

Art. n° 61  
Contribution COB n° 56

Mémoires Société Royale des Sciences de Liège, 6<sup>e</sup> série, tome II, pp. 27-41 (1972)

OBSERVATIONS DE FRONTS INTERNES DANS LE DETROIT DE  
GIBRALTAR PENDANT LA CAMPAGNE OCÉANOGRAPHIQUE  
OTAN 1970 ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS PAR  
UN MODÈLE MATHÉMATIQUE

ALAIN G. CAVANIE  
*Centre Océanologique de Bretagne, Plouzane, 29-N, France*

INTRODUCTION

- Les observations de MM. LACOMBE, FRASSETTO et ZIEGENBEIM, faites à l'aide de différentes méthodes de mesure, ont montré clairement l'existence de fronts internes et d'oscillations de courtes périodes à l'interface séparant l'eau atlantique de l'eau méditerranéenne dans la partie orientale du détroit de Gibraltar.

Les observations indiquent que les fronts internes sont engendrés par le mécanisme suivant : pendant la période de marée montante, le courant portant à l'ouest empile l'eau méditerranéenne contre le seuil du détroit et, lorsqu'au voisinage de la pleine mer le courant de marée s'annule, l'interface est loin de sa position d'équilibre, trop haut à l'est, trop bas à l'ouest du seuil. Les courants de densité dus à ce déséquilibre engendrent alors un front interne dont l'amplitude dépasse 50 m qui se déplace vers l'est à une vitesse de l'ordre de 3 à 4 nœuds sur le fond. Ce front est suivi d'oscillations de périodes caractéristiques de l'ordre de 10 à 20 minutes dont l'origine est analogue à celle des oscillations du ressaut ondulatoire pour les écoulements de surface. -

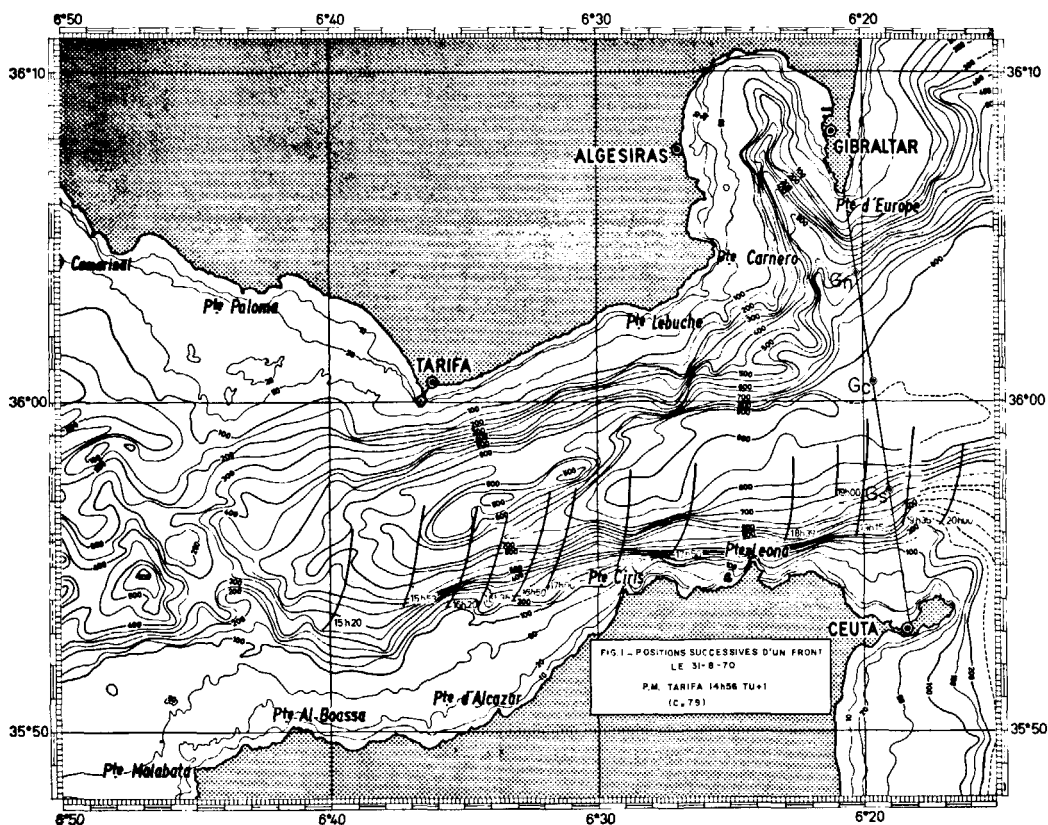
Pendant la campagne océanographique 1970 de l'OTAN, trois bateaux, le Bannock, le Mechelen et le San Jorge ont travaillé ensemble pendant deux périodes de quatre jours (du 20 au 24.8.70 et du 31.8 au 3.9.70) à l'étude de ces phénomènes. Les fronts internes et les oscillations associées à ces fronts ayant des temps et des longueurs caractéristiques relativement courts ne se prêtent pas à une étude détaillée par les méthodes de l'hydrologie classique, aussi d'autres techniques ont été mises en œuvre. Mesures de courant à partir d'appareils mouillés sur bouée, enregistrements d'échosondeurs, photographies d'écrans radar et enregistrements d'une chaîne de thermistance fournissent un ensemble de données qui se recourent pour donner une vue d'ensemble assez nette des phénomènes étudiés. Dans cette communication, une partie des résultats obtenus sera présentée puis expliquée à l'aide de travaux théoriques récents.

I. ETUDE DES FRONTS A L'AIDE DU RADAR

Les zones de convergence et de divergence créées en surface par les fronts internes respectivement augmentent et atténuent les amplitudes de la houle de courte période; ce phénomène, souvent visible à l'œil nu, peut être observé et photographié

sur les écrans radar sous certaines conditions de mer et de vent. Cette technique déjà employée par FRASSETTO et ZIEGENBEIM, a été utilisée de façon systématique pendant la campagne OTAN 1970 pour localiser et suivre les fronts sur leur trajet vers l'est.

Le 31.8.70 un vent d'est de 35 à 40 nœuds soufflait dans le détroit rendant impossible d'exécuter des mesures classiques à partir des différents bateaux. Malgré une mer agitée, il a été possible de suivre un front pendant cinq heures à l'aide du radar du Bannock. La fig. 1 montre le résultat de cette étude; les positions successives du



front, reportées en projetant les diapositives de l'écran radar sur la carte, sont exactes à  $\pm 0,1$  miles. Les vitesses du front sur le fond,  $\bar{V}$  (exactes à  $\pm 0,2$  nœuds), sont données en fonction du temps (TU + 1) par le tableau suivant :

de	15 h 20	16 h 20	16 h 20	18 h 39
à	16 h 20	17 h 21	18 h 39	19 h 35
V (nœuds)	3,5	4,3	3,8	3,8

La vitesse de propagation des ondes internes longues dans un modèle à deux

couches de fluides de masse spécifique  $\rho_1$  et  $\rho_2$  possédant des vitesses moyennes  $U_1$  et  $U_2$  est donnée par la formule classique :

$$V = [\rho_1 U_1 H_2 + \rho_2 U_2 H_1 \pm [(\rho_1 U_1 H_2 + \rho_2 U_2 H_1)^2 + (\rho_1 H_2 + \rho_2 H_1)((\rho_2 - \rho_1) g H_1 H_2 - \rho_1 H_2 U_1^2 - \rho_2 H_1 U_2^2)]^{1/2}] [\rho_1 H_2 + \rho_2 H_1]^{-1}$$

Dans la partie orientale du détroit de Gibraltar  $H_1 \approx 70$  m,  $H_2 \approx 730$  m,  $|U_1| > |U_2|$  pendant la période de marée descendante, et  $(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2 \approx 0.002$ , cette formule peut être approchée par l'équation beaucoup plus simple :

$$V = U_1 \pm [(\rho_2 - \rho_1) g H_1 H_2 [\rho_2 (H_1 + H_2)]^{-1}]^{1/2} = U_1 \pm 2.2 \text{ nds.}$$

Les vitesses dans la couche supérieure étant de l'ordre d'un nœud, c'est manifestement la formule avec le signe + qui doit être adoptée. Connaissant la vitesse de propagation des fronts, il est donc possible de se faire une première idée des courants dans la couche atlantique pendant la marée descendante. Les vitesses déterminées ainsi, de l'ordre de 1,7 nœuds, sont nettement plus faibles que celles mesurées par M. LACOMBE (1961) qui sont de l'ordre de 2 à 3 nœuds; ceci est dû sans doute au fait que les mesures de 1961 étaient faites par plus fort coefficient de marée et que le vent d'est de 35 à 40 nœuds soufflant pendant nos mesures réduisait le courant en surface.

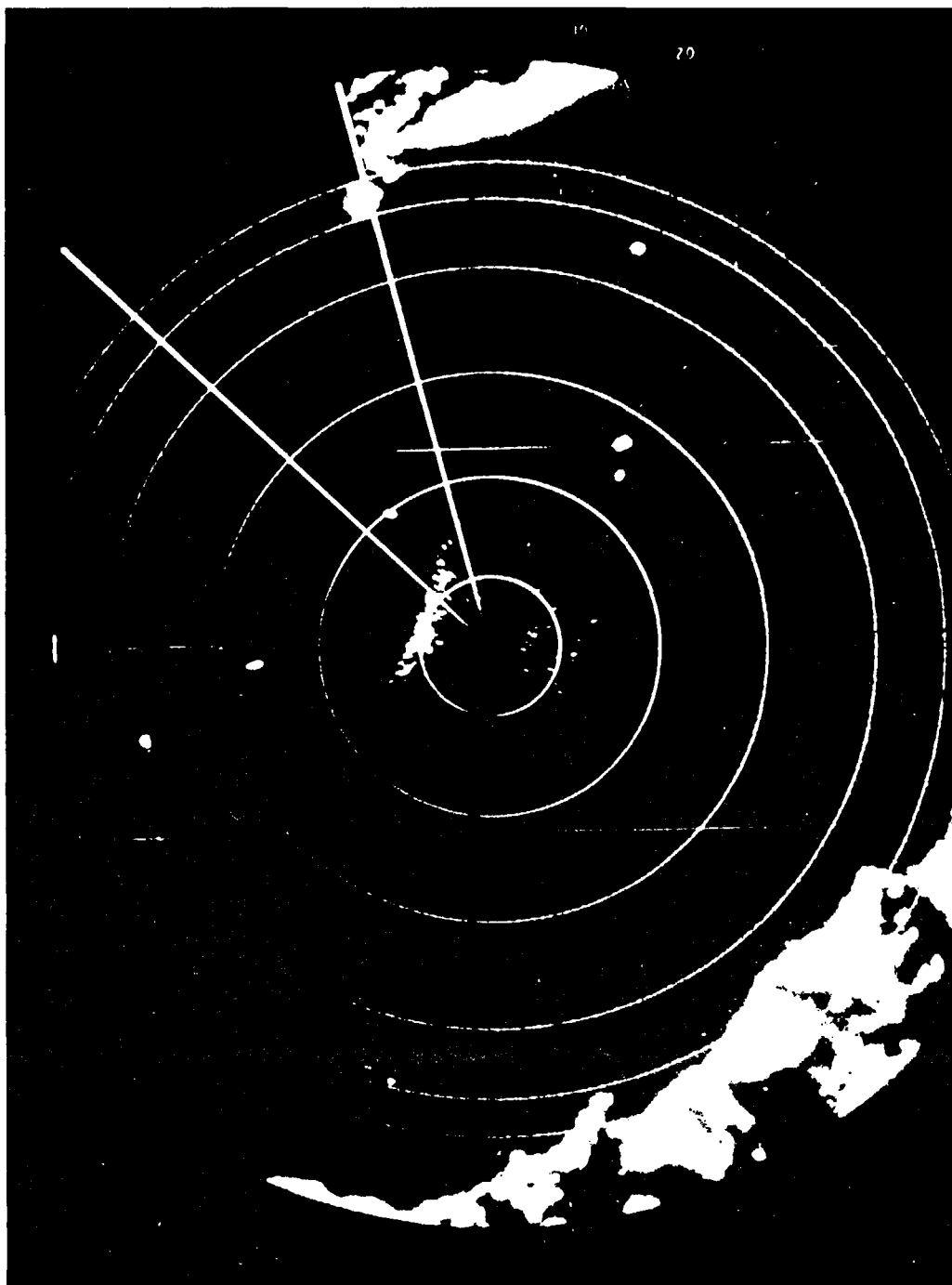
Le 23.8.70 trois séries de photographies faites sur la Bannock montrent le front en évolution. La première série (Fig. 2a et 2b) indique une seule zone de convergence, 7 milles approximativement à l'est du seuil, à 21 h 30 (TU + 1); la deuxième série (Fig. 3a et 3b) prise une demi-heure plus tard, montre que le front s'est déplacé vers l'est et qu'en aval de la première zone de convergence, trois autres sont décelables; enfin la troisième série (Fig. 4a et 4b) permet de déceler six zones de convergence en aval du front, les distances entre ces zones diminuant régulièrement de 1000 m entre les deux premières à 350 m entre la cinquième et la sixième.

Il faut joindre à ces observations les mesures de température faites sur le Bannock à l'aide de la chaîne de thermistances de l'Osservatorio Geofisico Sperimentale de Trieste par Dr. GRANCINI (Fig. 5). Ces mesures mettent en évidence l'amplitude considérable des mouvements verticaux et la régularité des oscillations en aval du front; les temps caractéristiques des oscillations étant quelque peu augmentés par un effet Doppler, le Bannock dérivant vers l'est à une vitesse d'un nœud approximativement, l'on peut conclure que pour un observateur au point fixe, les oscillations auraient une « période » très voisine de 10 minutes.

L'ensemble de ces mesures indique clairement que le front se comporte dans cette région du détroit comme un ressaut ondulatoire interne en voie de développement, et que les oscillations associées au front augmentent rapidement en amplitude pendant cette période.

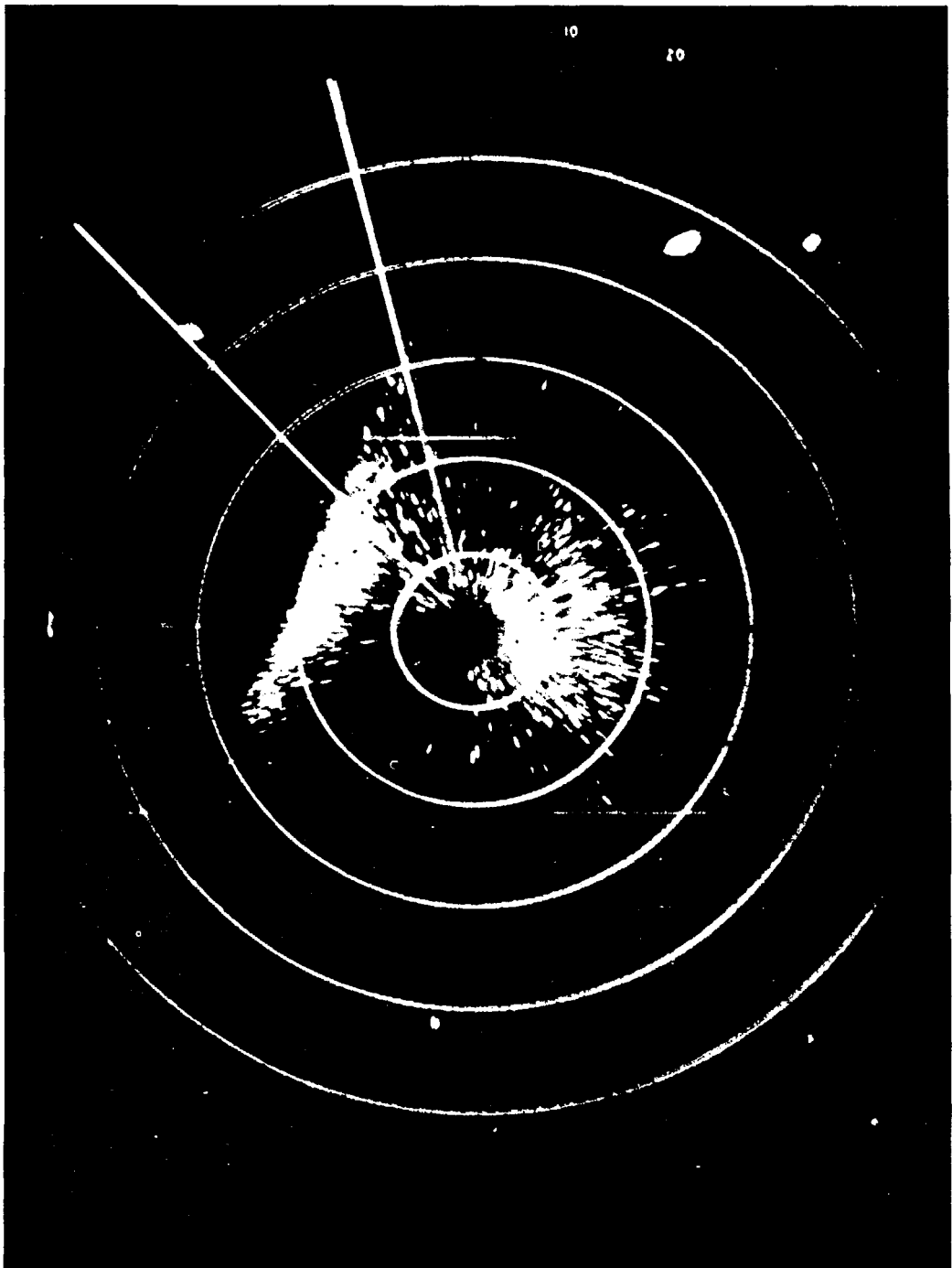
## II. ÉTUDE DES FRONTS A L'AIDE D'ENREGISTREMENTS AU SONDEUR

Dans la partie orientale du détroit de Gibraltar, les enregistrements de sondeurs à 12,30 ou 50 KHz montrent souvent une série de couches réfléchissantes superposées dans les 150 premiers mètres de profondeur. L'étude d'une centaine de bathythermographes obtenus sur le Bannock et le Mechelen indiquent que ces zones correspondent souvent à des régions de fort gradient vertical de la température. Les couches qui ne correspondent pas à ces zones de fort gradient de la température, sont probablement liées à des zones de fort gradient de salinité, ce qui serait à vérifier à l'aide d'un



0 1M 2M 3M 4M

Fig. 2 a

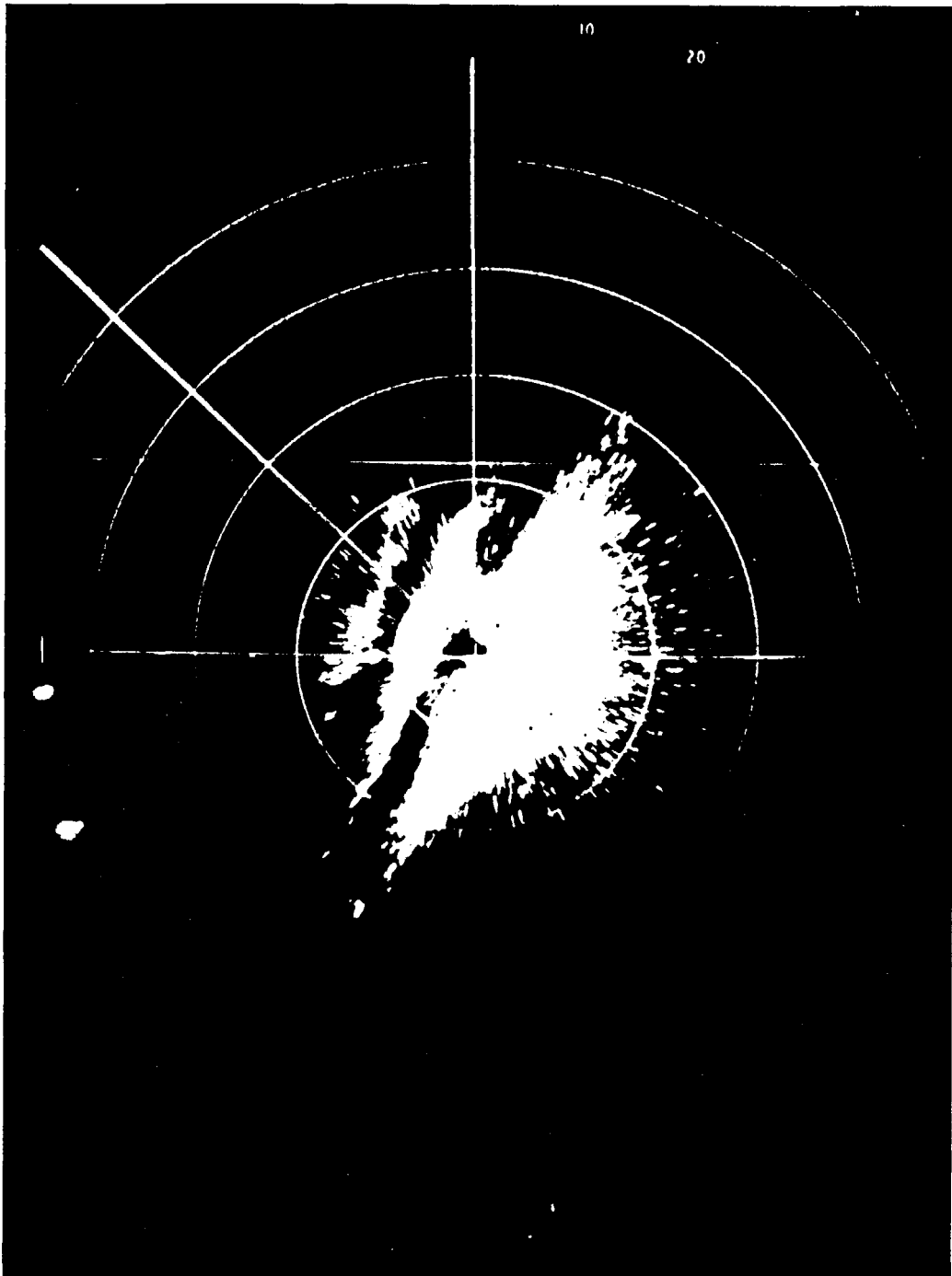


0 1M 2M

Fig. 2 b

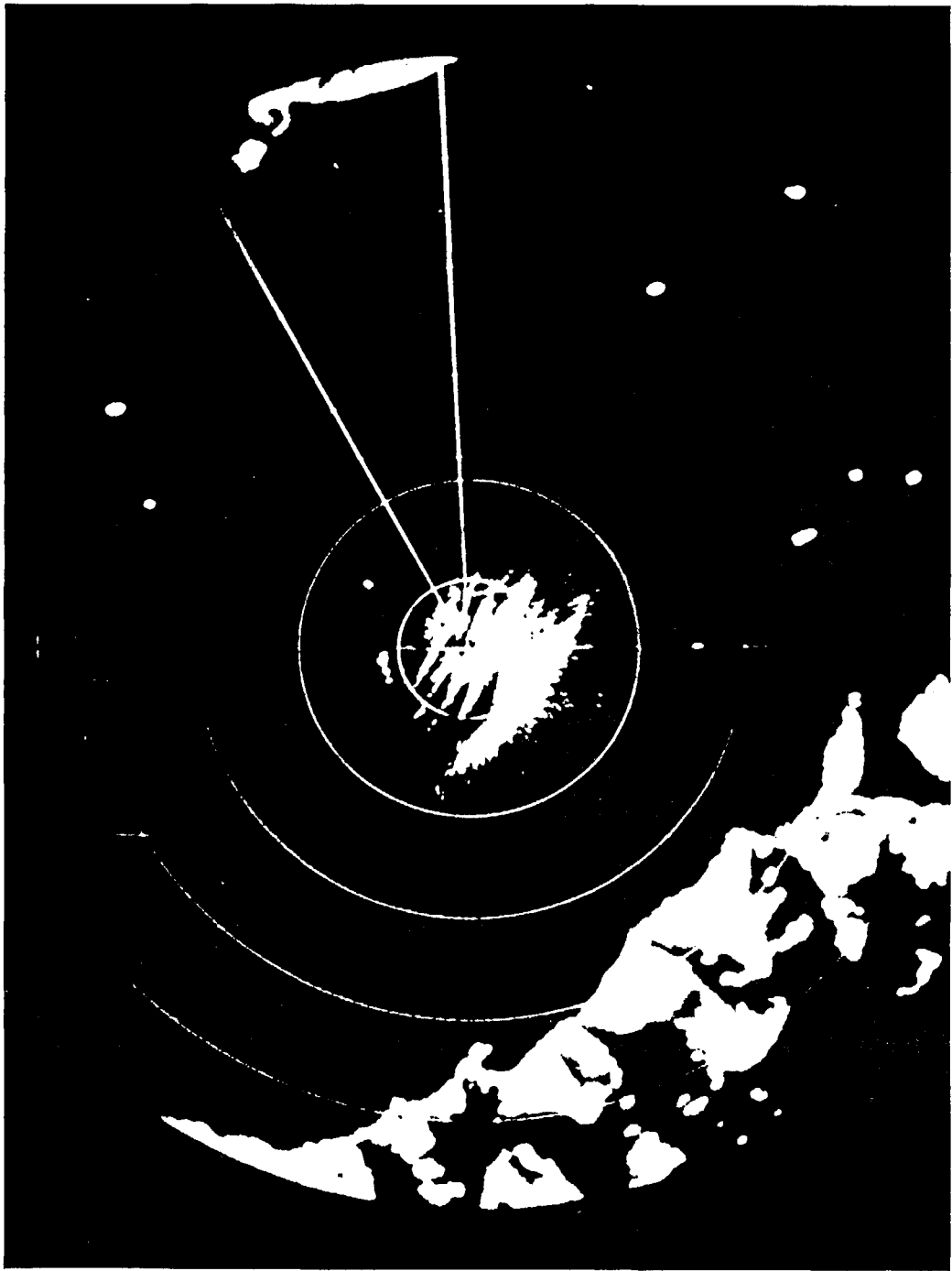


Fig. 3 d



0 1M 2M

Fig. 3 b



0 1M 2M 3M 4M

Fig. 4a



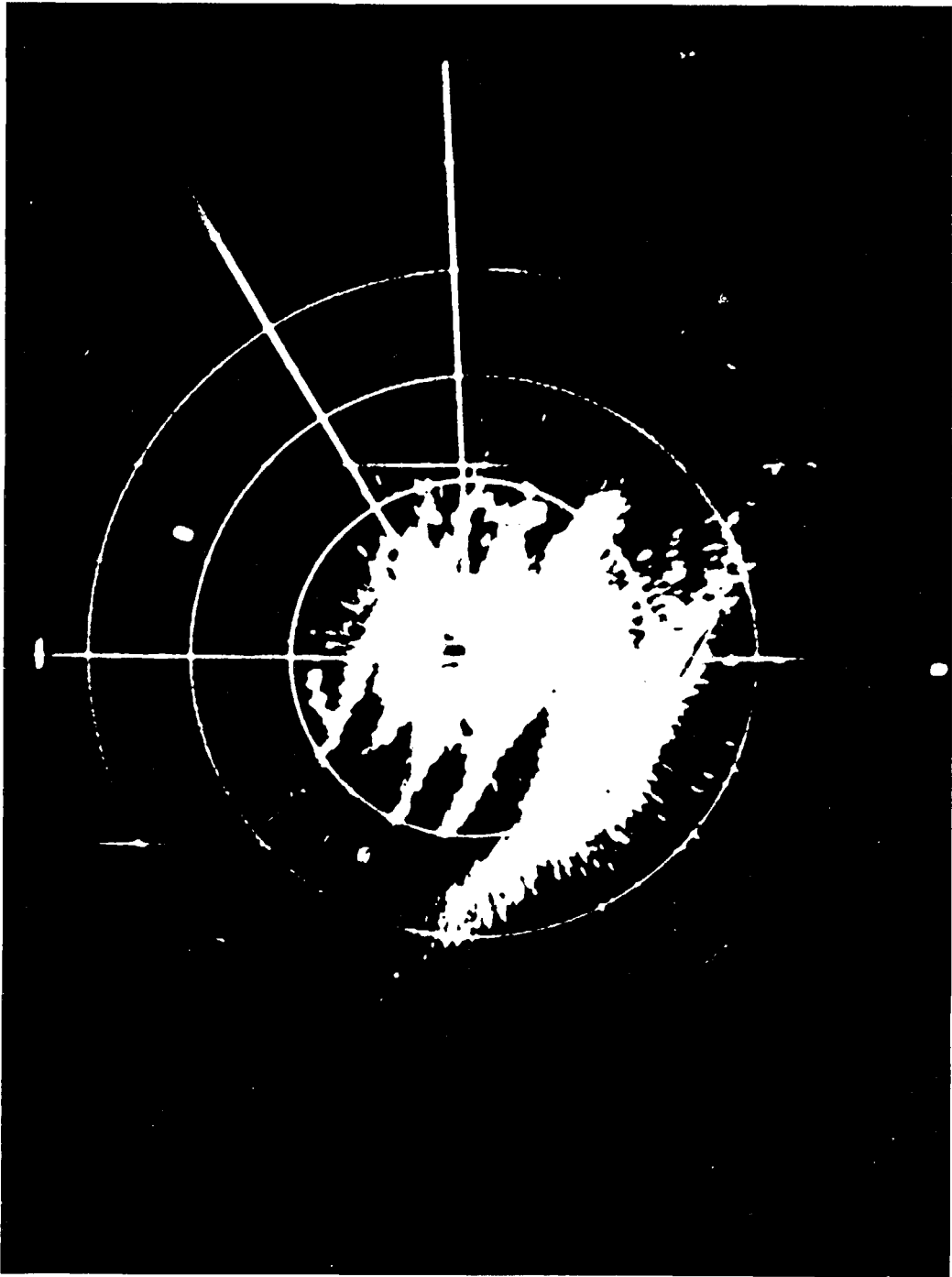
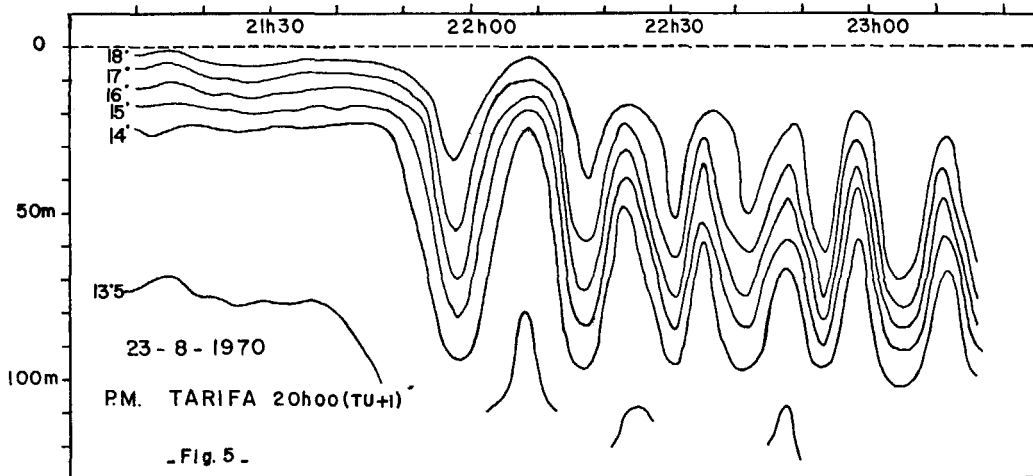


Fig. 4 b

appareil S.T.D. que nous n'avions malheureusement pas pendant la campagne. L'origine biologique de ces couches réfléchissantes est confirmée par le fait que ces phénomènes sont particulièrement nets la nuit, après la remontée du plancton vers la surface, et s'estompent à l'aube.



Des enregistrements obtenus par le Bannock, le Mechelen et le San Jorge aux points  $G_n$ ,  $G_c$ ,  $G_s$  (Fig. 1) l'on peut tirer les conclusions suivantes : en  $G_n$  l'interface entre l'eau atlantique et l'eau méditerranéenne est située vers 35 m de profondeur; dès l'arrivée du front l'écoulement devient violemment turbulent et les oscillations en aval du front sont détruites par ces mélanges verticaux. Par contre en  $G_c$  et  $G_s$  ou l'interface est à une profondeur voisine de 70 m, le passage du front se caractérise par une chute rapide de l'interface (de l'ordre de 80 m en 10 minutes) suivie par un nombre variable d'oscillations qui se terminent par un mélange vertical à l'interface dû à l'augmentation du gradient vertical de la vitesse horizontale.

### III. MESURES DE COURANT

Les conditions météorologiques n'ont permis d'effectuer qu'une seule station de courant de 44 heures au point  $G_s$ ; en ce point trois courantomètres Aanderaa ont été mouillés sur bouée du 22 au 24.8.70 aux profondeurs de 50, 125 et 200 mètres. Chaque courantomètre mesurait la température, la pression, le cap et le nombre de tours d'un rotor de Savonius toutes les deux minutes.

Trois fronts sont décelables sur ces enregistrements par l'augmentation rapide du courant à 50 m (augmentation de l'ordre d'un nœud du courant portant vers l'est en quatre minutes) et la renverse tout aussi brusque du courant à 200 mètres portant à l'est avant le front et à l'ouest après son passage. Ces fronts arrivent en  $G_s$  à 0 h 10 le 23.8.70 (P. M. Tarifa + 5 h,  $C = 74$ ) à 11 h 50 le 23.8.70 (P. M. Tarifa + 4 h 15,  $C = 65$ ) et à 2 h 15 le 24.8.70 (P. M. Tarifa + 6 h,  $C = 56$ ). En admettant que les fronts quittent le seuil une demi-heure avant la P. M. Tarifa ces résultats indiquent une vitesse moyenne sur le fond de 3,7 nœuds  $\pm 20\%$  ce qui est en bon accord avec les mesures directes faites au radar le 31.8.70.

Le fait que les fronts arrivent à des heures différentes par rapport à la pleine

mer implique une assez grande variabilité dans le régime du détroit. La Fig. 6 présente la composante Est du courant moyennée,

$$\bar{U}(t) = \frac{1}{12.4} \int_{t-6.2h}^{t+6.2h} U(\tau) d\tau$$



Fig. 6 - Composante Est moyennée du courant  $\bar{U}$  en fonction du temps.

en  $G_s$ , aux trois profondeurs de mesure. Si le courant moyenné est faible à 125 et 200 m, il varie de 32 à 76 cm/s à 50 m. Seules des mesures de longue durée permettraient de déterminer l'origine de ces fluctuations; mais il est certain qu'elles suffisent pour faire considérablement varier l'heure d'arrivée des fronts sur le méridien de Gibraltar.

#### IV. ÉTUDE D'UN MODÈLE THÉORIQUE DES FRONTS DANS LE DÉTROIT DE GIBRALTAR

Le modèle étudié est décrit par la Fig. 7; à l'instant initial, dans un canal borné à ses extrémités par deux parois verticales et possédant un fond et un plafond rigides horizontaux, deux couches de fluides incompressibles de masses spécifiques  $\rho_1$  et  $\rho_2$  sont superposées, l'interface séparant des deux couches étant indiquée par la ligne en pointillés et les vitesses dans chaque couche étant nulles à l'instant initial. Sous la restriction que les deux fluides ne soient ni miscibles ni visqueux, l'écoulement dans chaque couche dépendra des potentiels de vitesse  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ . En faisant l'hypothèse des petites perturbations l'écoulement sera déterminé par la méthode classique en

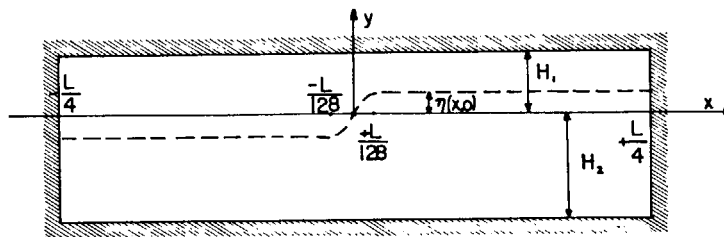
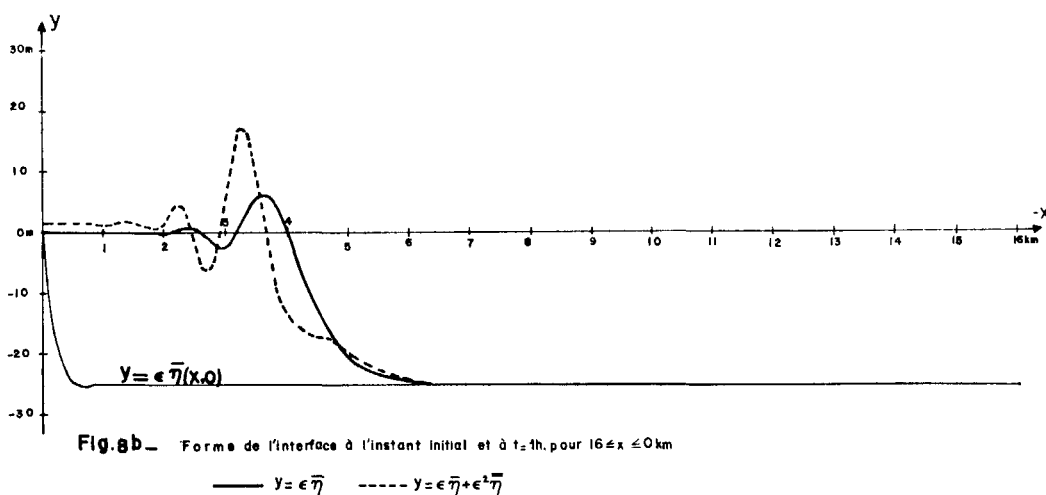
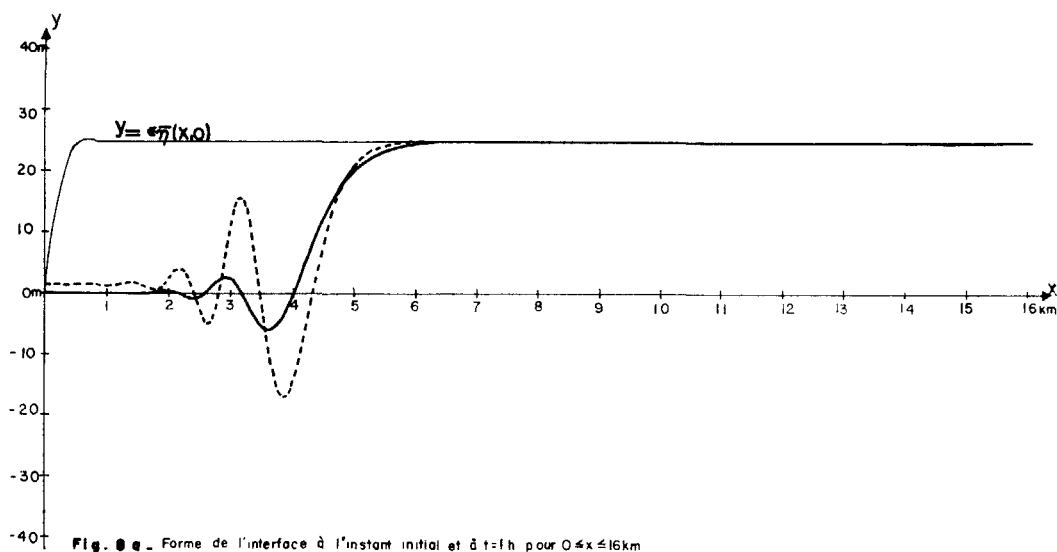


Fig 7. Forme générale du canal et de l'interface à l'instant initial.

développant la solution en série de Fourier. L'évolution en fonction du temps de la forme de l'interface pour la solution de petite perturbation, lorsque  $H_1 = 100$  m,  $H_2 = 700$  m,  $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2 = 0.002$ ,  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup> est donnée par les courbes en trait plein des figures 8a et 10b. En aval des fronts, engendrés par le déséquilibre du système à l'instant initial, apparaissent déjà à cette approximation, des oscillations mais leurs amplitudes et leurs taux de croissance semblent faibles par rapport au phénomène observé à Gibraltar.

Ces résultats indiquent que l'hypothèse des petites perturbations est trop restrictive. Il faut donc rechercher une solution en deuxième approximation en substituant les valeurs de la solution du problème linéarisé dans les termes non linéaires des conditions aux limites à l'interface. (Les détails de ces calculs sont exposés dans un article des Cahiers Océanographiques à paraître en 1971). L'évolution de la forme de l'interface donnée par cette deuxième approximation est décrite par les courbes en tiretés des figures 8a à 10b. L'influence des termes non linéaires augmente l'ampli-



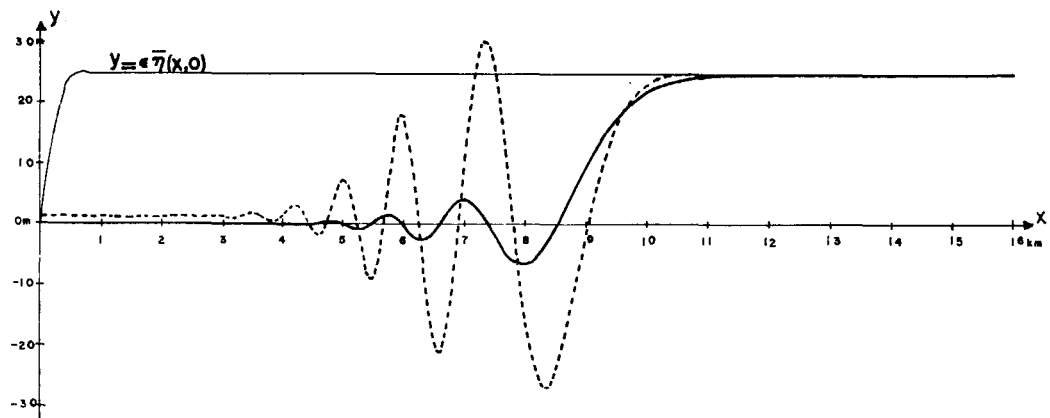


Fig. 9a - Forme de l'interface à l'instant initial et à  $t=2h$  pour  $0 \leq x \leq 16 \text{ km}$ .

—  $y = \epsilon \bar{\eta}$     - - - -  $y = \epsilon \bar{\eta} + \epsilon^2 \bar{\eta}$

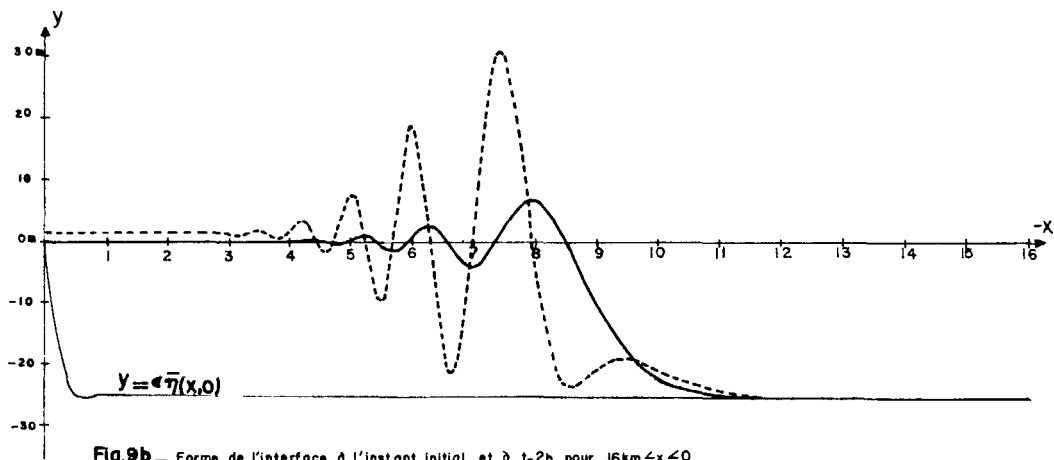


Fig. 9b - Forme de l'interface à l'instant initial et à  $t=2h$  pour  $16 \text{ km} \leq x \leq 0$

—  $y = \epsilon \bar{\eta}$     - - - -  $y = \epsilon \bar{\eta} + \epsilon^2 \bar{\eta}$

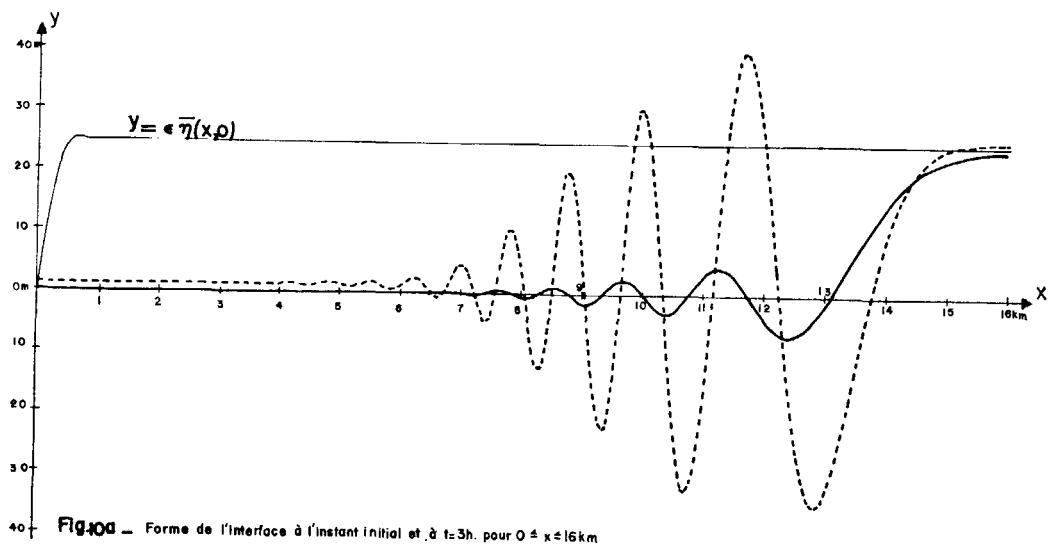
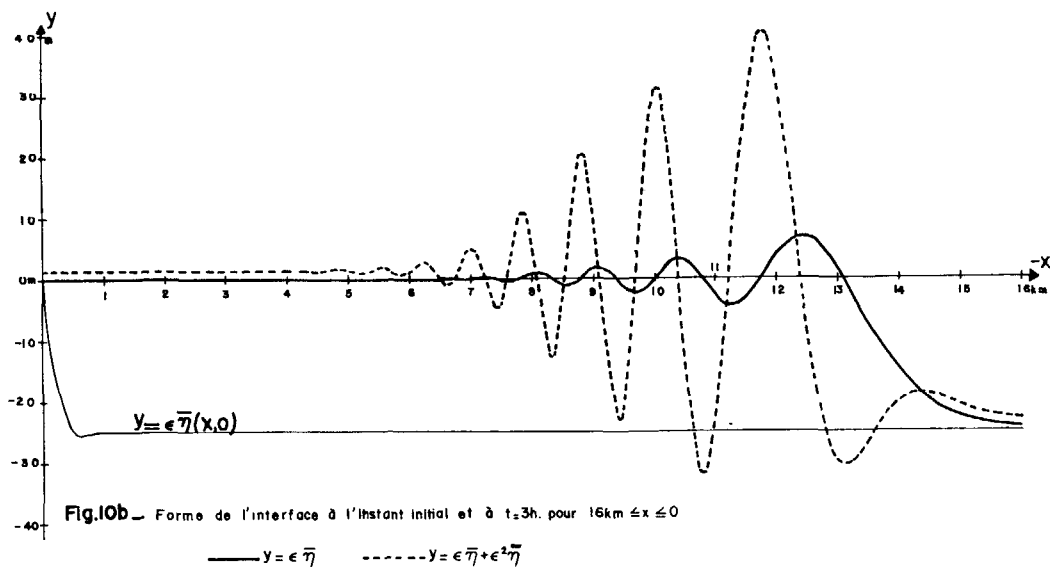


Fig. 9c - Forme de l'interface à l'instant initial et à  $t=3h$  pour  $0 \leq x \leq 16 \text{ km}$

—  $y = \epsilon \bar{\eta}$     - - - -  $y = \epsilon \bar{\eta} + \epsilon^2 \bar{\eta}$



tude des oscillations en aval des fronts, intensifie la pente du front de dépression et diminue la pente du front d'élévation. Ces résultats recourent ceux d'une étude antérieure (CAVANIE, 1969) faite en supposant la pression hydrostatique; le modèle à deux couches conduit alors à l'étude d'un système hyperbolique d'équations aux dérivées partielles quelque peu analogue à celui des ondes longues de surface. L'étude de ce système montre que les termes non linéaires augmentent la pente des fronts de dépression et diminuent la pente des fronts d'élévation lorsque l'épaisseur de la couche supérieure est nettement plus petite que celle de la couche inférieure.

Le modèle non hydrostatique qui tient compte en deuxième approximation des termes non linéaires présente deux défauts importants lorsqu'on l'applique au phénomène étudié dans le détroit de Gibraltar. Le premier est que l'amplitude des fronts est si grande dans la nature, que le développement en approximations successives, en supposant qu'il soit convergent, devrait être poussé plus loin; mais les calculs de la deuxième approximation sont déjà très longs et il ne semble pas raisonnable de s'obstiner dans cette voie. Le deuxième défaut de ce modèle est de négliger l'influence des échanges turbulents à travers l'interface qui peuvent atténuer considérablement les oscillations en aval du front. L'intérêt du modèle est de fournir une explication à l'existence d'oscillations de courtes périodes dans le détroit de Gibraltar et de montrer que l'étude de ces phénomènes ne peut se faire qu'en tenant compte des termes non linéaires et des accélérations verticales.

CAVANIE A., 1969, Sur la Génèse et la Propagation d'Ondes Internes dans un Milieu à Deux Couches. *Cahiers Océanographiques* XXI, 9, 1969, pp. 831-843.

CAVANIE A., 1970, Modèle Non Linéaire et Non Hydrostatique Appliqué à l'étude des Fronts internes dans le Détroit de Gibraltar. *Cahiers Océanographiques*. A paraître.

CHIAN-SHUN, YIH et GUHA, 1955, Hydraulic Jump in a Fluid System of Two Layers. *Tellus* 7 (3), Août 1955, pp. 358-366.

COURANT R. et HILBERT D. 1962, *Methods of Mathematical Physics* — Vol. II, Interscience Publ. New York.

- 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. Étude 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. Étude Hydrologique. *Cahiers Océanographiques* 13 (5), Mai 1961, pp. 276-291.
- 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 Startified 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.
- MILNE-THOMSON L., Theoretical Hydronamics. Mac Millan Co., N. Y., 1960.
- PEREGRINE D. H., Calculations of the development of an undular bore. *J. 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.