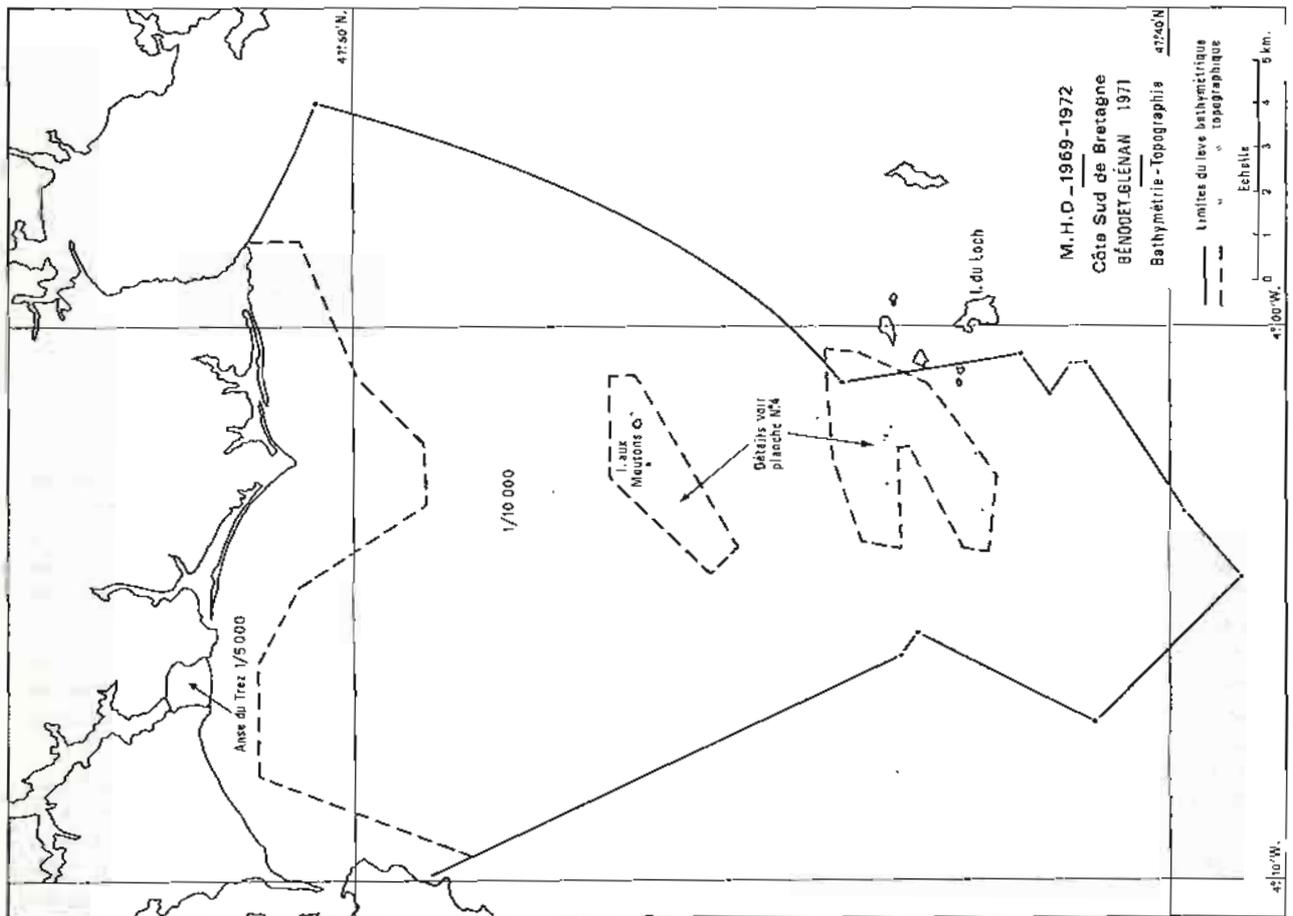


PLANCHE 3

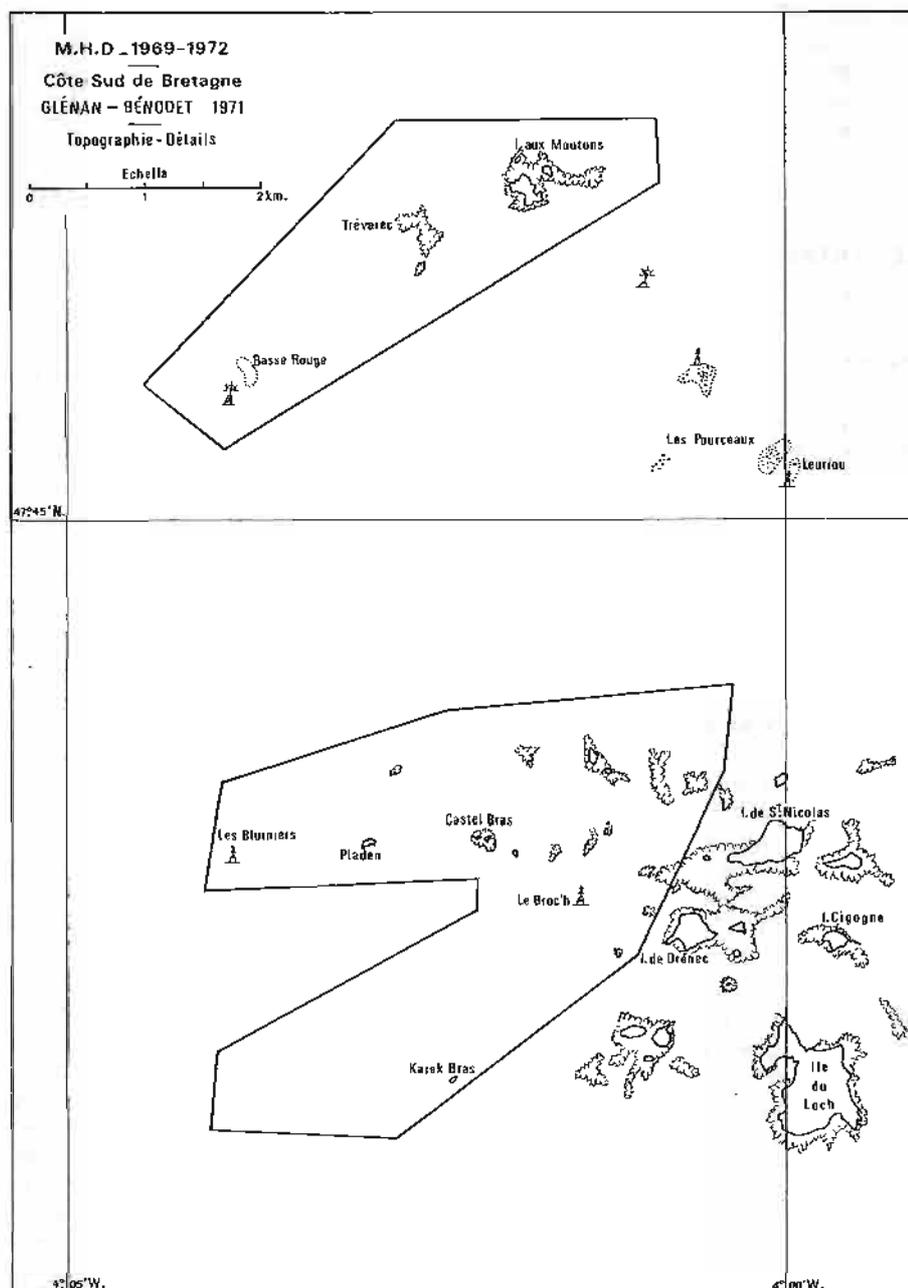


PLANCHE 4

têtes et de la complexité du relief. En effet, recherchant un haut-fond particulier, il ne fut pas rare d'en trouver de nombreux autres dans un rayon de quelques centaines de mètres. Il se posa alors des problèmes certains d'identification qui, grâce au Trident, furent en général commodément résolus.

Dans certaines zones, la recherche des têtes une à une s'avéra absolument impossible et on dut se résoudre à un faire un quadrillage serré (2 réseaux perpendiculaires avec profils espacés d'une vingtaine de mètres) sur des surfaces relativement importantes : basse Spinec et roches avoisinantes, basse Malaoët, basse Perennez, etc.

Les principaux alignements ont été étudiés plus ou moins à fond, celui de Bénodet en particulier,

sur lequel on effectua de nombreux passages toutes les fois que l'occasion se présenta.

Les alignements secondaires, Roches de Penmarc'h, Archipel de Glénan, sont très difficiles à identifier et doivent en conséquence être réservés aux seuls pratiques locaux. Leur maintien sur les cartes constitue en outre un réel danger en raison de l'impression de fausse sécurité qu'ils apportent.

L'interprétation des enregistrements au sondeur a posé quelques problèmes (bancs de poissons, algues ... ?). Je pense que, d'une manière générale, elle a été correcte; quelques erreurs ont pu cependant être faites. Lever absolument tous les doutes dans une telle zone par des procédés classiques (plongeurs, dragage) eut été d'ailleurs impossible;

une méthode rapide pourrait être employée quand il s'agit d'un banc de poissons, sa dispersion à l'explosif. Elle n'a pas été utilisée car elle pose un certain nombre de problèmes : sécurité et règlements dans le cadre de la Marine Nationale, réglementation des pêches, protection de la nature, etc.

5. TOPOGRAPHIE. TRIANGULATION

(voir planches 2, 3 et 4)

5.1. Trait de côte et estran.

La topographie du trait de côte et de l'estran a été faite à l'aide de photographies anciennes verticales piquetées et renseignées sur le terrain : 1 jeu au 1/10 000 entre Saint-Guénolé et la pointe de Pennallan, 1 jeu au 1/25 000 entre les pointes de Pennallan et de Beg-Meil. Les travaux ont été rédigés à l'échelle de 1/10 000 par restitution à la chambre claire pour le premier jeu, au stéréotop Zeiss pour le deuxième.

5.2. Topographie des roches et îlots du large.

Les photographies aériennes ont été peu utilisées, les unes parce qu'elles n'étaient pas de qualité suffisante, les autres parce que leur échelle était trop petite devant le fourmillement des roches dans certaines zones. De plus, l'interprétation d'une photographie aérienne au-dessus de la mer est très délicate et peut conduire à de graves erreurs.

Aussi servirent-elles essentiellement de document de préparation et de contrôle au même titre que les cartes de détail en service. Elles permirent cependant de redresser quelques erreurs grossières dans les positions de certaines roches et de rectifier le dessin de quelques plateaux ou îlots.

Les opérations furent donc conduites suivant des procédés classiques : cercle hydrographique ou théodolite de poche, perche de topographie ou stadia.

En dépit d'un manque total d'entraînement initial à ce genre de travail, de moins en moins effectué dans les Missions hydrographiques, les techniques se sont progressivement améliorées et on a fini par atteindre un rendement et surtout une qualité certainement convenables.

5.3. Triangulation.

Les travaux de topographie ont été complétés par la détermination des positions de toutes les marques de balisage et de quelques amers.

6. NATURE DU FOND

Des prélèvements superficiels au plomb suiffé ou à la benne à griffe ont été effectués sur l'ensemble

du levé, à deux exceptions près : les zones non navigables, la partie Sud-Est du levé 1970.

L'espacement de ces prélèvements est de 1 000 m, sauf autour de certains points de mouillage où il a été réduit à 500 m (Le Guilvinec, anse de Bénodet).

De plus, un essai d'interprétation de la nature du fond d'après les enregistrements obtenus au sondeur a été faite dans la zone Sonar; les fonds, à partir d'une certaine distance de la côte, sont en effet très réguliers et sur les bandes de sonde du sondeur Elac Deneb de *La Recherche* relativement pénétrant et toujours en route au cours de l'exploration Sonar, on pouvait distinguer 4 types caractéristiques de fonds :

- des fonds rocheux au relief très tourmenté;
- des fonds plats parsemés de roches.
- des fonds plats où les roches apparaissent sous une couche plus ou moins épaisse de sédiments;
- des fonds réguliers de nature indéterminée, soit qu'ils soient très peu pénétrants, soit que la couche de sédiment soit trop importante pour que puisse apparaître le socle rocheux.

7. EXPLORATION SONAR (voir planche 1)

Une exploration Sonar a été effectuée depuis une limite côté terre compatible avec la sécurité de la navigation de *La Recherche* jusqu'à la ligne des fonds de 100 m, entre le méridien de la pointe de Penmarc'h et le méridien 3°48'.

En juillet 1970, on a exploré la partie Ouest; en avril 1971, la partie Est. Deux réseaux sensiblement perpendiculaires ont été effectués au cours de chacune des deux périodes. L'espacement du premier réseau a toujours été de 1 000 m, celui du deuxième a été en 1971 porté à 1 500 m, les conditions de propagation s'étant avérées excellentes. De plus, en avril 1971, on a exploré une deuxième fois, suivant un seul réseau, la zone 1970; les conditions de propagation au mois de juillet avaient été en effet particulièrement mauvaises et les résultats nuls.

Une dizaine d'épaves ont été trouvées et leurs cotes déterminées au sondeur. Les résultats figurent en annexe 2 au présent chapitre.

8. MARÉE-COURANTS

8.1. Marée (voir planches 5 et 6).

a) Campagne 1970.

Les sondes de la zone 1970 ont été réduites de la marée au Guilvinec à l'aide d'un marégraphe Ott R 16 en fonctionnement continu du 7 juillet au 23 septembre 1970. Le zéro des sondes, adopté par concordance avec Port-Tudy, est à la cote —2,88 N.G.F. Ce niveau est matérialisé par 2 repères :

Désignation	Description	Cote par rapport au NGF	Cote par rapport au zéro des sondes
A	Repère NGF 01 K3 n° 25 (Pignon Est de l'église du Guilvinec)	7,220 m	10,10 m
B	Socle du dernier réverbère à l'extrémité de l'apponement	3,276 m	6,16 m

La concordance avec Port-Tudy a montré que les marées en ces deux points sont pratiquement iden-

tiques : rapport de l'amplitude égal à 1 et déphasage nul.

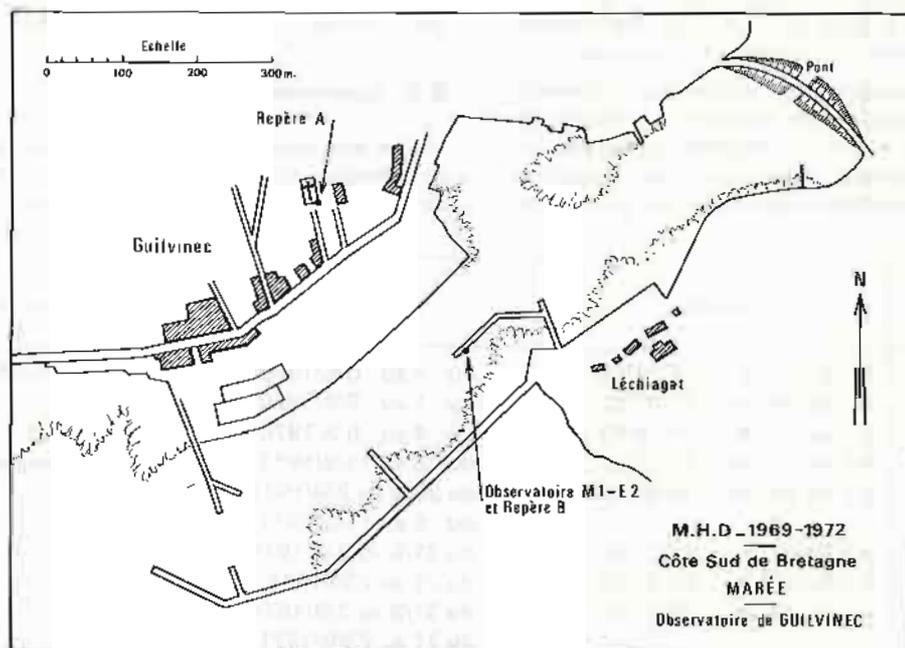


PLANCHE 5

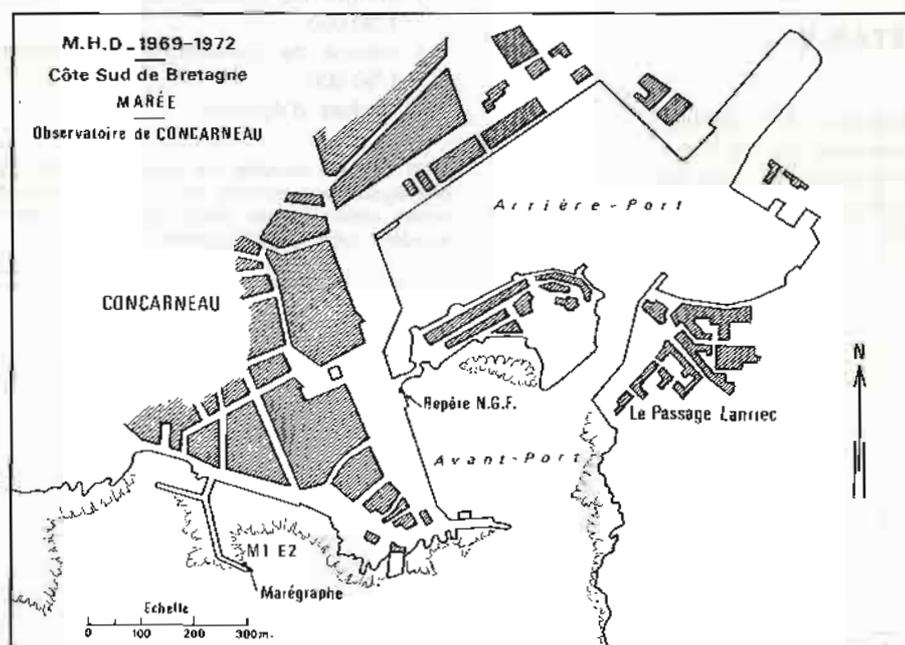


PLANCHE 6

b) Campagne 1971.

En 1971, les sondes ont été réduites de la marée observée d'une manière continue à Concarneau du 20 juillet au 7 octobre. Le zéro des sondes, déduit

d'une concordance avec Port-Tudy, est à la cote -2,91 N.G.F.

Ce niveau est matérialisé par le repère suivant :

Désignation	Description	Cote par rapport au NGF	Cote par rapport au zéro des sondes
A	Repère NGF 01 K3 P3 24 (quai d'Aiguillon)	4,25 m	7,16 m

Comme au Guilvinec, l'amplitude de la marée est sensiblement égale à celle de Port-Tudy. Par contre, il y a un léger retard de l'ordre de 5 minutes.

Un deuxième marégraphe installé au Guilvinec, n'ayant pu être normalement surveillé en raison de son éloignement, a eu, d'une manière générale, un fonctionnement douteux; cependant, les quelques enregistrements exploitables obtenus ont permis de

vérifier le bon accord des concordances Port-Tudy-Le Guilvinec, Port-Tudy-Concarneau.

8.2. Courants.

Des mesures de courant, d'une durée de 50 heures en général, ont été effectuées en différents points, ainsi qu'il est indiqué dans le tableau ci-dessous.

N° fichier EPSHOM	Position	Dates	Port de référence
SH 198	47° 44' 12" N - 04° 15' 00" W	du 4 au 6/8/1970	Le Guilvinec
SH 199	47° 43' 30" N - 04° 07' 42" W	du 1 au 3/9/1970	"
SH 200	47° 46' 42" N - 04° 24' 42" W	du 4 au 6/8/1970	"
SH 456	47° 46' 18" N - 03° 57' 36" W	du 8 au 11/8/1971	Concarneau
SH 455	47° 44' 48" N - 04° 01' 12" W	du 29/8 au 2/9/1971	"
SH 457	" "	du 8 au 11/8/1971	"
SH 458	47° 50' 00" N - 04° 07' 00" W	du 31/8 au 2/9/1971	"
SH 460	47° 50' 00" N - 04° 07' 00" W	du 21 au 23/9/1971	"
SH 459	47° 45' 48" N - 04° 07' 30" W	du 31/8 au 2/9/1971	"
SH 461	" "	du 21 au 23/9/1971	"

9. DOCUMENTS ÉTABLIS

- 1 minute de bathymétrie au 1/25 000;
- 1 minute de bathymétrie au 1/5 000;
- 10 minutes de bathymétrie au 1/10 000;
- 8 minutes de topographie et de recherches de roches au 1/10 000;

1 minute de concentrations d'échos Sonar (*) au 1/30 000;

1 minute de concentrations d'échos Sonar (*) au 1/50 000;

14 fiches d'épaves.

(*) Sur les minutes de concentrations d'échos sonar ont été également tracées les lignes séparant les différentes zones obtenues par interprétation des enregistrements sur sondeur (voir § 6 du présent chapitre).

ANNEXE 1 AU CHAPITRE II

CÔTES SUD DE BRETAGNE. COORDONNÉES DES POINTS REPÉRÉS.
LAMBERT II - N.T.F. (BRETAGNE 61)

Nom du point		X	Y	L (N)	G (W)	Origine
Tourelle Le Menhir *** (f)	axe	95 914,7	332 307,9	47° 47' 44",641	04° 23' 55",901	IGN
Tourelle Scoedec **	"	97 032	333 471	47° 48' 25",255	04° 23' 07",190	MHD
Ancienne église de Saint-Guénoilé **	"	98 421,0	334 528,9	47° 49' 03",218	04° 22' 05",009	"
Tourelle Grouies Bihan ** (f)	"	97 435	331 386	47° 47' 33",625	04° 22' 41",185	"
<i>Alignement d'entrée Saint-Guénoilé</i>						
a) Terme antérieur * (f)	"	97 745	334 533	47° 49' 01",484	04° 22' 37",401	"
b) Terme postérieur *	"	97 798	334 618	47° 49' 04",373	04° 22' 35",211	"
<i>Alignement de Saint-Pierre</i>						
a) Terme antérieur ** (f)	"	97 619,8	332 878,6	47° 48' 07",769	04° 22' 36",612	"
b) Terme postérieur ** (f)	"	97 855,4	332 692,0	47° 48' 02",400	04° 22' 24",568	"
Vieux phare ***	"	97 839,42	332 384,46	47° 47' 52",435	04° 22' 24",072	IGN
Phare d'Eckmühl **** (f)	"	97 958,61	332 416,75	47° 47' 53",806	04° 22' 18",498	"
Espar La Jument *	"	98 510	330 200	47° 46' 43",81	04° 21' 43",03	MHD (topographie)
Balise Ruinec **	"	99 014,2	330 740,1	47° 47' 02",628	04° 21' 21",109	IGN
Balise Les Firbichons **	"	99 593,6	331 103,2	47° 47' 15",936	04° 20' 54",859	"
Balise Le Rat **	"	100 375,4	330 388,8	47° 46' 55",038	04° 20' 14",525	"
Tourelle Locarec ** (f)	"	100 427,27	331 097,71	47° 47' 18",051	04° 20' 14",931	"
Espar Ragueu *	"	100 750	329 300	47° 46' 20",94	04° 19' 52",16	MHD (topographie)
Amer de Kersidal **	"	103 562,33	333 087,46	47° 48' 30",826	04° 17' 52",915	IGN
Balise Men Du **	"	103 038,12	330 737,08	47° 47' 15",205	04° 17' 39",766	"
Balise Rousse Ar-Men Du **	"	103 960,04	330 842,78	47° 47' 19",494	04° 17' 24",783	"
Cheminée W ***	"	104 019	331 379	47° 47' 36",954	04° 17' 24",130	MHD
Cheminée E ***	"	104 273	331 372	47° 47' 37",421	04° 17' 11",942	"
Balise Groaik **	"	104 295,2	330 663,9	47° 47' 14",636	04° 17' 08",016	IGN
Feu babord Le Guilvinec **	"	104 670	331 150	47° 47' 31",34	04° 16' 52",04	MHD
Feu tribord Le Guilvinec **	"	104 354	331 050	47° 47' 27",25	04° 17' 06",76	"
Tourelle Lost Moan ** (f)	"	104 789,15	330 199,27	47° 47' 00",991	04° 16' 42",494	IGN
<i>Alignement Le Guilvinec</i>						
Antérieur ** (f)	"	104 883,4	331 276,35	47° 47' 35",997	04° 16' 42",332	MHD
Postérieur ** (f)	"	105 382	331 588	47° 47' 47",408	04° 16' 19",718	"
Balise Ar Guisty ***	"	106 081,62	327 500,51	47° 45' 37",433	04° 15' 29",760	IGN
Balise Roue de la Charette **	"	106 624,8	329 637,5	47° 46' 47",854	04° 15' 12",364	"
Balise Basse Du	"	107 434,9	329 412,0	47° 46' 42",773	04° 14' 32",683	MHD
Pyramide Lesconil **	"	108 988,28	330 991,85	47° 47' 37",945	04° 13' 24",657	IGN
Château d'eau Pont-L'Abbé ****	"	109 748,2	340 244,9	47° 52' 38",536	04° 13' 25",340	MHD
<i>Alignement Lesconil</i>						
Postérieur * (f)	"	109 978,4	331 218,35	47° 47' 47",924	04° 12' 38",156	"
Antérieur * (f)	"	110 018,7	331 061,5	47° 47' 42",971	04° 12' 35",599	"
Balise Lesconil **	"	110 055,35	330 671,25	47° 47' 30",479	04° 12' 32",284	"
Balise Les Bleds **	"	112 395,4	330 249,5	47° 47' 23",158	04° 10' 38",567	IGN
Balise Men Du **	"	113 596,38	331 005,78	47° 47' 50",776	04° 09' 44",070	"
Phare des Perdrix ** (f)	"	113 747,89	335 474,19	47° 50' 15",360	04° 09' 54",554	IGN
Balise Karc Hir **	"	114 202,85	332 011,98	47° 48' 24",864	04° 09' 19",015	"
Phare de Langoz ** (f)	"	114 203,5	334 747,2	47° 49' 53",121	04° 09' 29",835	MHD
Balise Karcsoaz **	"	114 444,2	334 988,2	47° 50' 01",541	04° 09' 19",257	"
Balise Men Bret **	"	114 713,8	333 650,0	47° 49' 19",082	04° 09' 01",034	"
Espar Men Audierne **	"	114 885,0	335 493,7	47° 50' 19",028	04° 09' 00",139	"
Phare de Combrit ** (f)	"	117 951,2	338 111,6	47° 51' 51",660	04° 06' 43",509	"

ANNEXE 1 AU CHAPITRE II

CÔTES SUD DE BRETAGNE. COORDONNÉES DES POINTS REPÉRÉS.
LAMBERT II - N.T.F. (BRETAGNE 61) (suite)

Nom du point		X	Y	L (N)	G (W)	Origine
Phare de Bénodet *** (f)	"	118 061,4	339 280,8	47°52'29",679	04°06'42",835	"
Phare du Coq ** (f)	"	118 120,3	338 938,1	47°52'18",777	04°06'38",659	"
Espar La Rousse *	"	118 129,5	337 663,6	47°51'37",677	04°06'33",194	"
Balise Le Four **	"	118 400,5	337 956,6	47°51'47",880	04°06'21",355	IGN
Balise Les Verres **	"	118 702,2	337 500,7	47°51'33",940	04°06'05",094	"
Tourelle Men Diou **	"	119 969,20	330 977,69	47°48'06",802	04°04'38",766	"
Tourelle Le Tarc **	"	120 170,57	335 430,71	47°50'31",028	04°04'46",572	"
Tourelle des Bluiniers ***	"	120 362,70	332 115,16	47°43'21",844	04°03'45",281	"
Balise Les Poulains **	"	121 436,2	330 084,1	47°47'41",832	04°03'25",015	MHD
Balise Le Bœuf **	"	122 358,8	334 207,6	47°49'57",330	04°02'56",913	IGN
Balise La Vache **	"	122 777,9	333 421,5	47°49'33",056	04°02'23",764	"
Balise Le Broc'h *	"	123 352,4	321 507	47°43'10",066	04°01'19",941	MHD
Balise Men Vras **	"	124 069,13	333 535,12	47°49'40",108	04°01'32",332	IGN
Phare de l'île aux Moutons ***	"	123 504,87	327 655,75	47°46'28",897	04°01'36",510	"
Tourelle Le Huic **	"	124 218,59	322 780,86	47°43'53",441	04°00'43",449	"
Tourelle des Grands Pourceaux (détruite) *	"	124 772,00	326 095,61	47°45'41",862	04°00'29",806	IGN
Tourelle Leuriou **	"	125 468,26	325 032,55	47°45'09",371	03°59'52",373	"
Sémaphore de Beg-Meil	Mat	128 071,4	336 197,0	47°51'16",440	03°58'30",800	MHD
Balise Laouen Pod *	axe	128 769,1	336 079,0	47°51'14",450	03°57'56",896	"
Balise Lituen **	"	128 964,10	334 981,67	47°50'39",537	03°57'43",320	IGN
Immeuble Concarneau ****	"	132 699,9	338 893,4	47°52'55",434	03°54'59",179	MHD

Nota. — 1) (f) balisage lumineux.

2) Valeur comme amer :

**** amer remarquable,

*** amer important,

** amer moyennement visible,

* amer peu visible.

ANNEXE 2 AU CHAPITRE II

CÔTE SUD DE BRETAGNE. ÉPAVES. N.T.F. (BRETAGNE 61)

Année et n° MHD	Repère d'identification	L (N)	G (W)	Cote sondeur	Fond	Réponse Sonar	Observations
1971 - 6	13	47°36'22",0	04°18'34",0	92,5	102	Très bonne	
1971 - 7	15	47°34'03",2	04°17'11",8	97,5	103	Moyenne	
1971 - 8	10	47°40'30",8	04°09'41",9	70,0	82	Médiocre	
1971 - 9	11	47°41'52",9	04°13'44",3	76,0	84	Bonne	
1971 - 10	9	47°36'52",5	04°07'33",7	28,5	93	Médiocre	
1971 - 11	7	47°36'47",3	04°02'11",4	78,0	86	Moyenne	
1971 - 12	5	47°28'33",6	03°59'46",3	84,5	93	Très bonne	
1971 - 13	2	47°31'18",1	03°52'38",9	87,5	92	Bonne	
1971 - 14	3	47°33'03",4	03°54'23",0	84,5	90	Bonne	
1971 - 15	1	47°35'47",9	03°47'49",3	67,5	78	Bonne	
1971 - 16	4	47°26'42",6	03°53'58",3			Très bonne	Non recherchée au sondeur par suite d'une baisse de performances du Trident. Fond de l'ordre de 100 m.
1971 - 17		47°49'16",7	04°05'05",8	11,8			Epaves déjà portées sur les cartes en service et retrouvées au cours du levé bathymétrique.
1971 - 18		47°48'18",2	03°57'12",7	12,1			
1971 - 19		47°49'00",7	04°02'45",1	6,2			

Nota : 1) Le numéro MHD est un numéro donné à courir chaque année au moment de l'établissement de la fiche.

2) Le repère d'identification donné au cours des travaux afin d'effectuer un classement provisoire figure sur les minutes des échos Sonar.

CHAPITRE III

TRAVAUX SUR LA CÔTE NORD DU COTENTIN

1. GÉNÉRALITÉS - LOCALISATION

(voir planche 7)

Les travaux sur la côte Nord du Cotentin se sont échelonnés du mois d'octobre 1969 au mois de novembre 1971.

Ils ont comporté un levé bathymétrique régulier

doublé par une exploration Sonar et les travaux annexes correspondants.

La localisation, sauf rares exceptions, a été assurée par le Trident dont les balises ont occupé simultanément, en fonction de la progression des travaux, 3 et parfois 4, des points suivants : (Coordonnées Lambert I - Zone Nord).

	X	Y
a) Sémaphore de Longues	328 606,6	187 401,7
b) Fort de Saint-Vaast-La-Hougue	338 897,0	214 416,6
c) Phare de Gatteville	340 330,6	228 068,7
d) Phare du cap Lévi	325 287,8	228 739,8
e) Cote 138	325 580,9	225 672,2
f) Château d'eau de la Glacerie	315 685,9	220 493,0
g) Batterie d'Anfreville	380 183,5	226 090,7

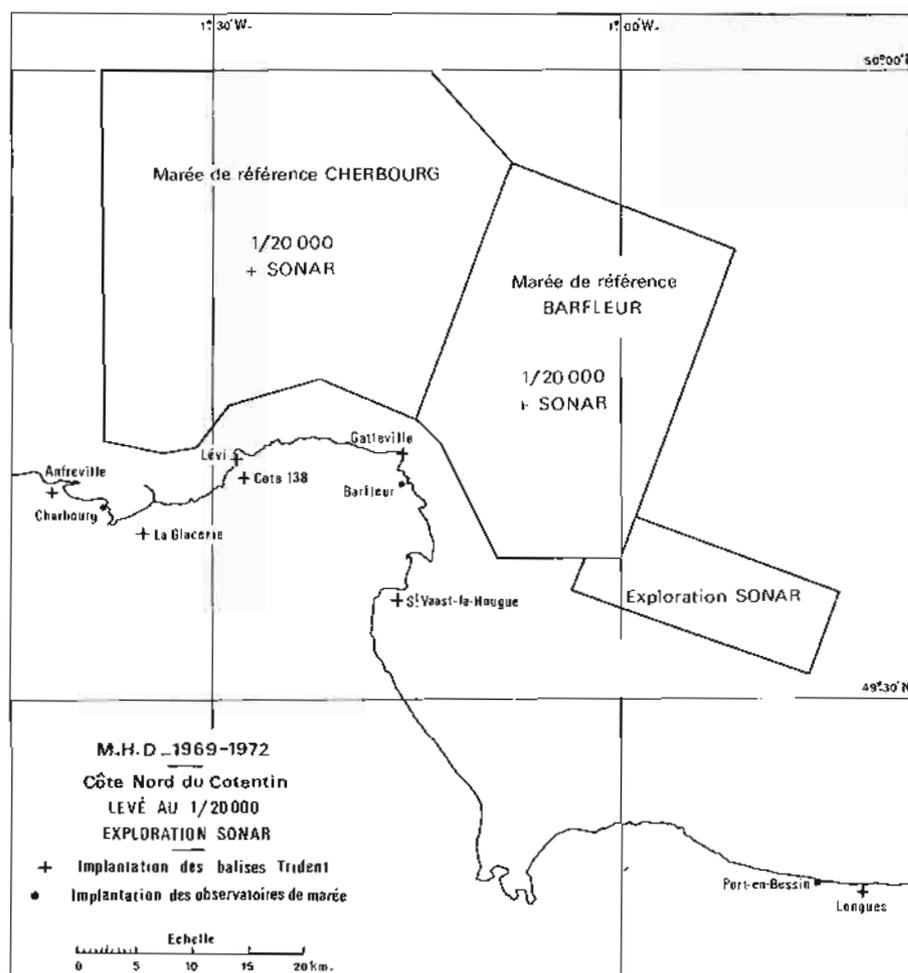


PLANCHE 7

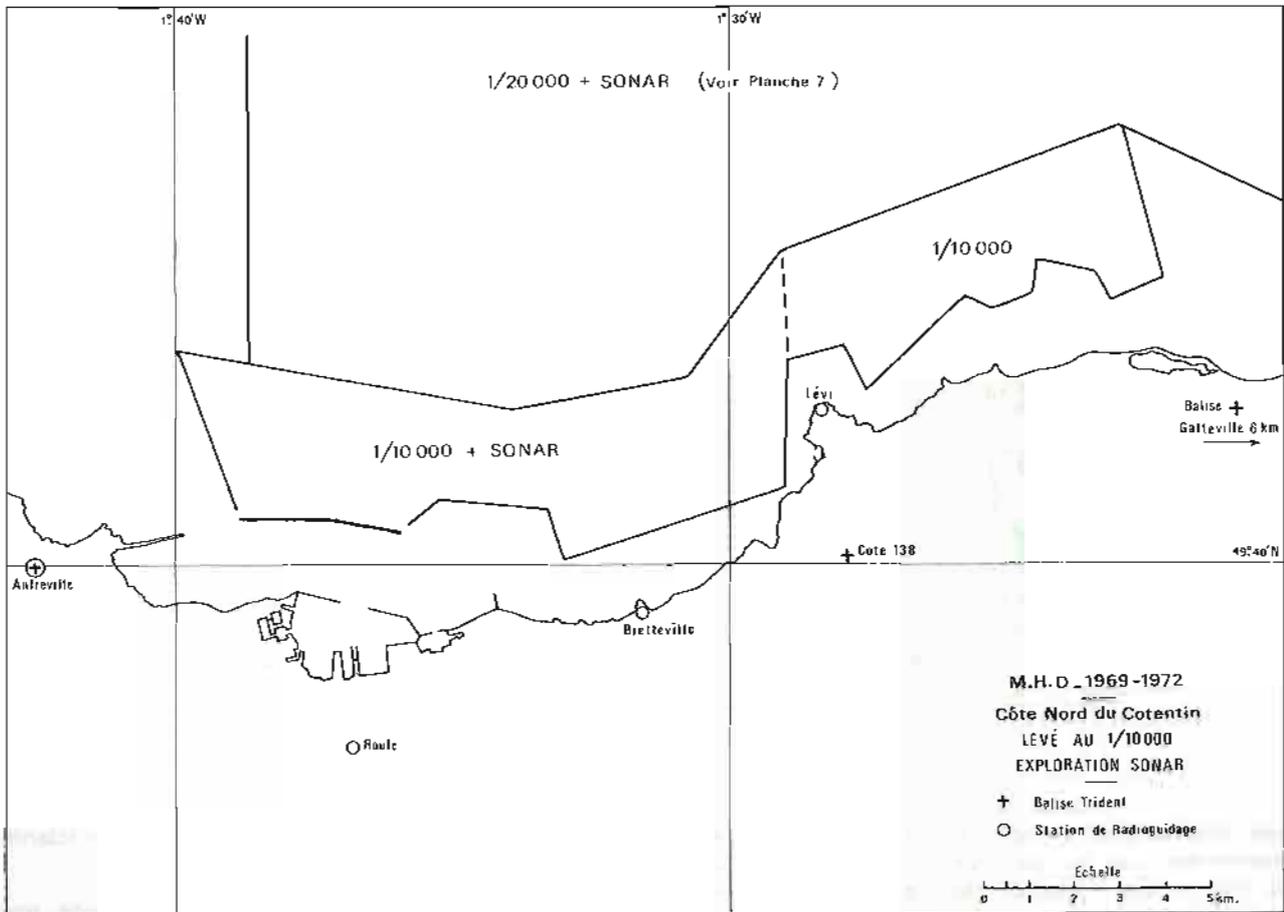


PLANCHE 8

2. LEVÉ BATHYMÉTRIQUE (voir planche 7 et 8)

Il a été effectué à l'échelle de 1/20 000, par *La Recherche* essentiellement au-delà des fonds de 30 m, à l'échelle de 1/10 000 en deçà jusqu'aux fonds de 15 m, par les B.H. 2 *Octant* et *Alidade* ou les vedettes de *La Recherche* suivant les dangers présentés pour la navigation. Les routes suivies ont été des cercles Trident sensiblement perpendiculaires à la côte; pour une partie du levé au 1/10 000 ont dû cependant avoir recours au radioguidage, le Trident étant utilisé ailleurs à une tâche plus urgente. Le seul détail topographique nouveau qui fut découvert et mérite d'être mentionné est une fosse à plus de 100 m dans une région où les fonds portés sur les cartes en service n'excèdent guère 70 m : 50°00'N - 01°21'W.

3. EXPLORATION SONAR (voir planche 7)

Elle a été effectuée dans toute la zone couverte par le levé au 1/20 000 et poussée jusqu'au plus

près de la côte aux abords de Cherbourg, c'est-à-dire à l'Ouest du cap Lévi.

On a exploré en outre, à l'Est du levé, une bande de 4 milles de large sur 10 de long, orientée au 110 et centrée sur le point 49°35'N - 00°56'W. 28 épaves, nouvelles ou anciennes, ont été repérées et une fiche a été établie pour chacune d'entre elles.

Les plongeurs du Premier Groupe de Plongeurs Démineurs en ont exploré une dizaine.

La récapitulation des résultats obtenus est donnée en annexe n° 1 au présent chapitre.

4. TOPOGRAPHIE - TRIANGULATION NATURE DU FOND

La topographie du trait de côte entre la pointe de Saire et le port de Roubaril (Ouest de Gatteville) a été faite à l'aide de photographies aériennes au 1/10 000; en raison de leur très mauvaise qualité (conditions de prises de vues, développement, tirage), la restitution pourrait, par endroits, être incertaine. Les positions de toutes les marques de balise

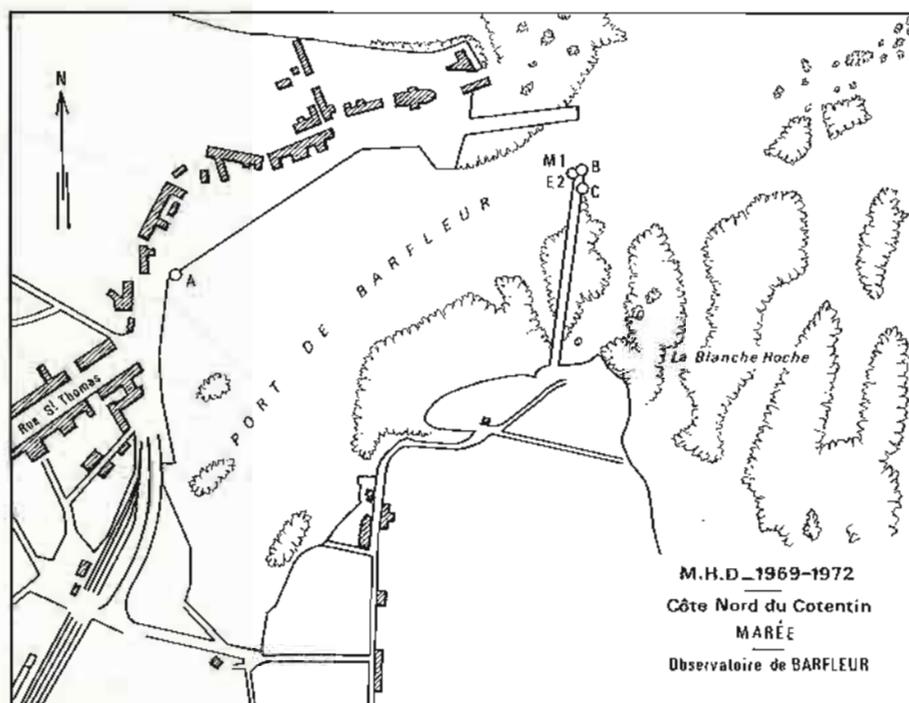


PLANCHE 9

sage situées dans la zone correspondante ont été déterminées. Les autres travaux de triangulation ont été très réduits : position des rares emplacements d'antenne Trident ou de radioguidage ne faisant pas partie de la triangulation de l'I.G.N., ainsi que d'un certain nombre d'amers jugés importants, des châteaux d'eau nouvellement construits en particulier.

Des prélèvements superficiels du fond à la drague Rallier du Baty, à la benne à griffes ou encore au plomb suiffé ont été effectués sur l'ensemble de la zone levée; leur espacement est variable : 1 km dans le levé au 1/10 000, 2 à 4 ailleurs.

5. MARÉE

Les observatoires de référence ont été :

— Barfleur pour la partie du levé située à l'Est d'une ligne passant par le phare de Gatteville et orientée au N.N.E.

— Cherbourg à l'Ouest de cette même ligne.

5.1. Observatoire de Barfleur (voir planche 9).

Un marégraphe Ott R 16 a été installé dans le port de Barfleur aux périodes suivantes :

— 22 septembre - 13 novembre 1969

— 20 mars - 29 juin 1970

— 9 novembre - 16 novembre 1970.

Son fonctionnement a été en général satisfaisant

mais il commençait à assécher pour des coefficients de la marée de l'ordre de 85.

Le zéro de réduction des sondes, adopté par concordance avec Port-en-Bessin où un deuxième marégraphe avait été également installé, est à la cote — 3,92 N.G.F. Ce niveau est rattaché à deux repères matériels.

Nota : Une concordance de vérification avec Cherbourg a fait apparaître une divergence de 6 cm qui, outre des erreurs de mesure, peut être attribuée au fait que les marées aux différents observatoires sont fort dissemblables.

5.2. Observatoire de Cherbourg (planche 10).

La marée à Cherbourg, où le zéro est à la cote — 3,70 N.G.F., a été observée essentiellement à l'aide du marégraphe du Port de Commerce exploité par la Capitainerie du Port.

Pour pallier d'éventuelles défaillances, un marégraphe Ott a été installé dans le puits du marégraphe du Port Militaire. Il a toujours très mal fonctionné, quel que soit l'appareil mis en place, pour des raisons qui n'ont pu être déterminées.

Au Port de Commerce, le zéro des sondes est rattaché à 3 repères N.G.F.

Au Port Militaire, il a fallu mettre de l'ordre dans le nivellement et rattacher à deux repères N.G.F. hors de l'enceinte (rue de la Bucaille et Place Bruhat) un certain nombre de repères situés dans l'enceinte de l'Arsenal.

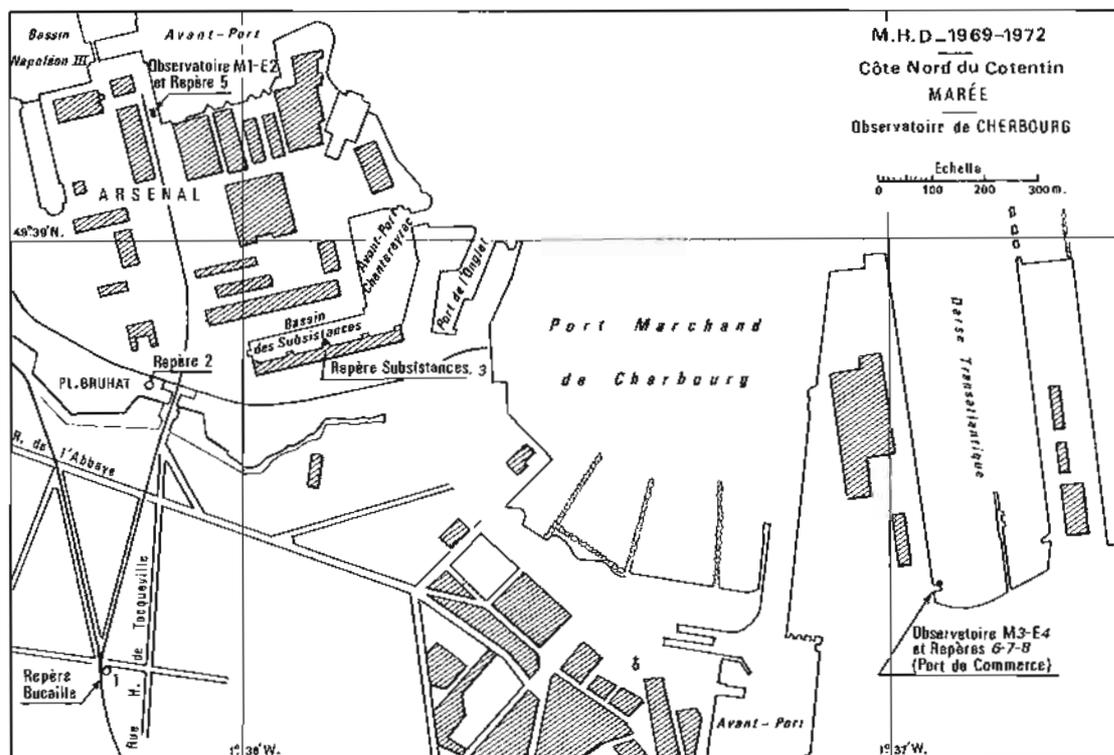


PLANCHE 10

5.3. Repères de nivellement des différents observatoires.

Observatoire de Barfleur.

Désignation	Description	Cote par rapport au NGF	Cote par rapport au zéro des sondes
A	Repère Np K3 m ³ n° 43 (Bassin à flot)	+ 3,31 m	+ 7,28 m
B	Repère SH (extrémité de la jetée est de Barfleur)	+ 5,21 m	+ 9,18 m

Observatoire de Cherbourg (Port de Commerce).

Désignation	Description	Cote par rapport au NGF	Cote par rapport au zéro des sondes
6	Repère NP K3 13 - 16 c (marégraphie de la darse Transatlantique)	+ 3,76 m	+ 7,46 m
7	Repère NP K3 13 - 16 C1 (graduation 7,50 m de l'échelle de marée du marégraphie)	+ 3,795	+ 7,495 m
8	Graduation 0 de l'échelle de marée	- 3,705	- 0,005 m

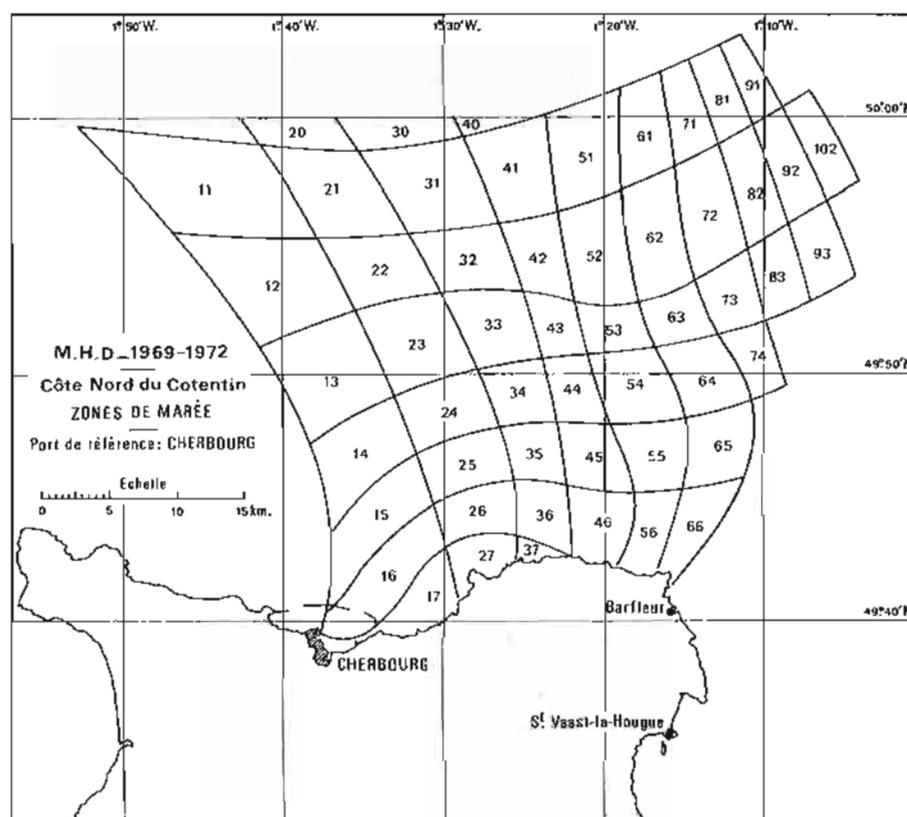
Observatoire de Cherbourg (Port Militaire).

Désignation	Description	Cote par rapport au NGF	Cote par rapport au zéro des sondes
1	Repère NGF NP q 33 – Rue de la Bucaille	+ 9,882 m	+ 13,582 m
2	Repère NGF NP q 35 – Place Bruhat	+ 5,525 m	+ 9,225 m
3	Repère Bourdaloue du Quai des Substances	+ 4,583 m	+ 8,283 m
4	Repère Bourdaloue du Quai Ramazotti	+ 5,175 m	+ 8,875 m
5	Zéro de l'échelle en cuivre du marégraphe de l'Arsenal	- 3,69 m	+ 0,01 m

5.4. Zones de marée (voir planches 11 et 12).

Les sondes ont été réduites d'une marée déduite

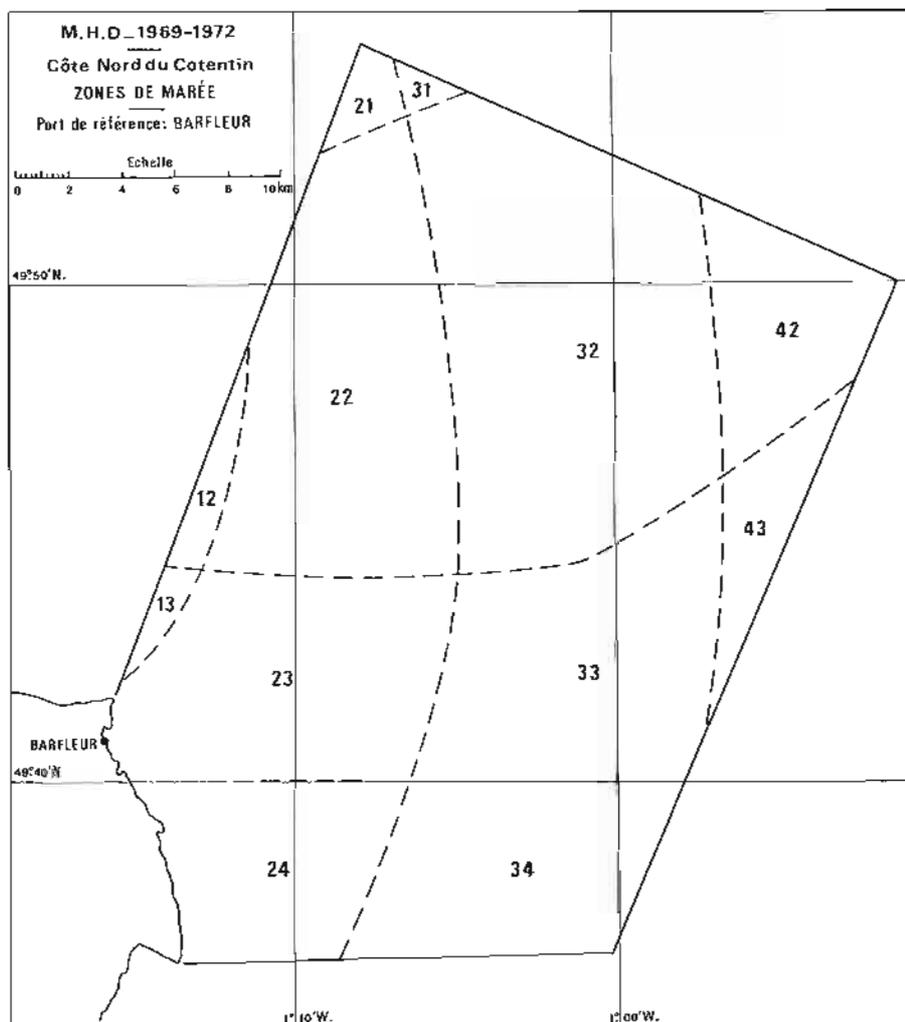
de celle de l'observatoire de référence par la formule générale $H_{ij} \text{ zone } (t) = K_j/H \text{ observatoire } (t - \theta_j)$.
Le découpage des zones et les valeurs des coeffi-



$$h_{ij} \text{ zone } (t) = k_j/H \text{ chercheurs } (t - \theta_j)$$

$K_0 = 0,70$	$K_1 = 0,73$	$K_2 = 0,78$	$K_3 = 0,83$	$K_4 = 0,88$	$K_5 = 0,93$	$K_6 = 0,93$	$K_7 = 1,00$
$\theta_0 = 0$	$\theta_1 = 5 \text{ mn}$	$\theta_2 = 15 \text{ mn}$	$\theta_3 = 25 \text{ mn}$	$\theta_4 = 35 \text{ mn}$	$\theta_5 = 45 \text{ mn}$	$\theta_6 = 55 \text{ mn}$	$\theta_7 = 1 \text{ h } 05 \text{ mn}$
$\theta_8 = 1 \text{ h } 15 \text{ mn}$	$\theta_9 = 1 \text{ h } 25 \text{ mn}$	$\theta_{10} = 1 \text{ h } 35 \text{ mn}$					

PLANCHE 11



$\theta_1 = -15$	$\theta_2 = 0$	$\theta_3 = +15$	$\theta_4 = +30$
------------------	----------------	------------------	------------------

$K_1 = 0,224$	$K_2 = 0,887$	$K_3 = 0,981$	$K_4 = 1,000$
---------------	---------------	---------------	---------------

$$h_{ij} \text{ zone } (t) = k_j H \text{ Barfleur } (t - \theta_j)$$

PLANCHE 12

cients ont été fournies par la Section « Marée-Océanographie » de l'Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Aucune vérification sérieuse n'a pu être effectuée, le fonctionnement des marégraphes à corde vibrante en essai à la Mission étant en général défectueux.

Cependant, une mesure effectuée par 70 m de fond, au point 49°58'N - 01°37'W a pu être en partie exploitée. Les résultats sont relativement concor-

dants, surtout en ce qui concerne le déphasage en temps.

6. COURANTOMÉTRIE

Des mesures de courant ont été effectuées aux points suivants :

n° Fichier Epsom	Position	Dates	Port de Référence
SH 196	49°40'48" N – 01°07'00" W	du 8 au 11/10/1969	Barfleur
SH 197	49°39'35" N – 00°54'40" W	du 22 au 23/10/1969	"
SH 195	49°59'48" N – 01°15'18" W	du 18 au 23/6/1970	"
SH 203	49°40'57" N – 01°31'57" W	du 15 au 19/6/1970	Cherbourg
SH 453	49°50'00" N – 01°37'48" W	du 16 au 18/6/1971	"
SH 454	49°49'42" N – 01°14'00" W	du 22 au 24/6/1971	"
SH 468	49°50'00" N – 01°15'00" W	du 30/6 au 2/7/1971	"

7. DOCUMENTS ÉTABLIS

8 minutes de bathymétrie au 1/20 000.
3 minutes de bathymétrie au 1/10 000.

1 minute de topographie au 1/10 000.
1 minute de nature du fond au 1/20 000.
2 minutes de nature du fond au 1/50 000.
28 fiches d'épaves.

ANNEXE 1 AU CHAPITRE III

CÔTE NORD DU COTENTIN. ÉPAVES. NOUVELLE TRIANGULATION DE FRANCE

Année et n° MHD	n° Fichier	L (N)	G (W)	Cote P Plongeur S Sondeur	Fond m	Réponse Sonar	Repère	Observations
1970 - 1	N 178. ²	49°37'36",4	01°02'45",5	21,0 P	35	Très bonne	6	Caboteur 50 m
1970 - 2	N 179. ¹	49°37'51",6	01°00'27",7	30,0 P	34	Assez bonne	7	Chaland de débarquement 50 m.
1970 - 3	N 179. ^{3A}	49°37'10",2	01°00'08",4	30,0 P	34	Moyenne	7 bis	Gros cylindre L = 15 m -- d = 5 m.
1970 - 4	N 179. ^{1A}	49°37'27",7	01°00'12",1	31,3 P	34	Moyenne	7 ter	Bugalet 15 m
1970 - 5	N 170. ⁴	49°43'46",3	01°06'36",4	33,0 P	44	Très bonne	16	Cargo 70 m
1970 - 6	N 170. ³	49°45'43",2	01°04'33",1	36,5 P	47	Bonne	24	Cargo 50 m
1970 - 7	N 162. ²	49°52'34",9	01°03'25",9	45,7 S	50	Assez bonne	29	Identification incertaine
1970 - 8	N 166	49°41'31",7	00°51'36",3	34,4 S	45	Très bonne	30	
1970 - 9	N 167. ^{2A}	49°47'16",3	01°09'29",6	41,0 S	48	Assez bonne	21	
1970 - 10	N 167. ³	49°48'44",0	01°12'36",9	44,0 S	52	Très bonne	34	
1970 - 11	N 166. ²	49°52'14",8	00°54'33",4	—	—	Bonne	35	Concentration obtenue en dehors des limites du levé -- Epave probable
1970 - 12	N 197. ^{3B}	49°32'14",6	00°49'40",8	20,3 P	24	Bonne	D	Engin de débarquement 40 m
1970 - 13	N 179. ⁹	49°33'12",8	00°58'51",4	20,3 P	25	Assez bonne	A	Concentration bien grou- pée -- Recherche sondeur négative -- Epave cependant probable.
1970 - 14	N 179. ¹⁰	49°32'41",5	00°56'52",3	21,2 S	25	Assez bonne	B	
1970 - 15	N 197. ^{3C}	49°31'17",6	00°46'42",0	—	—	Assez bonne	C	Concentration obtenue à l'extérieur des limites du levé -- Epave probable
1970 - 16	N 179. ^{2B}	49°34'59",2	00°51'27",6	29 S	30	Nulle	H	Epave de très petite dimen- sion d'après la trace au sondeur
1970 - 17	N 179. ⁸	49°33'47",3	00°53'02",1	—	30	Bonne	I	Recherche sondeur expédiée négative -- Epave probable.
1971 - 20		49°58'06",2	01°36'40",8	63,2 S	76	Très bonne	R	
1971 - 21		49°43'01",6	01°34'04",1	36,5 S	43	Bonne	H	
1971 - 22		49°46'10",7	01°25'30",8	40,3 S	49	Très bonne	P	
1971 - 23	N 273-	49°43'05",7	01°35'23",0	28,6 S	39	Assez bonne	C	Explorée par les plongeurs du 1 ^{er} GPD qui confirment l'ordre de grandeur de la cote. Une 2 ^{ème} épave se trouverait à 200 m. à l'Est. Pourrait être la N 272 ou vice-versa. Aucun écho ni trace au sondeur.
1971 - 24	N 277	49°41'13",2	01°39'04",7	13,6 S		22	2	Epave ancienne, explorée par 1 ^{er} GPD qui confirme l'ordre de grandeur de la cote (12 m).
1971 - 25	N 276	49°42'00",8	01°34'58",2	16,6 S	26	Médiocre	1	Epave à moitié détruite explorée par les plon- geurs du 1 ^{er} GPD qui l'ont cotée à 19 m (tête non trouvée par manque de visibilité).

ANNEXE 1 AU CHAPITRE III

CÔTE NORD DU COTENTIN. ÉPAVES. NOUVELLE TRIANGULATION DE FRANCE (suite)

Année et n° MHD	n° Fichier	L (N)	G (W)	Cote P Plongeur S Sondeur	Fond m	Réponse Sonar	Repère	Observations
1971 - 26	N 268x ¹	49° 45' 08",3	01° 36' 38",9	33 P	53	Assez bonne	Q	Très grosse épave explorée par les plongeurs du 1 ^{er} GPD – Paquebot ? 200 m
1971 - 27		49° 46' 07",4	01° 14' 45",6	47,4 S	57	Moyenne	S	
1971 - 28		49° 49' 38",5	01° 15' 42",7	44,7 S	55	Mauvaise	T	
1971 - 29		49° 49' 43",8	01° 33' 16",2	54,0 S	58	Nulle	V	
1971 - 30		49° 50' 04",4	01° 32' 41",8	—	57	Assez bonne	10 R	Epave de très petite dimension d'après la trace au sondeur Recherche interrompue en raison conditions météorologiques – Epave probable

Nota. — 1) Le numéro MHD donné à courir chaque année à l'établissement de la fiche.

2) Repère (lettre ou chiffre) donnée au moment des travaux et porté sur les documents intermédiaires.

ANNEXE 2 AU CHAPITRE III

**COORDONNÉES DES POINTS REPÉRÉS.
LAMBERT I - NOUVELLE TRIANGULATION DE FRANCE**

Désignation du point	X	Y	L (N)	G (W)
Antenne gonio du C.R.O.S.S.M.A.	293 867,6	229 193,8	49° 41' 05",841	01° 54' 27",105
<i>Blockaus Anfreville</i>				
1) Patte fiche scellée sur la terrasse	308 181,4	226 087,3	49° 39' 50",906	01° 42' 25",698
2) Angle Est de la cabane (et antenne Trident)	308 183,5	226 090,7	49° 39' 51",019	01° 42' 25",602
Forme du Homet — Repère en bronze scellé dans une borne en ciment	313 715,0	225 047,3	49° 39' 26",806	01° 37' 47",395
Château d'eau de la Zup d'Octeville : Axe **	314 057,1	221 289,0	49° 37' 25",958	01° 37' 20",517
Digue du Homet : repère en bronze scellé dans une borne en ciment	314 239,0	225 200,7	49° 39' 32",656	01° 37' 21",705
Château d'eau de la Glacerie : axe ***	315 685,9	220 493,0	49° 37' 02",924	01° 35' 57",397
<i>Blockaus Bretteville</i>				
1) Patte fiche scellée sur la terrasse	320 407,9	224 146,6	49° 39' 08",956	01° 32' 11",805
2) Tube en fer scellé sur la terrasse	320 409,2	224 146,4	49° 39' 08",952	01° 32' 11",732
Sémaphore du cap Levi : mât axe **	325 488,3	228 455,4	49° 41' 36",634	01° 28' 09",681
Blockaus cote 138 : douille en cuivre scellée sur la terrasse	325 582,15	225 669,9	49° 40' 06",733	01° 27' 57",991
Château d'eau du Mont Etolan : axe ***	331 317,6	223 286,5	49° 38' 58",943	01° 23' 06",423
Château d'eau de Saint-Floxel : axe ***	332 807,5	205 439,0	49° 29' 24",255	01° 21' 08",681
Château d'eau de Morsaline : axe ***	334 412,5	214 002,2	49° 34' 03",672	01° 20' 09",756
Château d'eau de la Pareillerie **	338 672,1	222 715,0	49° 38' 52",060	01° 16' 58",823
Balise Houmaisel : axe *	339 250,4	228 055,9	49° 41' 45",631	01° 16' 42",799
Château d'eau de Barfleur : axe	339 938,65	224 985,1	49° 40' 07",427	01° 16' 01",166
Sémaphore de Gatteville : Mât axe ***	340 256,3	228 119,7	49° 41' 49",273	01° 15' 52",812
Feu postérieur alignement de Barfleur : axe **	340 314,5	224 870,15	49° 40' 04",291	01° 15' 42",192
Feu antérieur alignement de Barfleur : axe **	340 508,1	225 083,55	49° 40' 11",490	01° 15' 33",032
Feu vert ouest Barfleur *	340 566,2	225 338,15	49° 40' 19",812	01° 15' 30",744
Balise du Rocher Rond à Barfleur : axe *	340 676,3	225 384,9	49° 40' 21",494	01° 15' 25",369
Espar du Canot de Sauvetage Barfleur : axe *	340 614,1	225 347,4	49° 40' 20",185	01° 15' 28",379
Espar La Janette : axe *	340 676,65	228 205,15	49° 41' 52",685	01° 15' 32",063
Feu rouge Barfleur : axe *	340 686,85	225 324,45	49° 40' 19",556	01° 15' 24",700
Balise de La Raie : axe*.	341 102,75	225 590,15	49° 40' 28",788	01° 15' 04",611
Balise de la Grosse Raie : axe *	340 936,5	225 430,6	49° 40' 23",373	01° 15' 12",515
Balise Fourquoio	341 053,05	225 280,50	49° 40' 18",699	01° 15' 06",351
Espar Le Moulard *	342 426,8	223 458,2	49° 39' 21",887	01° 13' 53",606
Château d'eau Les Veys ***	345 746,4	184 718,6	49° 18' 34",210	01° 09' 38",628

Nota. — Valeur comme amer :

**** amer remarquable,

*** amer important,

** amer moyennement visible,

* amer peu visible.

CHAPITRE IV

TRAVAUX EN IROISE (voir planche 13)

1. GÉNÉRALITÉS - LOCALISATION

Les travaux effectués en Iroise ont consisté en une exploration Sonar de vérification dans une zone déjà hydrographiée.

Ils se sont déroulés à 2 époques : septembre, octobre 1970 et mars 1971.

La localisation a été assurée par le radiolocalisateur Trident dont les balises occupaient les positions suivantes (Lambert II) :

- Pointe du Raz (sémaphore)
X = 73 564,1 Y = 361 421,0
- Cap de la Chèvre (Toran M.H.C.F.)
X = 88 035,9 Y = 375 491,5
- Trézien (phare)
X = 73 935,6 Y = 403 343,6

2. EXPLORATION SONAR - BATHYMÉTRIE

En octobre 1970, on a effectué une exploration Sonar à deux réseaux perpendiculaires avec profils espacés de 1 000 m : Routes N.S. et E.W. Les conditions bathythermiques ayant été en général mauvaises, on a, en mars 1971, exécuté un troisième réseau (cercles Trident centrés sur le phare de Trézien). Les conditions bathythermiques ont alors été excellentes.

Le sondeur Eiac de *La Recherche* était en per-

manence en route et on a obtenu ainsi un levé bathymétrique avec une densité correspondant à un levé au 1/50 000 en 1970, au 1/100 000 en 1971. Seuls ont été dépouillés et rédigés les enregistrements correspondant à des zones au relief irrégulier.

3. RECHERCHES DE CONCENTRATIONS

Les concentrations obtenues en juxtaposant les résultats des deux explorations Sonar ont été étudiées au sondeur et ont permis de découvrir, outre 4 épaves, un certain nombre de roches soit, complètement isolées dans des fonds réguliers, soit appartenant à des ensembles fort complexes mais situés le plus souvent dans des zones relativement régulières. Un exemple caractéristique est donné par une roche qui a été trouvée dans l'W.N.W. et à 6,5 milles de la bouée d'Ar-Men (49°05', 5 N - 05°08', 6 W). Les fonds voisins sont rigoureusement plats et de l'ordre de 95 m. Un levé régulier, effectué en 1966 par la M.H.C.F. avec un écartement des routes de 300 m, ne laisse apparaître aucune remontée du fond. Or, l'étude d'une concentration bien groupée a fait découvrir un haut-fond montant de plus de 30 m au-dessus du fond et d'une largeur à la base ne dépassant pas 200 m. La reproduction de la bande de sonde jointe (planche 14) représente deux passages espacés de 100 m; sur le premier on ne détecte qu'une très légère irrégularité, sur le deuxième la remontée atteint déjà 25 m.

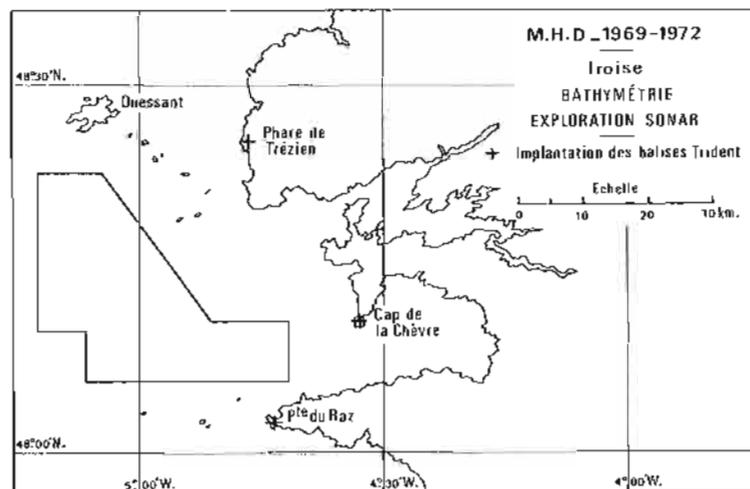


PLANCHE 13

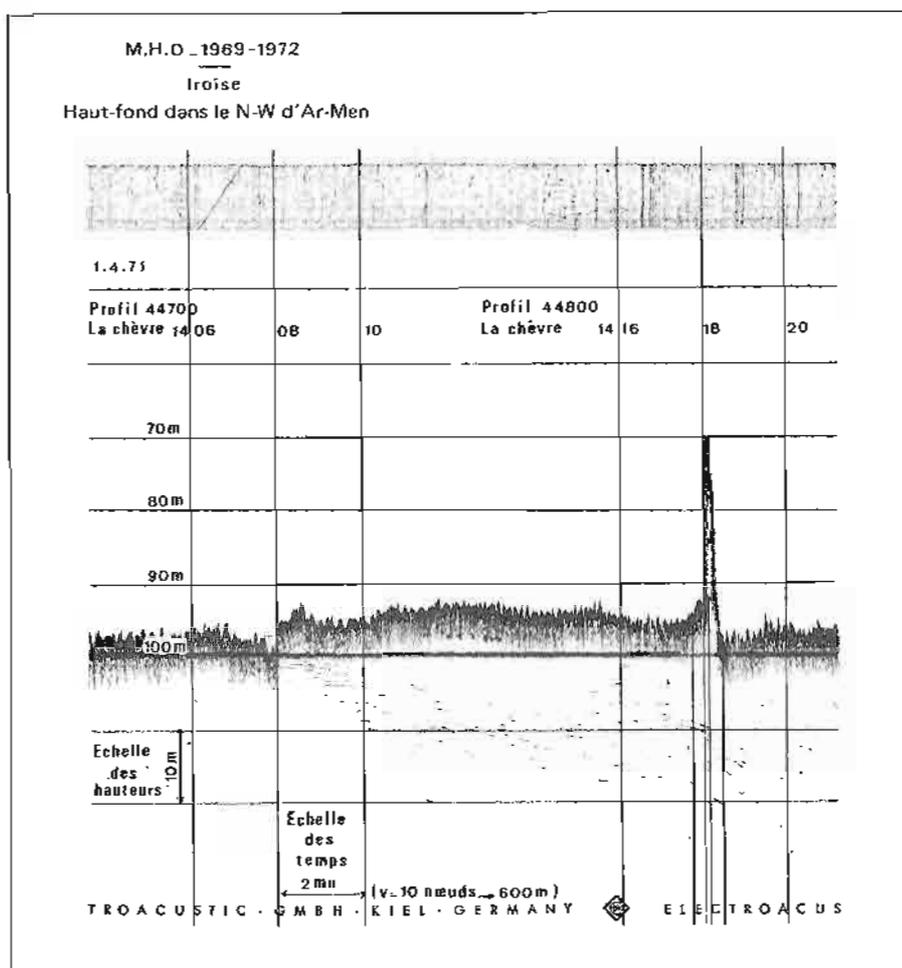


PLANCHE 14

4. MARÉE

Les sondes obtenues ont été réduites de la marée observée à Camaret pour la zone située au Nord du parallèle du cap de la Chèvre. Au Sud de ce même parallèle, on a utilisé la formule de réduction suivante :

$$H \text{ zone } (t) = -0,08 \text{ m} + 0,93 H \text{ Camaret } (t + 7 \text{ mn}).$$

5. DOCUMENTS ÉTABLIS

- 1 minute des concentrations d'échos au 1/50 000 (1970)
- 1 minute des concentrations d'échos au 1/50 000 (1970-1971)
- 1 minute des reliefs au 1/50 000 (1970)
- 1 minute des reliefs au 1/50 000 (1970-1971)
- 5 fiches d'épaves.

ANNEXE AU CHAPITRE IV
ÉPAVES. N.T.F. (BRETAGNE 61)

N° MHD	Repère MHD	L (N)	G (W)	Cote	Fond	Réponse Sonar	Observations
1971 - 1	X	48° 15' 04",6	05° 12' 11",6	96	105	Bonne	Relief environnant tourmenté Relief environnant relativement tourmenté Relief très tourmenté. Fonds compris entre 55 m et 70 m. Les échos sur l'épave sont noyés par ceux donnés par le relief. Très belle épave d'après la trace au sondeur.
2	E	48° 16' 14",2	05° 09' 18",9	89	96	Très bonne	
3	9	48° 13' 15",7	05° 07' 06",4	88	93	Médiocre	
4	D	48° 15' 35",8	05° 06' 10",8	74,5	84	Assez bonne	
5	Q	48° 13' 07",5	05° 01' 07",6	51,5	67	Médiocre	

CHAPITRE V

TRAVAUX A BELLE-ILE

1. NATURE DES TRAVAUX - LOCALISATION

(voir planche 15)

Ces travaux, destinés à accroître la sécurité de la navigation sous-marine à une dizaine de mètres

du fond, dans une zone de deux milles de côté et par des fonds de 35 à 45 m, ont comporté une exploration Sonar, un levé bathymétrique à l'échelle de 1/5 000, des prises de nature du fond. Commencés le 13 octobre 1970, ils ont été achevés le 30, une opération importante, dragage à 1 ou 2 m du fond

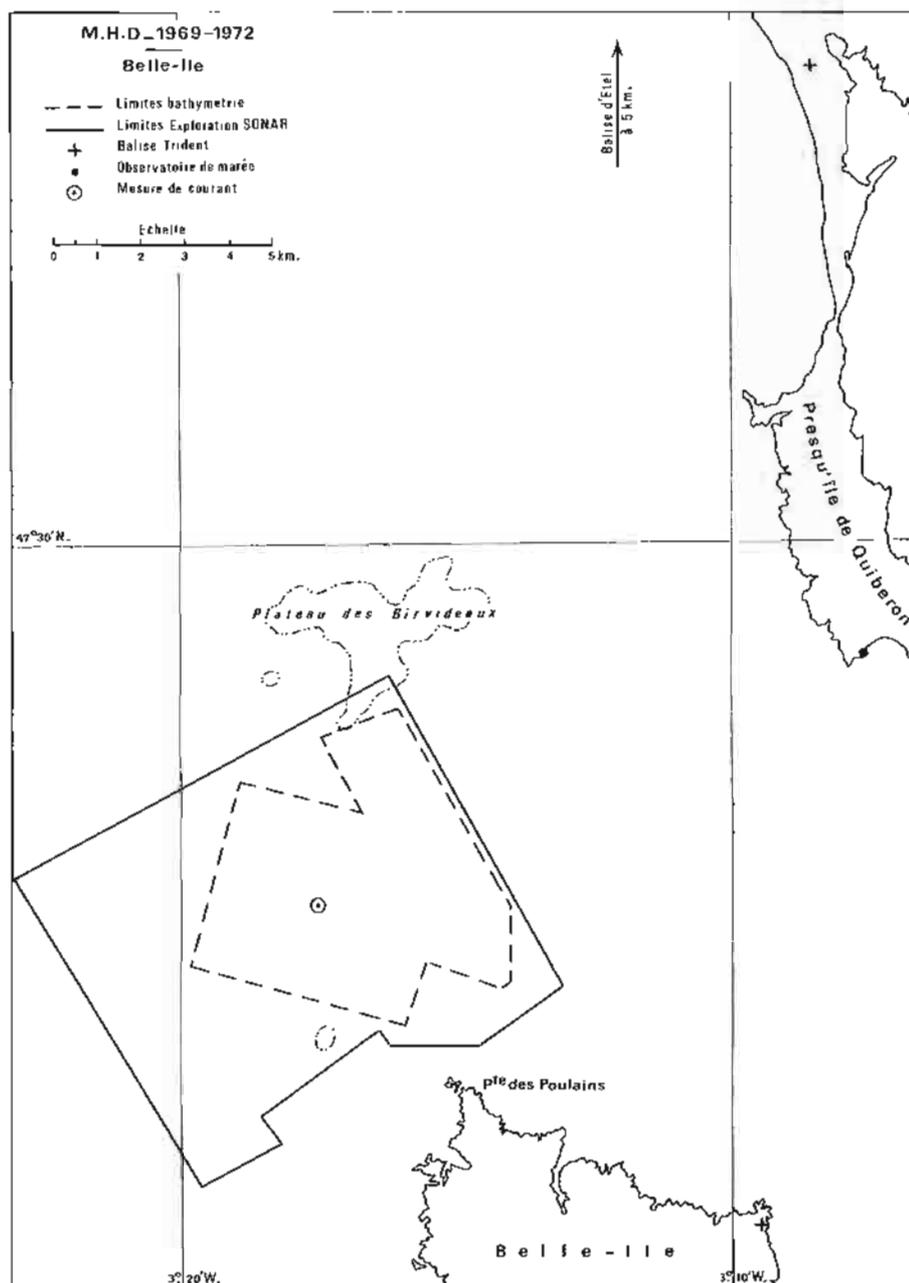


PLANCHE 15

n'ayant pu être effectuée par suite d'une avarie survenue au B.H. 2 *Alidade*.

La localisation a été assurée par le radiocalisateur Trident dont les trois balises occupaient les positions suivantes (Lambert II) :

	X	Y
— Château d'eau d'Étel	184 165,4	309 191,7
— Tour de Quiberon	187 787,6	293 647,0
— Immeuble à Belle-Ile	187 370,4	276 650,2

2. TRAVAUX EFFECTUÉS (voir planche 15)

Les profils du levé bathymétrique sont des cercles de distance centrés sur Quiberon et espacés de 50 m. Ils ont été exécutés par *La Recherche* et les B.H. 2 *Octant* et *Alidade*. Les limites de la zone approximativement définies par les autorités maritimes locales, ont été fixées après examen de la minute au 1/20 000 d'un levé 1966 et des enregistre-

ments au sondeur obtenus au cours de l'exploration sonar préalablement effectuée.

La rédaction a été faite à l'échelle de 1/10 000, de manière à représenter l'ensemble de la zone sur un document unique.

L'exploration Sonar, encadrant largement le levé bathymétrique, a été conduite suivant les procédures habituelles. Cependant, l'espacement des routes a été réduit à 500 m de manière à accroître les recouvrements et donc la sécurité. Aucune obstruction n'a été détectée.

— La connaissance de la zone a été complétée par des prises de la nature superficielle du fond suivant une maille de 700 m de côté.

— Les opérations de triangulation nécessaires aux travaux ont été extrêmement réduites, les antennes Trident ayant été placées à proximité immédiate de points de la triangulation de l'I.G.N.

On a cependant placé, dans la région d'Étel, deux amers importants dont les coordonnées sont données ci-dessous (Lambert II, Bretagne 61).

	X	Y	L	G
Nouveau château d'eau d'Étel.	184 931,65	309 964,65	47° 39' 28",063	03° 11' 33",764
Groupes de 4 pylônes :				
1)	180 304,2	311 985,2	47° 40' 22",729	03° 15' 21",849
2)	180 475	315 055	47° 42' 02",268	03° 15' 24",146
3)	180 546	311 868	47° 40' 19",501	03° 15' 09",888
4)	180 435	311 823	47° 40' 17",792	03° 15' 15",042

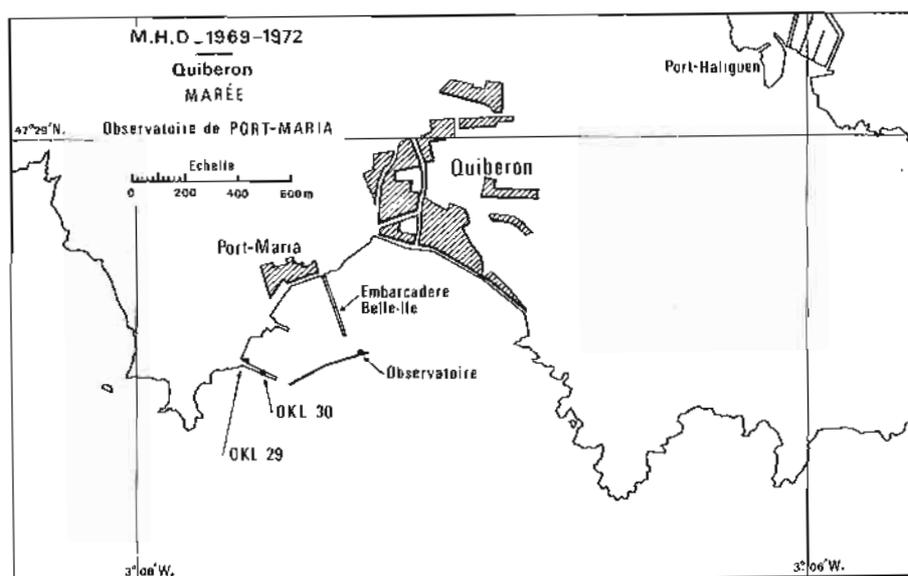


PLANCHE 16

3. MARÉE - COURANTS

a) Marée (voir planche 16).

La marée a été observée pendant toute la durée des travaux à Port-Maria où on avait installé un

marégraphe Ott et à Port-Tudy où se trouve un marégraphe permanent.

Les sondes ont été réduites de la marée observée à Port-Maria. Le zéro des sondes est à la cote — 3,23 N.G.F. (Chartier, 1966 et concordance de vérification avec Port-Tudy). Il est rattaché à deux repères matériels.

Désignation des repères	Description et emplacements	Cote par rapport au NGF	Cote par rapport au zéro des sondes
A	Repère NGF OKL n° 29 (enracinement de la jetée)	7,064 m	10,29 m
B	Repère NGF OKL n° 30 (milieu de la jetée)	5,963 m	9,19 m

b) Courants.

Deux mesures de courant à l'immersion de 10 m ont été effectuées au centre de la zone (dans le 310 et à 2,7 milles de la pointe des Poulains), l'une en morte-eau, l'autre en vive-eau.

4. DOCUMENTS ÉTABLIS

- 1 minute de bathymétrie au 1/10 000.
- 1 minute des échos Sonar et de la nature du fond au 1/10 000.

CHAPITRE VI

TRAVAUX EN BAIE DE SEINE

(voir planche 17)

1. NATURE DES TRAVAUX

Les travaux demandés par le port autonome du Havre avaient pour objet, dans une zone donnée, d'assurer un plafond de 22 m de manière à permettre l'évolution de gros pétroliers procédant à des manœuvres de simulation d'accostage à un appontement matérialisé par deux bouées.

Commencés le 1^{er} avril 1971, ils ont comporté deux phases, la première exécutée par *La Recherche* et ses vedettes, la deuxième par les B.H. 2 *Octant* et *Alidade*.

2. LOCALISATION

La localisation a été assurée :

— Pour la première phase, par la chaîne de radiolocalisation Trident de la M.H.D., les balises occupant les positions suivantes (Lambert I) :

	X	Y
A) Château d'eau de Ver ou Sémaphore de Villerville	391 353,9	185 761,9
B) Phare de La Hève	435 851,6	203 852,8
C) Phare d'Antifer	443 355,6	222 673,4

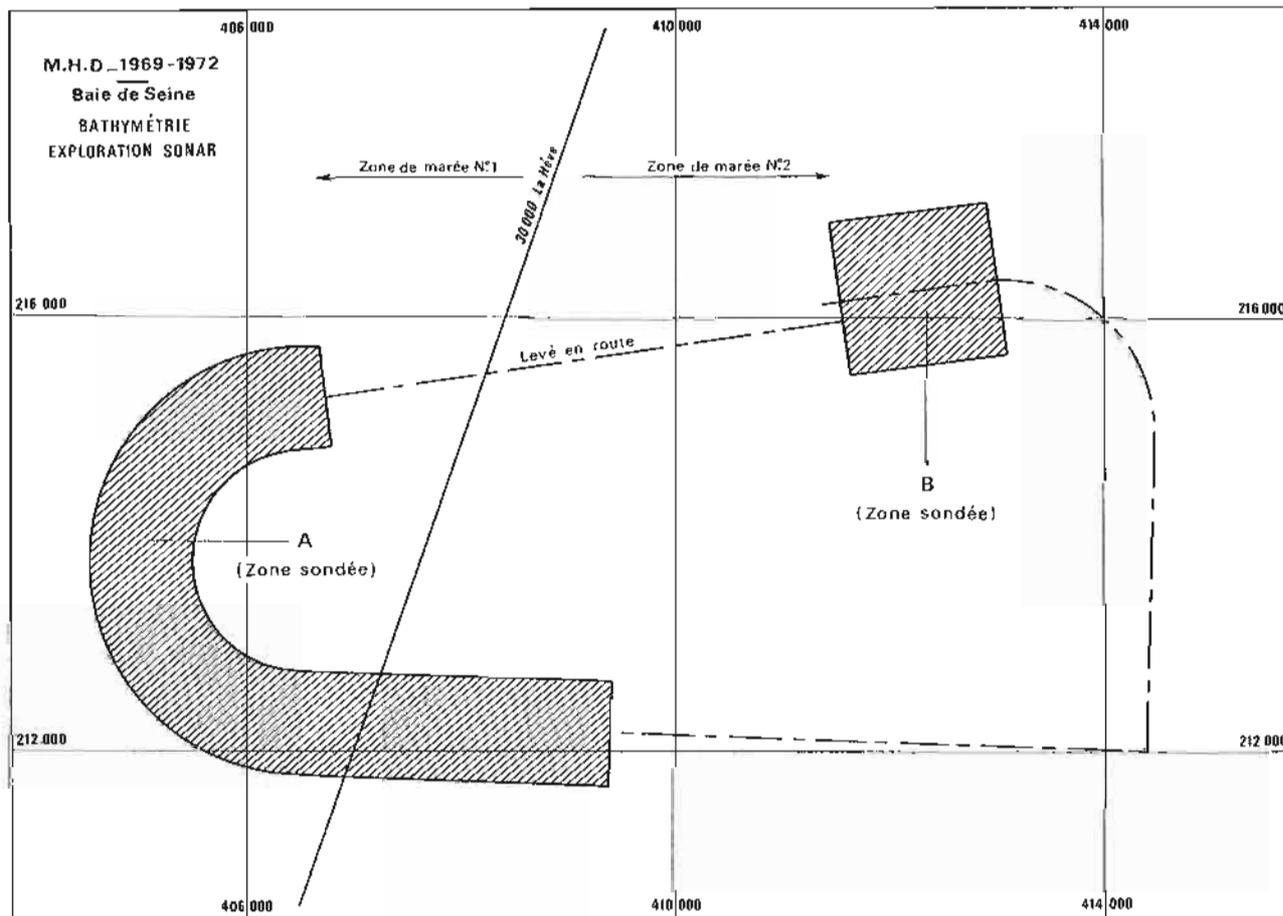


PLANCHE 17

— Pour la deuxième phase, par un lieu Trident (balise de La Hève) et les deux lieux Toran de la

chaîne Baie de Seine nouvellement implantée et dont les caractéristiques sont données ci-dessous.

Réseau A – Gatteville-Ouistreham P_{Ho} = 500

		X	Y	Fréquence
Foyer A	Gatteville	340 231,40	228 068,30	1884,000 KHZ
Foyer A'	Ouistreham	412 014,8	178 755,8	1884,080
Référence	Antifer	443 362,2	222 671,0	

Réseau B – Antifer-Ver – P_{Ho} = 5000

		X	Y	Fréquence
Foyer B	Antifer	443 362,2	222 671,0	1816,000
Foyer B'	Ver	392 565,0	186 164,7	1816,200
Référence	Gatteville	340 231,4	228 068,3	

RO = 109 152 33,0

C = 299 650,0 km/s

L'adjonction d'un lieu parfaitement sûr (Trident) au système Toran s'est avérée particulièrement efficace. En effet, le lever de doute, en début et fin de séance, se faisait d'une manière simple et commode par un passage du sondeur sur une épave connue, en suivant un cercle Trident. De plus, la construction en cours de séance permettait de déceler, d'une manière certaine et immédiate, d'éventuels sauts d'hyperbole.

3. TRAVAUX DE LA PREMIÈRE PHASE

3.1. Levé bathymétrique.

Le levé bathymétrique des zones A et B hachurées de la planche 17 a été exécuté à l'échelle de 1/5 000 en suivant des cercles Trident, centrés sur La Hève pour la zone A, sur Antifer pour la zone B. Ce travail a été effectué par *La Recherche* ou par ses vedettes en fonction de l'état de la mer et des portées Trident. Les bandes d'évolution entre ces deux zones ont été sondées par *La Recherche* : un passage sur la ligne médiane, deux passages de chaque bord à l'espacement de 50 m. Ces routes ont été suivies au compas, l'écart à la route moyenne étant en général de l'ordre de 20 m, soit près de 50 % de l'espacement théorique.

3.2. Exploration Sonar.

Une exploration Sonar effectuée suivant les méthodes habituelles ne fit apparaître aucune obstruction à l'intérieur de la zone.

3.3. Comparaison Trident-Toran.

Un récepteur Toran du Port Autonome du Havre

ayant été installé sur *La Recherche* dès le début des travaux, on a effectué un certain nombre d'observations simultanées Trident-Toran, soit bâtiment stoppé (ou mouillé), soit bâtiment en route ; on a pu ainsi déterminer, en première approximation, les corrections à apporter aux lectures Toran en vue d'une exploitation immédiate à l'occasion des travaux effectués par les B.H. 2 *Octant* et *Alidade*.

L'ensemble des observations (160 points) exploitées ultérieurement par l'E.P.S.H.O.M., donna des résultats parfaitement cohérents, les corrections moyennes à apporter étant de — 0,22 pour le réseau A, + 0,57 pour le réseau B. Il y a là un moyen fort commode d'étendre plus au large que ne le permettent les procédés optiques, les étalonnages des chaînes de radiolocalisation Toran (ou équivalentes).

4. DEUXIÈME PHASE

Des échos douteux étant apparus en très grand nombre sur les bandes de sonde, il parut nécessaire de lever toute ambiguïté avant de déclarer la zone saine : parasites ou obstructions ? En général, avec un peu d'expérience et « de flair », on arrive à faire la distinction. Au Havre, le phénomène a pris une ampleur inaccoutumée et la trace sur la bande de sonde avait, dans de nombreux cas, l'aspect caractéristique d'une obstruction isolée. Deux considérations principales pouvaient laisser supposer qu'il s'agissait le plus souvent de parasites : le phénomène ne se produisait que de jour, jamais de nuit ; l'exploration Sonar n'avait donné aucun résultat. Encore fallait-il s'assurer qu'aucun de ces échos n'était dû réellement à une obstruction. Après un examen critique serré des bandes de sondes, on retint 30 échos qui furent recherchés avec soin par les B.H. 2 *Octant* et *Alidade* au cours d'une campagne de plus d'un mois. Ces recherches confirmèrent avec certes les réserves d'usage, qu'il s'agissait partout de parasites.

5. MARÉE

Les sondes ont été réduites d'une marée déduite de celle observée au Havre par la formule :

$$H \text{ zone } (t) = K H \text{ le Havre } (t + \theta) :$$

— A l'Ouest du profil 30 000 La Hève

$$K1 = 0,93,81 = + 10 \text{ minutes}$$

— A l'Est du profil 30 000 La Hève

$$K2 = 0,095,82 = + 5 \text{ minutes}$$

Les enregistrements proviennent du marégraphe installé à l'entrée du port du Havre et exploité par les Ponts et Chaussées. Son zéro, confondu avec celui de réduction des sondes, est à la cote — 4,72 N.G.F.

6. DOCUMENTS ÉTABLIS

2 minutes de bathymétrie au 1/5 000.

1 minute de choix de sonde au 1/10 000.

CHAPITRE VII

TRAVAUX DIVERS

1. TRAVAUX DEVANT BISCAROSSE

Les travaux devant Biscarosse ont comporté un levé bathymétrique à l'échelle de 1/25 000 et une

exploration Sonar à l'intérieur d'une bande Nord-Sud de 12 milles de long sur 1,5 de large centrée sur le point 44°04' N - 01°29' W.

Les trois obstructions suivantes ont été découvertes :

	Position Lambert III		Cote	Hauteur au-dessus du fond	Observations
	X	Y			
1	295 020	237 540	61,3	7 m	Epave certaine.
2	294 480	240 650	60,6	9 m	Epave certaine.
3	295 620	242 120	66,5	2 m	Nature indéterminée épave cependant probable.

Les sondes ont été réduites d'une marée déduite de celle observée à Socoa par la formule : $H \text{ zone } (t) = 0,05 \text{ m} + 1,08 \text{ H Socoa } (t)$. Le zéro de réduction à Socoa est à la cote - 2,2 N.G.F.. Il a été établi une minute de bathymétrie au 1/20 000.

à l'Est par des fonds de 40 à 50 m. Des recherches poussées ont fait conclure, sans ambiguïté aucune, à la présence d'un parasite au-dessus d'une tête rocheuse.

La localisation pour tous ces travaux a été assurée par un lieu Trident (balise du sémaphore de la pointe du Raz) et deux lieux Toran des réseaux de la M.H.A. alors en fonction.

2. RECHERCHE DU HAUT-FOND DE LA « CHIMÈRE »

Le haut-fond de la *Chimère*, de cote 28 m, est situé à l'Ouest de la chaussée de Sein par des fonds environnants de l'ordre de 70 m (48°01'3 N - 03°17'3 W).

Il a été trouvé par le bâtiment hydrographique *Amiral Mouchez* en navigation. Sa position est très approximative et l'examen de la bande de sonde peut faire douter de son existence.

Une recherche effectuée par la M.H.C.F. en 1966 n'avait rien donné. Il fut demandé à la M.H.D. d'essayer de lever le doute.

A cet effet, pendant trois journées consécutives, on a effectué une exploration Sonar dans un rayon de 3 milles autour de la position présumée, suivie de recherches au sondeur sur les quelques rares groupements de deux à trois échos, les têtes obtenues au sondeur au cours de l'exploration ainsi que celles figurant sur la minute du levé de la M.H.C.F. en 1966. Le résultat de tous ces travaux fut négatif. Personnellement, j'estime que ce haut-fond n'existe pas, tout au moins à la position indiquée. Il est vraisemblable que l'écho obtenu par l'*Amiral Mouchez* provient d'un parasite (banc de poissons) sur une tête de roche à environ 40 m. A l'appui de cette hypothèse, j'indique qu'on a cru, un moment, avoir trouvé le haut-fond recherché, mais nettement plus

3. TRAVAUX DANS LE PORT DE CHERBOURG

Des travaux de détail ont été effectués dans le port de Cherbourg :

— Levé au 1/5 000 de l'avant-port et du bassin Napoléon.

— Levé au 1/1 000 en petite rade dans l'axe de la passe d'entrée dans l'avant-port.

— Recherche par plongeurs de quelques obstructions.

Ces travaux ont montré que les sondeurs à ultrasons sont difficilement utilisables pour effectuer des travaux de détail à l'intérieur de zones portuaires réduites : échos latéraux sur les murs des quais, parasites de toutes sortes, innombrables petites obstructions (ancres, chaînes, fûts, dépôts d'escarbilles, détritiques divers).

Il ne faut pas espérer qu'un levé, si serré soit-il, permette de dresser la carte topographique de détail. Il ne peut donner qu'une indication, précieuse certes, mais absolument incomplète sur le plafond moyen du bassin exploré. Un dragage hydrographique étant également difficile à réaliser, seule une exploration par plongeurs, systématique et conduite avec rigueur, peut apporter des résultats sûrs.

NOTE TECHNIQUE N° 1

MARÉGRAPHE AUTONOME A CORDE VIBRANTE (*)

I. GÉNÉRALITÉS

La M.H.D. a reçu au mois d'octobre 1969, afin d'en effectuer les essais à la mer, deux marégraphes à corde vibrante fabriqués par la société Telemac suivant des spécifications techniques du S.H.O.M. Le principe du marégraphe à corde vibrante est schématiquement très simple.

Les variations de pression appliquées à une membrane manométrique font varier la tension d'une corde vibrante et en conséquence sa fréquence de vibration. Il suffit donc de traduire cette vibration mécanique en signal électrique dont il est relativement aisé de mesurer la fréquence qui est une fonction de la pression exercée sur la membrane.

II. DESCRIPTION

L'appareil se présente sous la forme d'un cylindre, avec, à chaque extrémité, un couvercle assurant une fermeture étanche. L'un des fonds sert de support au capteur proprement dit ; l'intérieur du cylindre est entièrement réservé à l'appareillage électronique.

1. Prise d'eau.

La membrane élastique du capteur n'est pas au contact direct de l'eau de mer. Un liquide tampon, — en général de l'eau douce ou de l'huile — assure la transmission de la pression. Ce liquide est contenu dans un sac plastique, très souple, protégé des chocs extérieurs par un capot robuste percé de nombreux trous.

2. Capteur.

C'est un manomètre à corde vibrante dont une extrémité est fixée au centre de la membrane élastique sur laquelle s'appuie le liquide tampon. La déflexion plus ou moins grande de la membrane, suivant la hauteur d'eau, entraîne une variation de fréquence de la corde vibrante.

(*) Dérivé du marégraphe de grand fond : voir article « Marégraphes de grandes profondeurs », par M. Eyriès (*Cahiers Océanographiques* XX, 5, mai 1968, pp. 355-368).

— Corde vibrante en acier spécial à limite élastique très élevée (rupture à 300 kg/mm²).

— Electro-aimants à haut rendement pour l'entretien automatique de la vibration de la corde.

Le capteur est en acier — cadmié et bichromaté — de sorte que les coefficients de dilatation de la corde et du bâti étant sensiblement les mêmes, l'influence des variations de température reste négligeable. Il est protégé par un capot pour le mettre à l'abri des chocs et des poussières. Une prise à 4 broches permet le raccordement au cordon en provenance du bloc électronique.

3. Conteneur.

Il est constitué d'un cylindre en acier terminé à chaque extrémité par une colerette permettant le boulonnage des fonds. L'étanchéité est assurée par des joints toriques en caoutchouc. L'ensemble a supporté une pression extérieure, lors des essais, de 40 bars.

L'intérieur est recouvert d'une peinture phosphatée noire.

L'extérieur est protégé de la corrosion au moyen d'une peinture marine anti-rouille.

4. Ensemble électronique.

L'ensemble électronique se compose :

- a) d'un bloc chassis en armodur noir (PVC) ;
- b) de 18 plaquettes enfichables comportant tous les circuits électroniques ;
- c) d'une base de temps Golay - GIH6.B ;
- d) d'un flash électronique ;
- e) d'un bloc compteur (compteur de mesure et compteur horaire) ;
- f) d'une caméra avec son moteur pas à pas.

III. FONCTIONNEMENT

La vibration de la corde du capteur de pression est transformée en signal alternatif par un bobinage (bobine d'écoute). Ce signal est appliqué à l'entrée d'un amplificateur dont le but est de maintenir la corde de vibration, ceci en appliquant à un autre bobinage (bobine d'entretien) une partie du signal amplifié.

L'autre partie du signal amplifié, après mise en forme et passage par une chaîne de division vient attaquer un moteur pas à pas qui entraîne un compteur de mesure. Un flash électronique déclenché à intervalles réguliers et précis par une base de temps à quartz, permet des prises de vues photographiques du compteur de mesure ainsi que d'un compteur de temps. Entre deux déclenchements du flash, cette même base de temps fait avancer le film de la caméra et incrémenter de une unité le compteur de temps.

Le système se comporte donc comme un périodimètre. En effet, la différence des états du compteur entre deux prises de vue successives est égale, au facteur de division près, au nombre de périodes de vibration de la corde pendant l'intervalle de temps considéré.

IV. EXPLOITATION

1. Formule générale des capteurs à corde vibrante.

On sait que l'étalonnage des capsules manométriques se traduit par une formule générale :

$$P - P_0 = A (N_0^2 - N^2)$$

où P_0 = Pression de référence

N_0 = Fréquence de la corde pour la pression P_0

P = Pression à un instant donné

N = Fréquence pour la pression P

A = Coefficient d'étalonnage, dépendant essentiellement des caractéristiques de la membrane du manomètre, et de la longueur de la corde.

La formule peut encore s'écrire :

$$H - H_0 = B (N_0^2 - N^2)$$

H et H_0 représentant des hauteurs d'eau.

Lorsque l'on se trouve devant de petites variations de fréquence autour d'une valeur moyenne N_m , on peut se contenter de la formule simplifiée :

$$\Delta H = K \times N_m \Delta N \quad (K = 2B)$$

où $\Delta H = H - H_m$

H_m étant la hauteur d'eau moyenne correspondant à la fréquence moyenne N_m .

Le coefficient K , déduit des étalonnages, est constant quelle que soit la plage de pression considérée.

2. Application au marégraphe autonome.

Dans le marégraphe autonome, les lectures sont faites sur un compteur totalisateur, photographiées à intervalle de temps régulier.

La différence entre deux lectures consécutives est donc représentative de la fréquence moyenne de la corde pendant le temps qui sépare les deux images.

$L_0, L_1, L_2 \dots \dots \dots L_n$ Les lectures successives du compteur qui apparaissent sur le film photographique.

$$\lambda_1 = L_1 - L_0$$

$\lambda_n = L_n - L_{n-1}$ Les écarts entre lectures consécutives.

f = le facteur de division.

T = la période comptage.

La fréquence moyenne de comptage entre 2 prises de vue peut s'écrire :

$$N = \lambda \times f/T = K'\lambda$$

Dans le marégraphe Télémac $f = 16$, $T = 12$ minutes

ou 720 secondes, dans ces conditions $K' = \frac{2}{90}$.

3. Exploitation manuelle.

En exploitation manuelle, on utilise la formule différentielle :

$$\Delta H = KN_m \Delta N \quad (1)$$

N_m = fréquence moyenne entre marée haute et marée basse

ΔN = écart en fréquence par rapport à N_m

En utilisant les notations indiquées ci-dessus, on écrit :

$$N_m = K' \lambda_m$$

$$\Delta N = K' (\lambda_n - \lambda_m)$$

La formule (1) devient alors :

$$\Delta H = KK'^2 \times \lambda_m (\lambda - \lambda_m)$$

En principe, pour simplifier les calculs et avoir des ΔH toujours du même signe, on remplace dans la parenthèse $(\lambda - \lambda_m)$, λ_m par λ_{\min} (λ_{\min} étant, arrondie à la centaine inférieure, la différence minimale dans la plage de mesure considérée).

4. Exploitation par ordinateur.

On utilise dans ce cas la formule générale non simplifiée

$$H - H_0 = B (N_0^2 - N^2)$$

En application marégraphe $H_0 = 0$, N_0 est la fréquence de la corde à la pression atmosphérique et H peut se mettre sous la forme $H = \Delta H + F$ (F est le fond réduit au zéro des sondes).

La formule, dans ce cas, devient :

$$\Delta H = BN_0^2 - F - BN^2$$

5. Données numériques.

La fréquence à la pression atmosphérique des deux capteurs utilisés est de 800 Hz environ, ce qui donne une fréquence de comptage de 50 Hz (800 : 16).

Dans ces conditions :

$$\lambda_0 \approx 50 \times 720 \approx 36\,000.$$

Les coefficients d'étalonnage K sont de l'ordre de 700×10^{-4} . La valeur de l'incrément de mesure à la pression atmosphérique est donc de l'ordre de 1,5 cm.

V. ERREURS

Les erreurs du marégraphe peuvent être réparties en deux grandes catégories, celles provenant du capteur lui-même, y compris son électronique d'alimentation et d'entretien, celles provenant de la chaîne de mesure.

1. Erreurs dues au capteur.

D'après la formule $P - P_0 = B(N_0^2 - N^2)$ on voit que la fréquence de la corde dépend de deux paramètres N_0 et B que l'on suppose indépendants de la pression, de la température et de l'amplitude de vibration mécanique de la corde.

a) Influence de la pression sur B .

Tous les autres paramètres étant constants par ailleurs, déterminer l'influence de la pression sur B revient à effectuer l'étalonnage du capteur à température constante et amplitude de vibration de la corde constante. Cette opération ne peut se faire qu'avec une balance de pression de précision et au prix de très grandes précautions. Les mesures qui ont été faites par le constructeur, par la D.C.A.N. Cherbourg et l'E.P.S.H.O.M. semblent montrer que le coefficient d'étalonnage est effectivement constant. Il convient de remarquer, cependant, que les mesures de pression sont très difficiles à réaliser et que les matériels utilisés avaient des précisions qui n'étaient pas meilleures que celles du capteur.

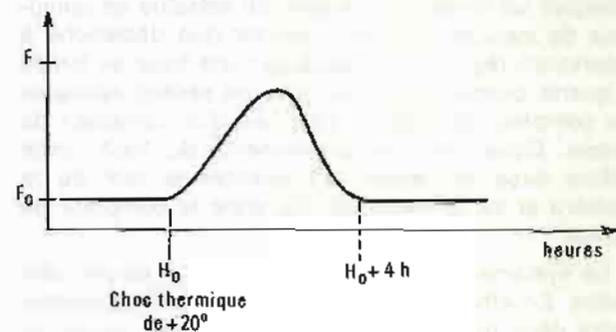
b) Influence de la température.

On a vu (§ II.1) que la réalisation du capteur élimine, en principe, toute influence de la température, le corps du capteur et la corde ayant des coefficients de dilatation identiques. Encore faut-il que les caractéristiques mécaniques de la corde, à tension égale, soient indépendantes de la température.

Des mesures ont été effectuées à l'E.P.S.H.O.M., elles ont donné les résultats suivants :

— à pression constante (pression atmosphérique) on a fait subir au capteur des chocs thermiques violents de l'ordre d'une vingtaine de degrés. On a alors constaté une variation brutale de la fréquence suivie, au bout de 4 heures, d'une stabilisation avec

une très faible hystérésis correspondant à environ 2 ou 3 cm d'eau.



De cette expérience, on peut tirer les conclusions suivantes :

A pression constante, la fréquence de la corde (N_0) peut être considérée comme indépendante de la température, pourvu que l'on soit en régime établi. En régime transitoire, il y a de fortes variations de la fréquence qui revient à sa valeur nominale au bout d'un certain temps avec une hystérésis faible.

Pour les applications marégraphiques, le phénomène transitoire n'est pas gênant. Il suffit en effet de ne pas tenir compte des mesures effectuées pendant les premières heures suivant la mise à l'eau de l'appareil. Quant aux variations de température par quelques dizaines de mètres de fond, elles sont en général faibles et à très longue période.

— Le capteur étant maintenu dans une enceinte thermostatée, on a effectué des mesures d'étalonnage en pression pour différentes températures (0°, 15° et 25°). On a déduit de ces mesures que le coefficient d'étalonnage paraissait, à la précision recherchée, indépendant de la température.

Nota : Il convient de remarquer que la pression mesurée n'est pas absolue mais relative, la contre pression étant celle de l'air enfermé dans le conteneur à la pression atmosphérique. Cette contre pression va donc varier avec la température, ce qui pourra se traduire par une erreur correspondant à environ 1 cm par degré.

c) Influence de l'amplitude de vibration.

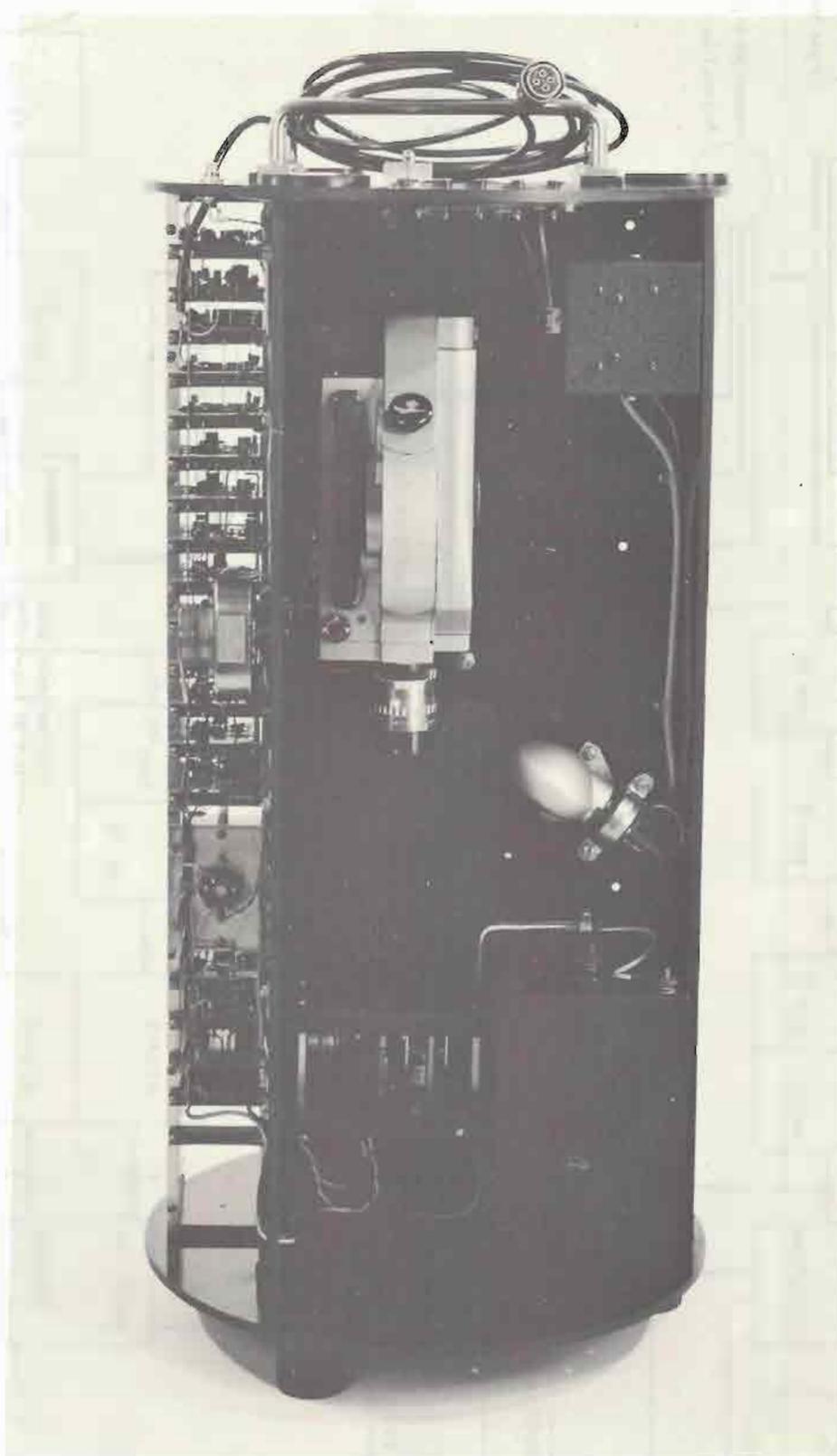
La vibration d'une corde vibrante n'est isochrone qu'au premier ordre près. Quelques expériences permettant de mettre en évidence le phénomène ont été réalisées. Elles n'ont pu être complètement achevées. Elles ont cependant montré qu'il fallait apporter un soin particulier à la réalisation de l'électronique d'entretien.

2. Erreurs dues à la chaîne de mesure.

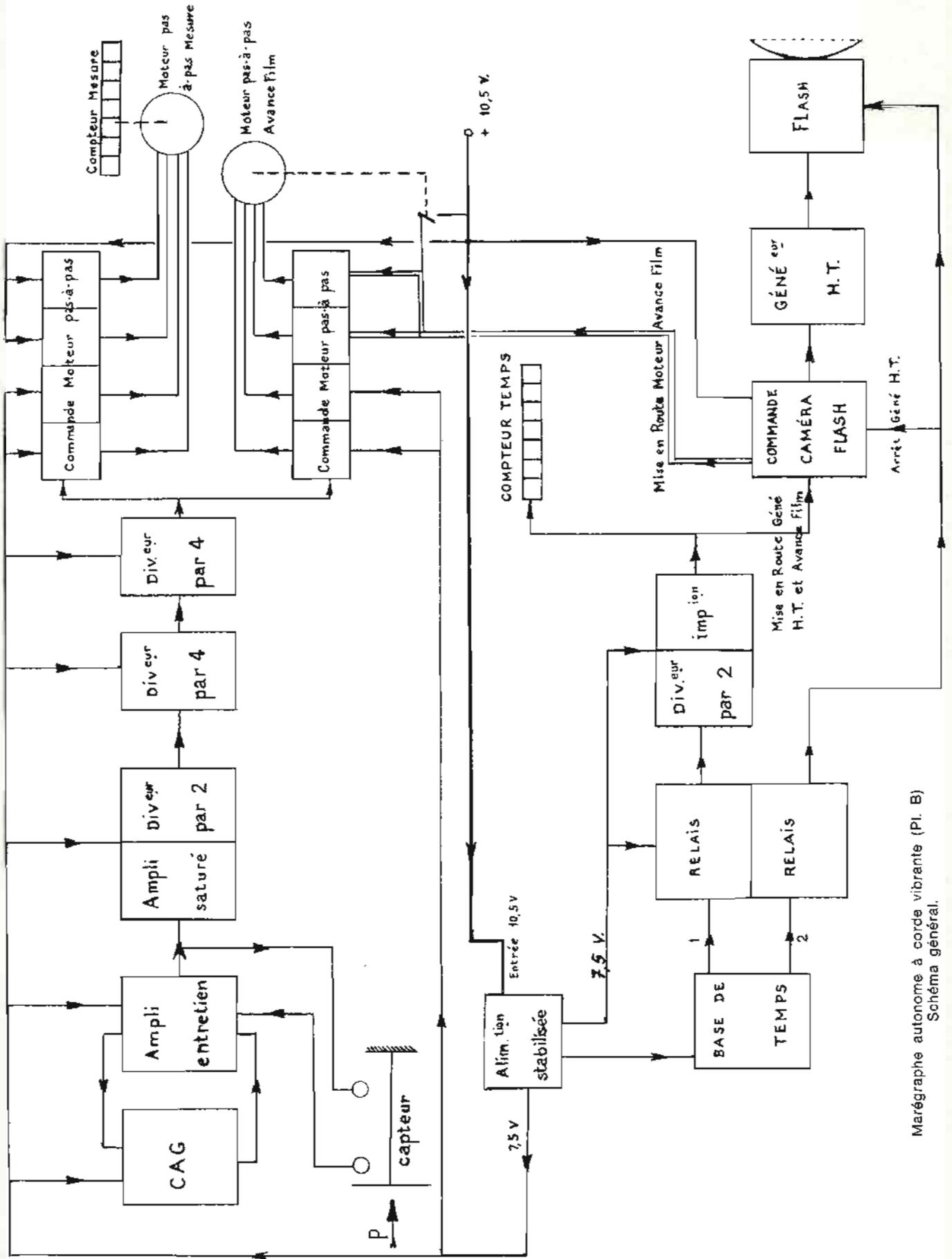
a) Formule simplifiée.

La simplification apportée dans les calculs en remplaçant la formule $H - H_0 = B(N_0^2 - N^2)$ par $H - H_0 = 2K(N_0 - N)$ fait négliger le terme $\epsilon \equiv -K(N_0 - N)^2$.

Cette simplification n'entraîne rigoureusement



Marégraphe autonome à corde vibrante (Pl. A).
Ensemble électronique : Vue générale.



Marégraphe autonome à corde vibrante (Pl. B)
Schéma général.

aucune erreur quant à la différence de deux hauteurs exactement symétriques par rapport à H_0 . L'erreur reste encore très faible si ces deux hauteurs ne sont que sensiblement symétriques; ceci est important car, en ayant soin de choisir N_0 à une valeur aussi voisine que possible du niveau moyen, on mesurera exactement l'amplitude de la marée entre pleine et basse mer successives.

Le terme correctif atteint en valeur absolue son maximum au voisinage des pleines et basses mers. On calcule facilement, compte-tenu des caractéristiques numériques données au paragraphe IV.5, que l'erreur maximum pour un marnage de 10 m n'excède pas 3 cm.

b) Période d'intégration.

La fréquence utilisée à l'instant t pour calculer la hauteur d'eau n'est pas la fréquence $N(t)$ mais la valeur moyenne de la fonction $N - N(t)$ entre les instants $t - dt$ et $t + dt$.

La marée étant un phénomène périodique, on pourra écrire en première approximation :

$$H - H_0 = A \cos \omega t = KN_0 (N(t) - N_0)$$

La valeur de $N(t)$ effectivement utilisée est donnée par :

$$\begin{aligned} N_m(t) &= \frac{1}{2 dt} \int_{t-dt}^{t+dt} N(t) \delta t \\ &= \frac{1}{2 dt} \int_{t-dt}^{t+dt} \left(\frac{A}{KN_0} \cos \omega t + N_0 \right) \delta t \end{aligned}$$

Le développement des calculs conduit au résultat suivant :

$$\frac{d(N(t) - N_0)}{(Nt - N_0)} = \frac{d(H - H_0)}{(H - H_0)} = \frac{\omega^2 dt^2}{6}$$

— Application numérique :

Période de la marée = 12 h

Période d'intégration = 12 minutes

$$\frac{d(H - H_0)}{(H - H_0)} \approx \frac{1}{2000}$$

L'erreur d'intégration peut donc être considérée comme parfaitement négligeable.

c) Quantification de la mesure.

On a vu au paragraphe IV.5 qu'une unité compteur correspond à environ 1,5 cm. L'erreur sur chaque lecture pouvant être d'une unité compteur, celle sur la différence de deux hauteurs pourra atteindre, dans le cas le plus défavorable, quatre unités compteur, soit 6 cm.

VI. RÉSULTATS OBTENUS - ENSEIGNEMENTS

Les deux marégraphes livrés à la M.H.D. étaient des appareils prototypes. Aussi leur fonctionnement

a-t-il été en partie défectueux. Certains défauts provenaient de l'électronique elle-même et auraient pu être en conséquence facilement corrigés, mais la partie à mettre principalement en cause était le système de comptage même. Les compteurs mécaniques, en effet, tournant très vite s'usaient rapidement et rendaient ainsi le système peu fiable.

Les appareils ont été renvoyés à l'E.P.S.H.O.M. qui a procédé à une refonte complète consistant essentiellement à remplacer les compteurs mécaniques par des compteurs entièrement électroniques sur affichage lumineux.

Le matériel a été ainsi rendu plus fiable, et l'exploitation elle-même a été améliorée, la qualité de l'image sur le film photographique s'étant avérée nettement supérieure.

Les appareils refondus ont subi des essais de longue durée dans le puits du marégraphe de la Penfeld à Brest et ils n'ont manifesté aucune défaillance.

Ils ont été malheureusement perdus au cours de deux tentatives de mesure à la mer.

L'expérience acquise a été cependant fructueuse. Elle a permis, tout d'abord, de se rendre compte des difficultés de réalisation d'un tel matériel, des limites qu'on peut raisonnablement se fixer, de la complexité du fonctionnement d'un capteur de pression si simple paraisse-t-il. Elle a permis, enfin, d'avoir des idées un peu plus saines sur ce que doit être un marégraphe plongeur adapté aux besoins d'une mission hydrographique. Le choix du capteur est un élément essentiel; il semble que le capteur à corde vibrante soit encore un des meilleurs.

Le principe de la mesure consistant à compter le nombre de périodes en un temps donné est excellent, mais pour réduire l'erreur de quantification de la mesure, il faut que, compte-tenu des capacités d'enregistrement, la fréquence de comptage soit la plus élevée possible. L'intervalle de mesure de l'ordre d'un quart d'heure devrait constituer un bon compromis; par contre, la période de comptage devrait être plus courte mais d'une durée suffisante de 3 à 4 minutes, pour éliminer la houle.

La précision globale recherchée devrait être de l'ordre de 10 cm sur quelques mois, des étalonnages périodiques permettant de corriger un éventuel vieillissement du capteur.

L'enregistrement photographique dont l'exploitation est fastidieuse doit être rejeté au profit d'un enregistrement numérique.

L'autonomie devrait être de un à quelques mois.

Il convient d'apporter une attention particulière aux dispositifs de relevage et de repérage. La meilleure solution consiste à réaliser un ensemble intégré à flottabilité positive, comprenant le marégraphe lui-même, un ou mieux, deux largeurs acoustiques, un répondeur acoustique et, dans la mesure du possible, une balise radioélectrique et un flash lumineux. Les mesures de marée sont en effet trop précieuses et difficiles à réaliser pour qu'on prenne le risque de perdre le matériel.

NOTE TECHNIQUE N° 2

RECHERCHE D'ÉPAVES AU SONAR

I. INTRODUCTION

Au moment où les progrès de la technique peuvent laisser espérer que le sondage linéaire sera, dans un avenir plus ou moins proche, remplacé par un sondage surfacique, où déjà, qualitativement au moins, certains sondeurs latéraux remorqués ou Sonar panoramiques permettent de détecter des objets de taille infinitésimale, il peut apparaître archaïque de continuer à faire des recherches d'épaves ou des hauts-fonds isolés à l'aide d'un Sonar classique. C'est cependant ce qui se passe encore à la M.H.D. et avec, je crois pouvoir l'affirmer, un succès certain.

II. ÉQUIPEMENT DE « LA RECHERCHE »

Pendant l'hiver 1969, *La Recherche* a été équipée d'un Sonar Duba 1 B simplifié. Ce Sonar, de conception déjà relativement ancienne, a équipé et continue d'équiper encore certains bâtiments de combat de la Marine Nationale. Pour nos besoins propres, l'équipement a été sensiblement modifié et on n'a conservé que les organes essentiels :

- le meuble gisement attaque,
- le meuble site,
- le graphique de distance,
- le système de stabilisation en site.

Le meuble gisement attaque a pour organes principaux d'exploitation :

- un tube cathodique à balayage linéaire horizontal sur lequel apparaît la trace des échos : cette trace, plus ou moins inclinée, n'est verticale que quand le projecteur est bien pointé en direction (système somme - différence) ;
- une couronne de gisement et d'azimut autour de laquelle se déplace un index d'orientation du projecteur ;
- des prises pour écouteur à casque.

Des organes divers de commande ont pour objet principalement de :

- choisir la gamme de détection :
 - 0 - 1 500
 - 0 - 3 000
 - 0 - 6 000

— régler d'une manière plus précise la distance maximum de balayage à l'intérieur de ces gammes et donc la cadence d'émission ;

— choisir la procédure de balayage (automatique ou manuelle) ;

— régler, en automatique, l'intervalle angulaire des bonds, dont la cadence est déterminée par la cadence d'émission (1 bond à chaque émission).

Le meuble site comprend un tube cathodique exactement semblable à celui du meuble gisement attaque à la seule différence que le balayage est vertical au lieu d'être horizontal. La trace des échos étant droite (horizontale) quand le projecteur est bien pointé en site.

Une commande manuelle permet d'afficher le site désiré dont la stabilisation est assurée par un repère de verticale associé à un calculateur.

Le graphique de distance permet en principe un enregistrement analogique de la distance horizontale. En fait, il est, en recherche Sonar, pratiquement inexploitable pour des raisons qui seront précisées ultérieurement.

La fréquence du projecteur est de l'ordre de 26 KHz, l'ouverture du faisceau étant de l'ordre de 12° en azimut et de 8° en site.

III. LA RECHERCHE D'ÉPAVES
OU D'OBSTRUCTIONS AU SONAR

La recherche d'épaves au Sonar comporte deux phases principales :

— une première phase dite d'exploration systématique où on balaie la zone à explorer suivant une procédure déterminée de manière à ne laisser (théoriquement du moins) aucun trou. Les épaves détectées sont annoncées par l'opérateur (azimut et distance) et leur report sur une projection de travail fait apparaître des groupements (appelés concentrations) indice probable de la présence d'une épave ou de toute autre obstruction ;

— une deuxième phase, dite identification, où on étudiera, par divers procédés, les concentrations obtenues au cours de la première phase.

IV. PREMIÈRE PHASE
EXPLORATION SYSTÉMATIQUE

IV.1. Procédure.

La procédure adoptée à la M.H.D. a toujours été la suivante :

— Routes parallèles et régulièrement espacées, l'espacement étant en principe lié à la portée maxi-

mum pratique de détection estimée, ou mieux, mesurée sur un bon réflecteur connu. Ce premier réseau est doublé par un deuxième sensiblement perpendiculaire au même écartement ou à un écartement supérieur suivant les premiers résultats obtenus.

— Exploration par bonds automatiques d'intervalle sensiblement égal à la demi-ouverture du faisceau en azimut soit 5° dans le cas du Duba 1 B. La cadence de ces bonds est liée comme on l'a vu plus haut à la distance de balayage qui doit être voisine de la portée maximum pratique de détection (égale ou légèrement supérieure).

On remarquera que, pour une vitesse donnée du bâtiment, les graphiques de la zone explorée quand on règle la distance de balayage sur la portée pratique se déduisent les uns des autres par une simple similitude (avance du bâtiment entre 2 émissions proportionnelle au temps séparant ces deux émissions, donc à la distance de balayage).

En fait, ce résultat n'est pas rigoureusement exact pour les raisons suivantes :

— Il subsiste en effet autour du bâtiment un trou dû à la « portée minimum pratique », distance en-deçà de laquelle les échos se perdent dans un bruit général : échos sur le fond, bruit de la mer, bruit propre du bâtiment. Ce trou est d'importance variable et dépend de plusieurs facteurs : relief, habileté de l'opérateur à distinguer les échos d'obstruction de ceux du fond, bathythermie. D'une manière générale on peut admettre que la valeur de ce trou est comprise entre 500 et 1 000 m.

— Il n'est pratiquement pas possible d'annoncer les échos au passage. Il faut en effet donner un azimut et surtout une distance les plus précis possible ainsi qu'une classification sommaire de l'écho (écho net, épave possible et même probable, écho douteux, épave encore possible mais plus vraisemblablement relief). Aussi les opérateurs doivent-ils, quand ils ont un écho, s'y arrêter le temps de quelques émissions (2 à 3), l'annoncer dès que tous les éléments sont acquis (distance, azimut, classification) et reprendre aussitôt l'exploration.

J'ai fait figurer en planche jointe, à titre d'exemple, la zone explorée avec les éléments suivants :

- Portée maximum pratique 3 000 m.
- Cadence des bonds correspondant à un balayage de 3 000 m.
- Intervalle des bonds 5°.
- Balayage de 90° de chaque bord.
- Vitesse du bâtiment 10 nœuds ou 5 m/s.

La durée théorique d'un cycle est de 144 secondes. Pratiquement, on l'a estimée à 180 secondes = 3 minutes en négligeant le temps nécessaire pour ramener le projecteur de l'avant vers le travers et en supposant que le temps perdu pour analyser les échos (uniformément réparti sur toute la durée du cycle) est de l'ordre de 30 s dans des conditions normales.

On voit qu'avec ces hypothèses la largeur de la bande explorée une fois est de deux fois 2 900 m;

cette largeur est encore de 2 500 m pour une double exploration mais décroît ensuite très rapidement (1 700 m pour la bande explorée 3 fois).

Compte-tenu d'un trou de 1 000 m, la bande balayée deux fois a une largeur de 2 fois 1 500 m. Dans ce cas, un espacement des routes de 1 000 m assure un très large recouvrement et permet d'espérer au moins 4 détections sur une obstruction. Les hypothèses faites correspondent à des conditions idéales :

— Le temps perdu pour analyser les échos n'est jamais uniformément réparti sur tout le cycle, de plus il peut dépasser largement 30 secondes si les échos sont nombreux et l'opérateur malhabile.

— Ce même opérateur peut rater la détection d'une obstruction; celle-ci peut aussi, dans certaines conditions (orientation par exemple), ne donner aucun écho.

— Les secteurs de balayage doivent en principe être donnés en azimut par rapport à la route moyenne suivie et non en gisement. Or, en général, les routes suivies sont des lieux radioélectriques dont la courbure peut ne pas être négligeable.

Ainsi, pour des portées de l'ordre de 3 000 m, un écartement des routes de 1 000 m paraît devoir réaliser un compromis acceptable entre la rapidité d'exécution et la sûreté de détection. On aura toujours la possibilité si la première exploration semble avoir donné de bons résultats d'augmenter l'écartement du deuxième réseau, voire même de ne pas l'effectuer.

IV.2. Problèmes divers.

a) Site.

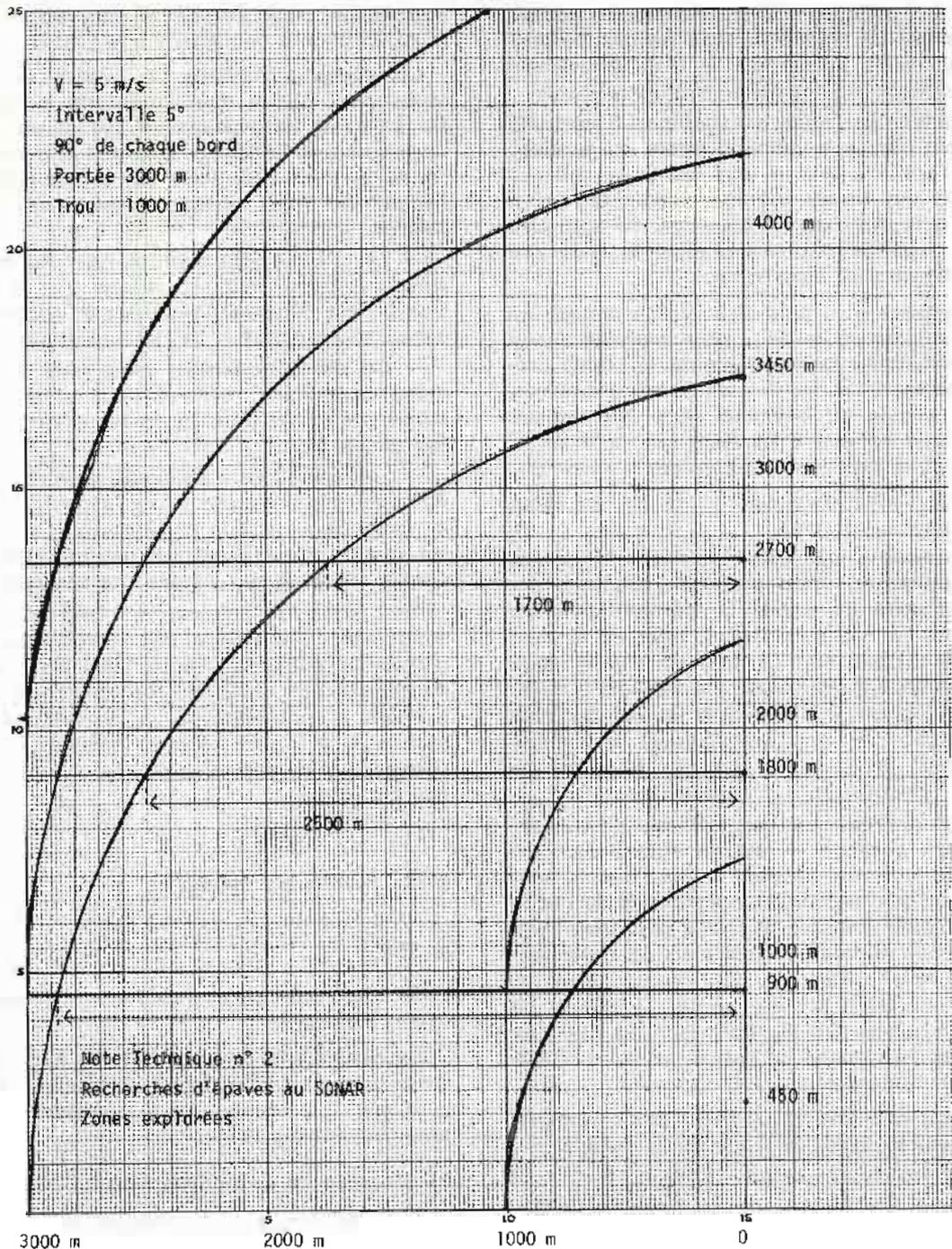
Le site dans cette phase est maintenu à une valeur constante.

L'expérience montre que par des fonds de l'ordre de 50 m et plus, il doit être légèrement négatif (de -1° à -3°), par des fonds inférieurs, il doit être sensiblement nul.

b) Influence de la bathythermie.

Les conditions bathythermiques ont une influence considérable. Quand elles se détériorent, la portée maximum pratique décroît et en même temps, la portée minimum croît jusqu'à ce qu'elles soient toutes deux confondues.

A titre d'exemple, au cours d'une exploration effectuée au mois de juillet sur les côtes Sud de Bretagne, les échos parasites extrêmement nombreux rendaient toute détection impossible jusqu'à plus de 1 500 m, alors que la portée maximum pratique était inférieure à 2 000 m. Dans de telles conditions, il n'y a absolument rien à faire. Resserrer les routes ne ferait que multiplier le nombre des faux échos. Les concentrations le plus souvent dispersées qu'on pourrait voir apparaître ne correspondraient à aucune réalité topographique. Ainsi, au



cours de cette exploration, on avait obtenu quelques groupements d'échos sur lesquels les sondages serrés effectués ne relevèrent aucune obstruction, ni irrégularité importante; de plus, aucun d'entre eux ne fut confirmé par une deuxième exploration qui, effectuée dans d'excellentes conditions, donna de très belles concentrations dues à des épaves ou à des roches.

c) Influence du relief et de la nature du fond.

L'influence du relief sous-marin est fort complexe, des accidents du terrain, même non isolés, pouvant donner lieu à des échos nets et relativement concen-

trés mais masquer par contre une obstruction plus importante. Il est curieux de constater que les concentrations dues à de simples mouvements du terrain sont obtenues en général en plus grand nombre dans des fonds relativement plats que dans des fonds irréguliers. On peut imputer ce paradoxe aux réactions des opérateurs. Ceux-ci, en effet, quand le relief est très tourmenté s'efforcent de ne retenir que les échos qui se distinguent nettement du bruit général dû à des réflexions sur le fond. Par contre, quand le relief est peu accidenté, il y a peu de bruits parasites et la moindre ondulation du terrain peut donner un écho qui ressort nettement.

La nature du fond a également une influence certaine, surtout quand la bathythermie n'est pas très bonne. Des recherches serrées sur certaines concentrations, en général assez dispersées, n'ont permis de déceler aucune obstruction ni aucun mouvement du terrain. Par contre, il était évident à l'examen des bandes de sonde que l'on était en présence de changements nets de la nature superficielle du fond.

d) Rôle des opérateurs.

Le rôle des opérateurs est primordial. Quelle que soit la procédure utilisée, c'est d'eux que dépend le succès de l'opération. Il leur faut en effet faire un choix personnel dans les échos à analyser et à annoncer de manière à ne rien laisser passer d'intéressant mais aussi à ne pas perdre trop de temps et créer ainsi des trous dans l'exploration.

V. DEUXIÈME PHASE

V.1. Généralités.

Cette deuxième phase, qui a pour but d'identifier les échos obtenus, comporte un certain nombre d'opérations soit successives, soit simultanées.

- a) S'assurer que les concentrations obtenues sont dues à des obstructions et en définir la nature (épave ou relief).
- b) Localiser avec précision l'obstruction identifiée et obtenir une première cote au sondeur.
- c) Préciser la première cote obtenue par divers procédés.
- d) Parfaire l'identification si les fonds le permettent par une exploration par plongeurs.

Il s'agit là d'opérations classiques de recherche d'obstruction dont on connaît une position approchée relativement précise. Le Sonar peut y apporter une contribution efficace, que l'on opère à partir du bâtiment principal directement ou à partir d'une embarcation.

V.2. Procédure du « Gouvernez Sonar ».

Un répéteur d'azimut ayant été installé devant l'homme de barre, *La Recherche* faisait route sur la concentration à étudier à partir d'une distance supérieure à la portée maximum pratique de détection. Sitôt l'obstruction détectée, l'opérateur du meuble « gisement-attaque » s'efforçait de maintenir le contact et de pointer au mieux son projecteur et on ordonnait à la passerelle « Gouvernez Sonar ». Un deuxième opérateur maintenait la trace droite sur le meuble site; le sondeur, s'il gênait l'écoute, n'était

mis en route qu'au tout dernier moment et les opérateurs s'efforçaient de garder le contact le plus longtemps possible; dès que celui-ci était perdu, on ne touchait plus à l'orientation du projecteur et l'homme de barre continuait à gouverner sur le dernier azimut affiché.

Cette méthode s'est avérée efficace dans plus de 50 % des cas.

Elle suppose que :

- le contact soit maintenu le plus longtemps possible;
- la composante latérale du courant soit nulle ou très faible surtout si la perte de contact se fait relativement loin;
- il n'y ait pas d'échos parasites sur lesquels l'opérateur risque de s'accrocher au dernier moment.

V.3. Utilisation du graphique de distance.

Les distances annoncées par l'opérateur au cours de la première phase étant lues directement sur l'écran cathodique ne sont pas très précises (entre 50 et 100 m); aussi le rayon d'incertitude peut-il être relativement grand. Le graphique de distance donne en principe une précision nettement supérieure.

On peut donc envisager de l'utiliser comme premier élément d'identification.

Des échos bien groupés, en effet, seraient un indice sérieux de présence d'une obstruction isolée. On doit noter que le graphique ne peut être utilisé dans la première phase, car pour avoir une trace exploitable, il faut avoir un bon écho et maintenir le contact un laps de temps non négligeable. Les concentrations obtenues grâce au graphique étant plus groupées et précises, le rayon d'incertitude serait considérablement réduit et, en conséquence, la recherche largement facilitée.

Ce procédé n'a jamais été utilisé à la M.H.D. en raison d'un fonctionnement souvent défectueux et du succès apporté par d'autres méthodes d'une mise en œuvre plus simple (gouvernez Sonar en particulier).

V.4. Guidage d'une embarcation.

Dans certaines conditions, il peut être intéressant, voire même nécessaire, de faire effectuer les recherches par une embarcation. Le Sonar peut là aussi apporter une aide précieuse. En effet, le bâtiment étant mouillé de manière à avoir une bonne détection de l'obstruction recherchée, on peut facilement guider une embarcation. De plus, on aura en général un écho sur l'embarcation elle-même qui pourra ainsi être informée de l'instant où elle passe à la verticale de l'obstruction.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN

Publications scientifiques et littéraires

TYPO OFFSET

05002 GAP - Téléphone 51 35 23

Dépôt légal 559 - 1977

AVIS AUX AUTEURS

Les auteurs sont priés de se conformer aux indications suivantes

Texte

- 1) Les manuscrits doivent être remis dactylographiés de préférence avec double interligne et sur le recto seulement de feuilles format 21 × 29,7 cm.
- 2) Les noms propres doivent être écrits en capitales ou soulignés d'un double trait; les noms des espèces animales et végétales ainsi que les noms de navires doivent être soulignés d'un trait.
- 3) Le titre de l'article ou de la communication doit être suivi du prénom usuel et du nom du ou des auteurs; il doit comporter ensuite l'indication du laboratoire ou de l'institution d'origine.
- 4) Les articles doivent être accompagnés d'un résumé en français, et si possible d'un résumé en anglais.
- 5) Les références bibliographiques seront groupées à la fin du manuscrit; elles seront classées dans l'ordre d'apparition dans le texte. Ces références comporteront nom de l'auteur, initiales des prénoms, date, titre complet de l'article, titre du périodique abrégé selon les règles internationales, volume, pagination complète.
- 6) Les manuscrits dactylographiés et les planches ne doivent pas excéder 25 pages.

Illustration

- 1) Les dessins doivent être exécutés à l'encre de Chine sur papier calque de préférence, sinon sur bristol ou carte grattage (les tirages Ozalid, photocopies ou tout autre moyen de reproduction ne peuvent être acceptés).
- 2) Ils doivent être envoyés roulés ou à plat, mais jamais pliés.
- 3) Ils peuvent être présentés à grande échelle; des réductions, exécutées par l'atelier de photographie, les ramèneront au format exigé de la publication 16,5 × 25 cm; ils ne devront en aucun cas être présentés à une échelle nécessitant un agrandissement. Lettres et chiffres seront écrits soigneusement et suffisamment grands pour qu'ils demeurent facilement lisibles une fois la réduction effectuée. Il est demandé de tenir compte dans la préparation des planches de la présentation du texte sur deux colonnes.
- 4) Pour les cartes et plans, il convient de faire figurer une échelle linéaire dont l'unité de mesure sera évidemment indiquée, et de ne pas mentionner d'échelle numérique susceptible d'être modifiée par réduction du cliché.

Tirés à la suite

Les auteurs d'une même communication reçoivent collectivement vingt-cinq exemplaires de leur article. Les tirés à la suite supplémentaires doivent être commandés à l'envoi du manuscrit en précisant le nombre d'exemplaires ainsi que l'adresse à laquelle doivent être envoyées les factures.

SOMMAIRE

PREMIÈRE PARTIE

	Pages
J. LE FLOCH, Y DENIAUD Mesure du gradient de vitesse au voisinage du fond en Manche	5
J. RAILLARD Quelques aspects de la structure thermique sur le plateau continental breton. (Thermocline, Front thermique)	11
Y DESNOËS Le bruit dans les analyses de marée	31
Y DESNOËS, B. SIMON Analyse et prédiction de la marée. Application aux marées du Havre et de Brest	47

DEUXIÈME PARTIE

L. PIÉRETTI Mission hydrographique de dragage (septembre 1969 - février 1972)	65
-------------------------------------------------------------------------------	----