

# OBSERVATIONS OCÉANOGRAPHIQUES DANS LE DÉTROIT DE GIBRALTAR PENDANT LA CAMPAGNE PHYGIB

(Septembre - Octobre 1971)

par

M. Alain CAVANIÉ, Centre Océanologique de Bretagne

*Communication présentée au 23<sup>e</sup> congrès-assemblée plénière de la C.I.E.S.M.  
Athènes, 3-11 novembre 1972. Océanographie physique*

## Introduction

Le détroit de Gibraltar, seul lieu de communication entre la Méditerranée et l'océan mondial, est une région de grand intérêt pour les océanographes. Il est bien connu que l'écoulement dans le détroit se fait en deux couches superposées ; la couche supérieure d'eau atlantique pénètre en Méditerranée pour y compenser les pertes par évaporation et, dans la couche inférieure, l'eau méditerranéenne plus salée et plus dense s'écoule vers l'Atlantique. Ces deux flux en sens inverses permettent de maintenir constants le niveau moyen de la Méditerranée et la salinité de ses eaux.

Les mesures faites dans le détroit pendant les quinze dernières années ont mis en évidence des ondes internes se propageant à l'interface entre les deux couches d'eau, ondes engendrées par les courants périodiques de marée au seuil du détroit. Les variations temporelles des différents paramètres mesurés (profondeur de l'interface, vitesse des particules fluides dans les deux couches) sont du même ordre de grandeur que leurs valeurs moyennes. Ceci laisse prévoir que l'écoulement dans le détroit varie de façon non linéaire en fonction du coefficient de marée. La déduction la plus intéressante à tirer de cette remarque est que le flux d'eau méditerranéenne sortant par le détroit doit varier considérablement entre la période de vive eau et de morte eau.

Pour étudier ces phénomènes, deux stations de courantométrie et d'hydrologie ont été faites sur le N.O. *Le Noroit* par l'équipe d'Océanographie Physi-

que du C.O.B. en octobre 1971 (fig. 1). La première série d'observations a été faite au point G ( $\varphi$  : 35°59'5 N, G : 5°19'9 W) à l'entrée orientale du détroit au Sud de la pointe d'Europe et approximativement à mi-distance entre cette pointe et Ceuta ; cette station a été tenue du 9 au 12 octobre pour étudier l'évolution en fonction du temps de l'interface et des courants dans la couche d'eau atlantique. La deuxième station, à l'Ouest du détroit, se situait au point A ( $\varphi$  : 35°52'3 N, G : 5°53'0 W), entre le banc de Spartel et la côte marocaine, dans la vallée sous-marine qui canalise l'eau venant de la Méditerranée ; elle avait pour but l'étude des variations du débit de cette eau en fonction du coefficient de marée. La mesure de courant faite en ce point dans l'eau méditerranéenne a permis de mettre en évidence une augmentation du simple au double du courant (moyenne sur 24,8 h) entre période de morte eau (coefficient de marée, CM = 38) et période de vive eau (CM = 115).

## 1. Observation au point G, à l'entrée orientale du détroit

### A. — Mesures de courant.

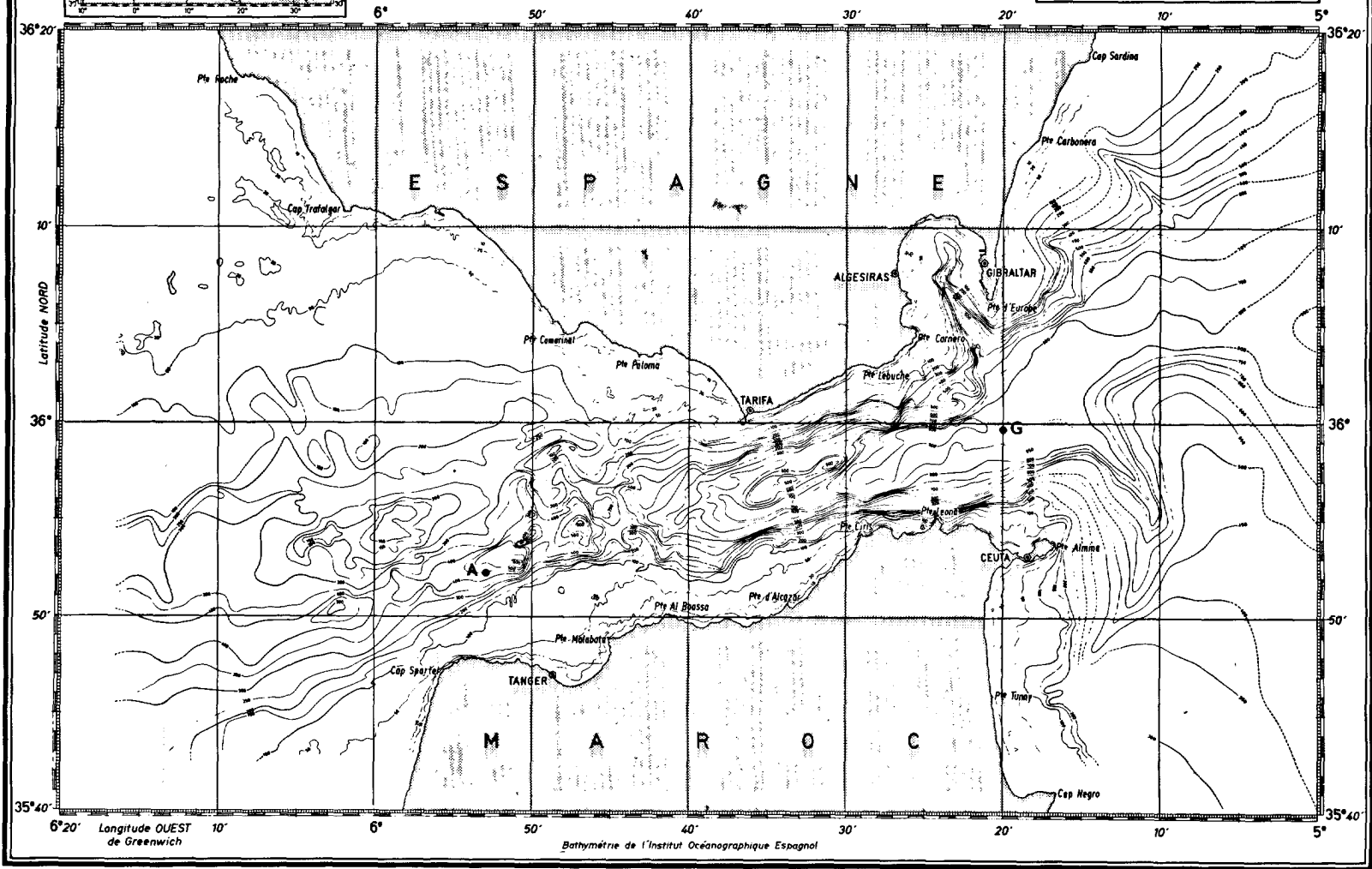
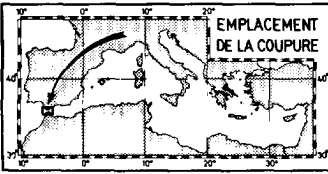
Les mesures de courant ont été faites à partir d'une ligne de quatre courantomètres Aaderaa suspendue à une bouée de surface reliée par un orin de 100 m à une deuxième bouée de surface ancrée sur le fond (880 m). L'un des courantomètres

\* Contribution n° 149 du Département Scientifique du Centre Océanologique de Bretagne.

MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE  
LABORATOIRE D'OcéANOGRAPHIE PHYSIQUE

# DETROIOT DE GIBRALTAR

ECHELLE MOYENNE (LAT. 35°58')  
0 5 10 15 20 Km.  
Fond cartographique extrait de la carte N° 1809  
du Service Hydrographique de la Marine.



- 360 -

FIG. 1

n'ayant pas fonctionné correctement, seuls sont représentés dans les figures 2 à 4 les résultats des courantomètres C 1, C 2, C 3, immergés aux profondeurs nominales de 30, 50 et 110 m ; ces trois courantomètres mesuraient toutes les deux minutes la température, la profondeur d'immersion, le cap du courant et le nombre de tours d'un rotor de Savonius, permettant d'en déduire le courant moyen entre deux mesures. La figure 2 indique les températures et les profondeurs d'immersion, la figure 3 la composante Est-Ouest du courant, la figure 4 la composante Nord-Sud du courant mesurées par ces instruments. Les pleines mers de Tarifa sont indiquées (PM) et suivies, entre parenthèses, de leurs coefficients de marée.

Les fronts notés sur les figures se signalent par une augmentation rapide de la composante vers l'Est du courant, de la température et, pour trois fronts de jour, par une remontée des trois courantomètres vers la surface d'où ils étaient suspendus. Les fronts de nuit arrivent au point G respectivement 7 h 15 mn, 7 h 35 mn et 7 h 50 mn ( $\pm 5$  mn) après la PM de Tarifa ; par contre, les fronts de jour arrivent 3 h 40 mn, 3 h 30 mn et 3 h 15 mn après la PM de Tarifa. Cette différence ne peut s'expliquer que par l'existence d'une composante diurne du courant de marée, que l'on distingue très nettement sur la figure 3.

Les oscillations de courtes périodes (10 à 20 minutes) en température et en vitesse après le passage des fronts ont déjà fait l'objet de plusieurs études tant théoriques qu'expérimentales. Ces oscillations sont plus marquées pour les fronts de nuit que ceux de jour ; l'amplitude relative (par rapport à la profondeur de l'interface juste avant le passage du front) est plus grande pour les fronts de nuit que pour les fronts de jour, ce qui explique cette différence de comportement. En effet, le modèle théorique que nous avons développé pour étudier ce phénomène, indique que les oscillations en aval du front sont d'autant plus importantes que l'amplitude relative est grande.

#### B. — Hydrologie au point G.

Des mesures de température et de salinité en fonction de la profondeur ont été faites toutes les heures du 9 au 12 octobre, à l'aide d'une centrale automatique d'acquisition de données hydrologiques développée au C.O.B. Les résultats de ces mesures sont indiqués dans les figures 5 à 7, qui donnent respectivement la profondeur des isothermes, des isohalines et des isopycnes en fonction du temps. Le gradient de température dans la zone de transition entre l'eau atlantique et méditerranéenne est relativement faible et cette région est beaucoup plus facilement visible sur les figures 6 et 7, centrée sur l'isohaline 37,00 ‰ et l'isopycne 28,00.

A chaque front détecté par les mesures de courant correspond une chute des isolignes de l'ordre d'une cinquantaine de mètres dans la zone de fort

gradient séparant les deux couches d'eau. La profondeur de cette zone est en moyenne de l'ordre de 75 m juste avant le passage du front de nuit et de 100 m juste avant le passage du front de jour. De même que dans les mesures de courant, une composante diurne importante est observée dans les mouvements verticaux de l'interface séparant l'eau atlantique de l'eau méditerranéenne.

#### C. — Conclusions des mesures au point G.

En fonction de nos propres mesures et de celles recueillies par d'autres océanographes dans le détroit de Gibraltar, le mécanisme qui engendre des ondes internes dans le détroit de Gibraltar nous semble être le suivant : au moment de la marée montante le courant de marée portant vers l'ouest empile l'eau méditerranéenne contre le seuil du détroit, créant une dénivellation importante de l'interface, nettement plus haute à l'Est qu'à l'Ouest du seuil. Au moment où ce courant de marée s'annule, le système de deux couches fluides n'est pas en équilibre et une onde interne de gravité, créée par ce déséquilibre, se propage vers l'Est du détroit. Une composante diurne importante du courant de marée, superposée à la composante semi-diurne, a pour résultat de successivement retarder puis avancer l'heure de la renverse au seuil. Ceci retarde ou avance d'autant le départ de l'onde interne du seuil, ce qui explique le décalage dans le temps de deux fronts successifs au point G.

S'il en était ainsi, à l'époque de nos mesures, la composante diurne du courant de marée portait vers l'Est au moment de la pleine mer du matin et vers l'Ouest au moment de la pleine mer du soir. Les mesures de courant au point G étant limitées à la couche atlantique qui ne représente que les cent premiers mètres d'eau (pour une profondeur au point G de 880 m) il ne nous est pas possible de vérifier directement cette hypothèse. Mais le fait que chaque jour de nos observations l'interface soit à son immersion maximum en début d'après-midi et à son immersion minimum quelques heures après minuit, est une excellente indication d'un courant diurne portant effectivement à l'Est le matin et à l'Ouest le soir.

## 2. Observations au point A, à l'Ouest du détroit

#### A. — Mesures de courant.

Les mesures de courant ont été faites au point A à l'aide d'un courantomètre Aaderaa qui enregistrait toutes les cinq minutes la température, la profondeur d'immersion, la direction du courant et le nombre de tours d'un rotor de Savonius. Cet appareil, suspendu à une bouée sub-surface ancrée sur le fond (440 m) était immergé à une profondeur nominale de 265 m dans l'eau méditerranéenne

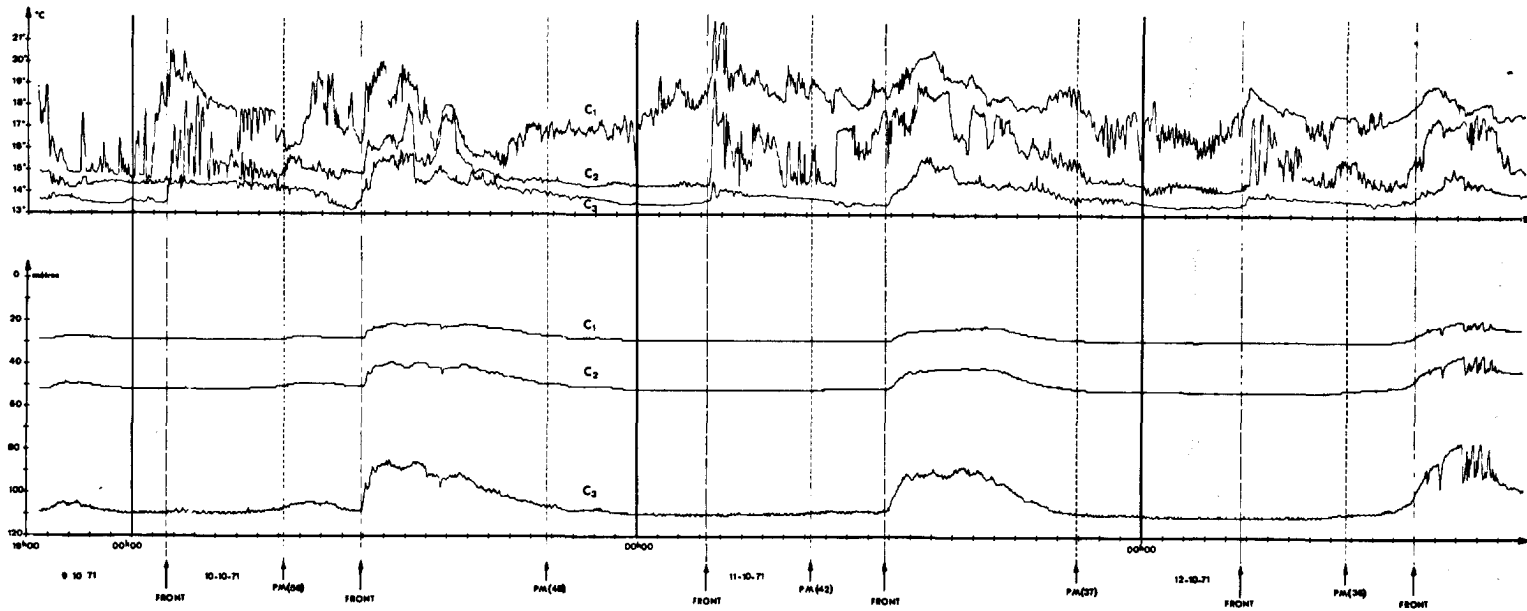


FIG. 2. — Point G : températures et profondeurs d'immersion des courantomètres en fonction du temps (TU + 1).

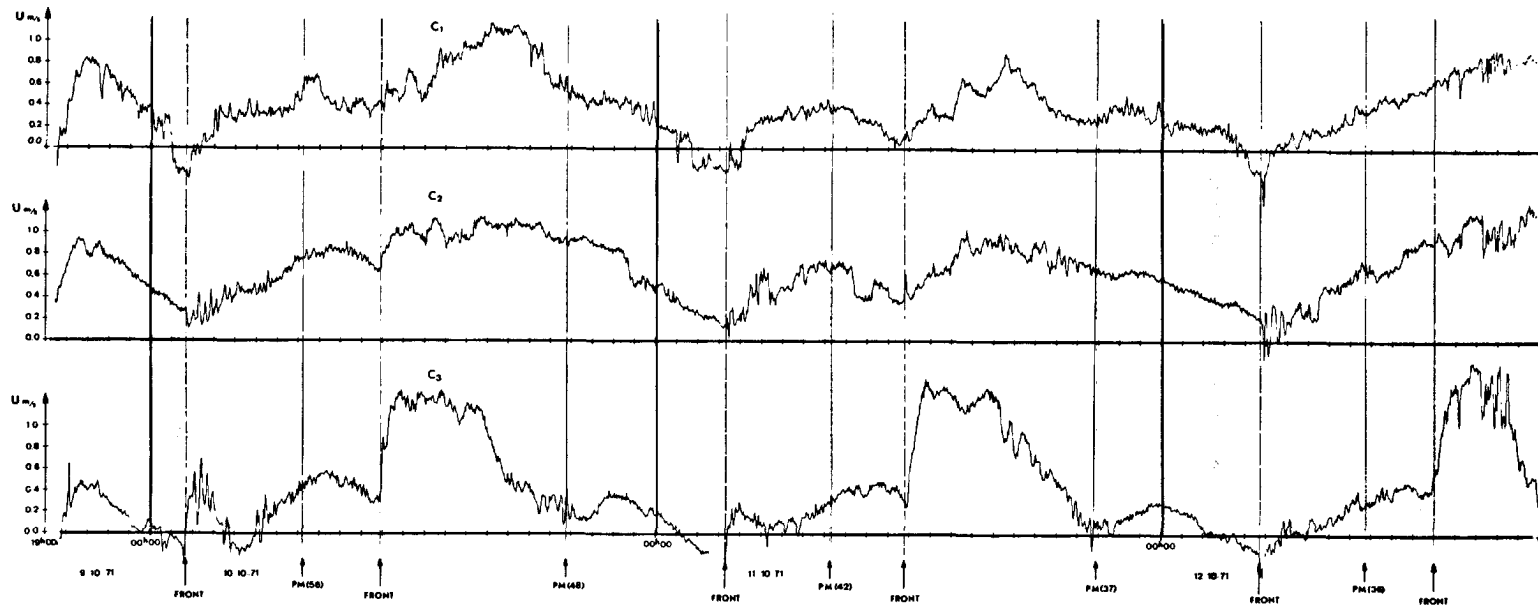


FIG. 3. — Point G : composante Est-Ouest de la vitesse (+ vers l'Est) en fonction du temps (TU + 1).

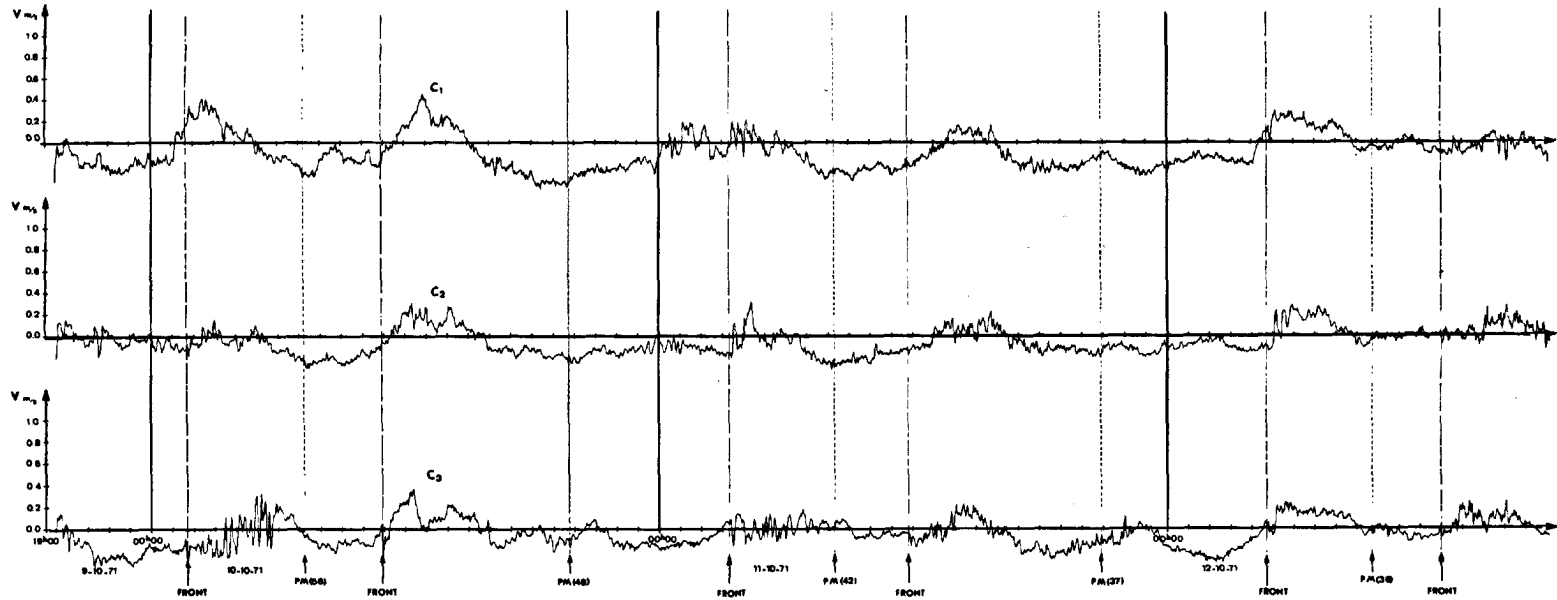


FIG. 4. — Point G : composante Nord-Sud de la vitesse (+ vers le Nord) en fonction du temps (TU + 1).

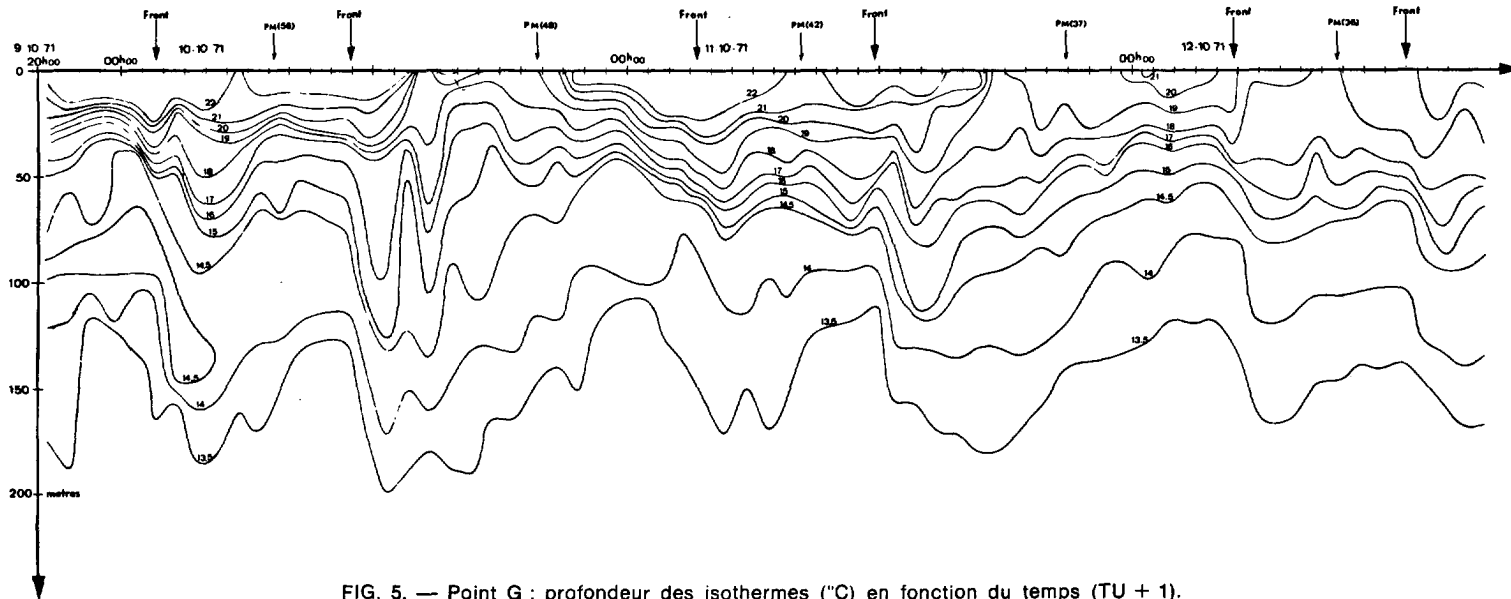


FIG. 5. — Point G : profondeur des isothermes (°C) en fonction du temps (TU + 1).

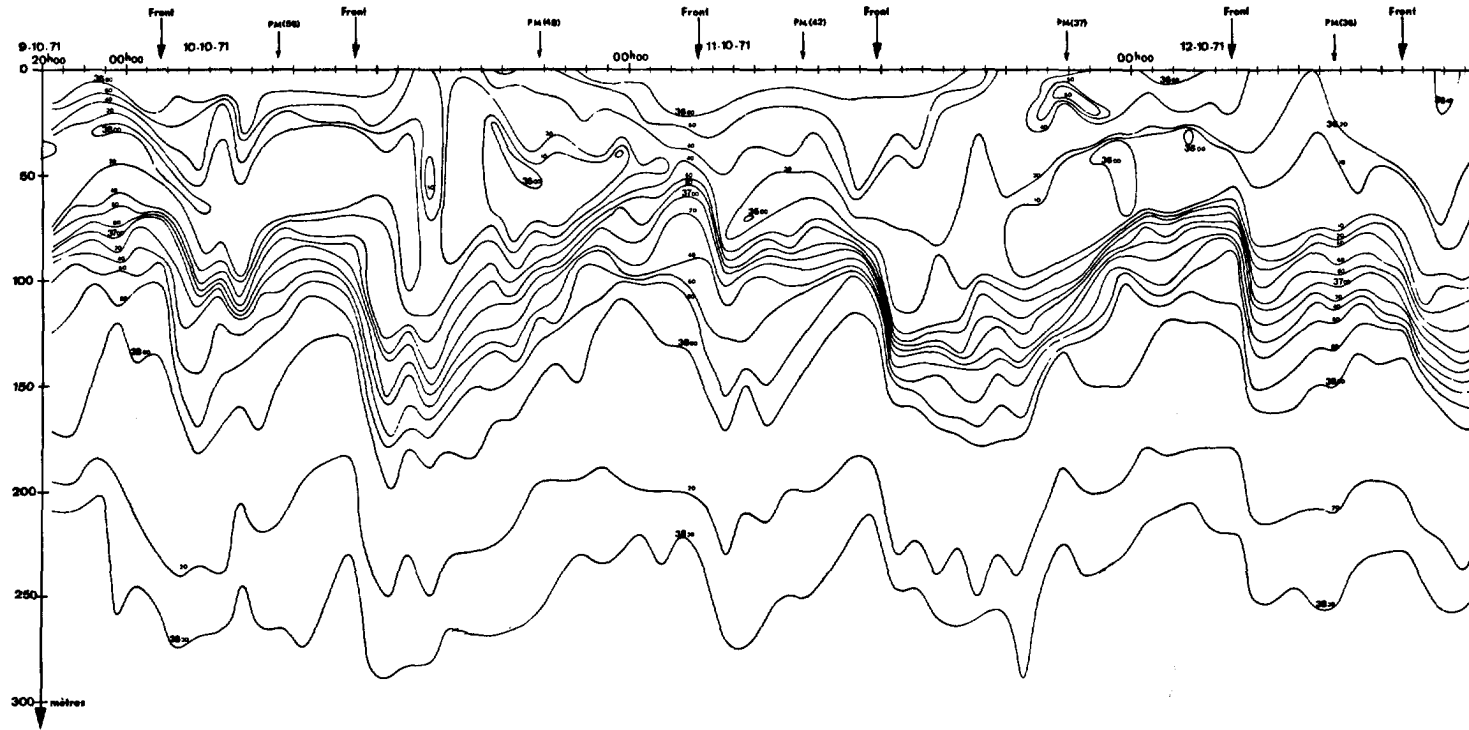


FIG. 6. — Point G : profondeur des isohalines (‰) en fonction du temps (TU + 1).

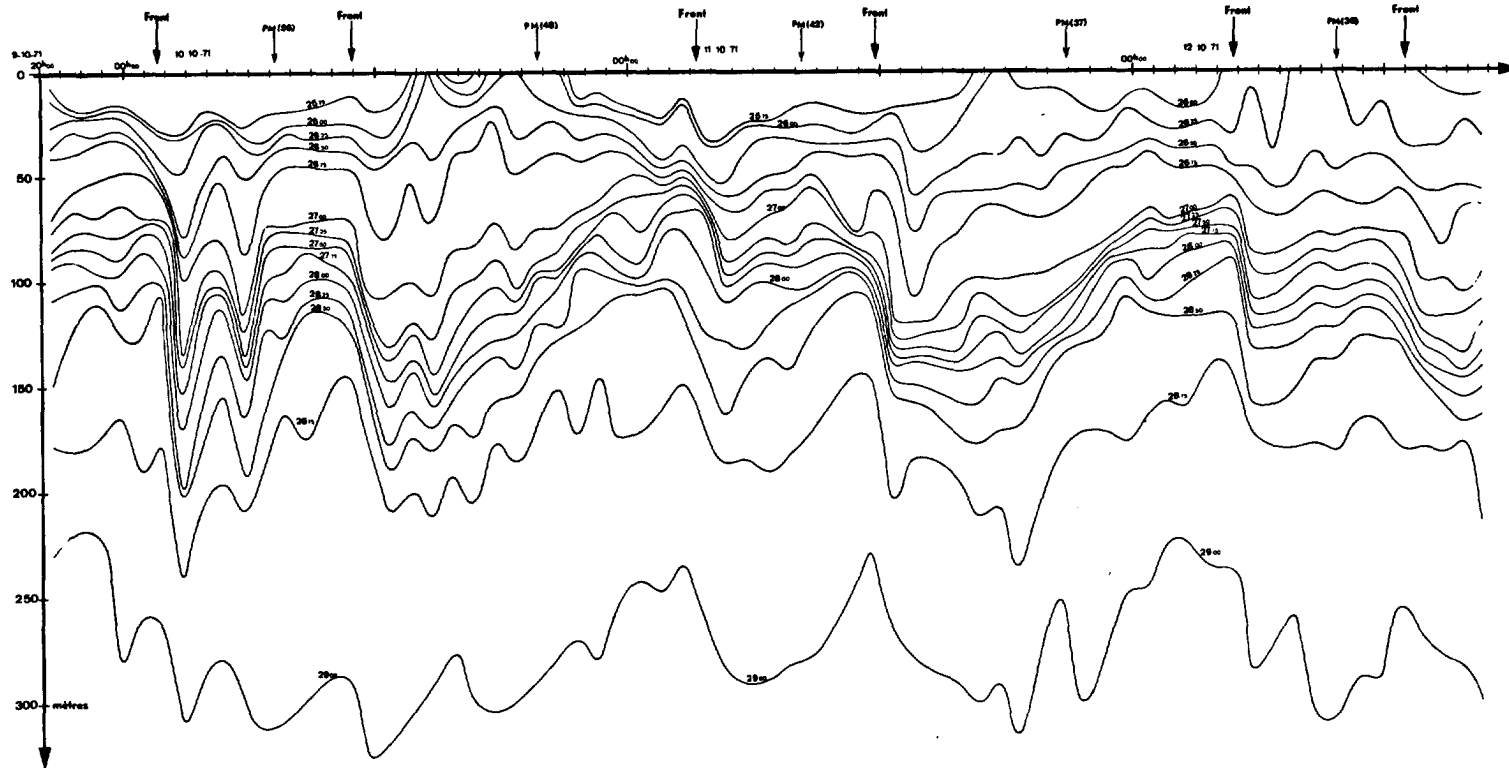


FIG. 7. — Point G : profondeur des isopycnas en fonction du temps (TU + 1).

sortant du détroit de Gibraltar. Ces mesures faites du 5 au 13 octobre, montrent une composante diurne du courant superposée au courant semi-diurne. Le courant diurne porte effectivement à l'Est au moment de la pleine mer du matin et vers l'Ouest au moment de la pleine mer du soir, ce qui confirme les conclusions tirées des observations au point G.

Pour évaluer l'influence du coefficient de marée sur le courant sortant, il faut d'abord moyenner le courant sur 24,8 h pour éliminer l'influence de la marée diurne et semi-diurne. « U » étant le vecteur courant instantané, le courant « V » est défini par la formule :

$$V(t) = \left( \int_{t-12,4h}^{t+12,4h} U(\tau) d\tau \right) / 24,8$$

Le tableau 1 donne, en fonction du jour d'observation, le coefficient moyen des marées de ce jour, l'amplitude moyenne du courant  $|V|$  et sa direction  $\theta$ .

**Tableau 1**

Date	Coefficient de marée	$ V $ M/S	$\theta$ (degrés)	$ V _T$
6 oct. 71	114	0,74	246	0,80
7 oct. 71	104	0,73	248	0,72
8 oct. 71	89	0,59	242	0,61
9 oct. 71	70	0,42	241	0,49
10 oct. 71	51	0,40	238	0,40
11 oct. 71	40	0,36	240	0,36
12 oct. 71	38	0,38	238	0,36

La direction du courant moyen varie très peu de jour en jour et suit comme il faut s'y attendre l'axe de la vallée sous-marine dans laquelle l'eau méditerranéenne s'écoule. L'enregistrement de pression du courantomètre montre que sous l'effet du courant de marée très violent le 6 et le 7 octobre, la ligne de mouillage s'inclinait à plus de 45° au moment où le courant sortant était le plus fort ; les valeurs de  $|V|$  pour ces deux jours sont donc certainement quelque peu plus importantes en réalité que celles qu'indiquent nos mesures. Malgré cela, le courant moyen est deux fois plus fort en période de vive eau qu'en période de morte eau. Nous avons cherché à exprimer le courant moyen par la formule empirique suivante :

$$|V|_T = 0,56(C/120)^2 + 0,30 \text{ M/S}$$

où C est le coefficient de marée moyen du jour. Les valeurs données pour cette formule sont reportées dans la dernière colonne du tableau 1. La comparaison entre les valeurs de  $|V|$  et  $|V|_T$  est satisfaisante et doit nous donner une certaine confiance dans cette formulation.

#### B. — Hydrologie au point A.

Des mesures de température et de salinité ont été faites toutes les heures de 21 h le 12 à 12 h le

13 octobre 1972 à l'aide de notre système d'acquisition de données hydrologiques. Ces mesures ont été faites à un mille à l'Est-Nord-Est du point A pour éviter d'accrocher la ligne de mouillage du courantomètre avec le câble de la sonde C.T.D.

Les résultats de ces mesures sont indiqués dans les figures 8 à 10 qui donnent la profondeur des isothermes, des isohalines et des isopycnes en fonction du temps. De même qu'au point G, le gradient thermique est relativement faible dans la zone de transition entre les deux couches d'eau, et ce sont les gradients de salinité et de densité qui

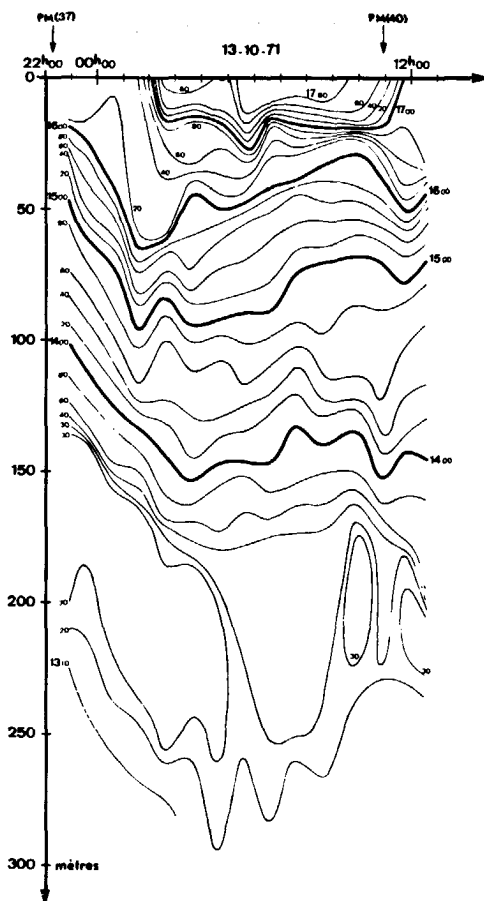


FIG. 8. — Point A : profondeur des isothermes (°C) en fonction du temps (TU + 1).

indiquent cette zone, évoluant entre 150 et 220 m au cours de nos mesures. Il est regrettable de ne pas avoir pu obtenir un enregistrement de longue durée au point A, mais nos mesures indiquent déjà que l'évolution en profondeur de l'interface en fonction du temps comporte une composante semi-diurne superposée à une composante de plus longue période que l'enregistrement de courant permet de fixer à celle de la marée diurne.



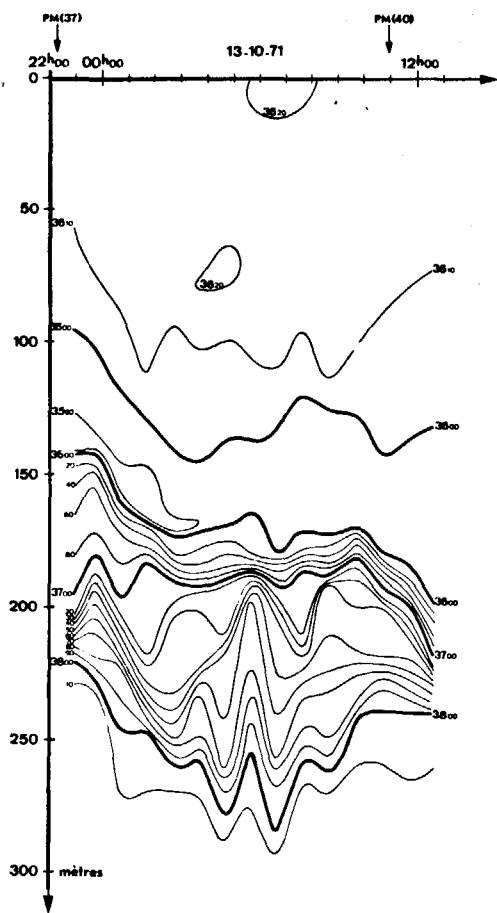


FIG. 9. — Point A : profondeur des isohalines (‰) en fonction du temps (TU + 1).

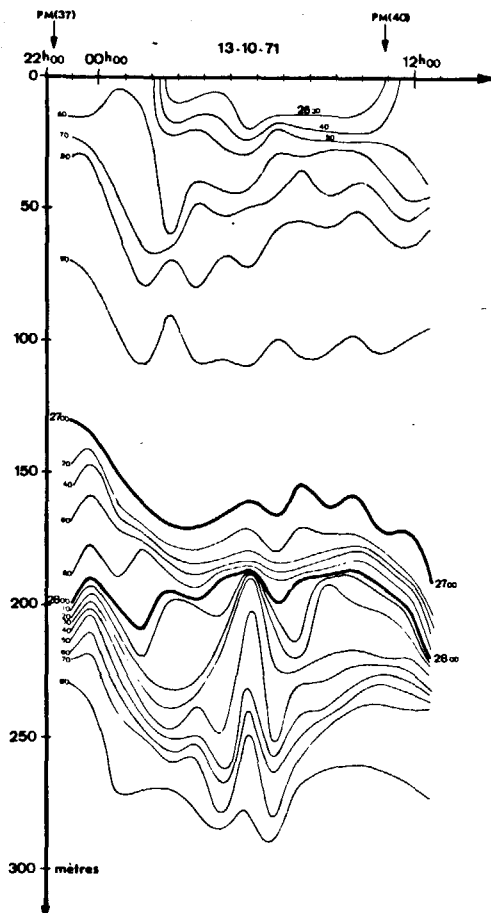


FIG. 10. — Point A : profondeur des isopycnes en fonction du temps (TU + 1).

### C. — Conclusions des mesures au point A.

La comparaison des mesures d'hydrologie faites en mai 1967 au point A4 par le Professeur Lacombe avec celles que nous avons faites, n'indique pas de différences notables si ce n'est au voisinage de la surface où les températures sont un peu plus élevées et les salinités plus faibles de 0,2 ‰ en octobre 1971 qu'en mai 1967. Ceci permet de conclure que les variations saisonnières dans le régime du détroit sont relativement faibles par rapport aux variations de plus courtes périodes.

Les mesures de courant au point A indiquent une augmentation du simple au double dans le courant moyen entre période de morte eau et de vive eau. Pour s'assurer qu'il en est de même du débit, il faut pouvoir montrer que l'épaisseur de la couche d'eau méditerranéenne ne diminue pas notablement en période de vive eau. Or, les mesures faites par le Professeur Lacombe en mai 1967 montrent que, pour un coefficient de marée de 37, l'interface est à une profondeur (moyennée sur une demi-journée) de 220 m et, pour un coefficient de marée de 79, à une profondeur de 200 m approximativement. Ces variations, relativement faibles, vont donc dans le

même sens que les variations de courant pour accentuer la différence de débit entre période de morte eau et de vive eau.

### 3. Conclusions générales

Les observations faites pendant la campagne Phygib confirment les conclusions que l'on pouvait tirer d'observations antérieures et de considérations théoriques, notamment que le régime dans le détroit de Gibraltar dépend de la marée diurne et semi-diurne et que le débit dans la couche d'eau méditerranéenne varie notablement en fonction du coefficient de marée. L'intérêt de ces mesures est de chiffrer, au moins approximativement, l'importance de ces influences, ce qui serait très difficile de faire actuellement par un modèle numérique ou expérimental.

Une variation du simple au double dans le flux d'eau méditerranéenne entrant dans l'Atlantique a certainement des répercussions importantes sur la veine d'eau méditerranéenne qui suit la côte de l'Espagne et du Portugal. De même, il faut s'attendre

à trouver une variation du même ordre du flux d'eau atlantique entrant en mer l'Alboran. Nous espérons que les observations que nous venons de présenter et les conclusions qui en découlent inciteront les océanographes travaillant dans ces régions à revoir les données en leur possession et à prévoir leurs futures campagnes en tenant compte de la périodicité bi-mensuelle des variations dans le régime du détroit de Gibraltar.

## BIBLIOGRAPHIE

- FRASSETTO R. — Short period vertical displacements of the upper layers in the Strait of Gibraltar. *Saclant ASW Research Centre Tech. Rep.*, n° 30, nov. 1964.
- LACOMBE H., 1961. — Année Géophysique Internationale 1957-1958. Participation française. Contribution à l'étude du Déroit de Gibraltar II. Etude Hydrologique. *Cahiers Océanographiques*, **13** (2), février 1961, pp. 73-107.
- LACOMBE H. et RICHEZ C., 1961. — Année Géophysique Internationale 1957-1958. Participation française. Contribution à l'étude du Déroit de Gibraltar II. Etude Hydrologique. *Cahiers Océanographiques*, **13** (5), mai 1961, pp. 276-291.
- LACOMBE H., TCHERNIA P., RICHEZ C., GAMBERONI L., 1964. — Deuxième contribution à l'étude du régime du détroit de Gibraltar (travaux de 1960). *Cahiers Océanographiques*, **16** (4), avril 1964.
- LACOMBE H., 1965. — Courants de densité dans le Déroit de Gibraltar. *La Houille Blanche*, 1965 (I), janvier-février, pp. 38-44.
- LONG R., 1954. — Some aspects of the flow of stratified fluids, I, *Tellus* **5** (1), février 1953, pp. 42-58.
- LONG R., 1954. — Some aspects of the flow of stratified Fluids, II. *Tellus*, **6** (2), mai 1954, pp. 98-115.
- MADELAIN F., RICHEZ C. — Observations des ondes internes dans le Déroit de Gibraltar. Communication au 22<sup>e</sup> Congrès de la C.I.E.S.M., Rome, 30 nov.-8 déc. 1970. A paraître dans les Rapports et Procès-Verbaux de la C.I.E.S.M.
- MILNE-THOMSON L., 1960. — Theoretical hydrodynamics. Mac Millan Co., N. Y.
- PEREGRINE D.H., 1966. — Calculations of the development of an undular bore. *Jour. Fluid. Mechanics*, **25**, part 2, June 1966, pp. 321-330.
- ZEILON N., 1912. — On tidal boundary waves and related hydrodynamical problems. *Kungl. Svenska Vetenskaps Akademiens Handlingar*, **47**, 1912, pp. 1-46.
- ZEILON N., 1934. — Experiments on boundary tides. A preliminary report. *Göteborgs Kungl. Vetensk. Samhälle, Handlingar*, Serie 5, **3**, 1934, pp. 1-13.
- ZIEGENBEIN J., 1968. — A study of internal waves in the straits of Gibraltar during october-november 1968. *Saclant ASW Research Centr. Tech., Rep.* n° 127.

## RÉSUMÉ

— Les mesures faites dans le détroit de Gibraltar pendant les quinze dernières années ont mis en évidence des ondes internes se propageant à l'interface entre la couche supérieure d'eau atlantique et la couche inférieure d'eau méditerranéenne. Ces ondes sont engendrées par l'action des courants de marée au seuil du détroit. L'importance de ces phénomènes permet de prévoir une variation non-linéaire de l'écoulement dans le détroit en fonction du coefficient de marée, et en particulier, une variation importante du débit d'eau méditerranéenne entre périodes de vive eau et de morte eau.

Pour étudier ces phénomènes, deux stations de courantométrie et d'hydrologie ont été faites sur le N. O. *Le Noroit* par l'équipe d'Océanographie Physique du C.O.B. en octobre 1971. La première série d'observations a été faite à l'entrée orientale du détroit, du 9 au 12 octobre. Ces mesures faites en période de morte eau ont mis en évidence l'existence d'une composante diurne importante du courant de marée.

La deuxième station, à l'Ouest du détroit, entre le banc de Spartel et la côte marocaine avait pour but l'étude des variations du débit d'eau méditerranéenne en fonction du coefficient de marée. Ces mesures montrent une augmentation du simple au double du courant (moyenné sur 24,8 h) surtout entre la période de morte eau (coefficient de marée CM : 38) et la période de vive eau (CM : 115).

## ABSTRACT

— Measurements in the strait of Gibraltar during the last fifteen years have shown the existence of large internal waves propagating at the interface between the upper layer of Atlantic water and the lower layer of Mediterranean water. These waves are generated by the tidal currents running over the sill. The scale of the phenomena are such that non linear variations of the flow in the strait as a fonction of the tidal amplitude can be expected. Specifically, mean Mediterranean outflow over a tidal period should be expected to increase going from neap to spring tides.

To study these effects, two currentmeter and hydrological stations were made by the N. O. *Le Noroit* by the C.O.B.'s physics group in october 1971. The first series of observations made at the eastern entrance of the strait between the 9th and 12th of october during a period of neap tides indicate a strong diurnal variation in the flow.

The second station, west of the sill, between the Moroccan coast and Spartel bank, was made to study the variations in the Mediterranean outflow, as a fonction of tidal amplitudes. These measurements show a twofold increase of this outflow (meaned over 24,8 h) between periods of neap tides (tidal coefficient CM : 38) and of spring tides (CM : 115).