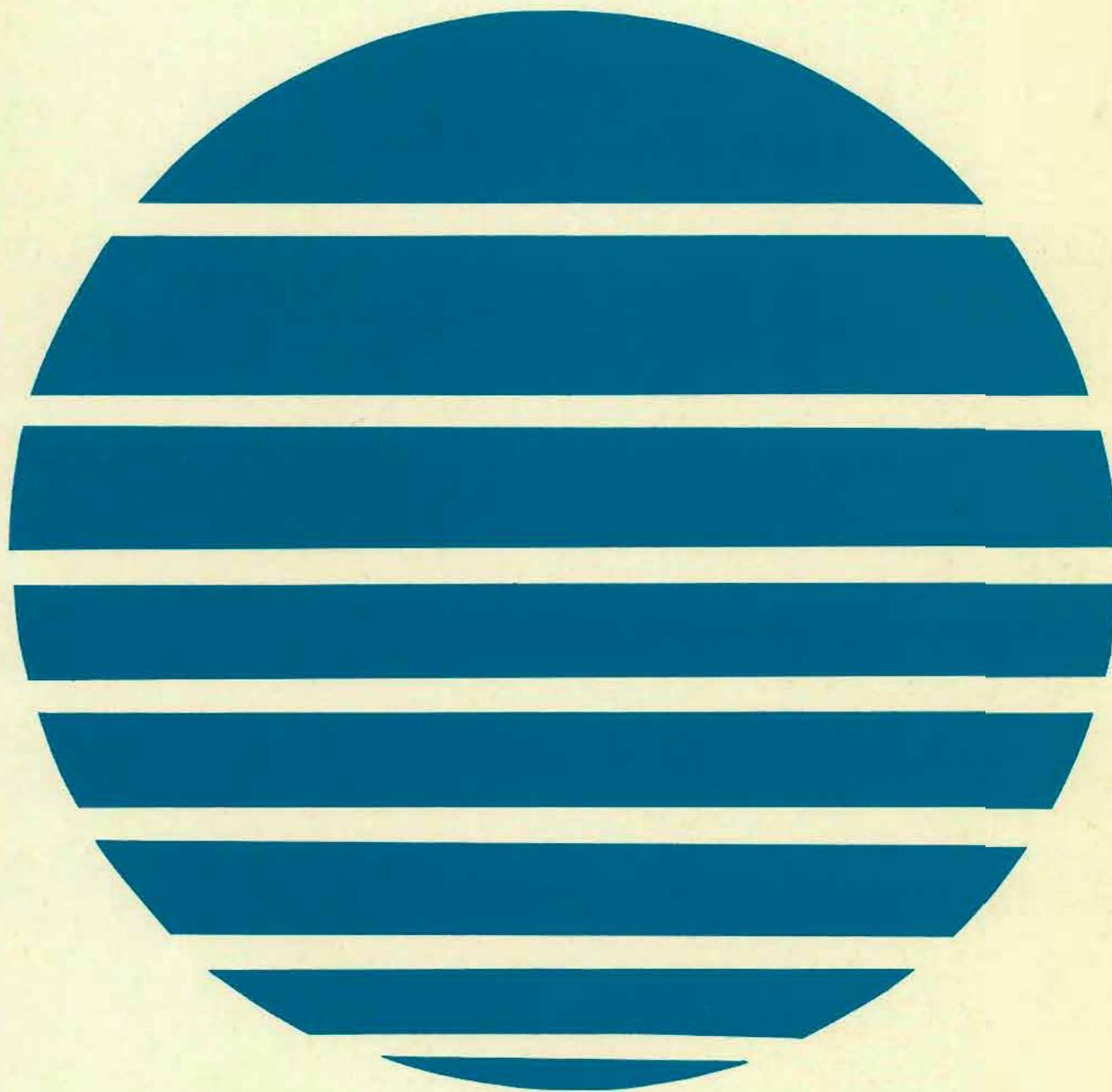


ANNALES HYDROGRAPHIQUES

5^e Série – Vol. 10 – 1982

N^o 757



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'Établissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la marine, 13, rue du Chatellier, B.P. 426, 29275 Brest Cedex.

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
L'Ingénieur Hydrographe Général Henri DYEUVRE (1893-1982), par M. Jean BOURGOIN, Ingénieur Général de l'Armement (Directeur du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine)	3
Première partie	
Ondes de frontière dans une mer stratifiée dont le fond est incliné, par M.B. SAINT-GUILY, Muséum d'Histoire Naturelle et Laboratoire Arago, Banyuls s/mer	7
Etude des courants de la marée M_2 dans la Manche à l'aide du modèle réduit de Grenoble, par Mlle M. FORNERINO et M.G. CHABERT D'HIERES, Institut de Mécanique de Grenoble	13
Prédiction de la marée à Brest, par M.B. SIMON, Ingénieur Civil scus contrat, Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine	33
Application de la méthode des concordances par espèces à la marée dans la Loire, par M. K.J. GEORGE, Department of Marine Science Plymouth Polytechnic	51
Etude du front de Malte à partir de données de télédétection et de mesures in-situ, par Mme CHAMPAGNE-PHILIPPE, Centre de Météorologie Spatiale de Lannion et M.M. D. GUEVEL, Ingénieur de l'Armement R. FROUIN, Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine	65
Deuxième partie	
Les vedettes hydrographiques en service en 1981, par M.P. SOUQUIERE, Ingénieur Principal de l'Armement (hydrographe) . . .	101
Mission Hydrographique de Circonstance de l'Océan Indien (décembre 1980-avril 1981), par M. F. HABERT, Ingénieur Principal de l'Armement (hydrographe)	113





L'INGÉNIEUR HYDROGRAPHE GÉNÉRAL HENRI DYÈVRE (1893-1982)

par

M. Jean BOURGOIN

Ingénieur Général de l'Armement (Hydrographe)

Directeur du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Fils de Louis Dyèvre, officier d'artillerie, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Henri Dyèvre est né le 21 décembre 1893, à Vannes (Morbihan).

Entré à l'Ecole Navale en 1910, avec le numéro 2 de sa promotion, il en sort premier en 1912 et premier de l'Ecole d'application en 1913. Enseigne de vaisseau de 1^{ère} classe en 1915, lieutenant de vaisseau en 1919, capitaine de corvette en 1928, capitaine de frégate en 1934, il est capitaine de vaisseau en 1940.

Entré dans le corps des ingénieurs hydrographes comme ingénieur en chef de 1^{ère} classe le 1^{er} septembre 1941, il est promu ingénieur général de 2^e classe le

2 juillet 1942 et ingénieur général de 1^{ère} classe le 23 juin 1948.

Embarqué en 1914 sur la *Zelée* à Tahiti, il effectue dans les îles Tuamotou divers travaux hydrographiques pour lesquels il reçoit des félicitations du Ministre.

En août et septembre 1914, il participe aux opérations de guerre de la *Zelée* : prise à Makatea du cargo allemand *Walkure* dont il prend le commandement pour le ramener à Papeete ; organisation et entraînement d'une batterie de 6 auto-canon de 37 mm, dont il exerce le commandement lors du bombardement de Tahiti par l'escadre allemande du Pacifique, le 22 septembre 1914.

Embarqué sur le *Montcalm*, de décembre 1914 à mai 1917, il prend part aux diverses opérations de ce bâtiment à Singapour, dans le canal de Suez, en mer Rouge et dans la Mer des Antilles.

En mai 1917, il est embarqué au choix à la Division des Patrouilles de Bretagne, à Brest, où il contribue, en qualité d'officier de liaison, à l'organisation militaire et à l'installation matérielle de la base navale américaine, ce qui lui vaut les félicitations de l'Amiral Fletcher.

Il est affecté d'août 1918 à septembre 1919 au centre naval de Savannah (Etats-Unis), où il est chargé de diverses missions, notamment de prendre à Port William (Canada) le commandement d'une section de chalutiers qu'il a armés et équipés, puis d'exercer à Boston le commandement supérieur de 10 chalutiers en achèvement d'armement.

Après avoir exercé des fonctions diverses à Brest de 1919 à 1921, il est nommé le 15 septembre 1921, professeur de navigation et de calculs nautiques à l'École Navale. Il est affecté sans interruption à ce poste jusqu'en 1927, puis de nouveau de 1930 à 1933. Il forme alors de nombreuses promotions aux méthodes d'observations et de calculs astronomiques. Il est aussi professeur au cours de perfectionnement à la navigation aérienne des officiers des forces aériennes de terre, attire l'attention du Ministre par son zèle et sa compétence et reçoit une plaquette souvenir de la Ligue aéronautique de France.

En 1928 et 1929, entre ses deux affectations à l'École Navale, il participe comme commandant des canonnières *Vaillante* et *Engageante* à la Mission hydrographique de dragages des côtes Nord et Ouest de France.

Affecté de 1933 à 1936 à l'Etat-Major Général (2^e Bureau), il publie durant cette période dans la Revue Maritime diverses études sur la navigation astronomique ("Réflexion sur la navigation de demain", "Le point à l'Air", "Le point autour de midi"). Il est membre en 1935 de la commission chargée par le Ministre de l'Air de poser les bases de l'organisation générale de la navigation aérienne astronomique et met au point un projet d'éphémérides aéronautiques.

Il prend le commandement de l'École de Pilotage de la Flotte et de l'avis *Ancre* de 1936 à 1938 et met à jour le pilotage des côtes de France grâce aux travaux hydrographiques les plus récents. Il reçoit en 1937 un témoignage officiel de satisfaction du Préfet Maritime de la 2^e Région pour l'impulsion nouvelle donnée à l'École de Pilotage et les résultats obtenus en ce qui concerne la formation des pilotes.

Il suit en 1938-1939 la session du Centre des Hautes Etudes Navales et est reconnu apte aux fonctions de chef d'Etat-Major.

Il est désigné à la fin d'août 1939 comme officier de liaison auprès du Vice-Amiral, Commandant la Dover Patrol à Douvres, puis affecté à l'Etat-Major de l'Amiral Sud à Toulon. Commandant la Marine et Délégué de l'Amirauté française à Tunis de 1940

à 1942, il reconstruit à Bizerte en 1941 un cours de perfectionnement des Pilotes de la Flotte.

Il remplit de 1942 à 1944, comme ingénieur hydrographe général de 2^e classe les fonctions de Directeur adjoint du Service Hydrographique. Il rassemble durant cette période, à l'insu des autorités occupantes, les archives de l'École de Pilotage de la Flotte.

Il prend à la Libération, le 15 août 1944, les fonctions de Directeur du Service Hydrographique de la Marine et conservera ce poste jusqu'au 1^{er} janvier 1956, date à laquelle il est versé dans la 2^e Section, par application des mesures sur la limite d'âge. C'est sous sa ferme autorité que reprit l'activité de ce Service au sortir de la période troublée de la guerre et la nouvelle organisation qu'il mit en place à cette époque devait rester pratiquement inchangée jusqu'en 1971. Il s'attacha tout particulièrement à la qualité des documents nautiques, élaborés (cartes marines, tables de navigation, annuaires de marée) et se livra avec passion à l'étude de la toponymie, spécialement la toponymie bretonne où son nom fait autorité.

Décorations françaises et étrangères :

Commandeur de la Légion d'Honneur (1949); Commandeur du Mérite Maritime (1953); Officier de l'Instruction Publique (1935); Médaille de 2^e classe des Services Militaires Volontaires (1936); Chevalier de l'Ordre de Dannebrog (Danemark) (1925); Officier de l'Ordre des Trois Etoiles (Lettonie) (1933); Grand Officier du Nichan Iftikar (1942).

Titres :

— Membre, ex-officio : du Comité Hydrographique, du Comité d'Océanographie et d'Etudes des Côtes, de la Commission des Phares, du Bureau des Longitudes, du Conseil d'administration de l'Office des Pêches, de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée, du Conseil Supérieur de la Météorologie, du Conseil des Terres Australes et Antarctiques Françaises.

— Membre à titre personnel : de l'Académie de Marine; de l'Académie des Sciences Coloniales, du Comité National de Géodésie et Géophysique, du Comité Central des Travaux géographiques, de la Section de géographie du Comité national des travaux historiques et scientifiques, de la Commission de Toponymie et d'Anthroponymie.

— Henri Dyèvre était également Directeur honoraire du Service Hydrographique. Père de dix enfants et titulaire du prix Cognacq en 1922, deux de ses fils sont morts pour la France au cours de la dernière guerre, l'un lieutenant d'infanterie coloniale, tombé en novembre 1944 à la tête de sa section, au début de la campagne d'Alsace, l'autre membre d'un réseau de Résistance, décédé en déportation, à l'âge de 19 ans. L'ingénieur général Henri Dyèvre est décédé à Paris le 28 mai 1982. Ses obsèques ont eu lieu à Poullaouen (Finistère) le 2 juin 1982.

PREMIÈRE PARTIE



ONDES DE FRONTIÈRE DANS UNE MER STRATIFIÉE DONT LE FOND EST INCLINÉ

par

Bernard SAINT-GUILY
Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris
et Laboratoire Arago, Banyuls-sur-Mer

RESUME

Des solutions tridimensionnelles qui représentent des ondes guidées par une côte rectiligne et un fond incliné de pente constante, dans une mer tournante et stratifiée, ont été obtenues sous forme explicite. Elles montrent que le premier mode n'est pas modifié par la présence de la stratification. Par contre, les caractères des modes d'ordre supérieur dépendent de la valeur d'un paramètre de stratification qui est donné par le produit de la fréquence de Väisälä et du sinus de l'angle de pente divisé par la fréquence d'inertie. De plus, dans une mer profonde, l'existence d'une stratification est une condition nécessaire pour que des ondes de fond de basses fréquences puissent se propager sur un fond incliné.

ABSTRACT

Three-dimensional explicit solutions which represent edge waves trapped on a constant slope along a rectilinear coast, in a rotating and stratified sea, have been obtained. They show that the stratification does not affect the first mode. But the properties of the modes of higher order depend on the value of a stratification parameter which is the product of the Väisälä frequency and of the slope angle divided by the inertial frequency. Besides, in a deep sea, the existence of a stratification is a necessary condition for the possibility of low frequencies progressive bottom waves on a slope.

INTRODUCTION

Dans les upwellings, et d'une manière générale dans la réponse de la mer aux forces transitoires, la présence de pentes du fond et d'irrégularités topographiques doit jouer un rôle important. En particulier les ondes topographiques côtières peuvent être excitées par résonance pour des longueurs d'onde comparables à quelques rayons internes de déformation (quelques dizaines de km). Les talus et les plateaux continentaux ont le plus souvent des profils dont la forme ressemble à des coins d'eau limités par la surface et des fonds de pente constante. Dans le cas d'un profil en forme de marche, la production d'ondes de plateau est due à la présence de frontières verticales et d'une largeur finie du plateau. Dans le cas de profils en forme de coins, la pente du fond et la rotation donnent naissance à des ondes topographiques; et les modes barotrope et barocline sont nécessairement couplés. S'il existe en outre une profondeur non nulle à la côte, ou bien une discontinuité de pente au large, les ondes sont de modes hybrides: Kelvin-topographiques ou plateau-topographiques.

Les ondes de frontière, ou de bord, sur une pente constante, ont été étudiées par G. Stokes (1846) et par F. Ursell (1952) pour un fluide homogène, puis par H. Greenspan (1970) pour un fluide stratifié avec une loi exponentielle. Les effets de la rotation ont été examinés par B. Saint-Guiluy (1968, 1979) pour un fluide homogène et stratifié, puis par S. Muzylev et A. Odulo (1980).

Nous présentons dans les pages qui suivent les solutions exactes représentant des ondes frontière tridimensionnelles sur une pente constante, dans une mer en rotation et de densité exponentielle. Ce travail a été effectué indépendamment de celui de S. Muzylev et A. Odulo (1980) dont nous venons d'avoir une traduction. Les résultats dans l'ensemble sont naturellement les mêmes. Cependant, la présentation étant différente, et quelques compléments ayant été apportés sur certains points, il nous semble utile de publier ici cette étude.

Les équations linéarisées

Choisissons l'axe oy le long de la côte rectiligne, l'axe ox normal à la côte, orienté vers le large, et

l'axe oz vertical, orienté vers le haut (Figure 1). La densité ρ est une fonction exponentielle de z plus une perturbation δ .

$$\rho = \rho_0 (1 + \delta) \quad , \quad \rho_0 = e^{-\alpha z} \quad ; \quad (1)$$

le fond de pente constante ϵ est représenté par

$$x \sin \epsilon + z \cos \epsilon = 0 \quad , \quad (2)$$

Au premier ordre les équations du mouvement sont linéaires, et représentent des petites perturbations de l'état d'équilibre:

$$\begin{aligned} \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} - fv \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x} \quad , \\ \rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial t} + fu \right) &= - \frac{\partial p}{\partial y} \quad , \\ \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} &= - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_0 \delta g \quad , \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \quad , \\ \frac{\partial \delta}{\partial t} - \alpha w &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

u, v, w, p, δ désignent les perturbations de la vitesse, de la pression et de la densité; $f = 2 \omega \sin l$ (ω vitesse angulaire de rotation de la terre, l latitude) désigne la fréquence d'inertie.

Les conditions aux frontières sont également au premier ordre les suivantes. Sur la surface libre nous avons

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \rho_0 g w \Big|_{z=0} = 0 \quad , \quad (4)$$

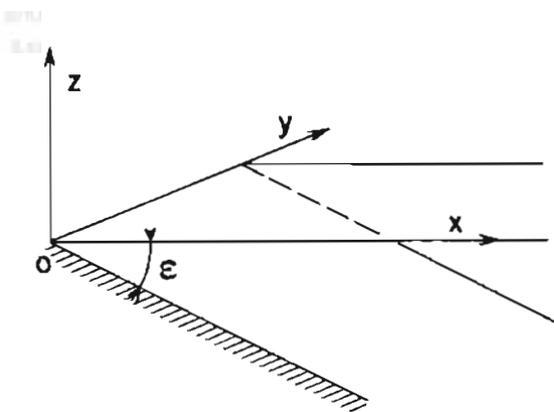


FIG. 1. — Choix des axes de coordonnées.

et sur le fond F

$$u \sin \epsilon + w \cos \epsilon \Big|_F = 0 \quad (5)$$

En éliminant δ, u, v, w nous obtenons pour p l'équation d'onde

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + N^2 \right) \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + \\ + \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + f^2 \right) \left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{N^2}{g} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

où nous avons posé $N^2 = g\alpha$; N représente la fréquence de Väisälä. En formant les équations d'onde pour les composantes de la vitesse u, v, w , on trouve qu'elles diffèrent de l'équation (6) seulement par le signe du dernier terme qui est négatif. Les conditions (4), (5) sur la surface libre et le fond peuvent s'écrire

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + N^2 + g \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{z=0} = 0, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + N^2 \right) \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} + f \frac{\partial p}{\partial y} \right) \sin \epsilon + \\ + \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + f^2 \right) \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial t} \cos \epsilon \Big|_F = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Cherchons des solutions qui représentent des ondes se propageant dans une direction parallèle à la côte sous la forme

$$p = e^{j(ky - \sigma t)} \varphi(x, z). \quad (9)$$

Nous obtenons pour φ un problème aux valeurs propres défini par l'équation

$$\begin{aligned} (N^2 - \sigma^2) \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - k^2 \varphi \right) + \\ + (f^2 - \sigma^2) \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{N^2}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

et les conditions

$$g \frac{\partial \varphi}{\partial z} + (N^2 - \sigma^2) \varphi \Big|_{z=0} = 0, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (N^2 - \sigma^2) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} - f \frac{k}{\sigma} \varphi \right) \sin \epsilon + \\ + (f^2 - \sigma^2) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cos \epsilon \Big|_F = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Notons que l'approximation de Boussinesq qui consiste à négliger les gradients de densité dans les termes de l'accélération des équations du mouvement, se traduit simplement par la suppression du dernier terme de l'équation d'onde (6).

Le premier mode

Le premier mode a la forme simple d'une exponentielle

$$\varphi = e^{-\lambda x - \mu z}, \quad (13)$$

où $\lambda, \mu,$ et k sont déterminés par les relations

$$\begin{aligned} g\lambda \sin \epsilon &= \sigma (\sigma \cos \epsilon \mp f), \\ g\mu &= N^2 - \sigma^2, \\ gk \sin \epsilon &= -\sigma (f \cos \epsilon \mp \sigma). \end{aligned} \quad (14)$$

Les expressions de λ et k sont identiques à celles obtenues dans le cas d'une mer homogène (Saint-Guily, 1968). Ainsi pour le premier mode la dispersion n'est pas modifiée par la stratification. La relation de dispersion se traduit par le diagramme fréquence-nombre d'onde de la figure 2.

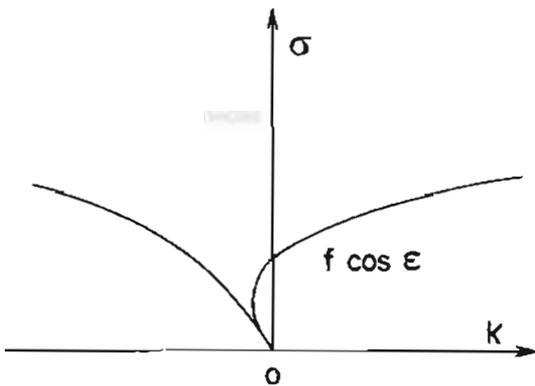


FIG. 2. — Diagramme fréquence-nombre d'onde du mode fondamental.

Les modes d'ordre supérieur

Pour construire les solutions représentant les modes d'ordre supérieur il faut effectuer la transformation

$$\varphi = e^{-N^2 z/2g} \psi(x, z); \quad (15)$$

La fonction ψ est alors une solution du système

$$(N^2 - \sigma^2) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + (f^2 - \sigma^2) \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \left[(N^2 - \sigma^2) k^2 + (f^2 - \sigma^2) \frac{N^4}{4g^2} \right] \psi = 0, \quad (16)$$

$$g \frac{\partial \psi}{\partial z} + \left(\frac{N^2}{2} - \sigma^2 \right) \psi \Big|_{z=0} = 0,$$

$$\begin{aligned} (N^2 - \sigma^2) \frac{\partial \psi}{\partial x} \sin \epsilon + (f^2 - \sigma^2) \frac{\partial \psi}{\partial z} \cos \epsilon \\ - \left[f \frac{k}{\sigma} (N^2 - \sigma^2) \sin \epsilon + \frac{N^2}{2g} (f^2 - \sigma^2) \cos \epsilon \right] \psi \Big|_F = 0. \end{aligned}$$

Dans les océans la stratification est relativement grande presque partout si bien que la période de Väisälä est inférieure à la période d'inertie: $N > f$. Dans ces conditions on peut distinguer trois domaines. Posons

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{N^2 - \sigma^2}{f^2 - \sigma^2}, \\ \chi^2 &= \Lambda + \frac{N^4}{4g^2 k^2}, \\ M &= \Lambda \frac{f}{\sigma} \operatorname{tg} \epsilon + \frac{N^2}{2gk}, \\ \beta &= \frac{\sigma^2}{gk}, \quad \tau = \frac{N^2}{\sigma^2} \end{aligned} \quad (17)$$

1) Dans le premier domaine où $\Lambda \geq 0, \chi^2 > 0$, la transformation

$$\xi = k \Lambda^{-\frac{1}{2}} x, \quad \zeta = kz, \quad \operatorname{tg} \Omega = \Lambda^{\frac{1}{2}} \operatorname{tg} \epsilon, \quad (18)$$

permet de mettre le système (16) sous la forme simple

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} - \chi^2 \psi = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \zeta} - \beta \left(1 - \frac{\tau}{2} \right) \psi \Big|_{\zeta=0} = 0,$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \xi} \operatorname{tg} \Omega + \frac{\partial \psi}{\partial \zeta} - M \psi \Big|_{\xi+\zeta \operatorname{tg} \Omega=0} = 0.$$

La solution pour le mode n a la forme d'une somme de $2n - 1$ exponentielles. Nous avons

$$\begin{aligned} \psi_{n+1} &= e^{-\chi(\xi \cos \theta - \zeta \sin \theta)} \\ &+ \sum_{m=1}^n A_{mn} e^{-\chi[\xi \cos(\theta + 2(m-1)\Omega) + \zeta \sin(\theta + 2(m-1)\Omega)]} \end{aligned} \quad (20)$$

$$+ \sum_{m=1}^m C_{mn} e^{-\chi[\xi \cos(\theta + 2m\Omega) - \zeta \sin(\theta + 2m\Omega)]}$$

avec

$$\begin{aligned} A_{1n} &= - \frac{\operatorname{tg} n \Omega}{\operatorname{tg}(\theta + n \Omega)}, \\ A_{mn} &= \frac{(-1)^m \operatorname{tg} n \Omega}{\operatorname{tg}(\theta + n \Omega)} \frac{m}{\prod_{j=2}^m \operatorname{tg}(\theta + (j-2)\Omega)} \frac{\operatorname{tg}(\theta + (j-2)\Omega) \operatorname{tg}(n-j+1)\Omega}{\operatorname{tg}(\theta + (n+j-1)\Omega) \operatorname{tg}(j-1)\Omega}, \\ C_{mn} &= A_{mn} \frac{\operatorname{tg}(\theta + (m-1)\Omega)}{\operatorname{tg} m \Omega}, \end{aligned} \quad (21)$$

et

$$\begin{aligned} \chi \operatorname{Sin}(\theta + 2n\Omega) &= \beta \left(1 - \frac{\tau}{2} \right), \\ \chi \operatorname{Sin}(\theta - \Omega) &= M \operatorname{Cos} \Omega. \end{aligned} \quad (22)$$

2) Dans le second domaine où $\Lambda < 0, \chi^2 > 0$, la transformation

$$\xi = k(-\Lambda)^{-\frac{1}{2}} x, \zeta = kz, \text{th } \Omega = (-\Lambda)^{1/2} \text{tg } \epsilon, \quad (23)$$

$$\sigma^2 \geq \sigma_0^2 = N^2 \text{Sin}^2 \epsilon + f^2 \text{Cos}^2 \epsilon,$$

conduit au système

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - \chi^2 \psi = 0, \quad (24)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \zeta} - \beta \left(1 - \frac{\tau}{2}\right) \psi \Big|_{\zeta=0} = 0,$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \zeta} - \text{th } \Omega \frac{\partial \psi}{\partial \xi} - M \psi \Big|_{\zeta+\xi \text{th } \Omega=0} = 0;$$

et les solutions ont pour expressions :

$$\psi_{n+1} = e^{-\chi(\xi \text{sh } \theta - \zeta \text{ch } \theta)}$$

$$+ \sum_{m=1}^n A_{mn} e^{-\chi[\xi \text{sh}(\theta - 2(m-1)\Omega) + \zeta \text{Ch}(\theta - 2(m-1)\Omega)]}$$

$$+ \sum_{m=1}^n C_{mn} e^{-\chi[\xi \text{Sh}(\theta - 2m\Omega) - \zeta \text{Ch}(\theta - 2m\Omega)]}$$

avec

$$A_{1n} = \text{th } n\Omega \text{ th } (\theta - n\Omega)$$

$$A_{mn} = (-1)^{m-1} \text{th } n\Omega \text{ th } (\theta - n\Omega) \times$$

$$\prod_{j=2}^m \frac{\text{th}(\theta - (n+j-1)\Omega) \text{th}(n-j+1)\Omega}{\text{th}(\theta - (j-2)\Omega) \text{th}(j-1)\Omega},$$

$$C_{mn} = -A_{mn} \text{Coth } m\Omega \text{Coth}(\theta - (m-1)\Omega).$$

et

$$\chi \text{Ch}(\theta - 2n\Omega) = \beta \left(1 - \frac{\tau}{2}\right), \quad (27)$$

$$\chi \text{Ch}(\theta + \Omega) = M \text{Ch } \Omega.$$

3) Dans le troisième domaine $\Lambda < 0, \chi^2 < 0$; effectuons la même transformation que la précédente (23); nous avons le même système (24) à l'exception de l'équation qui s'écrit maintenant :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \chi'^2 \psi = 0, \quad (28)$$

avec

$$\chi'^2 = -\chi^2$$

Les solutions sont données par

$$\psi_{n+1} = e^{-\chi'(\xi \text{Ch } \theta - \zeta \text{Sh } \theta)}$$

$$+ \sum_{m=1}^n A_{mn} e^{-\chi'[\xi \text{Ch}(\theta - 2(m-1)\Omega) + \zeta \text{Sh}(\theta - 2(m-1)\Omega)]}$$

$$+ \sum_{m=1}^n C_{mn} e^{-\chi'[\xi \text{Ch}(\theta - 2m\Omega) - \zeta \text{Sh}(\theta - 2m\Omega)]}$$

avec

$$A_{1n} = \frac{\text{th } n\Omega}{\text{th}(\theta - n\Omega)},$$

$$A_{mn} = \frac{(-1)^{m-1} \text{th } n\Omega}{\text{th}(\theta - n\Omega)} \prod_{j=2}^m \frac{\text{th}(\theta - (j-2)\Omega) \text{th}(n-j+1)\Omega}{\text{th}(\theta - (n+j-1)\Omega) \text{th}(j-1)\Omega}, \quad (30)$$

$$C_{mn} = -A_{mn} \frac{\text{th}(\theta - (m-1)\Omega)}{\text{th } m\Omega},$$

et

$$\chi' \text{Sh}(\theta - 2n\Omega) = \beta \left(1 - \frac{\tau}{2}\right),$$

$$\chi' \text{Sh}(\theta + \Omega) = M \text{Ch } \Omega. \quad (31)$$

Les relations (22), ou (27), ou (31) donnent par élimination de θ et Ω une relation de dispersion.

Relation de dispersion pour le second mode

Dans le cas du second mode la relation de dispersion peut se mettre sous la forme

$$\alpha \mathfrak{F}^2 + \beta \mathfrak{F} + \mathfrak{C} = 0, \quad (32)$$

où

$$\mathfrak{F} = \frac{2gkf}{\sigma} \text{sin } \epsilon,$$

$$\alpha = \frac{1}{4f^2} \{[(N^2 - \sigma^2) \text{Sin}^2 \epsilon + (f^2 + 3\sigma^2) \text{Cos}^2 \epsilon]^2 - 16\sigma^2 f^2 \text{Cos}^4 \epsilon\},$$

$$\beta = (\sigma_0^2 - \sigma^2) \text{Cos } \epsilon \{ (f^2 - \sigma^2) \text{Cos}^2 \epsilon - (N^2 - 3\sigma^2) \text{Sin}^2 \epsilon \}, \quad (33)$$

$$\mathfrak{C} = (f^2 \text{Cos}^2 \epsilon - \sigma^2) \{ [(N^2 - \sigma^2) \text{Sin}^2 \epsilon - (f^2 - \sigma^2) \text{Cos}^2 \epsilon]^2 - 4\sigma^2 \text{Sin}^2 \epsilon \text{Cos}^2 \epsilon (f^2 - \sigma^2) \},$$

$$\sigma_0^2 = N^2 \text{Sin}^2 \epsilon + f^2 \text{Cos}^2 \epsilon.$$

L'examen de cette relation conduit aux résultats suivants :

quand

$$\sigma \rightarrow 0, k \rightarrow -\frac{\sigma f}{g\sigma_0^2 \text{tg } \epsilon} (f^2 \text{Cos}^2 \epsilon - N^2 \text{Sin}^2 \epsilon);$$

quand

$$\sigma \rightarrow \infty, k \rightarrow \pm \frac{\sigma^2}{g \text{sin } \epsilon (3 \text{Cos}^2 \epsilon - \text{Sin}^2 \epsilon)};$$

quand

$$\sigma \rightarrow f \text{Cos } \epsilon, k \rightarrow \frac{f(f \text{Cos } \epsilon - \sigma)}{g \text{tg } \epsilon}.$$

De plus $k \rightarrow 0$ quand $\mathcal{C} \rightarrow 0$, c'est-à-dire pour

$$\sigma^2 = (f^2 - \sigma_*^2) \text{Cos}^2 \epsilon + \sigma_*^2 \text{Sin}^2 \epsilon \pm 2 \sigma_* \text{Sin} \epsilon \text{Cos} \epsilon \sqrt{f^2 - \sigma_*^2}, \quad \sigma_* = N \text{Sin} \epsilon$$

Ces racines sont réelles si $\sigma_* < f$; quand $\mathcal{C} \rightarrow 0$, c'est-à-dire quand

$$\sigma \rightarrow \frac{f}{(3 \text{Cos}^2 \epsilon - \text{Sin}^2 \epsilon)} [2 \text{Cos}^2 \epsilon \pm \sqrt{(3 \text{Cos}^2 \epsilon - \text{Sin}^2 \epsilon) (S_0^2 - S^2)}], \quad (34)$$

avec

$$S = \frac{N \text{Sin} \epsilon}{f}, \quad S_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3 \text{Cos}^2 \epsilon - \text{Sin}^2 \epsilon} \right)^{1/2}, \quad (35)$$

(S désigne le paramètre de stratification) une des racines $k \rightarrow \infty$ et l'autre reste finie.

Par conséquent si $S \leq S_0$, deux asymptotes apparaissent sur le diagramme fréquence-nombre d'onde (Figure 3).

Le paramètre S dépend à la fois de la stratification et de la pente du fond. Si ϵ est petit et si S est petit, les fréquences correspondant aux asymptotes tendent vers les valeurs

$$\frac{f \text{Cos} \epsilon (2 \text{Cos} \epsilon \pm 1)}{3 \text{Cos}^2 \epsilon - \text{Sin}^2 \epsilon}$$

qui sont voisines de f et $f/3$.

Si $S = S_0$, ces fréquences coïncident avec une valeur voisine de $2f/3$.

Les figures 3 et 4 donnent une représentation qualitative du diagramme fréquence-nombre d'onde dans les deux cas

$$S < S_0, \quad S < \text{Cos} \epsilon < 1, \quad \text{et} \quad S > S_0, \quad S > 1 > \text{Cos} \epsilon.$$

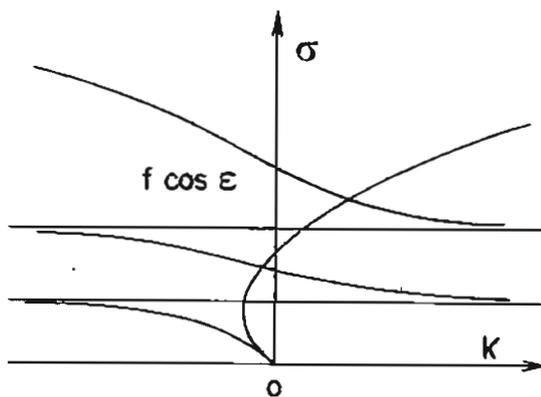


FIG. 3. — Diagramme fréquence-nombre d'onde du 2^e mode, pour $s < s_0, s < \text{Cos} \epsilon$.

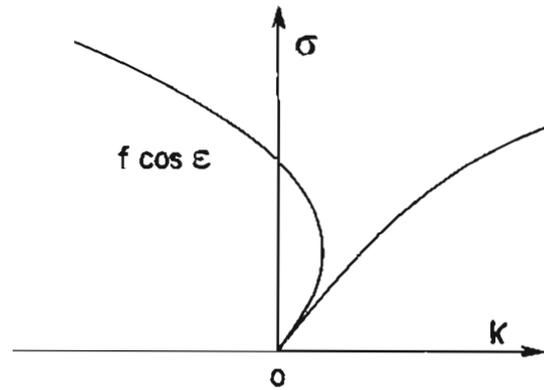


FIG. 4. — Diagramme fréquence-nombre d'onde du 2^e mode, pour $s > s_0, s > 1$.

Ondes de fond

En l'absence de surface libre, il existe des ondes de fond, dont l'amplitude est importante au voisinage du fond. Dans les mêmes conditions, pente constante ϵ , stratification exponentielle, etc. . . , cherchons une solution de l'équation d'onde (6) sous la forme

$$p = e^{-i\sigma t - \lambda(x \text{Sin} \epsilon + z \text{Cos} \epsilon) + i l x + i k y + i m z} \quad (36)$$

L'amplitude de cette onde solution diminue exponentiellement en s'éloignant du fond et elle doit satisfaire à la condition de vitesse normale nulle sur le fond (5), (8). Il est alors facile de voir que cette vitesse normale est identiquement nulle, et que l'on a $m = l = 0$. Nous avons en outre

$$k = - \frac{\sigma f \sigma_*^2}{(\sigma_*^2 - \sigma^2) g \text{tg} \epsilon}, \quad (37)$$

$$\lambda = \frac{(N^2 - \sigma^2) f^2 \sigma_*^2 \text{Cos} \epsilon}{g(\sigma_0^2 - \sigma^2) (\sigma_*^2 - \sigma^2)}.$$

Les diagrammes fréquence-nombre d'onde (σ, k) et (σ, λ) sont représentés de manière qualitative sur les

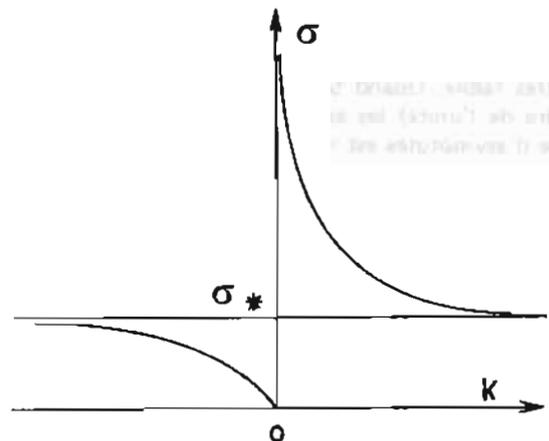


FIG. 5. — Diagramme fréquence-nombre d'onde d'une onde de fond.

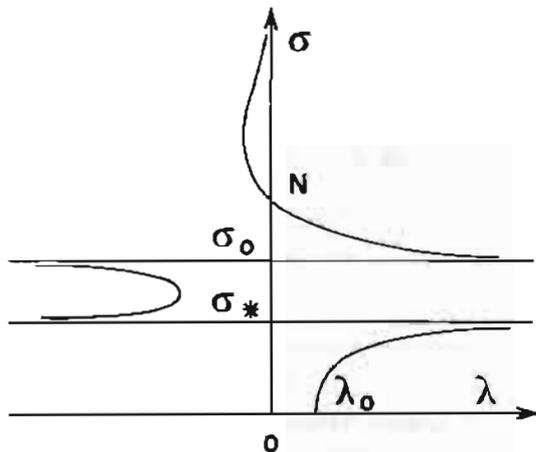


FIG. 6. — Diagramme fréquence-facteur d'amortissement d'une onde de fond.

figures 5 et 6. Comme λ doit être positif pour que l'onde soit captée par le fond, on voit que le domaine d'existence est donné sur les deux bandes de fréquence $0 < \sigma < \sigma_*$ et $\sigma_0 < \sigma < N$. Le nombre limite λ_0 est petit (de l'ordre de α) :

$$\lambda_0 = N^2 f^2 \cos \epsilon / g \sigma_0^2.$$

Ces résultats améliorent et corrigent ceux de P.H. Rhines (1970) qui ont été obtenus avec l'approximation de Boussinesq.

CONCLUSIONS

Cette analyse montre que la stratification est pratiquement sans effet sur le premier mode, et que les caractères des modes d'ordre supérieur dépendent étroitement du paramètre de stratification S . Quand S est petit il apparaît, pour le mode d'ordre n , $2n - 2$ asymptotes horizontales dans le diagramme fréquence-nombre d'onde. Pour des pentes du fond modérées les fréquences de ces asymptotes sont comprises entre f et $f/n + 1$; elles tendent vers ces deux valeurs quand la stratification est très faible. Quand S est supérieur à S_0 (qui est de l'ordre de l'unité) les asymptotes disparaissent. La présence d'asymptotes est importante. En effet au voisinage de leurs fréquences la vitesse de groupe tend vers zéro, et

les longueurs d'onde sont petites. La réponse de la mer aux forces extérieures, vent, etc... devrait avoir une amplitude plus grande (quasi résonnante) pour ces fréquences.

Nous avons effectué une analyse similaire en utilisant l'approximation de Boussinesq, c'est-à-dire en négligeant les variations de densité dans les termes de l'accélération. Les résultats montrent que cette approximation est valable pour des fréquences supérieures à σ_* qui se trouve être une fréquence de coupure dans cette approximation.

La présence de stratification semble éliminer les restrictions sur les grandeurs de l'angle de pente pour l'existence des modes d'ordre élevé, que l'on rencontre en l'absence de stratification et de rotation. Mais il existe des restrictions en fréquence pour que les ondes soient effectivement des ondes de frontière dont l'amplitude décroît vers le large. Enfin la stratification est une condition nécessaire pour l'existence d'ondes de fond de basses fréquences qui se propagent en laissant les petits fonds sur la droite (dans l'hémisphère nord). Cependant pour des stratifications très faibles il faudrait reprendre les calculs en tenant compte de la composante horizontale de la rotation terrestre.

BIBLIOGRAPHIE

- GREESMAN H.P. (1970). — A note on edge waves in a stratified fluid. *Studies In Applied Mathematics*, 49, 4, 1970, pp. 381-388.
- MUZYLEV S.V., ODULO A.B. (1980). — Waves in a rotating stratified fluid on a sloping beach. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 250, 2, 1980, pp. 331-335.
- RHINES P. (1970). — Edge —, Bottom —, and Rossby waves in a rotating stratified fluid. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1, 3, 1970, pp. 273-302.
- SAINT-GUILY B. (1968). — Ondes de frontière dans un bassin tournant dont le fond est incliné. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 266, série B, 1968, pp. 1291-1293.
- SAINT-GUILY B. (1979). — Ondes de frontière dans une mer stratifiée dont le fond est incliné. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 289, série B, 1979, pp. 177-180.
- STOKES G.G. (1846). — Report on recent researches in hydrodynamics. British Association Reports, 1846. *Mathematical and physical papers* 1, 1880, p. 167.
- URSELL F. (1952). — Edge waves in a sloping beach. *Proceedings of the Royal Society of London*, A, 214, 1952, pp. 79-97.

ÉTUDE DES COURANTS DE LA MARÉE M_2 DANS LA MANCHE A L'AIDE DU MODÈLE RÉDUIT DE GRENOBLE

par

Mariana FORNERINO

Université du Zulia (Venezuela), Stagiaire de Recherche à l'I.M.G. *

et Gabriel CHABERT d'HIÈRES

Ingénieur au C.N.R.S., I.M.G.

RESUME

Dans cet article, nous présentons essentiellement un ensemble de cartes précisant les caractéristiques des courants de la marée M_2 dans la Manche. Ces résultats ont été obtenus par une mesure systématique des courants conduite à l'aide d'un anémomètre à laser, dans le modèle tournant de la Manche à Grenoble. Ces mesures ont été effectuées alors que le modèle avait été réglé pour représenter les dénivellations de l'onde M_2 .

Par ailleurs, les résultats obtenus sur le modèle physique ont été, dans la mesure du possible, comparés à des données nature afin d'apprécier la qualité de la simulation des courants de marée sur modèle physique.

ABSTRACT

In this paper a set of maps is presented which point out M_2 tidal-currents main characteristics in the English Channel. These results were obtained by performing systematic measurements of tidal currents in the English Channel physical rotating model of Grenoble, using a laser Doppler anemometer. The model was calibrated to represent the M_2 tide level variations when the measurements were carried out.

On the other hand, comparisons between the physical model and the prototype were conducted as far as possible in order to estimate the precision of tidal current representation in a physical model.

1. INTRODUCTION

La connaissance des marées dans la Manche est assez précise, à l'heure actuelle, en ce qui concerne les marées.

Avec "l'Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche" Chabert d'Hières et Le Provost (cf. (3)), on peut considérer que la prédiction des variations de hauteurs de la surface libre de la mer sous l'effet de la marée est un calcul simple, puisqu'il suffit de superposer les composantes harmoniques les plus significatives. Cet aboutissement a été la conséquence d'une longue étude menée par Le Provost à l'Institut de Mécanique de Grenoble, (cf. (7)).

La complexité du spectre de la marée est connu depuis la fin du siècle dernier. En reprenant cette étude théorique, Le Provost a montré qu'il existe, dans presque toutes les mers littorales, une onde "dominante" avec d'intéressantes caractéristiques.

Dans la Manche, l'onde lunaire moyenne M_2 est nettement dominante. On peut donc envisager d'étudier une première approximation de la composante lunaire seule. Mais, par contre, pour l'étude d'une onde secondaire comme S_2 , N_2 , K_2 , il est nécessaire de considérer chacune de ces ondes en présence au moins de la composante dominante M_2 .

Ces conclusions ont permis d'étudier toutes les composantes harmoniques à l'aide d'un modèle réduit. En effet, l'étude des marées à partir d'une modélisation physique aurait été impossible, sans cette méthode, à cause de la complexité du phénomène. Il aurait fallu introduire à l'entrée du domaine une loi de vitesse fort compliquée, qui résulte de la superposition d'un grand nombre de fonctions dont les amplitudes sont a priori inconnues. Les composantes ont pu être, ainsi, bien déterminées, grâce à cette étude théorique de la structure spectrale de la marée, grâce à l'existence, à Grenoble, d'un modèle réduit tournant de la Manche, et grâce, aussi, à un appareillage de mesure de niveau fort précis. Par contre, les courants de marée, sujet qui fait l'objet de cette publication, ont été, jusqu'à présent, très mal con-

* I.M.G. : Institut de Mécanique de Grenoble.

nus et très peu étudiés en détail à cause, essentiellement, du problème posé par leur mesure, soit in situ, soit en laboratoire.

Nous avons entrepris cette étude en commençant par la simulation, sur notre modèle réduit, de l'onde lunaire moyenne M_2 , seule, et par la mesure des courants ainsi engendrés. Pour cela, nous avons mis au point une technique de mesure de vitesse adaptée aux caractéristiques des courants de marée.

Du point de vue pratique, et non strictement scientifique, les résultats obtenus montrent une grande coïncidence avec les mesures nature faites au coefficient 70, ou avec celles faites au coefficient 95 et réduites au coefficient 70 par une simple loi de proportionnalité, comme nous le montrerons dans ce qui suit.

II. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

1. Le modèle réduit de la Manche.

La description détaillée du modèle de la Manche a déjà fait l'objet de plusieurs publications (Chabert d'Hières, 1962, cf. (2)). Nous nous limiterons à rappeler quelques unes de ses caractéristiques principales :

- échelles géométriques :
 - . horizontale : 1/50.000
 - . verticale : 1/500
- échelles des temps et des vitesses imposées par la similitude de Froude :
 - . t modèle/ t nature : 1/2230
 - . V modèle/ V nature : 1/22,3
- étant donné une distorsion de 100, donc assez importante, le frottement est simulé artificiellement dans toute la masse du fluide, afin de respecter une répartition uniforme des vitesses sur la verticale, conformément à l'une des caractéristiques des ondes longues
 - l'onde de marée est produite sur le modèle par un générateur qui impose à l'entrée de la Manche, un champ de vitesses, similaire à celui que les marées océaniques engendrent in situ
 - pour simuler la force de Coriolis, le modèle est construit sur une plaque tournante de 14 mètres de diamètre dont la rotation d'un tour en 50,4 sec. simule l'effet de rotation de la terre pour une latitude moyenne de 50°
 - pour le réglage du modèle, le critère d'étalonnage choisi est le marnage. Cette opération a consisté en un ajustement empirique de l'amplitude du générateur (la période étant fixée à la période lunaire) et de la distribution des rugosités, de façon à obtenir le long des côtes une amplitude de l'onde M_2 en bonne concordance avec la nature.

2. L'appareil de mesure : vélocimètre à laser.

Pour mesurer les courants de marées, il faut déter-

miner deux paramètres qui les définissent et qui varient au cours du temps : le cap et le module.

Quand les échelles de longueur et de temps sont petites, comme c'est le cas des modèles réduits, la mesure du cap peut devenir imprécise. Une méthode plus pratique consiste à mesurer la vitesse suivant deux directions, puis par recombinaison, on en déduit le module et le cap. Pour y arriver, il faut un appareil qui soit, d'une part, directif, c'est-à-dire, qui permette de connaître, avec une bonne précision, la direction de la mesure ; d'autre part, celui-ci doit être sensible à la mesure de vitesses très faibles, voire nulles, puisque chaque composante s'annule deux fois par période. La vélocimétrie à laser offre les caractéristiques demandées.

Pour mener la campagne de mesures envisagée, nous avons utilisé un appareil entièrement conçu et mis au point dans notre Laboratoire (Lismonde, cf. (8), Auchère et Barbier, cf. (1)).

La vélocimétrie à laser est basée sur le principe de la mesure de la vitesse des particules entraînées par le fluide. Les particules introduisent une discontinuité de l'indice de réfraction, ce qui provoque une diffusion de la lumière. La mesure se fait, alors, par l'intermédiaire de cellules photoélectriques.

La méthode consiste à former, à partir de deux faisceaux laser qui convergent, un réseau de franges d'interférences. Les particules qui traversent ces franges lumineuses émettent une lumière diffusée dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse des particules.

La technique laser de mesure de vitesse a connu un développement rapide ces dernières années et elle est maintenant couramment utilisée dans les laboratoires de Mécanique des Fluides.

L'installation la plus employée consiste en des dispositifs d'émission et réception qui séparent la veine d'essai limitée par des parois transparentes. Or, notre modèle, comme la plupart des modèles réduits à surface libre, est à fond opaque. Notre vélocimètre présente donc une particularité vis à vis du montage classique. L'émission et la réception se trouvent du même côté (au-dessus de la surface libre) et un miroir placé au fond du modèle renvoie la lumière diffusée vers le haut, (fig. 1), Fornerino, (cf. (5)).

Ce montage impose une profondeur de 8 cm d'eau minimum. Pour mesurer près des côtes et dans des zones peu profondes, nous avons introduit une modification : l'axe optique de l'émission n'est plus vertical, mais dévié dans un plan horizontal par un miroir à 45° , placé près de la paroi opaque, (fig. 2).

Bien que ce dernier montage soit utilisable dans tout le modèle, il est susceptible de perturber légèrement l'écoulement, donc il est préférable d'employer le premier montage chaque fois que cela est possible.

3. Conditions de mesure.

Nous avons commencé par la vérification de l'hypothèse des ondes longues, suivant laquelle la vitesse est

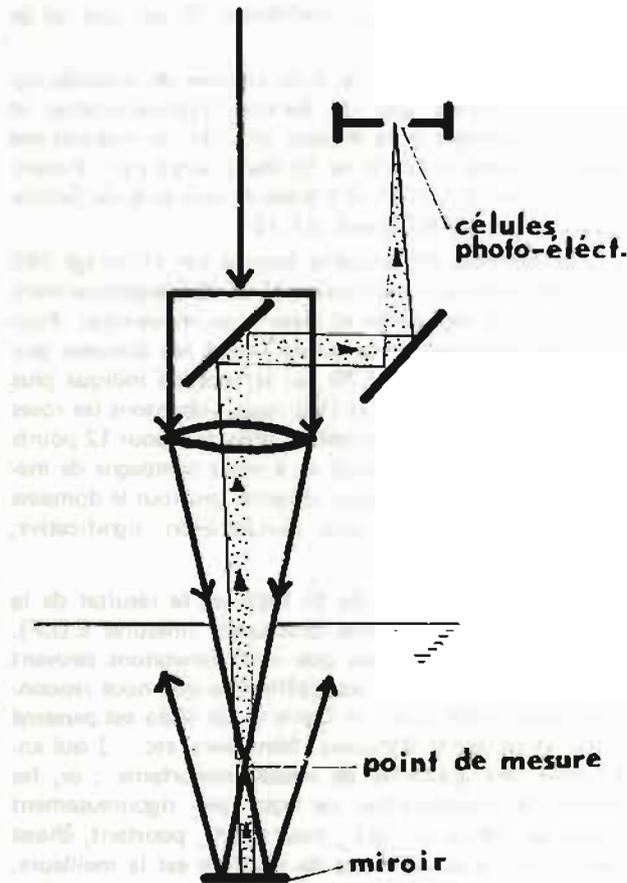


FIG. 1. — Schéma du vélocimètre à laser.

uniforme sur la verticale, exception faite, bien entendu, de la couche limite.

Nos mesures ont été donc faites à mi-profondeur.

Pour l'exploration du modèle, nous avons couvert le domaine avec un réseau de 162 points, régulièrement distribués dans toute la Manche.

Pour éliminer les problèmes de turbulence et de parasites introduits par l'appareil, nous avons enregistré 20 périodes successives de marée et nous avons ensuite traité la moyenne.

III. DEPOUILLEMENT ET PRESENTATION DES DONNEES

Nous rappelons que l'onde monochromatique de période lunaire que nous avons introduite à l'entrée du modèle se charge en harmoniques d'origine non-linéaire au cours de sa propagation.

Notre but étant l'étude de la composante lunaire de courants M_2 , nous avons fait une analyse harmonique du signal brut et nous avons retenu l'onde fondamentale. Cela donne des roses de courant strictement elliptiques, et deux composantes perpendiculaires si-

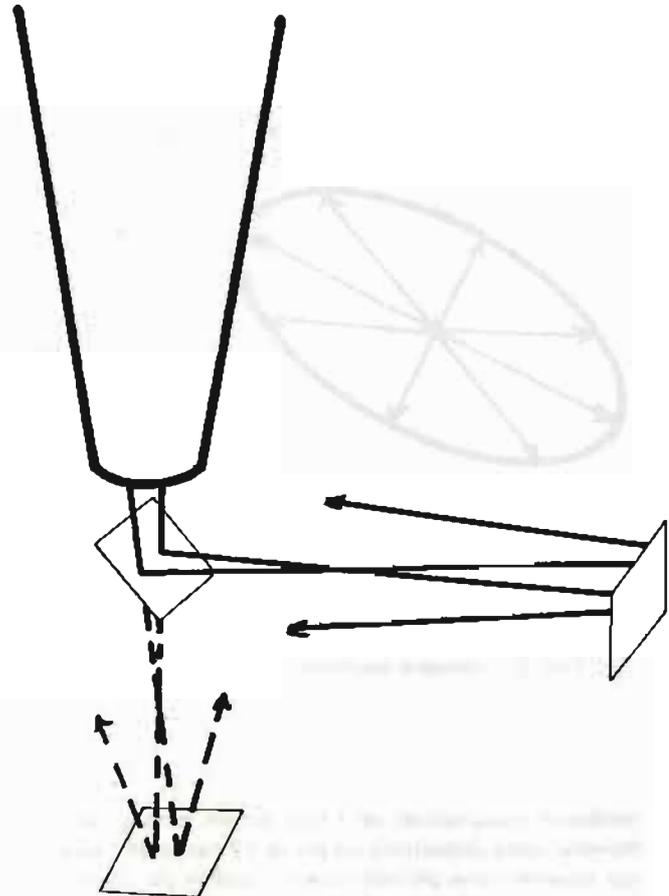


FIG. 2. — Montage adapté aux zones peu profondes.

nusoïdales, U et V , qui peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$U = A_u \cdot \cos (wt - \varphi_u) \quad (1)$$

$$V = A_v \cdot \cos (wt - \varphi_v) \quad (2)$$

Dans les équations (1) et (2) A_u et A_v sont les amplitudes et φ_u et φ_v les phases de l'onde fondamentale trouvées d'après l'analyse harmonique.

Pour exprimer l'ensemble des résultats dans toute la Manche, nous avons choisi quatre paramètres : (fig. 3) :

1. La vitesse maximale (A)
2. la phase (wt_{\max}) de cette vitesse maximale
3. la direction de la vitesse maximale (β_{\max})
4. le rapport du courant minimum au courant maximum (a/A).

Il faut remarquer que le courant maximum est atteint deux fois par période, en conséquence, il y a deux valeurs possibles pour wt_{\max} et β_{\max} qui diffèrent entre elles de 180° . Le rapport du courant minimum au courant maximum équivaut au rapport du petit axe au grand axe de la rose de courant.

Sur les figures (4), (5), (6) et (7) nous avons présenté les lignes iso-valeurs de ces quatre paramètres. Cette représentation des résultats permet de donner toutes les caractéristiques qualitatives des courants. Mais pour une

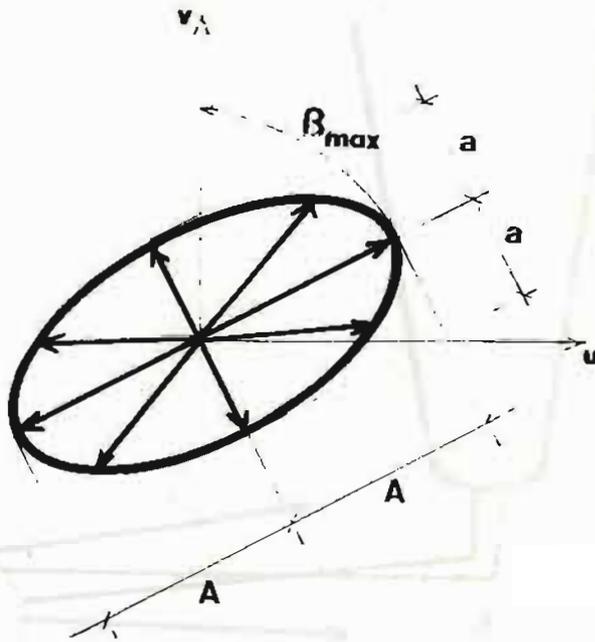


FIG. 3. — Éléments descriptifs d'une rose de courant.

meilleure visualisation de l'écoulement général dans la Manche, nous présentons un jeu de 12 cartes de courants qui couvrent une période lunaire, repérée par rapport à la pleine mer (P.M.) à St Malo, (fig. 8 à 13). Comme nous traitons avec l'onde M_2 , la pleine mer correspond à la phase de cette onde pour les marnages. Dans les équations (1) et (2), $wt = 187^\circ$ donne les courants à l'instant de la P.M. à St Malo.

IV. LE MODELE ET LA NATURE.

Dans les nombreuses études menées sur le modèle réduit de la Manche, il a été montré une excellente simulation des marnages. Pour la première fois, nous avons des résultats concernant les courants (vitesses eulériennes). Les courants dans la Manche sont seulement connus dans un nombre restreint de points et, en général, les valeurs correspondent à des enregistrements de courte durée, où il est impossible de séparer les composantes harmoniques. Nous n'avons donc pas les moyens de comparer nos résultats avec les données nature correspondant à l'onde M_2 .

C'est pour cela que nous nous sommes limités à une comparaison qui n'est qu'une approximation pratique. Les coefficients de marée permettent d'évaluer d'une façon courante (en France) la magnitude des marées. Pour les dénivellations, il a été constaté que les marnages au coefficient 70 se rapprochent sensiblement des marnages de l'onde M_2 . Nous avons, donc, fait une comparaison des courants M_2 — modèle avec les courants-nature au coefficient 70 ou avec des courants-nature au

coefficient 95 réduits au coefficient 70 par une loi de proportionnalité.

Nous avons disposé de trois sources de données nature : l'Ouvrage 550 du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, (cf. 19), les mesures des courants dans le Golfe de St Malo faites par l'Electricité de France, (cf. 4), et l'Atlas de courants du Service Hydrographique Allemand, (cf. 10).

Les données de courants fournis par l'Ouvrage 550 correspondent aux coefficients 45 et 95 (respectivement, mortes eaux moyennes et vives eaux moyennes). Pour nos comparaisons, nous avons utilisé les données aux coef. 95, ramenées au 70 par le procédé indiqué plus haut. Sur les fig. (15) et (16) nous présentons les roses de courants nature et modèles, obtenues pour 12 points communs à l'Ouvrage 550 et à notre campagne de mesure. Ces douze points sont répartis dans tout le domaine et permettent donc une comparaison significative, (fig. 14).

C'est dans le Golfe de St Malo où le résultat de la comparaison est le moins satisfaisant (mesures E.D.F.). Les différences sensibles que nous constatons peuvent être partiellement liées aux difficultés que nous rencontrons dans cette zone : le Golfe de St Malo est parsemé d'îles et de récifs (Chausey, Minquiers, etc. . .) qui entraînent des gradients de vitesse importants ; or, les points de comparaison ne sont pas rigoureusement placés au même endroit ; nous avons, pourtant, choisi ceux dont la coïncidence de position est la meilleure, (fig. (14)). De plus, sur le modèle, la position d'un point est déterminée avec une précision d'un demi-centimètre, c'est-à-dire 250 m dans la nature. Nous devons donc être prudent pour l'interprétation des différences entre les roses nature et modèle.

Par ailleurs, la rugosité artificielle n'étant pas continue, elle peut introduire des variations locales des courants, surtout dans cette zone, peu profonde et accidentée.

La simulation des courants dans le Golfe de St Malo est donc à améliorer : une autre campagne de mesures sur le modèle pourrait être entreprise avec rugosité continue et en ayant une meilleure précision sur la position des points. Les résultats devraient donner des comparaisons plus satisfaisantes. En outre, il semble nécessaire de disposer d'un réseau de points de mesures plus serré pour tracer avec plus de précision et plus de fiabilité les cartes iso-valeurs dans cette zone.

Notons enfin que la comparaison dans le Golfe de St Malo a été faite avec des mesures d'E.D.F. enregistrées directement au coefficient 70, pour le point 3225 (enregistré au coef. 95).

La dernière comparaison est présentée sous une forme différente (fig. (18)). Nous ne comparons plus, ponctuellement, des roses de courants, mais des valeurs des courants maximaux dans l'ensemble de la Manche. Nous notons, une fois de plus, que dans l'ensemble du domaine, les valeurs coïncident remarquablement. Dans le Golfe de St Malo, nous n'avons pas tracé les courbes de comparaison puisqu'il s'agit de réseaux très serrés et compliqués. Dans la Manche

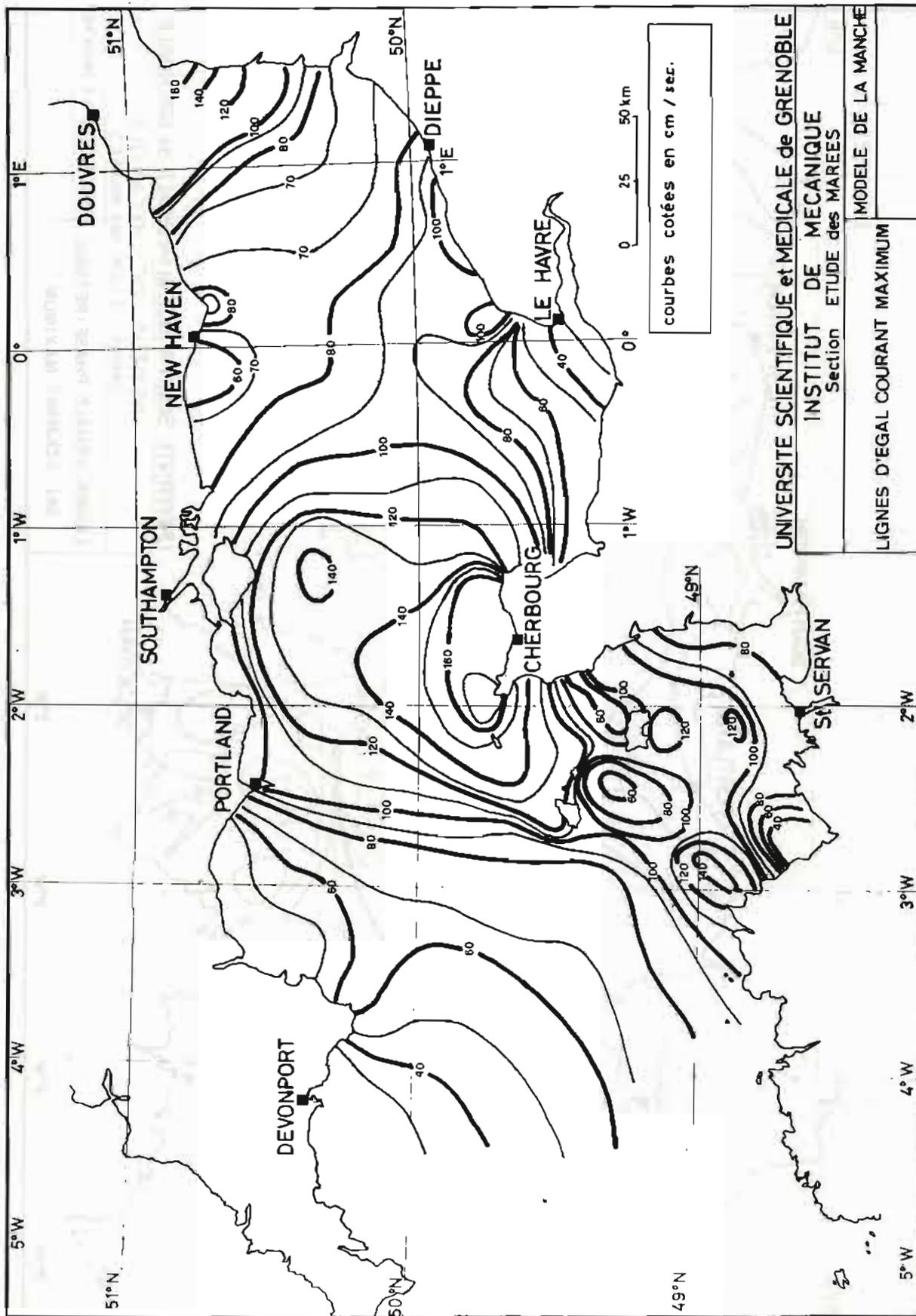


FIG. 4.

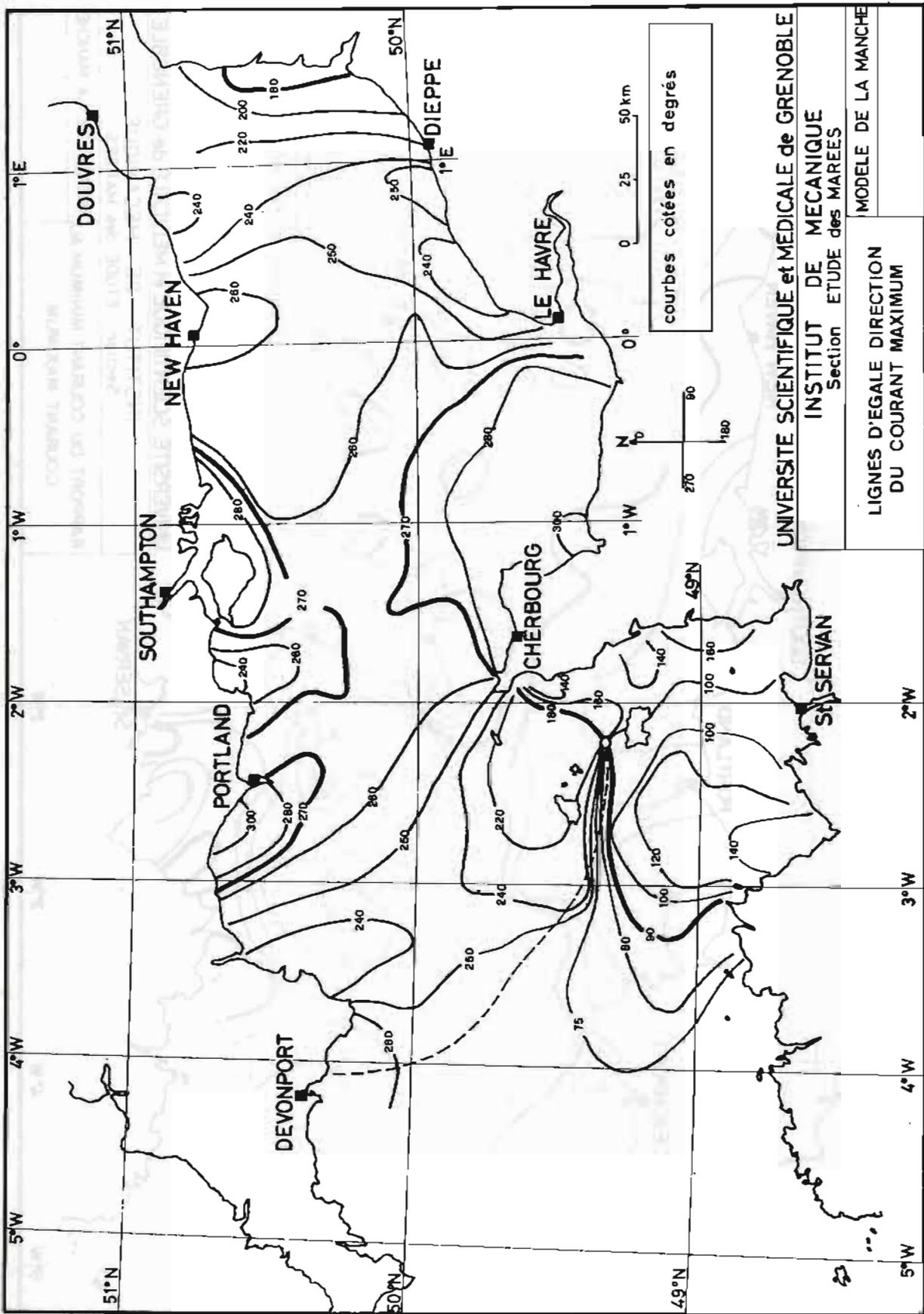


FIG. 6.

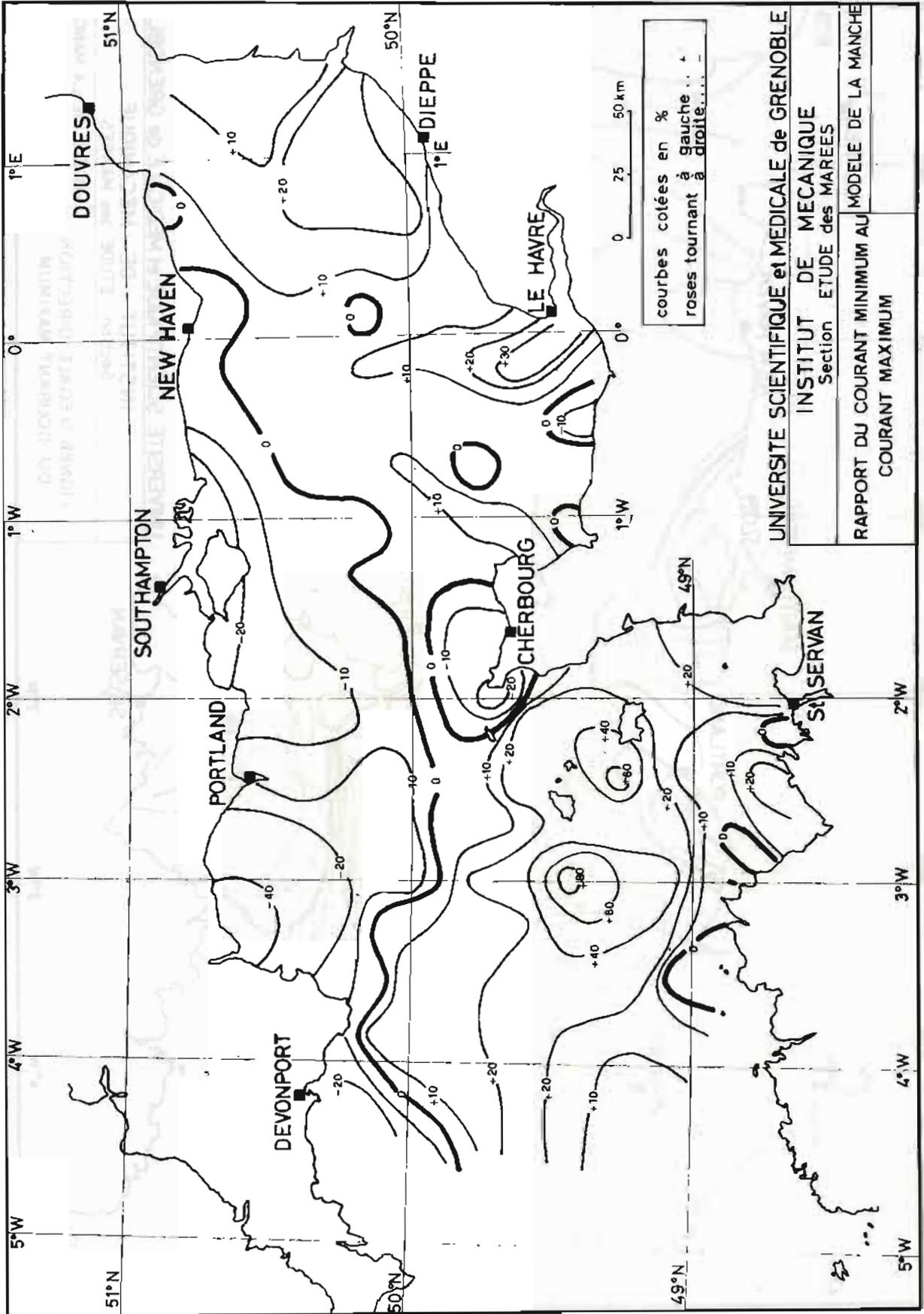


FIG. 7.

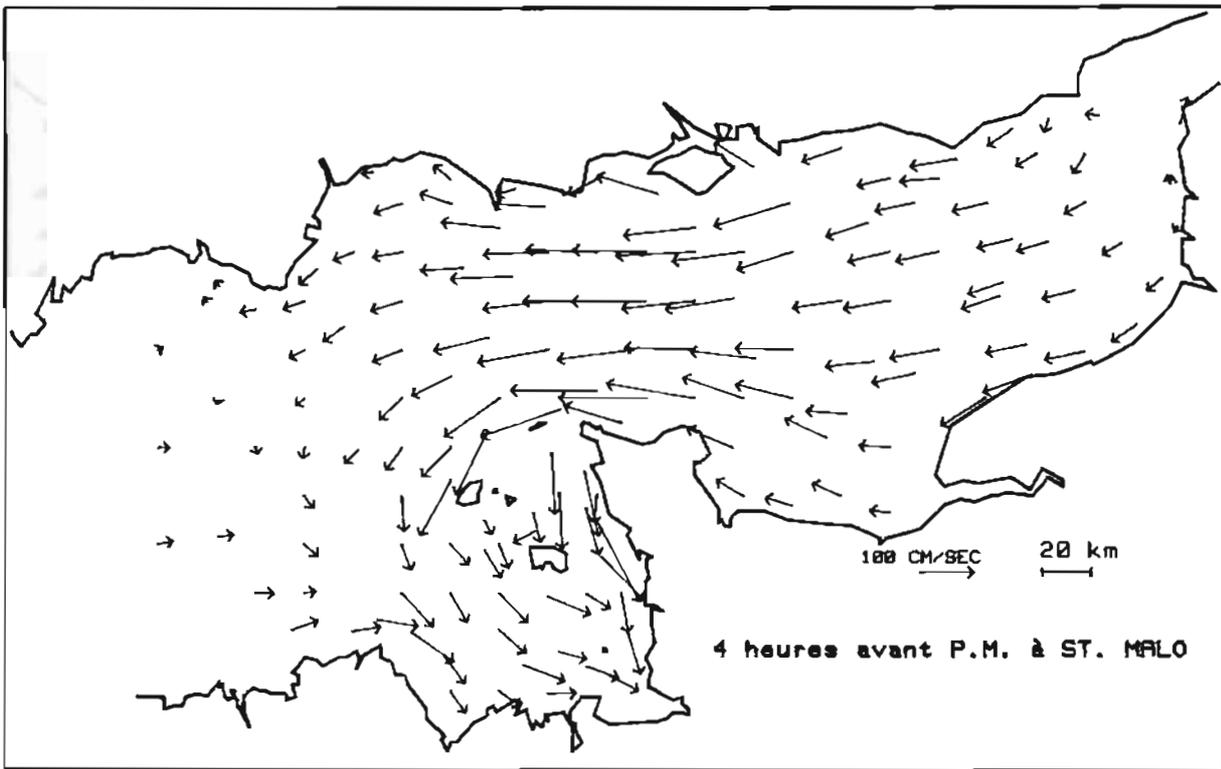
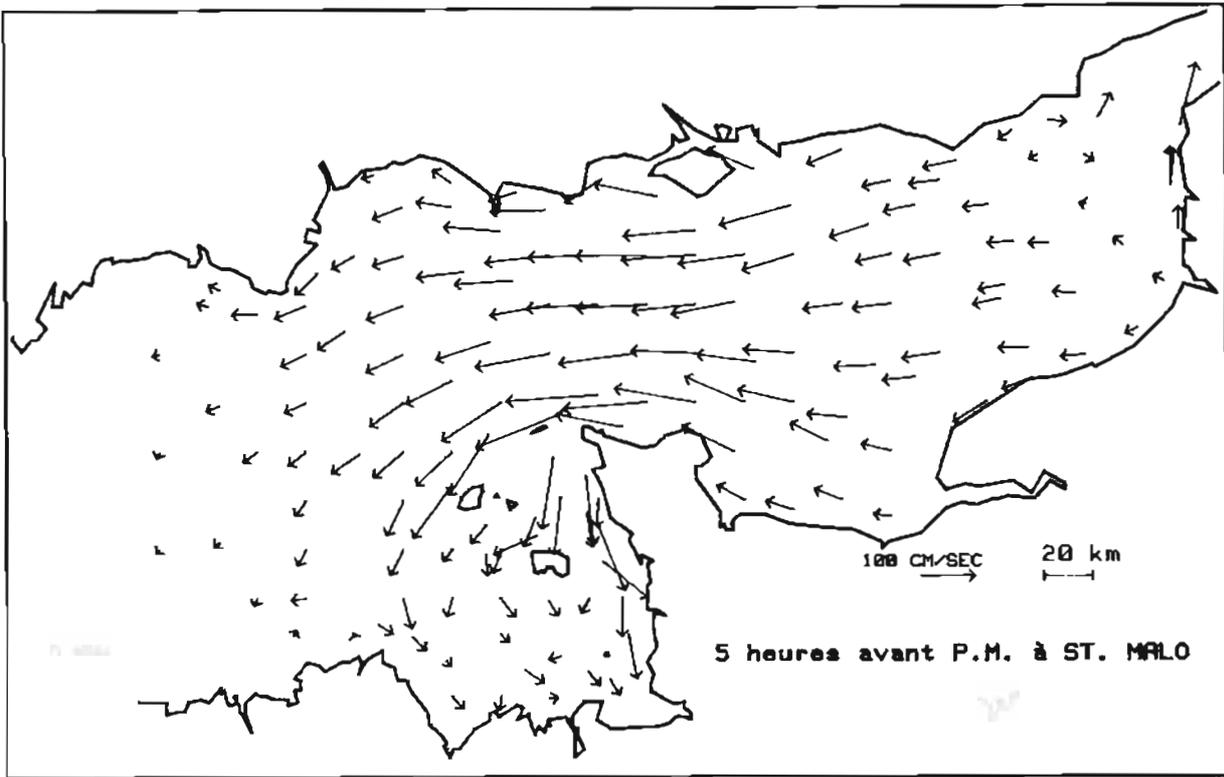


FIG. 8.

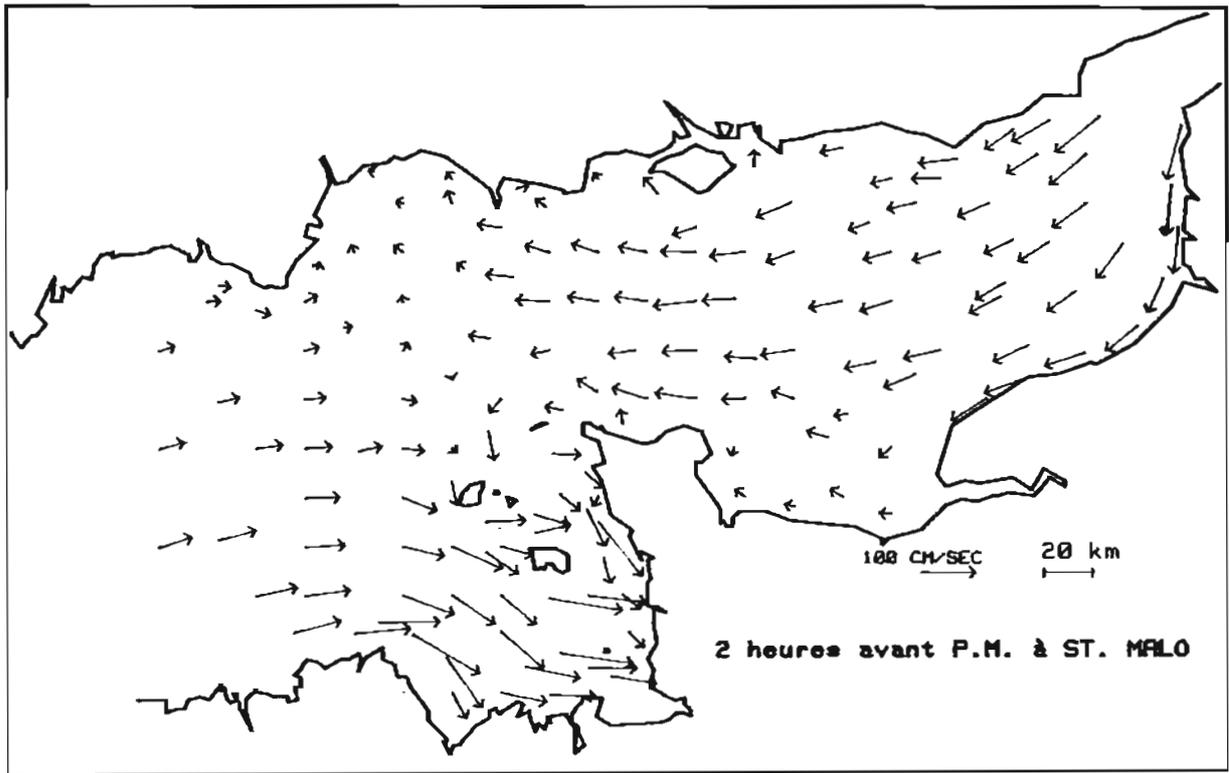
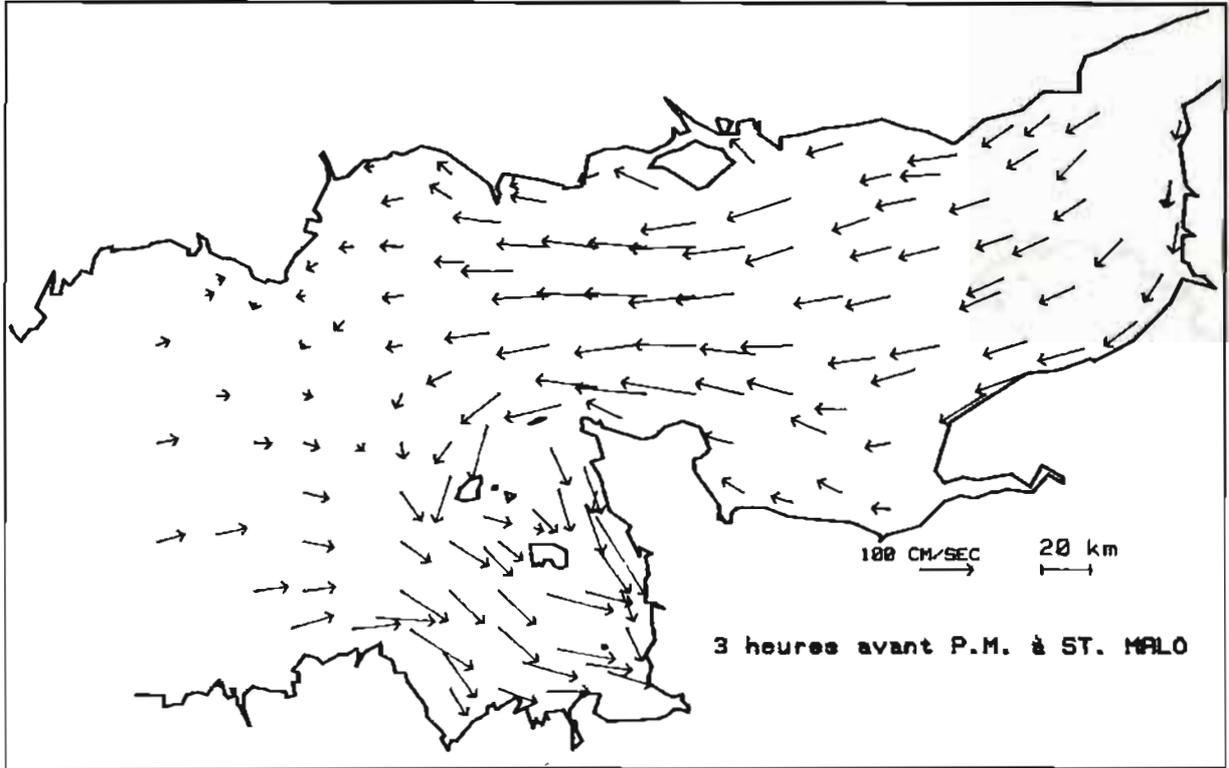


FIG. 9.

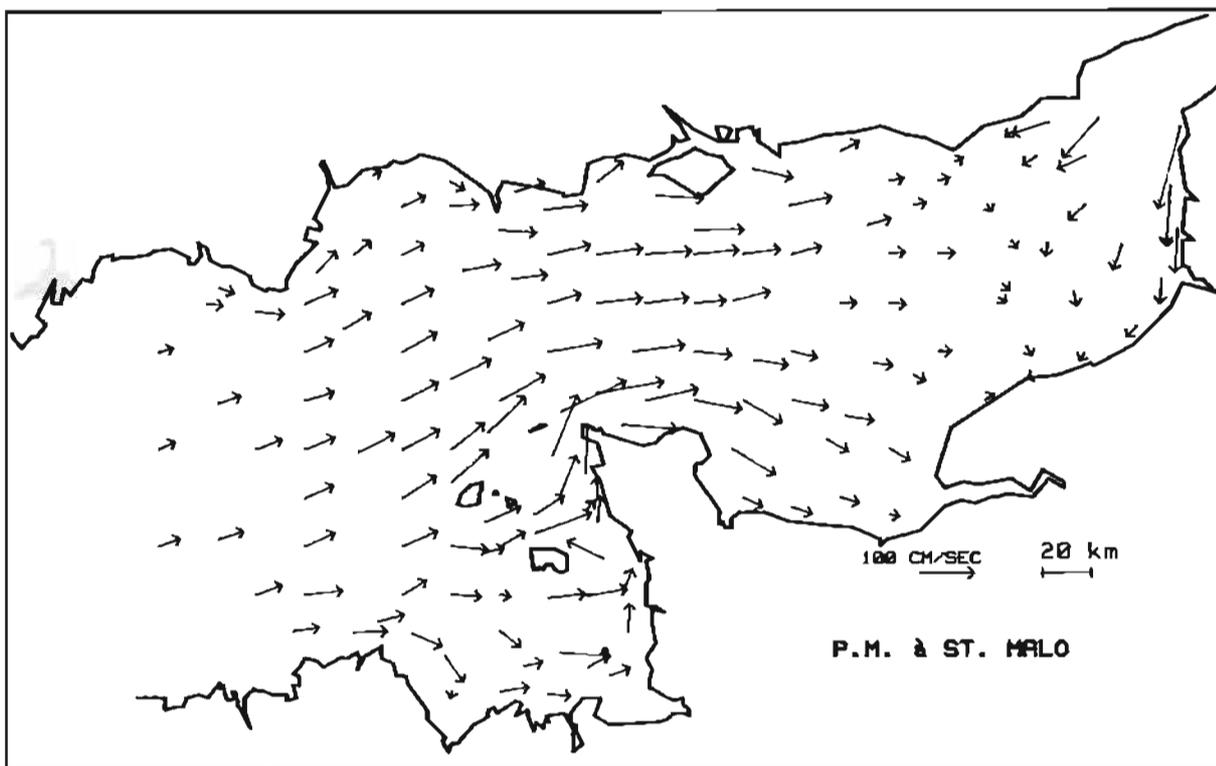
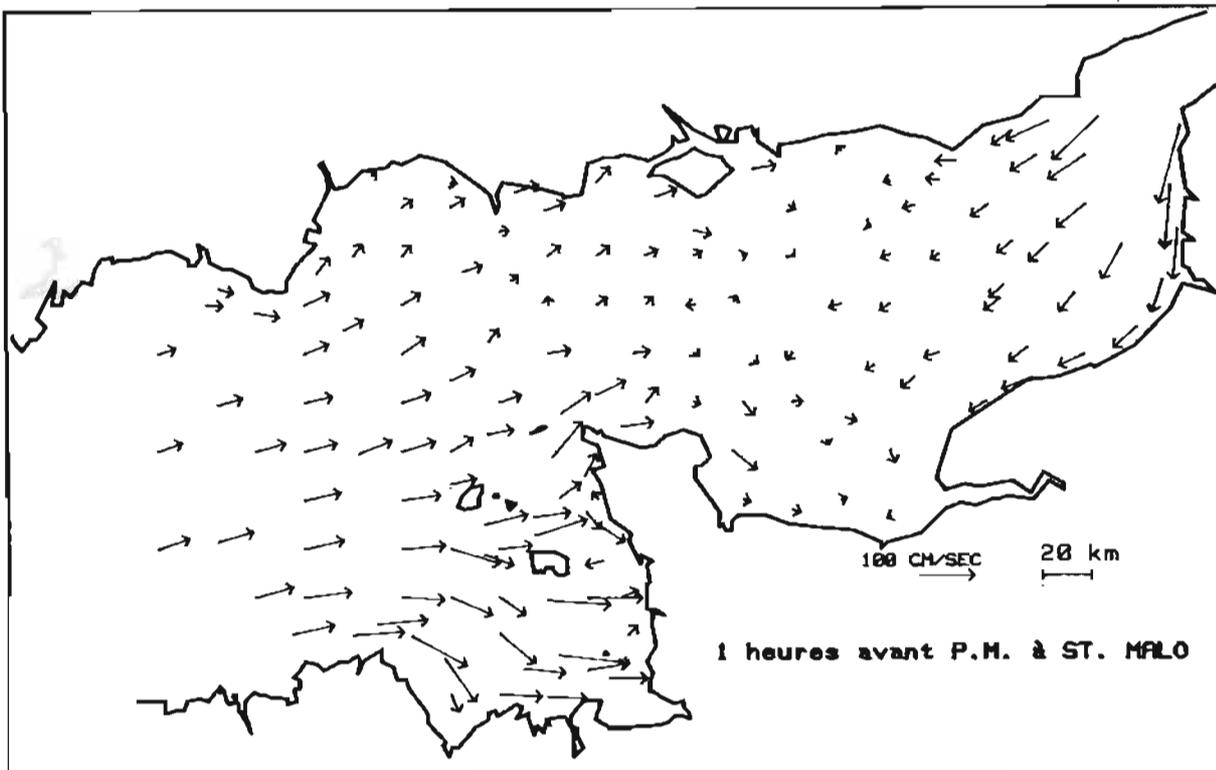


FIG. 10.

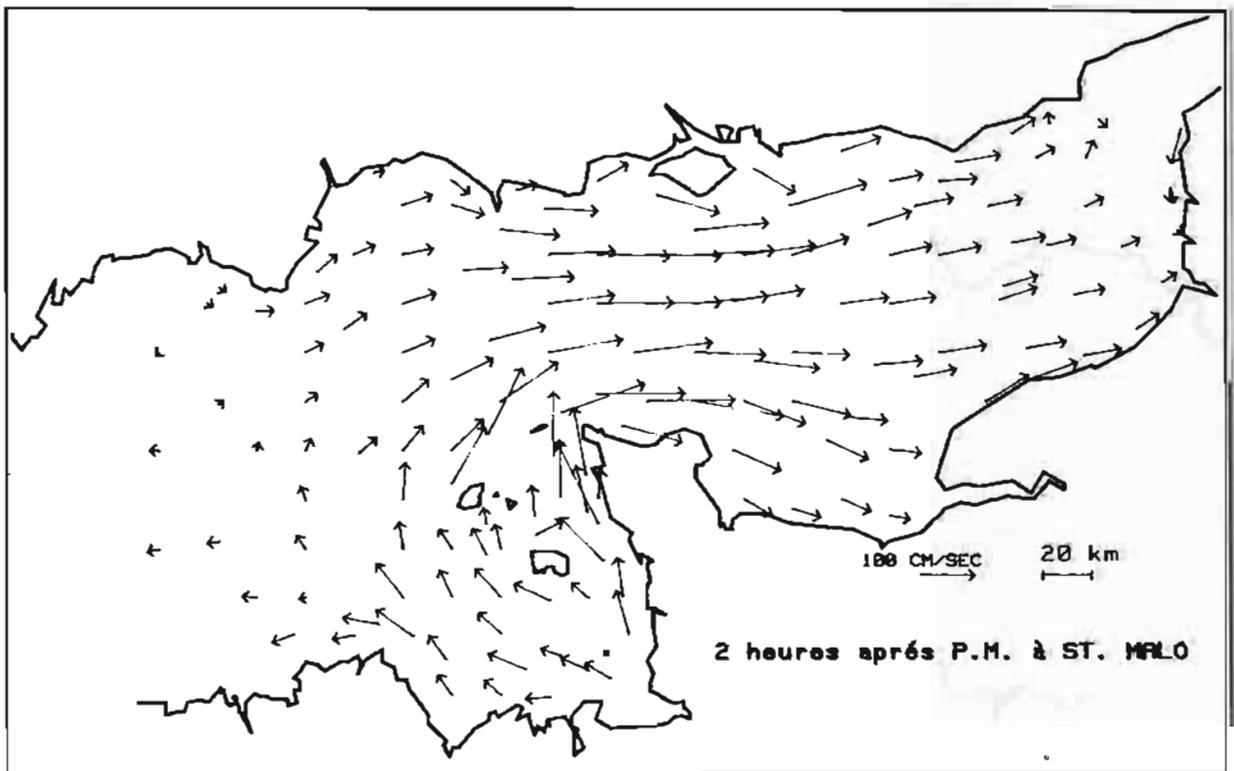
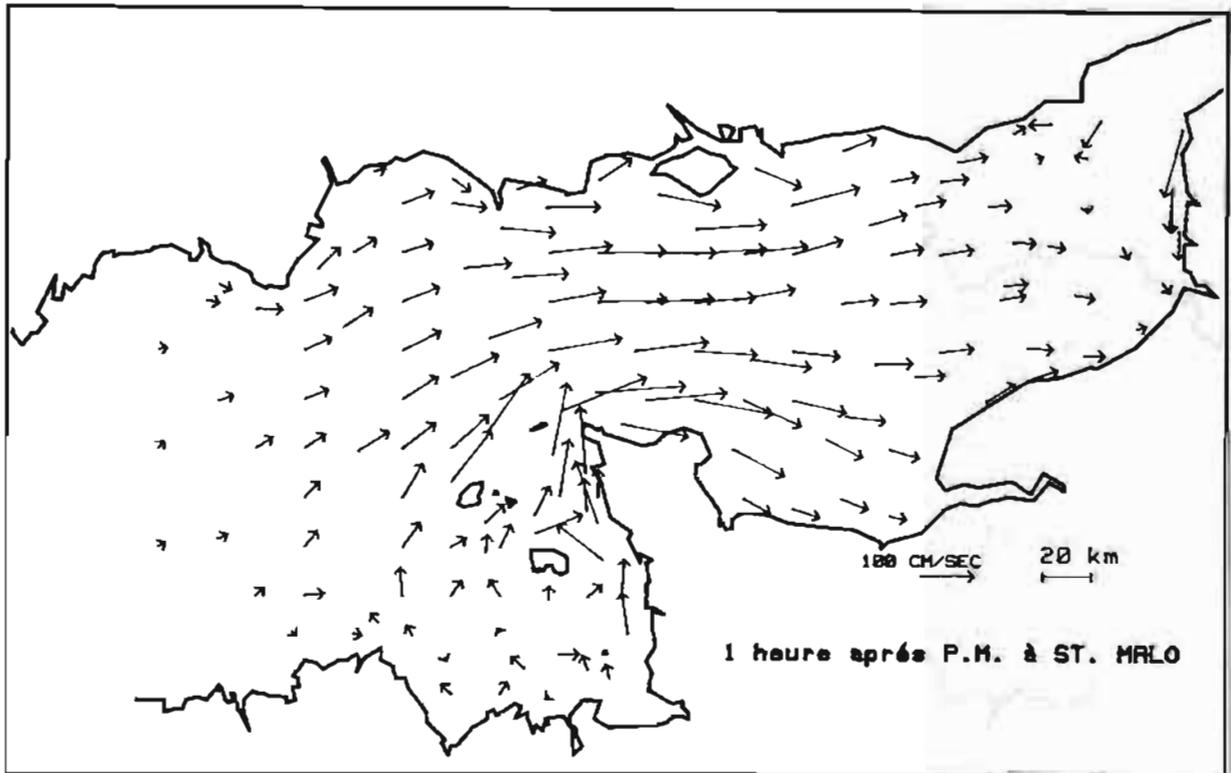


FIG. 11

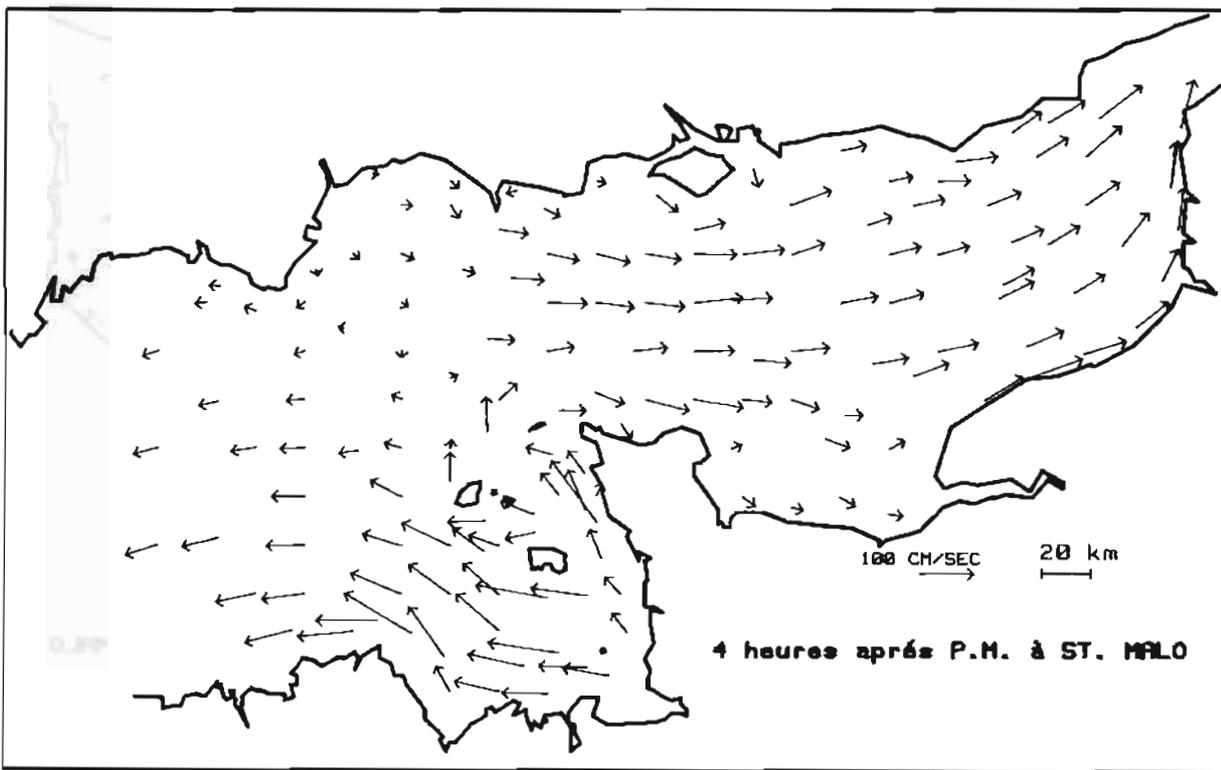
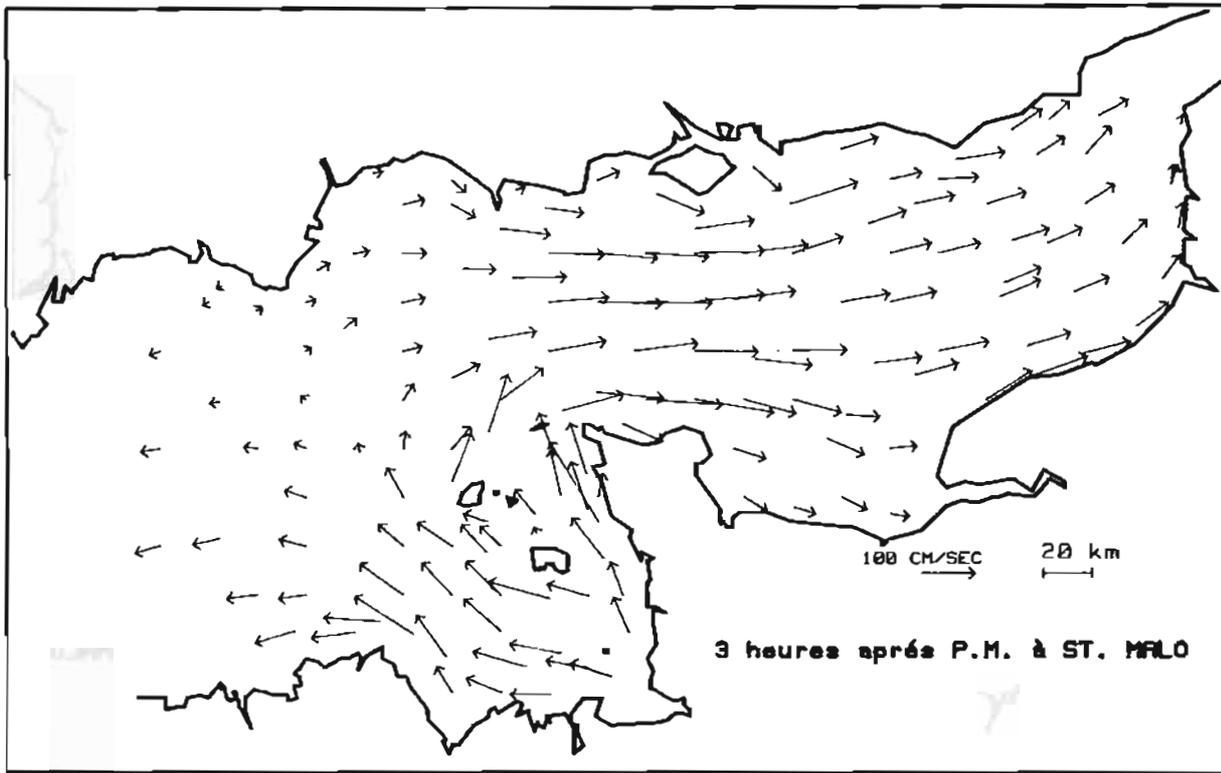


FIG. 12

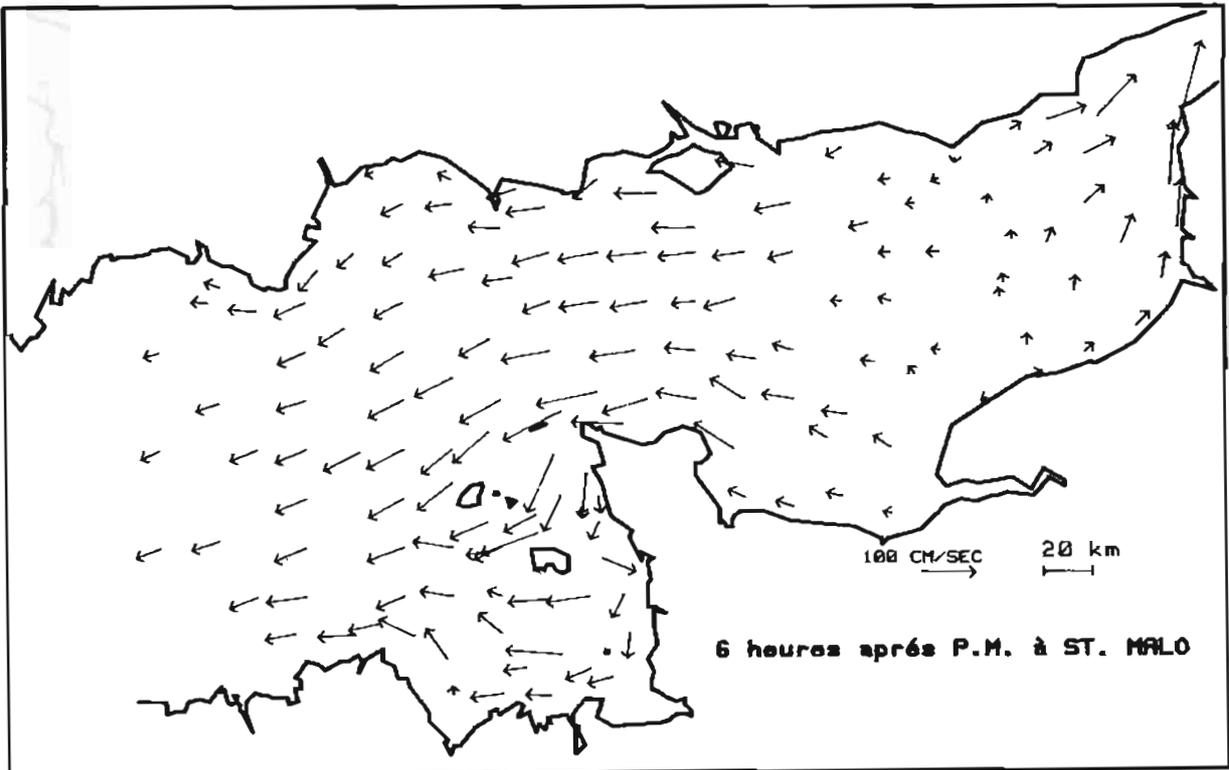


FIG. 13

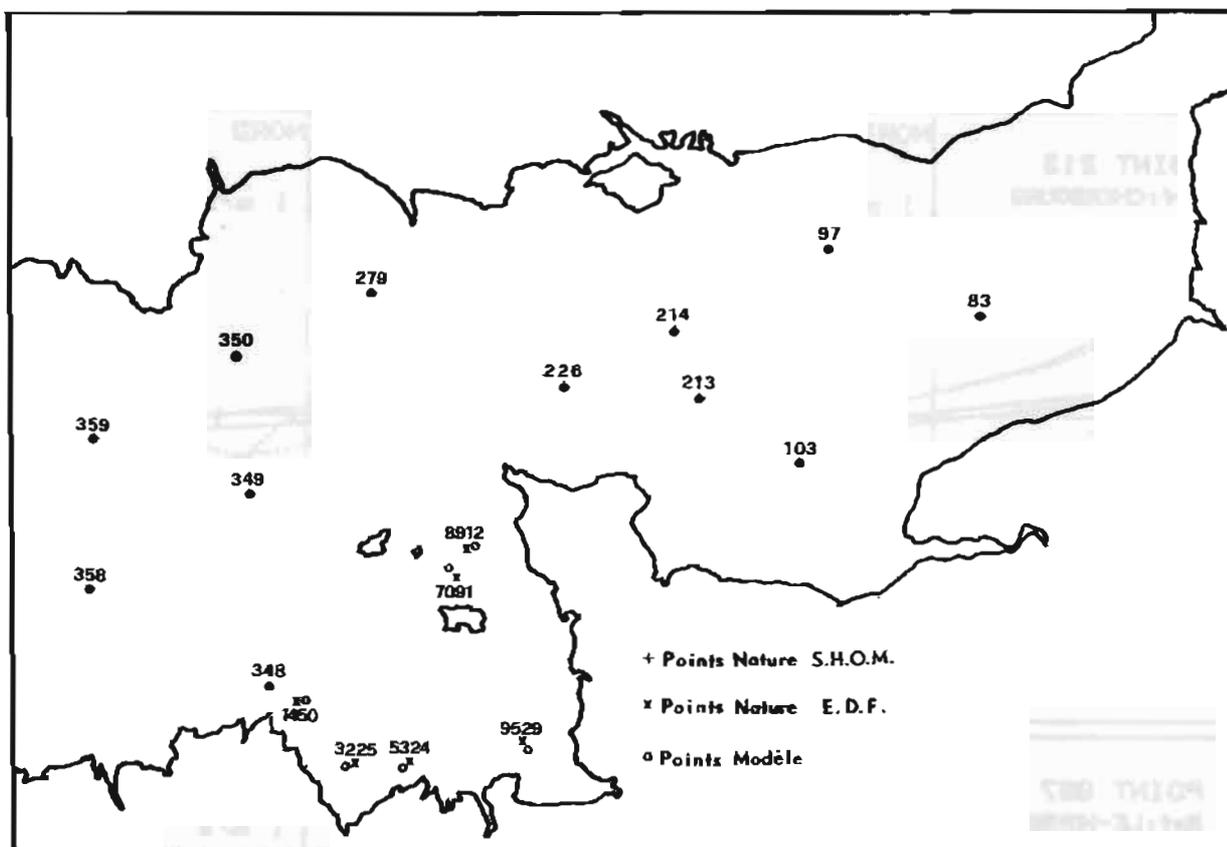


FIG. 14. — Position des points de comparaison

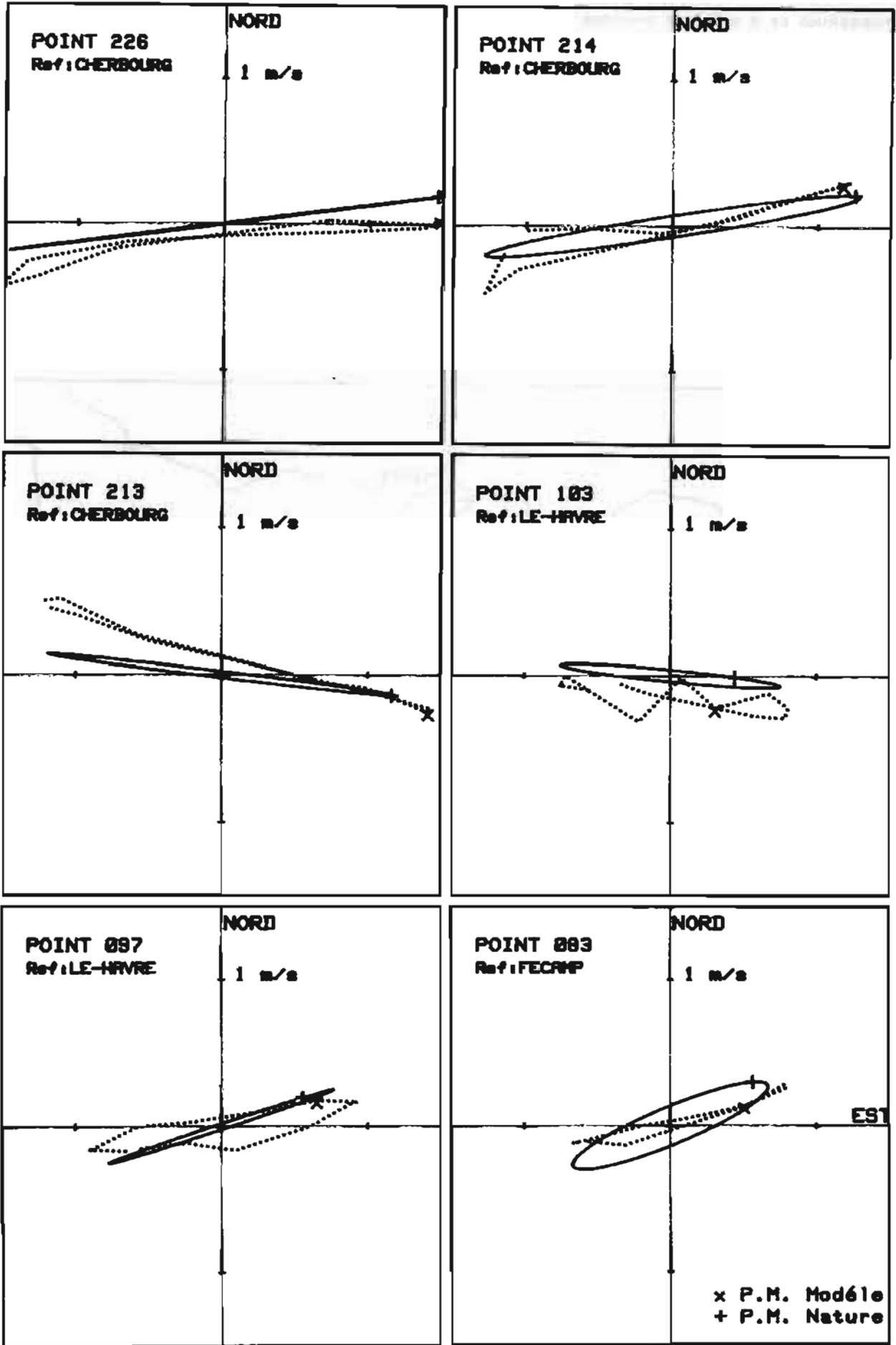
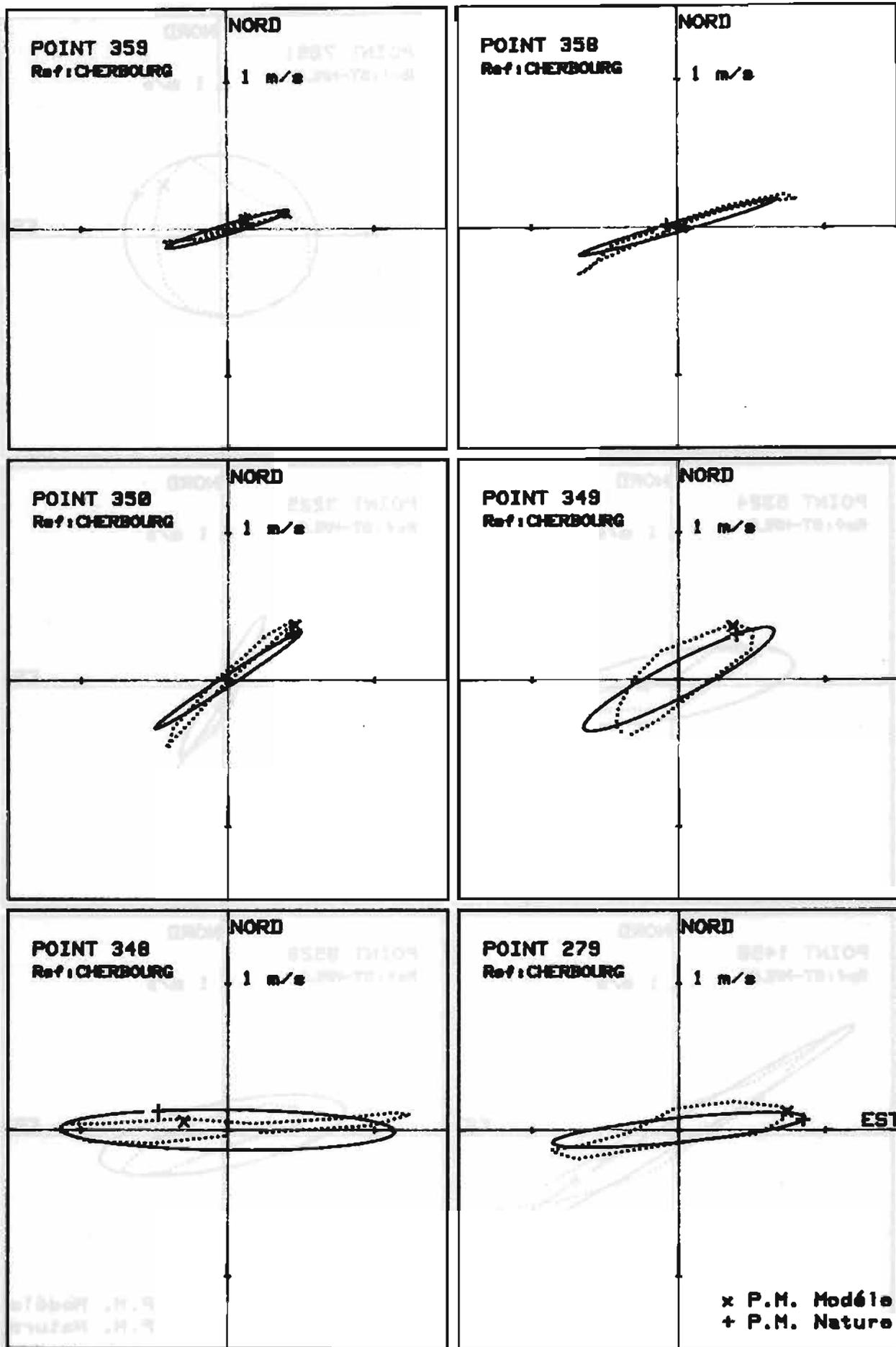


FIG. 15. — Comparaisons roses de courant Nature (SHOM) — Modéle réduit



Nature (SHOM) — Modèle réduit FIG. 16. — Comparaisons roses de courant

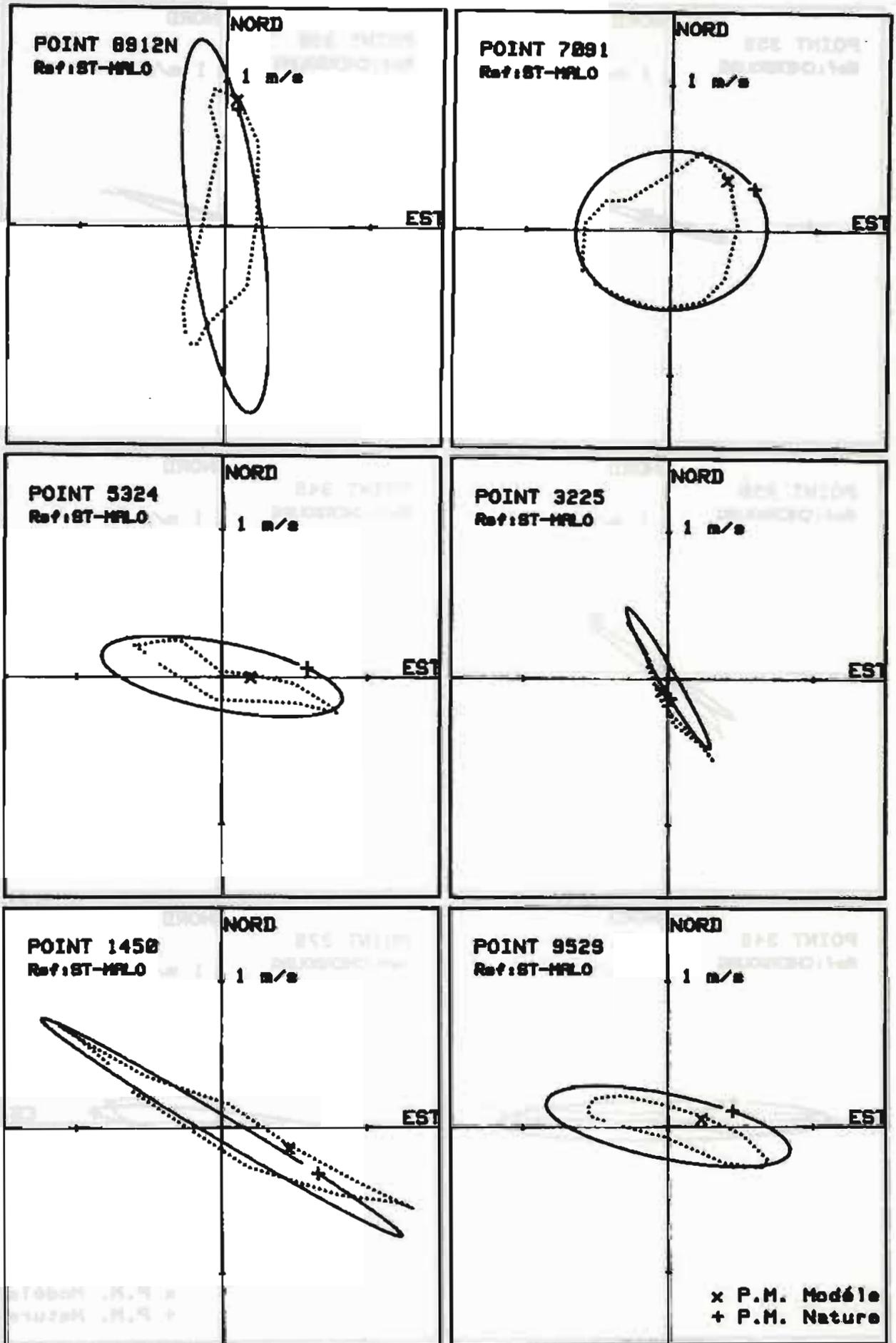


FIG. 17. — Comparaisons roses de courant Nature (EDF) — Modèle réduit

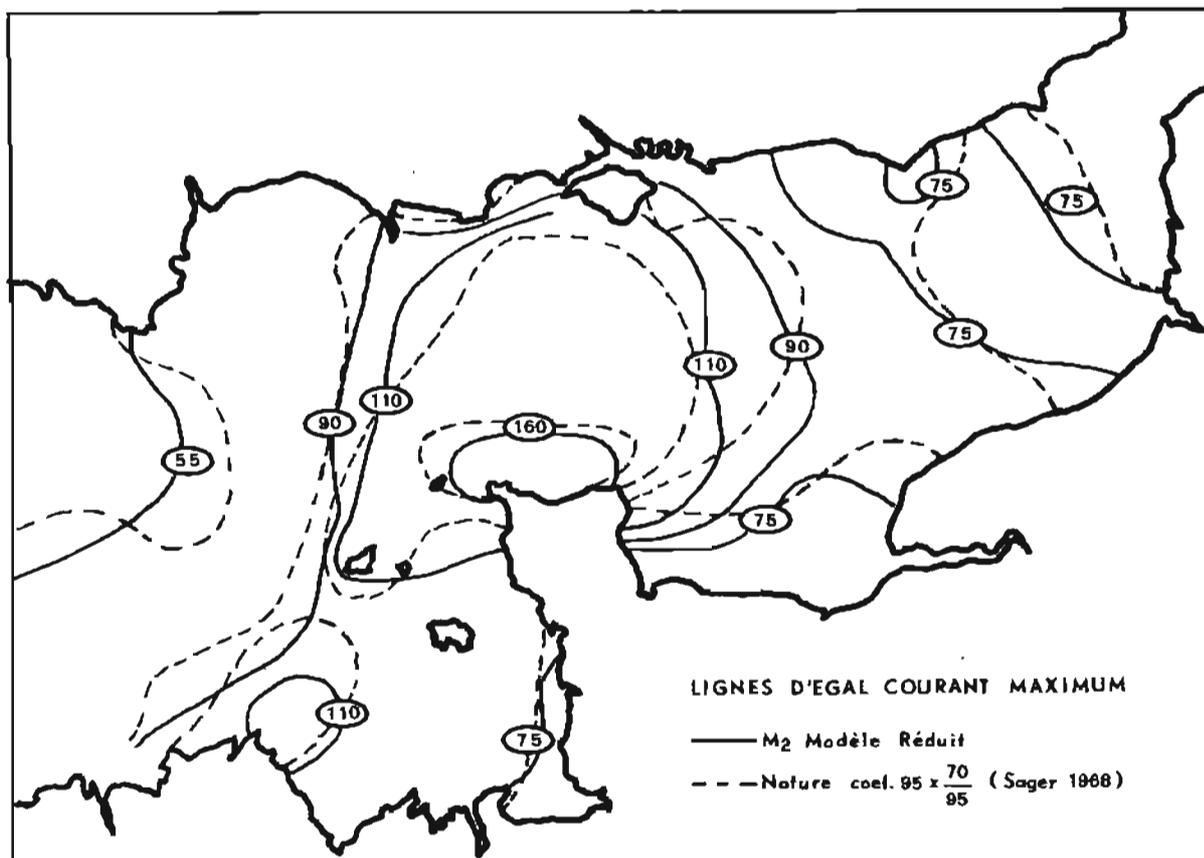


FIG. 18. — Lignes d'égal courant maximum

Orientale, près du Pas de Calais, qui fait office de convergent, le modèle semble s'accélérer plus que la nature ; les vitesses-modèle sont de l'ordre de 25 % plus fortes que les réelles.

V. CONCLUSIONS

A partir des résultats obtenus avec cette première campagne de mesures, nous pouvons affirmer que le modèle réduit de la Manche réglé pour les marnages, simule avec une bonne précision les courants de marée.

Dans un avenir proche, nous espérons pouvoir comparer les résultats du modèle avec, d'une part, des données nature plus précises, relatives à l'onde M₂, et d'autre part, avec les résultats d'une simulation sur modèle numérique qui est, actuellement, développée dans notre équipe.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AUCHERE ET BARBIER. — "Anémométrie laser type I.M.G. Fonctionnement et utilisation". Manuel d'utilisation.
- [2] G. CHABERT D'HIERES, 1962. — "Réglage et exploitation de la plaque tournante de Grenoble". Mémoires et Travaux de la S.H.F. suppl. au vol. 1, La Houille Blanche.
- [3] G. CHABERT D'HIERES et C. LE PROVOST, 1978. — "Atlas des composantes de la marée dans la Manche". *Annales Hydrographiques*, vol. 6, fasc. 3.
- [4] ELECTRICITE DE FRANCE, 1961. — "Modèle réduit des Iles Chausey. Les conditions naturelles du Golfe de St Malo. Les courants de marée". Rapport n° 3. Laboratoire National d'Hydraulique.
- [5] M. FORNERINO, 1979. — "Application de l'anémométrie à laser à la mesure des courants de marée en modèles réduits". Rapport de D.E.A. présenté à Grenoble.
- [6] M. FORNERINO, 1980. — "Campagne de mesures des courants de marée M₂ dans le modèle réduit de la Manche". Rapport interne, Institut de Mécanique de Grenoble.
- [7] C. LE PROVOST, 1974. — "Contribution à l'étude des marées dans les mers littorales. Application à la Manche". Thèse d'Etat soutenue à Grenoble.
- [8] B. LISMONDE, 1979. — "Les anémomètres à laser. Etude de leurs caractéristiques. Réalisation de prototypes". Thèse de Docteur-Ingénieur soutenue à Grenoble.
- [9] SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCEANOGRAPHIQUE DE LA MARINE, 1968. "Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique". (ouvrage n° 550)
- [10] SEEHYDROGRAPHISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK, 1968. "Atlas der Gezeitenströme".

PRÉDICTION DE LA MARÉE À BREST

par

M. Bernard SIMON

Ingénieur Civil sous contrat

Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

RESUME

L'annuaire des marées des côtes de France publié par le Service Hydrographique de la Marine repose sur le calcul de la marée à Brest à partir de laquelle les prédictions dans les autres ports sont déduites par concordance. L'objet de cet article est d'expliquer, mais aussi d'évaluer la formule en usage dite "formule de Laplace", qui permet la prédiction de la marée à Brest. Deux méthodes plus modernes lui sont opposées, mais bien que plus performantes, la formule traditionnelle est maintenue en raison des répercussions pour l'instant non encore appréciées que pourrait avoir un changement de méthode sur la qualité de l'annuaire des marées. Parallèlement la notion de "Brest-référence", port fictif où la marée obéit à la "formule de Laplace" est introduite.

ABSTRACT

Tide tables for French coasts published by the "Service Hydrographique et Océanographique de la Marine" are based upon tidal prediction at Brest from which the predictions for the other ports are deduced by applying time and height differences.

The purpose of this article is to explain and estimate the formula called "Formule de Laplace" used to predict the tide at Brest.

Two other methods, opposed to it, are found more efficient. However the traditional formula has been maintained owing to the repercussion — not yet evaluated — of the change of method on the tide tables quality.

The concept "Brest-reference" a fictitious port where tide complies with the "formule de Laplace" is introduced.

INTRODUCTION

En 1839, était publié sous l'impulsion de l'ingénieur hydrographe Chazallon le premier "annuaire des marées des côtes de France".

En raison de la complexité des calculs et de l'absence de toute machine à calculer, la méthode utilisée à cette époque pour fabriquer l'annuaire consistait à :

— calculer la marée de Brest d'après les formules que Laplace avait publiées dans les tomes II et V de la "Mécanique Céleste".

— appliquer ensuite la méthode des concordances sur la marée prédite à Brest pour obtenir la marée dans les autres ports.

La première opération est de loin la plus longue et la plus pénible mais une fois réalisée la prédiction pour les autres ports ne soulevait aucune difficulté.

Cette méthode n'a subi dans sa formulation que peu de modifications malgré son informatisation et est toujours en vigueur. Cette stabilité peut être attribuée à la précision des résultats jugée suffisante pour les besoins

de la navigation. Cependant les contrôles effectués par Hatt, Rollet de l'Isle et Courtier ont révélé certaines anomalies. Ne voulant pas mettre en cause la précision du calcul, Courtier attribua les erreurs de prédiction à la modification de la marée dans le port de Brest à la suite de la construction des digues formant la rade-abri.

Cela concourut à figer la formulation du calcul de la marée de Brest : en effet dans cette hypothèse la formule de Laplace-Chazallon devenait la seule trace de la marée ancienne, à partir de laquelle la marée de tous les ports de l'annuaire est déduite par concordance. La modifier aurait entraîné une refonte de toutes les tables de concordance, travail considérable avant l'avènement des ordinateurs et actuellement encore long et coûteux en raison de la disparition d'une bonne partie des observations anciennes qui devraient être refaites.

L'objet principal de cette étude est donc d'expliquer la formule de Laplace-Chazallon modifiée au cours des âges et actuellement utilisée pour le calcul de la marée de Brest et de mettre en évidence ses imperfections et son infériorité par rapport à deux méthodes plus avancées et plus performantes qui lui sont opposées.

Elle a conduit, en raison de la décision de maintenir la méthode ancienne qui sauvegarde l'homogénéité et la cohérence de l'annuaire, à justifier l'introduction récente dans ce dernier d'un port fictif "Brest référence" où la marée suit la loi de Laplace-Chazallon et à partir de laquelle sont déduites les prédictions des ports des côtes de France.

Cette étude a été menée et rédigée avec le concours de la section "océanographie" de l'Établissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine dirigée par l'Ingénieur en Chef de l'Armement Bonnot.

I. LA FORMULE DE LAPLACE

I.1. Généralités

Rompant avec la théorie statique de la marée développée par Bernoulli, Laplace fut le premier à introduire l'inertie des masses liquides pour expliquer les mouvements de la mer et élabora ainsi la théorie dynamique qui est rapportée dans le livre IV de son traité de Mécanique Céleste.

Ainsi la formule de Laplace est la relation qui lie le potentiel de la force génératrice de la marée à la variation du niveau de la surface libre de l'eau. Cette formule pose en principe qu'à une force périodique appliquée à un fluide correspond un mouvement de même période.

Pour expliquer l'âge de la marée, Laplace utilise l'analogie du canal fictif :

"Chacun de nos ports peut être considéré comme l'extrémité d'un canal à l'embouchure duquel les marées partielles arrivent au moment même du passage des astres au méridien et emploient un jour et demi (36 heures) à parvenir à son extrémité supposée plus orientale que son embouchure d'un certain nombre d'heures. Ce nombre est ce que je nomme heure fondamentale du port. On peut facilement la conclure de l'heure de l'établissement du port en considérant que celle-ci est l'heure de la marée lorsqu'elle coïncide avec la syzygie. Le retard des marées d'un jour à l'autre étant alors de 2705 secondes (), ce retard sera de 3951 secondes pour un jour et demi ; c'est la quantité qu'il faut ajouter à l'heure de l'établissement pour avoir l'heure fondamentale. Maintenant si l'on augmente les heures des marées de quinze heures plus l'heure fondamentale, on aura les heures des marées correspondantes dans le port.*

Ainsi le problème se réduit à déterminer les heures des marées dans un lieu dont la longitude est connue en supposant que les marées partielles arrivent à l'instant du passage des astres au méridien".

(*) Secondes décimales 2705 secondes = 0,02705 jour = 38,9 minutes

3951 secondes = 0,03951 jour = 56,9 minutes

En 1839, l'ingénieur hydrographe Chazallon utilisa la formule de Laplace pour calculer la marée à Brest.

Il y apporta toutefois quelques modifications, soit pour faciliter les calculs, soit pour améliorer empiriquement les résultats.

Chazallon écrit ainsi (*) :

"Depuis 1838, je n'ai rien changé aux constantes de Brest données par Laplace. J'ai seulement ajouté à la formule un petit terme relatif au niveau d'équilibre et modifié le temps de la transmission de l'onde diurne. Les motifs de ces légères modifications sont indépendantes de la théorie et résultent de l'examen des faits. Ils se trouvent consignés dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences Tome XXXIX, page III".

(Dans ce document, Chazallon justifie effectivement l'introduction des ondes annuelles et semi-annuelles, mais non la modification du temps de transmission de l'onde diurne).

Chazallon écrit ailleurs :

"Certains éléments ont été légèrement modifiés et Laplace lui-même a souvent modifié sa théorie".

"L'annuaire des marées a un but essentiellement pratique et non théorique et si l'on me demandait pourquoi j'emploie 36 heures de retard pour l'onde 1/2 diurne et 4 jours 1/2 pour l'onde diurne, je n'aurais aucune raison théorique à donner".

Ces quelques citations montrent, et cela à notre avis est amusant à souligner, que la formule de Laplace est en fait une véritable modélisation numérique au sens moderne du terme, que depuis un siècle et demi environ on s'est efforcé de régler de façon empirique pour obtenir des résultats les plus voisins de l'observation.

I.2. La formule de Laplace-Chazallon

I.2.1. Formule actuellement en vigueur

On adopte les notations suivantes :

A et A'	angle horaire de la lune et du soleil en heures et minutes
D et D'	déclinaison de la lune et du soleil
h	longitude du soleil
i et i'	rapport des parallaxes horizontales ω et ω' de la lune et du soleil à leur parallaxe horizontale moyenne ω_0 et ω'_0 avec $\omega_0 = 3422,61$ secondes (lune) et $\omega'_0 = 8,794$ secondes (soleil) les parallaxes horizontales sont exprimées en secondes d'arc sexagésimales.

La hauteur d'eau de la marée à Brest est la somme

- d'un terme constant
- de trois termes à longue période
- de deux termes semi-diurnes
- de deux termes diurnes.

Les expressions de ces termes sont fournies dans le tableau suivant :

(*) Lettre du 27 décembre 1839 rapportée dans les notes du manuscrit de Courtier.

Terme constant		4,453 mètres
Termes à longue période	$\left\{ \begin{array}{l} \text{lunaire} \\ \text{solaire} \\ \text{solaire} \end{array} \right.$	$- 0,075 i^3 (1 - 3 \sin^2 D),$ $+ 0,058 \cos (h - 229^\circ 28')$ $+ 0,028 \cos^2 (h - 70^\circ 38')$
		$+ 2,37734 i^3 \cos^2 D \cos 2 (A_l - 4 \text{ h } 42,4 \text{ m})$ $+ 0,82154 i^3 \cos^2 D' \cos 2 (A_l' - 4 \text{ h } 42,4 \text{ m})$
Termes diurnes	$\left\{ \begin{array}{l} \text{lunaire} \\ \text{solaire} \end{array} \right.$	$- 0,2906 \frac{i^3 \sin 2D}{2} \cos (A_l + 2 \text{ h } 24 \text{ m})$ $- 0,085 \frac{i'^3 \sin 2D'}{2} \cos (A_l' + 2 \text{ h } 24 \text{ m})$

Le terme constant correspond au niveau moyen.

Les variables astronomiques i, i', A_l, A_l', D et D' sont fonction du temps t .

La particularité essentielle de la formule de Laplace-Chazallon est que

– le groupe des termes à longue période est calculé pour l'instant t

– le groupe des termes semi-diurnes est calculé pour l'instant $t - T_2$ avec $T_2 = 36$ heures.

– le groupe des termes diurnes est calculé pour l'instant $t - T_1$ avec $T_1 = 112$ heures 50 minutes.

T_1 et T_2 sont respectivement les "âges" des marées diurne et semi-diurne.

1.2.2. Principe du calcul

En réalité on ne se préoccupe jamais d'obtenir par la formule précédente la hauteur d'eau à un instant donné. L'annuaire donne en effet uniquement les heures et les hauteurs des pleines et basses mers, et le calcul est strictement orienté vers l'obtention de ce résultat.

Les termes semi-diurnes étant de loin les plus importants, la recherche des extremums de la courbe-marée se ramène à celle de la somme des termes semi-diurnes, ce qui est beaucoup plus simple évidemment.

On admet en effet que les heures de ces extremums fournissent avec une exactitude suffisante les heures des pleines et basses mers.

Les hauteurs des pleines et basses mers correspondent aux hauteurs d'eau calculées aux instants obtenus précédemment.

Calcul de l'heure des pleines mers – termes semi-diurnes

Les éléments astronomiques étant pris à l'instant t , le groupe des termes semi-diurnes correspondant à l'instant $t + 36$ h s'écrit :

$$Y_2(t + 36 \text{ h}) = B \cos 2 (A_l - t_0) + B' \cos 2 (A_l' - t_0)$$

en posant :

$$\left\{ \begin{array}{l} B = 2,37734 i^3 \cos^2 D \\ B' = 0,82154 i'^3 \cos^2 D' \\ t_0 = 4 \text{ h } 42,4 \text{ m} \end{array} \right.$$

t_0 est la somme de l'établissement $E = 3 \text{ h } 46 \text{ m}$ du port de Brest adopté par Chazallon (1839) et du terme 56,4 minutes qui représente le retard déterminé par Laplace (Mécanique Céleste, livre XIII, page 12) entre la pleine mer du jour de la vive-eau et la pleine mer du jour de la syzygie.

Pour une journée donné B et B' peuvent être considérés comme constants, l'équation dérivée s'écrit alors :

$$Y_2'(t + 36 \text{ h}) = - 2B \sin 2 (A_l - t_0) dA_l - 2B' \sin 2 (A_l' - t_0) dA_l'$$

or $\frac{dA_l'}{dA_l}$ est égal au rapport de la durée du jour lunaire à celle du jour solaire soit 1,035.

Ainsi en posant $\varphi = A_l' - A_l$ (obtenu par les tables), les extremums de la courbe-marée sont obtenus pour les valeurs de A_l qui satisfont l'équation :

$$B \sin 2 (A_l - t_0) + 1,035 B' \sin 2 [A_l - t_0 + \varphi] = 0$$

ce qui conduit à :

$$\text{tg } 2 (A_{lPM} - t_0) = - \frac{\sin 2 \varphi}{\frac{B}{1,035 B'} + \cos 2 \varphi}$$

A_{lPM} est l'angle horaire de la lune à l'instant de la pleine mer.

Chazallon indique ensuite que l'heure effective de la pleine mer est obtenue par la relation :

$$\begin{aligned} \text{Heure PM} & \quad \text{Heure du passage} \\ (\text{temps local Brest}) & = \text{de la lune au méridien} \\ & \quad \text{de Greenwich (U.T.)} + \\ & \quad + 1,035 (A_{lPM} - t_0) + 4 \text{ h } 42,4 \text{ m} + 36 \text{ h} \end{aligned}$$

Cette formule n'est pas en accord avec l'expression des termes semi-diurnes et elle avait été contestée par Hatt. En fait, c'est probablement de cette formule qu'est parti Laplace pour remonter à l'expression des termes semi-diurnes parce qu'elle peut être facilement confrontée avec l'observation (référence 9).

Pour être homogène il faudrait écrire les termes semi-diurnes sous la forme :

$$Y_2(t) = + 2,37734 i^3 \cos^2 D \cos^2 (A_l - \lambda) + 0,82154 i^3 \cos^2 D' \cos^2 (A_l' - 4 \text{ h } 42,4 \text{ m})$$

avec

$$\lambda = 1,035 \times 4 \text{ h } 42,4 \text{ m}$$

Cette remarque n'influe pas sur la suite du calcul dans la mesure où l'on ne s'intéresse qu'aux pleines et basses mers pour lesquelles le cosinus du terme lunaire est très voisin de 1.

Pour passer du temps local moyen de Brest au temps universel, il suffirait normalement d'y ajouter 18 minutes correspondant au décalage horaire de Brest par rapport au méridien de Greenwich.

En fait, les heures de PM obtenues par le calcul précédent ne collant pas exactement à la réalité, on a procédé à un ultime réglage du modèle en définissant une correction additionnelle, connue sous le nom de correction Gaussin, résultant d'un tableau de concordance en heures entre Brest prédit et Brest observé.

Heure PM Brest Temps local moyen		Correction Gaussin en minutes
de 0 ^h à 5 ^h	12 ^h à 17 ^h	0
6 ^h	18 ^h	-1
7 ^h	19 ^h	-3
8 ^h	20 ^h	-5
9 ^h	21 ^h	-5
10 ^h	22 ^h	-3
11 ^h	23 ^h	-1
12 ^h	24 ^h	0

Heures des basses mers

Les heures des basses mers s'intercalent entre les heures des pleines mers.

L'heure d'une basse mer s'obtient en ajoutant 8 minutes à la moyenne des heures des pleines mers qui l'encadrent.

Calcul des hauteurs des pleines et basses mers

On commence par calculer le demi-marnage du groupe des termes semi-diurnes.

Un calcul simple montre qu'il est donné par la formule

$$R = \sqrt{B^2 + B'^2 + 2BB' \cos 2\varphi}$$

Compte tenu du décalage de l'heure de la pleine mer sur l'instant du passage de la lune au méridien et aussi de l'intervalle moyen de 12 h 25 m séparant deux pleines mers successives on est conduit à appliquer la valeur du demi-marnage calculé par la formule ci-dessus à la basse mer précédant immédiatement la pleine mer dont on vient de déterminer l'heure.

Ce sont par conséquent les demi-marnages des basses mers semi-diurnes que l'on commence par calculer. On fait ensuite la moyenne des demi-marnages de deux basses mers consécutives pour obtenir le demi-marnage de la pleine mer qui s'intercale entre ces deux basses mers.

Il reste à corriger ces hauteurs de marée semi-diurne de la double contribution apportée par les termes diurnes et les termes à longue période, on ajoute enfin le

terme constant 4,453 à la somme algébrique ainsi obtenue.

Unité de hauteur — Coefficient de marée

En divisant le demi-marnage de la pleine mer de la marée semi-diurne par la constante 3,209 mètres adoptée par Laplace pour la marée de Brest et connue sous le nom de "unité de hauteur" on obtient la valeur du "coefficient de marée" correspondant à l'heure de la pleine mer à Brest. Ce coefficient s'exprime en centièmes, il renseigne immédiatement sur l'ordre de grandeur du marnage de la marée, non seulement à Brest mais aussi sur tout le littoral métropolitain et dans les ports du globe même lointains où la marée est principalement semi-diurne.

1.3. Termes diurnes (Y_1)

C'est certainement la formulation et le réglage des constantes du groupe des termes diurnes qui donnèrent le plus de fil à retordre aux différents spécialistes qui se penchèrent sur la formule de Laplace, et c'est également par l'évolution historique de la formule de ce groupe qu'est mis en évidence l'empirisme qui a prévalu pour la mise au point d'une prédiction correcte de la marée de Brest.

1.3.1. Historique de la formulation du groupe diurne

Laplace avait proposé initialement la formule :

$$Y_1(t + 36 \text{ h}) = -0,21537 i^3 \frac{\sin 2D}{2} \cos (A - 4 \text{ h } 24 \text{ m}) \\ - 0,7179 i'^3 \frac{\sin 2D'}{2} \cos (A' - 4 \text{ h } 24 \text{ m})$$

et préconisait d'adopter pour l'âge de la marée la valeur de 36 heures identique à celui de la marée semi-diurne.

Chazallon proposa la formule actuellement en vigueur (voir tableau du § 1.1.2.) mais adopta 4 jours et demi pour l'âge de la marée diurne.

Cette formule fut employée pour le calcul de l'annuaire jusqu'en 1928.

A partir de 1928 Courtier, pour simplifier les calculs, adopte la formule harmonique pour l'onde diurne. Il montre en outre que les résultats obtenus sont nettement meilleurs :

"1) Le calcul de Chazallon fournit des chiffres qui sont plus faibles (dans le rapport 12/18) que ceux fournis par l'analyse harmonique.

2) Les chiffres obtenus, tant par le calcul de Chazallon que par l'analyse harmonique, sont plus faibles que la réalité, ainsi qu'il résulte des comparaisons de l'année 1924.

$$\frac{\text{Chazallon}}{6} = \frac{\text{Analyse harmonique}}{9} = \frac{\text{Réalité}}{10}$$

Donc, il est préférable d'adopter pour la prédiction de l'onde diurne les chiffres fournis par l'analyse harmonique".

Il montre par ailleurs que l'âge de l'onde diurne, tel qu'il résulte de l'analyse harmonique, est égal à 90,734 h avec une situation de 144° :

"Il eût été, à première vue, préférable pour Chazallon de prendre 3 j 1/2 comme âge au lieu de 4 j 1/2".

Mais cela n'a que peu d'importance, car :

"A la déclinaison et à la parallaxe près, l'adoption de 4 j 1/2 pour l'âge comme le fait Chazallon, au lieu de 3 j 1/2 adopté par Laplace, ne modifie rien aux résultats"...

Une certaine confusion a résulté du fait qu'une erreur de transcription semble s'être glissée dans les formules du cours de marée de Rollet de l'Isle : le facteur 1/2 n'y apparaît pas. La confusion est entretenue par le fait que la formule ainsi obtenue donne de meilleurs résultats, comme il est aisé de s'en rendre compte d'après la comparaison faite par Courtier (voir ci-dessus).

Mais il semble bien qu'il s'agisse d'une erreur de Rollet de l'Isle, car il est peu probable qu'il ait corrigé les formules de Laplace et de Chazallon sans le signaler et en outre, le calcul de l'annuaire a toujours été fait selon la formule de Chazallon, même au temps de Rollet de l'Isle.

Roumégoux rapporte ainsi :

"Laplace dit que le terme diurne a une grandeur d'environ 1/5 de m. (20 cm) (Tome VIbis, livre 4, page 329, et aussi Tome V, livre 13, page 268) : 2R = 0,2134 ; 2R paraît bien être l'amplitude dans l'idée de l'auteur. En fait, le simple examen des constantes harmoniques du port de Brest montre que :

$$K_1 + O_1 + P_1 + Q_1 + J_1 + M_1 + S_1 = 19 \text{ cm}$$

On peut s'attendre à trouver une amplitude de la marée diurne sensiblement double de celle que semble annoncer Laplace. Il y a probablement chez le maître un coefficient 2 qui s'est égaré".

En conclusion, il semble que, jusqu'en 1928, l'annuaire ait été calculé avec un terme diurne deux fois trop faible, l'erreur ayant été faite par Laplace lui-même. Courtier a rétabli la situation à partir de 1928 en adoptant la formule harmonique pour calculer le terme diurne de l'annuaire.

1.3.2. Formule actuellement en vigueur

En 1972, Roumégoux est revenu à la formule de Laplace pour calculer le terme diurne, mais l'adaptation aux tables de valeurs astronomiques qu'il en a faite et sur laquelle il ne donne aucune explication nous a semblé ne reposer sur aucun calcul rigoureux et résulte probablement d'un ajustement des coefficients d'une formule erronée pour obtenir des résultats voisins de ceux de l'analyse harmonique.

Laplace donne la valeur de 0,095 j (soit 2 h 16 m) pour "le temps dont le flux d'un jour (flux diurne) précède le moment des maxima des marées du soir d'un demi-jour (semi-diurne)".

On retrouve ce décalage dans la valeur 2 h 24 m du terme diurne de Chazallon.

On admet par ailleurs depuis Chazallon que si la pleine mer de la marée semi-diurne met trois marées pour se propager de l'embouchure du canal de Laplace jusqu'à Brest, la marée diurne en met neuf pour effectuer le même trajet.

Ainsi, si l'on se place en syzygie, la pleine mer du flot diurne aura lieu à :

Heure du passage de la lune au méridien

$$\begin{aligned} &+ 40 \text{ h } 42,4 \text{ m} && (36 \text{ h} + 4 \text{ h } 42,4 \text{ m}) \\ &+ 74 \text{ h } 31,2 \text{ m} && (6 \text{ marées supplémentaires}) \\ &- 2 \text{ h } 24 \text{ m} \end{aligned}$$

soit à l'heure du passage de la lune au méridien augmentée de $T_1 = 112 \text{ h } 50 \text{ m}$.

$T_1 =$ âge du terme diurne.

Si l'on désigne par n le numéro d'ordre du passage de la lune au méridien toujours pour une syzygie, la pleine mer correspondante aura lieu

40 h 42,4 m plus tard

le terme diurne doit donc être calculé

112 h 49,6 m - 40 h 42,4 m = 72 h 07,2 m avant le passage de la lune au méridien soit 6 marées moins 2 h 24 m avant.

Roumégoux donne alors pour la valeur du terme diurne à l'instant de la pleine mer semi-diurne la formule suivante :

$$Y_{1(PM)} = Y_1(n-6) + 1,8 \frac{Y_1(n-5) - Y_1(n-6)}{12,41667}$$

et pour la basse mer

$$Y_{1(BM)} = Y_1(n-6) - 3,75 \frac{Y_1(n-6) - Y_1(n-7)}{12,41667}$$

$Y_1(n-5)$, $Y_1(n-6)$, $Y_1(n-7)$ étant calculés pour des valeurs de A nulles ou égales à 180°.

Ces formules font penser à des formules d'interpolation permettant de rattraper le décalage de 2 h 24 m avec des coefficients ajustés pour obtenir des résultats conformes à ceux de l'analyse harmonique. Aucune justification théorique n'a pu être trouvée.

1.4. Les termes à longue période

Ces termes sont au nombre de 3, comme l'indique le tableau du § 1.2 :

- un terme lunaire qui est le plus important
- deux termes solaires dépendant de la longitude moyenne du soleil.

Le terme lunaire s'écrit $-0,075 i^3 (1 - 3 \sin^2 D)$. Les éléments i^3 et $\sin^2 D$ se calculent en même temps que le demi-marnage du terme semi-diurne lunaire

$$B = + 2,37734 i^3 \cos^2 D.$$

Les valeurs du terme lunaire à longue période pour chaque passage de la lune au méridien de Greenwich

sont ainsi facilement obtenues. Les valeurs de ce terme aux heures des pleines et basses mers successives s'en déduisent par interpolation.

Pour calculer les termes solaires on met la longitude moyenne h du soleil sous la forme :

$$h = h_0 + qt$$

où h_0 est la valeur de h le 1er janvier à 00 h 00

$q = 0,04106864$ degrés par heure.

Les deux termes solaires s'écrivent ainsi

$$+ 0,058 \cos (qt + h_0 - 229^\circ,47)$$

$$+ 0,028 \cos (2qt + 2h_0 - 141^\circ,26)$$

1.5. Conclusion

Les paragraphes qui précèdent montrent bien l'empirisme dont il a fallu faire preuve pour obtenir des résultats corrects en employant la formule de Laplace qui n'a en fait que très peu de fondement théorique.

Il est intéressant d'écouter les propos de Hatt (1880) à ce sujet :

"Le calcul de l'heure repose sur un principe inexact et si le résultat obtenu est à peu près juste, c'est grâce à un concours fortuit d'erreurs de sens contraires et à une correction finale obtenue empiriquement.

Il nous semble qu'il se présente une question de principe et qu'il serait plus digne d'un établissement scientifique de l'importance du Dépôt de la Marine de ne s'en tenir, pour une de ses principales publications, à l'exactitude d'un résultat final mais encore d'obtenir ce résultat par des méthodes dont l'enchaînement logique serait irréprochable".

Hatt poursuit :

"Il nous semble indispensable de procéder à de nouvelles recherches basées, non plus, comme on l'a fait jusqu'à présent, sur l'observation des minima et maxima, mais bien sûr sur la considération de la courbe entière que nous fournit le marégraphe de Brest depuis de longues années.

C'est prendre le problème par son côté le plus compliqué que d'avoir recours aux pleines et basses mers et en outre, du point de vue de l'heure, c'est s'exposer au maximum d'indétermination".

Cette déclaration d'intention ne fut pas suivie d'effets et Hatt et ses successeurs s'en tinrent à la formule de Laplace et à "l'exactitude du résultat final" pour se consacrer à des tâches plus urgentes telles que l'établissement des tables de concordance.

Courtier en vint toutefois à contester l'exactitude même des résultats mais ne voulant remettre en cause la formule de Laplace-Chazallon il attribua la mauvaise qualité relative de la prédiction à une modification de la marée à l'observatoire de la Penfeld par la construction des digues de la rade-abri. Il admit alors que la formule de Laplace permettait la prédiction d'une marée fictive, qu'il dénomma "Brest-rade", et à partir de laquelle

pouvait se déduire par concordance la marée dans les autres ports et notamment à Brest, l'application des tableaux de concordances permettant en fait de redresser les inexactitudes de la prédiction par Laplace.

"Brest-rade" n'est autre que "Brest-référence" introduit pour la première fois dans l'annuaire des marées des côtes de France de 1982.

II. EXTENSION DE LA FORMULE DE LAPLACE

II.1. Généralités

La première partie montre bien que la mise au point de la formule de Laplace n'était pas dissociée du souci de rendre la prédiction de la marée accessible au calcul manuel.

Il y a une vingtaine d'années le passage sur ordinateur n'a pas modifié fondamentalement le mode de calcul et le calcul de la marée à Brest reste notamment tributaire de la fourniture par le Bureau des Longitudes des éléments astronomiques, ce qui constitue une servitude.

Or les moyens de calculs actuels permettent d'appliquer directement la formule de Laplace et de calculer les éléments astronomiques à un instant donné, sans avoir recours à des méthodes d'interpolation entre des valeurs fournies par une table. Il en est de même pour les approximations successives nécessaires au calcul des heures des pleines ou basses mers.

Ces considérations nous ont ainsi amené à mettre au point pour le calcul de la marée à Brest, une nouvelle méthode que nous avons appelée "Extension de la Formule de Laplace". Les performances de cette méthode seront évaluées en troisième partie et comparées à celle de la Formule de Laplace exposée précédemment.

II.2. Calcul automatique des éléments astronomiques

Nous emploierons les notations suivantes empruntées à Doodson :

- θ : longitude de la lune
- θ' : longitude du soleil
- ω : inclinaison de l'écliptique
- χ : angle horaire du point vernal (temps sidéral)
- s : longitude moyenne de la lune
- h : longitude moyenne du soleil
- p : longitude moyenne du périhélie lunaire
- N : longitude moyenne du noeud ascendant
- p_1 : longitude moyenne du périhélie solaire
- δ : latitude de la lune

II.2.1. Les données pour le calcul des arguments sont tirées des *American Ephemeris de 1968* (explication).

T étant le temps exprimé en siècles juliens de 36525 jours des éphémérides, écoulé depuis le 31 décembre 1899 à 12 h TE, ces données sont :

$$\begin{aligned}
 s &= 270^{\circ},43416 + 481267^{\circ},88314 T - 4'',08 T^2 \\
 h &= 279^{\circ},68668 + 36000^{\circ},76892 T + 1'',089 T^2 \\
 p &= 334^{\circ},32956 + 4069^{\circ},03403 T - 37'',17 T^2 \\
 N &= 259^{\circ},183275 - 1934^{\circ},14201 T + 7'',48 T^2 \\
 P_1 &= 281^{\circ},22083 + 1^{\circ},71918 T + 1'',63 T^2 \\
 \omega &= 23^{\circ},452294 - 46'',845 T \\
 \chi &= 15^{\circ} t + h - 180^{\circ} - \varphi
 \end{aligned}$$

où t est le temps des éphémérides (en heures) et φ la longitude du lieu.

Les termes principaux de la nutation sont pris en compte :

La nutation en longitude L est ajoutée aux longitudes moyennes et la nutation en obliquité Ω est ajoutée à ω

$$\begin{aligned}
 L &= 17'',23 \sin N \\
 \Omega &= 9'',21 \cos N
 \end{aligned}$$

Le temps est le temps des éphémérides (TE)

$$t = UT + \Delta T.$$

ΔT est obtenu d'après les observations. La valeur servant au calcul des éphémérides est le résultat d'une extrapolation.

Par exemple, pour l'année 1978, $\Delta T = 48$ s.

11.2.2. Calcul des éléments astronomiques de la lune

- déclinaison D :

$$\sin D = \sin \omega \cos \delta \sin \theta + \cos \omega \sin \delta$$

- angle horaire Ah : $\cos Ah = \cos \xi / \cos D$

$$\cos \xi = \cos \delta \cos \theta \cos \chi + \sin \chi (\cos \omega \cos \delta \sin \theta - \sin \omega \sin \delta)$$

θ et δ se calculent à l'aide des tableaux I et II empruntés à Doodson en appliquant des formules qui ont la forme suivante :

$$\delta = \sum a_j \sin A_j$$

où a_j sont les coefficients des tableaux et

$$\begin{aligned}
 A_j &= (n_j^1 - 5) s + (n_j^2 - 5) h \\
 &+ (n_j^3 - 5) p - (n_j^4 - 5) N + (n_j^5 - 5) P_1
 \end{aligned}$$

Le nombre formé de 5 chiffres $[n_j^1 n_j^2 n_j^3 n_j^4 n_j^5]$ étant le nombre argument des tableaux.

δ et θ sont exprimés en radians.

Le nombre i , rapport de la distance de la lune à la distance moyenne, s'obtient par une formule analogue en utilisant le tableau III.

11.2.3. Calcul des paramètres astronomiques du soleil

Le problème, dans ce cas, est beaucoup plus simple.

$$\begin{aligned}
 \theta &= h + 0,033501 \sin (h - p_1) + 0,000351 \sin 2 (h - p_1) \\
 &+ 0,000005 \sin 3 (h - p_1) \\
 i' &= 1 + 0,016750 \cos (h - p_1) + 0,000281 \cos 2 (h - p_1) \\
 &+ 0,000005 \cos 3 (h - p_1)
 \end{aligned}$$

Déclinaison D'

$$\sin D' = \sin \omega \sin \theta$$

Angle horaire Ah'

$$\cos Ah' = \cos \xi' / \cos D'$$

avec

$$\cos \xi' = \cos \theta' \cos \chi + \sin \chi \cos \omega \sin \theta'$$

11.2.4. Résultat des calculs astronomiques

Les résultats des calculs ont été comparés à ceux des Ephémérides Nautiques et des Astronomical Ephemeris de l'année 1978 :

l'angle horaire de la lune est calculé à mieux que $30''$, la déclinaison à mieux que $20''$ et la parallaxe horizontale à mieux que $1''$.

Ces résultats sont satisfaisants, puisque l'incertitude que cela entraîne sur la hauteur d'eau calculée par la formule de Laplace est de l'ordre de 3 mm et l'incertitude en temps est de l'ordre de 1 s.

Il est donc possible de calculer la formule de Laplace à l'aide de ces formules. Le calcul étant suffisamment rapide. La recherche de l'heure de la pleine mer par approximations successives peut être envisagée.

On a procédé différemment pour profiter des programmes disponibles : grâce à la méthode de prédiction par les hauteurs réduites, il est possible de calculer une hauteur tous les $1/128^h$ de jour lunaire (environ 11 mn) en ne calculant qu'un vecteur représentatif de chaque espèce par jour lunaire (voir ref. n° 7). Les pleines mers sont obtenues par interpolation avec une précision suffisante. Les résultats obtenus de cette manière ne sont pas identiques à ceux de l'annuaire, ce qui n'est pas surprenant puisque ce dernier n'est pas calculé exactement selon la formule de Laplace, mais selon une méthode imaginée par Chazallon, qui permet d'obtenir de meilleurs résultats. Il serait possible d'appliquer exactement la méthode de Chazallon, mais ce serait peu judicieux car l'utilisation d'un ordinateur offre d'autres possibilités. On a vérifié simplement que l'on pouvait obtenir les heures des pleines mers et les amplitudes correspondantes (appliquées aux basses mers précédentes), identiques à celles de l'annuaire.

11.3. Extension de la formule de Laplace

D'après Laplace, la hauteur de marée est une fonction linéaire des différents termes du potentiel générateur de la marée.

Si l'on exprime les termes du potentiel générateur par des formules générales

$$\begin{aligned}
 P_0 &: \text{terme à longue période d'origine lunaire} \\
 P'_0 &: \text{terme à longue période d'origine solaire} \\
 P_1 &: f_1(i, D) e^{jAH} \\
 P'_1 &: f_1(i', D') e^{jAH'} \\
 P_2 &: f_2(i, D) e^{2jAH} \\
 P'_2 &: f_2(i', D') e^{2jAH'}
 \end{aligned}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{termes diurnes} \\ \text{termes semi-diurnes} \end{array}$$

Tableau I. Développement de la longitude de la lune : ($\theta - s$).
Coefficients des sinus

Nombre argument	Coefficient						
55-654	5	555	-605	74-356	47	85-255	175
753	1	554	-138	455	-41	475	-219
775	6	65-358	-2	554	-119	86-254	-3
56-356	-12	456	0.109760	75-365	3728	91-755	3
456	90	554	87	454	6	90-556	9
554	-3243	653	-12	575	-1996	91-555	67
576	7	675	-192	76-354	-37	92-266	6
57-355	-1026	66-355	9	574	2	554	-1
553	-37	454	-532	77-165	-5	570	-2
575	-267	575	3	375	3	93-355	70
58-354	-42	67-255	-64	81-657	2	575	-28
574	-11	453	-6	866	1	94-354	-1
59-363	-1	68-254	-2	80-656	21	95-155	9
60-658	1	70-558	2	81-467	4	375	-19
61-635	1	756	13	655	186	595	2
657	36	71-557	40	82-456	71	XI-655	2
855	6	656	-1	555	2	X0-456	1
62-436	-2	755	149	654	-3	X1-456	10
535	-1	72-566	802	676	-2	675	-1
656	1000	655	-16	83-455	931	X3-255	6
755	-6	754	-2	675	-46	475	-5
63-435	-31	73-335	-2	84-256	3	X5-275	-2
457	13	357	1	355	-3	E1-355	1
556	-3	555	0.011490	454	-14		
655	0.022236	654	1	476	-1		
64-456	717	775	-3	575	1		

Tableau II. Développement de la latitude de la lune : (δ)
Coefficients des sinus.

Nombre argument	Coefficient						
55-566	-4	544	-59	466	33	84-368	4
665	-4847	566	24	565	-26	465	-3
56-444	-25	65-345	154	604	-6	564	-8
466	4	565	0.089604	75-245	8	85-365	300
566	23	66-344	-2	465	4997	585	-31
664	-27	465	2	564	4	86-364	-3
57-245	-1	564	-31	685	-14	90-666	2
465	-808	67-365	-75	76-464	-26	91-445	2
655	1	585	-11	77-265	-7	665	15
58-464	-38	68-364	-3	485	-2	92-466	6
59-463	-1	70-646	3	80-546	2	93-465	78
61-547	5	71-645	32	766	1	685	-1
745	3	667	2	81-545	18	94-464	-1
62-546	144	72-446	9	567	2	95-265	19
645	-2	545	-2	765	13	485	-5
63-545	3024	666	43	82-566	39	X1-665	6
765	-8	78-445	162	665	-1	X3-365	7
64-346	1	665	967	83-345	10	X5-165	1
445	-3	74-444	-4	565	368	E1-464	1

Tableau III. Développement de i.
Coefficient des cosinus.

Nombre argument	Coefficient						
55-566	1.000000	65-455	0.054501	74-368	37	454	-14
664		554	44	465	-82	85-255	182
776		653	-8	564	-88	475	
56-455	4	675	-209	75-365	2970	86-254	-3
554	-117	66-355	5	454	5	91-755	3
57-355	-89	454	-278	576	-4	90-556	10
553	-3	575	2	76-354	-30	91-555	76
575	-31	67-255	-35	77-165	-4	92-356	6
58-354	-8	453	-3	375	-3	554	-1
574	-2	475	-24	81-865	1	93-355	83
61-657	14	68-254	-1	80-656	20	94-354	-1
866	2	70-766	9	81-467	3	95-155	12
62-656	432	71-657	27	655	178	X1-655	3
755	-3	755	109	82-456	67	X0-456	2
63-435	-14	72-566	561	565		X1-455	13
457	6	655	-11	654	-3	X2-256	
655	0.010025	73-835	-1	83-455	902	X3-255	7
64-466	337	555	8249	675	-3	X5-056	
555	-285	776	-4	84-268	4	E1-355	1
654	-66			355	-3		

avec $j^2 = -1$ et f_1 et f_2 étant des fonctions de la forme $j^3 \cos 2D$ et $j^3 \cos^2 D$

la formule de Laplace s'écrit normalement :

$$H(t) = R_e(a_0 P_0 + a'_0 P'_0 + a_1 P_1 + a'_1 P'_1 + a_2 P_2 + a'_2 P'_2)$$

R_e signifiant : Partie réelle de

$a_0 \dots a_2$ étant des coefficients complexes constants
 $P_0, P'_0, \dots, P_2, P'_2$ étant calculés à des instants $t - T_i$ différents

T_i correspondant à l'âge de la marée du terme correspondant.

Cette formulation permet de rationaliser le calcul de Laplace, mais n'en modifie pas pour autant les résultats précédemment obtenus par des artifices de calcul manuel.

Alors tant qu'à rationaliser le mode de calcul, autant en profiter pour critiquer et compléter la formule de Laplace. Cela peut être fait à partir des constatations suivantes :

- Le principe de Laplace est qu'à une force périodique issue du potentiel générateur correspond une marée de même période, mais ne fait aucune hypothèse sur le rapport des amplitudes de ces fonctions périodiques.

- Pourquoi alors ne pas introduire dans la formule une marée tiers-diurnes, réponse du fluide aux forces tiers-diurnes apparaissant à travers le développement du potentiel générateur et pourquoi négliger a priori les puissances croissantes des termes diurnes, semi-diurnes et tiers-diurnes ?

- L'analyse harmonique des observations de longue durée à Brest ne met pas en évidence un terme lunaire à longue période d'importance significative, alors que pour Laplace ce dernier semble être le plus important des termes à longue période.

On peut proposer ainsi une formule à la fois plus complète et probablement plus logique et plus réaliste de la formule suivante :

$$H_{(t)} = R_e(b_0 P'_0 + b_1 U_1 + b_2 U_2 + b_3 U_3 + b_4 U_2^4 + b_8 U_2^4 + b_{10} U_2^5)$$

où dans laquelle P_0 est négligé

$U_i = P_i + \rho_i P'_i$, ρ_i étant des coefficients constants
 P_3 et P'_3 correspondent aux termes tiers-diurnes du potentiel générateur.

$b_0 \dots b_{10}$ sont des fonctions de l'amplitude C et des vitesses de variations D_C et ν_2 de l'amplitude et de la phase du vecteur représentatif de l'espèce semi-diurne.

La forme de cette expression est calquée sur celle qui a été mise au point par l'auteur de l'étude pour le calcul de la marée en Gironde à partir de celle de son embouchure. Tout comme Brest peut être considéré à l'extrémité d'un canal en amont d'une embouchure où la marée répond instantanément à l'excitation du potentiel générateur.

La formule détaillée et numérisée adoptée pour les calculs est explicitée en annexe. Certains termes γ sont notamment négligés. Des formulations différentes auraient pu être envisagées. En particulier on aurait pu

tenir compte des périodes des ondes diurnes et tiers-diurnes dans le calcul de b_1 et b_3 , mais telle qu'elle est, comme le montre la troisième partie de l'étude, cette formule permet déjà d'obtenir des résultats plus proches de la réalité que celle de Laplace-Chazallon.

Les coefficients ρ_1 et ρ_2 , doivent être introduits pour tenir compte du fait que les influences de la lune et du soleil ne sont pas dans leur rapport théorique, probablement parce que, à l'effet gravitationnel, se superpose, pour l'onde solaire, un effet "radiationnel" important. Ces coefficients pourraient être calculés directement à partir des observations (30 jours d'observations suffisent). Pour cette étude, on les a déduits des constantes harmoniques.

Les éléments astronomiques sont calculés au temps t pour le terme à longue période, $t - T_1$ pour le terme diurne et $t - T_2$ pour les termes semi-diurne et tiers-diurne.

T_1 et T_2 sont l'âge de la marée diurne et l'âge de la marée semi-diurne.

Pour les calculer, reprenons l'image de Laplace : La marée est engendrée à l'embouchure d'un canal dont la longitude est λ (degrés). Soit t_0 l'instant de passage de l'astre au méridien. Le maximum d'action a lieu au temps t_1 , tel que $(t_1 - t_0) q = \lambda$ où q est la vitesse angulaire de l'astre (en degré par unité de temps). La pleine mer a lieu au temps t_2 tel que $t_2 - t_1 = T = x/c$ où x est la longueur du canal et c la vitesse de propagation de l'onde. Eliminons t_1 entre les expressions précédentes, on obtient l'angle horaire de l'astre au moment de la pleine mer

$$K = (t_2 - t_0) q = \lambda + q T$$

C'est la situation absolue de l'astre. T est l'âge de la marée. Il est possible de le calculer à l'aide d'une analyse harmonique. Soit K_1 et K_2 les situations de deux ondes de vitesse angulaire q_1 et q_2

$$T = \frac{K_2 - K_1}{q_2 - q_1}$$

Cette théorie n'est vérifiée que si les situations sont proportionnelles aux vitesses angulaires. C'est approximativement le cas pour les ondes diurnes à Brest.

$$T_1 = \frac{K_{K1} - K_{01}}{q_{K1} - q_{01}} = 97,25 \text{ heures}$$

On a déduit

$$\lambda_1 = K_{01} - q_{01} T_1 = K_{K1} - q_{K1} T_1 = 47,1^\circ$$

(Pour ce calcul, on ne tient pas compte de l'origine partiellement solaire de K_1 . Les valeurs présentées en annexe, qui en tiennent compte, sont plus exactes).

Dans le cas des semi-diurnes, la proportionnalité n'est pas exactement vérifiée :

$$\frac{K_{M2} - K_{S2}}{q_{M2} - q_{S2}} = 38,12 \text{ heures}$$

$$\frac{K_{M2} - K_{K2}}{q_{M2} - q_{K2}} = 33,21 \text{ heures}$$

$$\frac{K_{M2} - K_{N2}}{q_{M2} - q_{N2}} = 34,04 \text{ heures}$$

Nous avons adopté $T_2 = 33,86$ heures, résultat d'un calcul de régression linéaire pour les ondes d'origine lunaire.

On en déduit pour les ondes d'origine lunaire

$$\lambda_2 = K_{M2} - q_{M2} T_2 = 198,5^\circ$$

Pour les ondes d'origine solaire

$$\lambda'_2 = K_{S2} - q_{S2} T_2 = 203,2^\circ$$

Ces résultats ne sont qu'approchés, mais une valeur précise de l'âge de la marée n'est pas requise.

Les coefficients complexes $A_{0j} \dots A_{5j}$ de la formule sont calculés par la méthode des moindres carrés. Ils sont fournis en annexe 1.

III. EVALUATION DES PERFORMANCES DES DIFFÉRENTES FORMULES

III.1. Généralités

Le marégraphe de Brest, fait pratiquement unique dans le monde, fonctionne depuis 1861 et toutes les observations recueillies ont été transcrites sur cartes perforées.

De bonne qualité en général, elles constituent une référence privilégiée pour tester la qualité de nos prédictions.

Les lacunes de courte durée ont été comblées artificiellement. Il subsiste cependant des lacunes importantes : l'année 1915, 519 jours entre 1937 et 1939 et 3168 jours entre 1944 et 1953.

Les observations peuvent être ainsi décomposées en quatre périodes de 6943 jours qui débutent

- . le 1^{er} mars 1864
- . le 2 mars 1883
- . le 2 février 1917
- . et le 1^{er} janvier 1953.

La durée des observations disponibles a permis de réaliser une analyse harmonique très poussée qui a permis d'isoler 199 constantes, c'est-à-dire toutes les constantes dont l'amplitude est supérieure à 1 mm.

Cette analyse nous a fourni un troisième outil de prédiction qu'il nous a paru intéressant d'évaluer par rapport aux deux précédents.

III.2. Historique des comparaisons entre prédiction et observation

Il est bien évident que nous ne sommes pas les premiers à avoir fait ces comparaisons qui ont été au con-

traire le souci constant de nos prédécesseurs. Rappeler leurs conclusions ne manque pas d'intérêt.

Courtier rapporte ainsi :

"En 1847, Chazallon a vérifié les prédictions de 1835, 39 et 40. Il a trouvé qu'elles étaient trop faibles et qu'il fallait ajouter 10,5 cm aux hauteurs".

"En 1904, Rollet de l'Isle a comparé les prédictions de l'annuaire avec le marégraphe de Brest pour les années 1861, 1895, 1898 et 1900. Le résultat a été que la prédiction est satisfaisante pour les heures de pleines et basses mers et pour les hauteurs des pleines mers. Pour les hauteurs des basses mers, il trouve que les hauteurs prédites sont trop faibles de 0,125 m en moyenne".

"En 1928, Courtier a comparé les prédictions de l'annuaire avec le marégraphe de Brest pour les années 1926 et 1927. Il a trouvé que la prédiction des heures de l'annuaire était très satisfaisante, notamment en vive-eau, mais que les hauteurs des basses mers étaient trop faibles de 0,24 m et des pleines mers de 0,11 m".

Courtier attribue ces écarts "à une variation lente du niveau moyen et à une déformation de la marée à Brest par suite de la création de nouvelles jetées gênant la vidange de la Penfeld" (La construction de ces jetées a commencé en 1895).

"En résumé :

1. Il semble que la marée de Brest se soit légèrement modifiée en ce qui concerne la hauteur des basses mers depuis l'établissement des nouvelles digues de la rade abri (1895-1912), mais non en heures.

2. L'annuaire des marées prédit jusqu'ici l'ancienne marée de Brest et non la nouvelle. Si l'on veut prédire la nouvelle, il faudra veiller ensuite à utiliser rationnellement les tables actuelles de concordance des 17 autres ports avec Brest.

3. La machine à marée du Service Hydrographique est insuffisante (n'a pas assez d'ondes) pour effectuer la prédiction des heures de Brest avec la précision de la formule de Chazallon ; en outre, le dépouillement conserve une petite imprécision.

4. Les prédictions de Brest par la formule de Chazallon sont très exactes pour les heures. La prédiction des hauteurs pourrait être améliorée, notamment en faisant subir à toutes les hauteurs la petite correction de niveau moyen + 10,5 cm déjà indiquée par Chazallon (compte rendu de l'Académie des Sciences 1854, vol. 39). Toutefois, les raisons qui ont déterminé Chazallon à ne rien changer à sa formule subsistent encore".

Toutes ces vérifications font état des prédictions de hauteurs trop faibles, notamment en ce qui concerne les basses mers :

Il est équivalent de dire que le niveau moyen adopté est trop bas et que l'amplitude prédite est trop forte.

Si on adopte ce point de vue, on remarque alors que les amplitudes prédites avant la construction de la rade abri (vérifications de Rollet de l'Isle, portant sur les années 1861 et 1895) sont trop fortes en moyenne de 13 cm, ce qui est exactement la valeur trouvée par Courtier pour les années 1926 et suivantes.

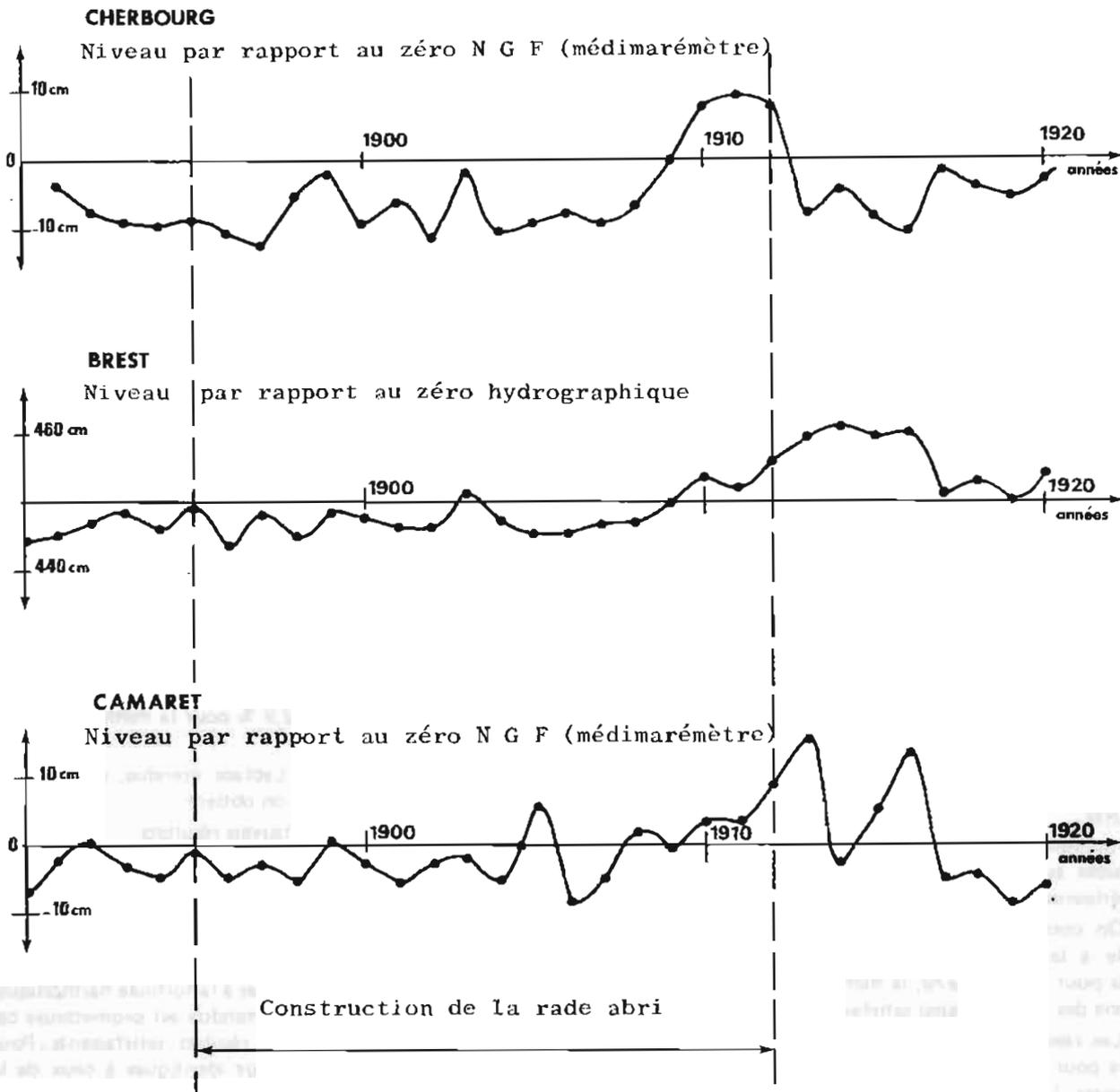


FIG. 1. — Niveaux moyens annuels à Cherbourg, Brest et Camaret

Comme la prédiction des heures reste très exacte, on en conclut, contrairement à Courtier, que la construction de la rade abri n'a pas déformé la marée de Brest : les différences s'expliquent uniquement par une augmentation du niveau moyen ; mais ce niveau moyen ayant augmenté conjointement à Camaret et à Cherbourg, comme l'illustre la figure 1, la construction de la rade abri n'a apparemment rien changé à la marée de Brest.

Quant aux raisons qui ont déterminé Chazallon à ne rien changer à sa formule, concernant le niveau moyen, nos recherches n'ont pas permis de les déceler (elles ne figurent pas dans l'extrait du compte rendu de l'Académie des Sciences cité par Courtier).

Il apparaît par ailleurs que Chazallon lui-même a modifié sa formule plusieurs fois (voir les formules utilisées dans l'annuaire (*)).

III.3. Comparaisons des trois méthodes effectuées en 1980-1981

Ces comparaisons portent sur les heures et hauteurs des pleines et basses mers calculées et observées pour les années 1979, 1978, 1976, 1895 et 1879.

Les résultats apparaissent sous forme d'écart-types, de répartition des écarts et d'écart moyen en fonction du coefficient.

Afin de minimiser l'effet des perturbations d'origine météorologiques, les hauteurs observées et prédites sont réduites au même niveau de mi-marée calculé chaque jour.

(*) Données numériques concernant les marées des côtes de France par M.A. Courtier (Ref. 4)

Pleines et basses mers

	Brest rade	Brest Penfeld	L P E	HARM ₃₀	HARM ₂₀₀
	σ_H (cm) : σ_T (mn)	σ_H : σ_T	σ_H : σ_T	σ_H : σ_T	σ_H : σ_T
1879	:	:	:	:	4,3 : 4,1
1895	:	:	6,6 : 6,0	:	4,4 : 3,9
1976	:	6,5 : 5,9	6,2 : 6,1	6,1 : 5,6	4,4 : 4,4
1978	8,0 : 6,3	6,6 : 6,6	:	:	5,5 : 5,1
1979	7,8 : 5,8	6,5 : 5,5	5,5 : 5,3	6,9 : 6,2	5,2 : 5,0

Dans les tableaux de comparaison, "Brest référence" est la marée de Brest prédite qui figure dans l'annuaire. "Brest Penfeld" est la marée calculée dans la Penfeld à l'aide des concordances, L P E est le résultat du calcul par la formule de Laplace étendue, HARM₂₀₀ et HARM₃₀ sont les résultats de calcul par la méthode harmonique utilisant respectivement 200 ondes (amplitudes supérieures à 1 mm) et 30 ondes (amplitudes supérieures à 1 cm).

On constate que la comparaison est toujours favorable à la méthode harmonique utilisant 200 ondes, mais pour l'année 1979, la méthode de Laplace étendue donne des résultats aussi satisfaisants.

Les résultats de la prédiction harmonique sont meilleurs pour les années 1879 et 1895 que pour les années récentes. Les constantes harmoniques ayant été calculées d'après les observations postérieures à 1917, on a la confirmation de ce qui a été dit plus haut : la construction de la rade abri n'a apparemment rien changé à la marée en Penfeld.

Les meilleurs résultats pour les années antérieures peuvent être dus à des conditions météorologiques plus stables, ou plus vraisemblablement à une meilleure qualité des observations.

Nota : Une comparaison rapide portant sur les observations de juillet 1714 donne de bons résultats en ce qui concerne les hauteurs, mais fait apparaître un décalage en temps de 6 minutes.

Les différences d'écart types peuvent sembler faibles. Adoptons un point de vue plus concret : supposons que les écarts supérieurs à 12,5 cm et à 12,5 mn soient jugés excessifs.

Pour les années 1976, 1978 et 1979, on obtient :

— en temps : 3,3 % de mauvais résultats pour "Brest Penfeld", contre 1,2 % pour la méthode harmonique ;

— en hauteur : 5,9 % de mauvais résultats pour "Brest Penfeld", contre 2,9 % pour la méthode harmonique.

Avec la méthode de Laplace étendue, pour les années 1895, 1976 et 1979, on obtient :

— en temps 1,9 % de mauvais résultats
— en hauteur 4,8 % de mauvais résultats.

III.4. Conclusion partielle

Les résultats sont favorables à la formule harmonique, mais la formule de Laplace étendue est prometteuse car elle a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Pour l'année 1979, ils sont presque identiques à ceux de la méthode harmonique (appliquée à 19 ans d'observations) à partir d'une année d'observations seulement. C'est probablement là sa qualité principale.

En outre, cette méthode est perfectible.

Cependant, en ce qui concerne Brest, il est probable que la formule harmonique utilisant 200 ondes ne peut pas être concurrencée.

Les courbes de répartition des écarts illustrent ce qui précède.

Les courbes d'écart moyens en fonction du coefficient mettent en évidence un autre avantage de la formule harmonique. Les écarts sont pratiquement indépendants du coefficient. En revanche, pour "Brest Penfeld", on observe des écarts assez importants en vive eau : pour un coefficient 100, le marnage prédit est, en moyenne, trop faible de 10 cm et la pleine ou basse mer prédite est, en moyenne, en avance de 5 mn.

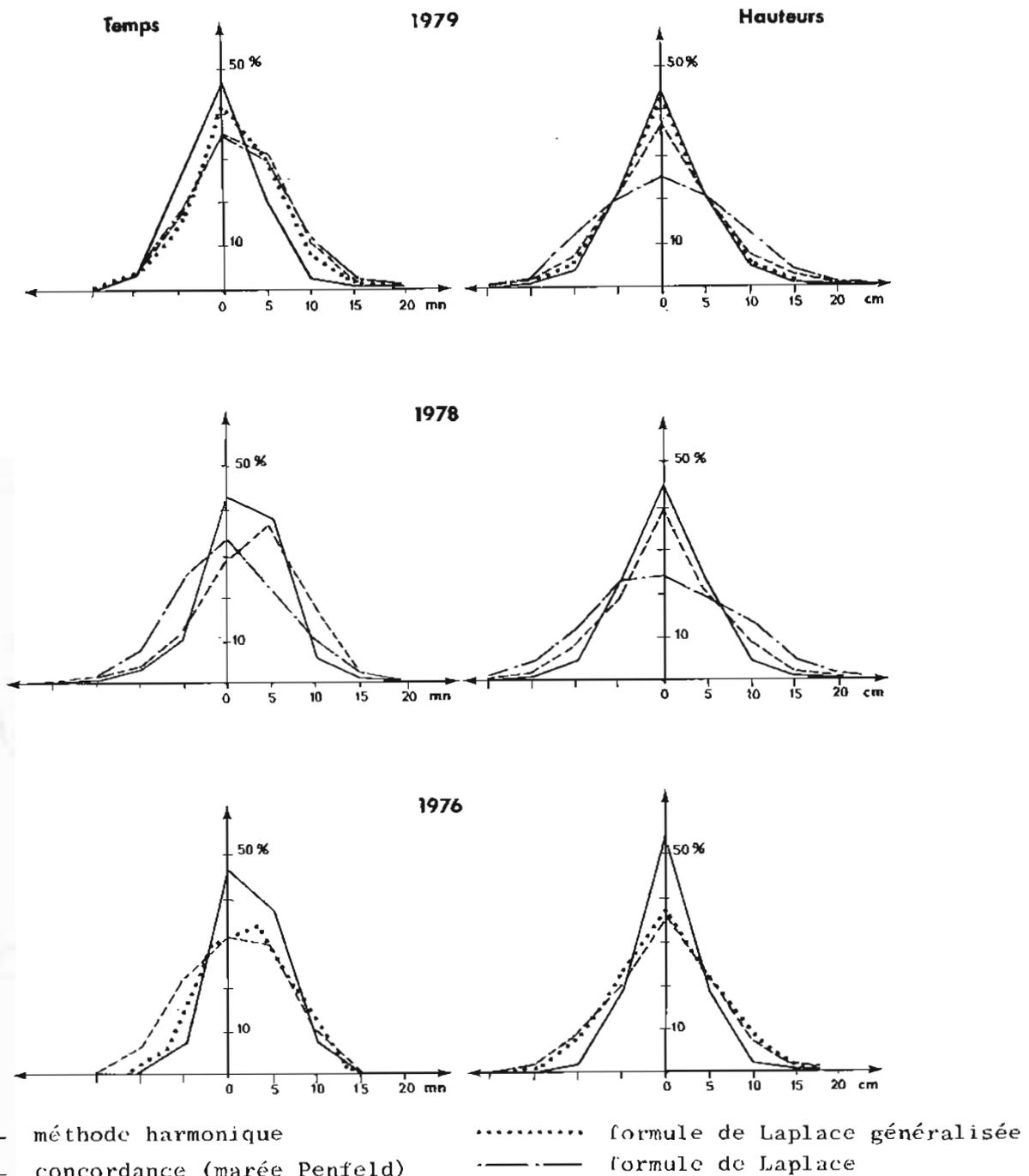


FIG. 2. — Répartition des écarts

IV. REMARQUES PARTICULIERES CONCERNANT L'EVOLUTION SECLAIRE DE LA MAREE A BREST

IV.1. Généralités

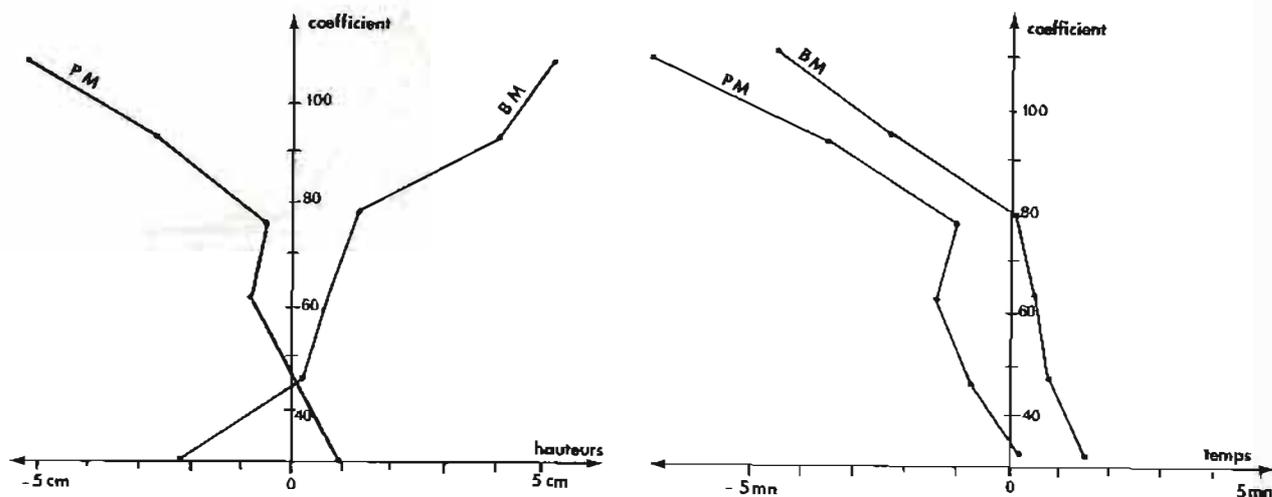
Bien que n'ayant pas de relation directe avec le sujet proprement dit de cette étude qui se rapportait initialement à l'étude de la formule de Laplace, nous n'avons pu nous empêcher, vu l'intérêt qu'elles peuvent présenter, d'indiquer quelques observations importantes sur

l'évolution séculaire de la marée. Celles-ci pourraient d'ailleurs être prises en considération pour améliorer encore si besoin était la qualité de la prédiction.

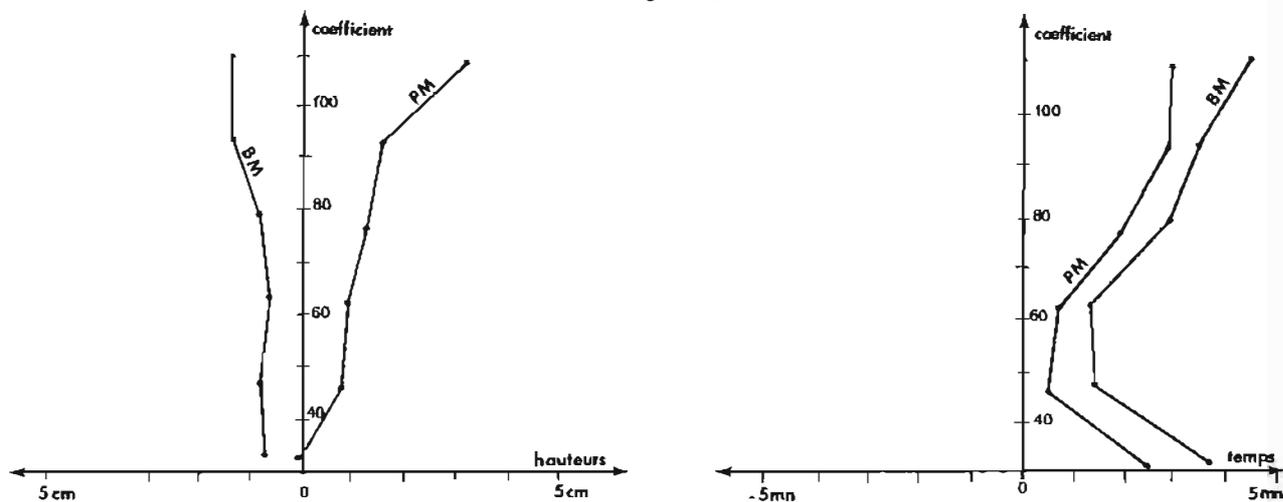
IV.2. Evolution de l'onde M_2 .

Les marnages prédits par la méthode harmonique sont trop faibles, en moyenne, de 3 cm. Cet écart s'explique par les variations de l'amplitude de l'onde M_2 . Alors que S_2 reste remarquablement stable, l'amplitude de M_2 subit des variations d'origine inconnue. Sa

Annuaire Penfeld 1976-1978-1979



LPG 1895-1976-1979



HARM 200 1976-1978-1979

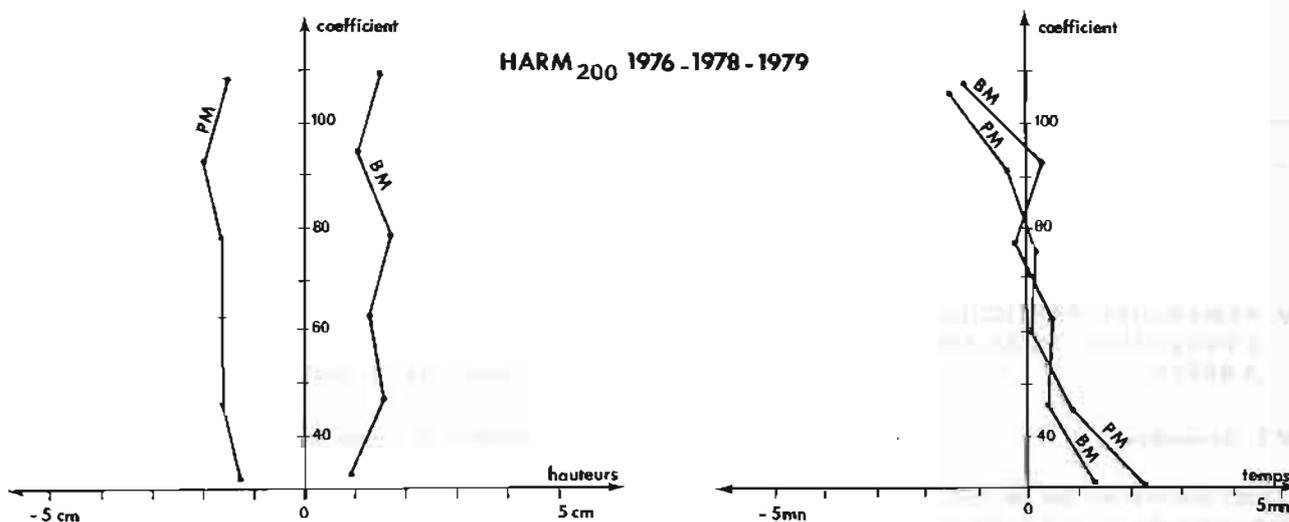


FIG. 3. - Ecart s moyens

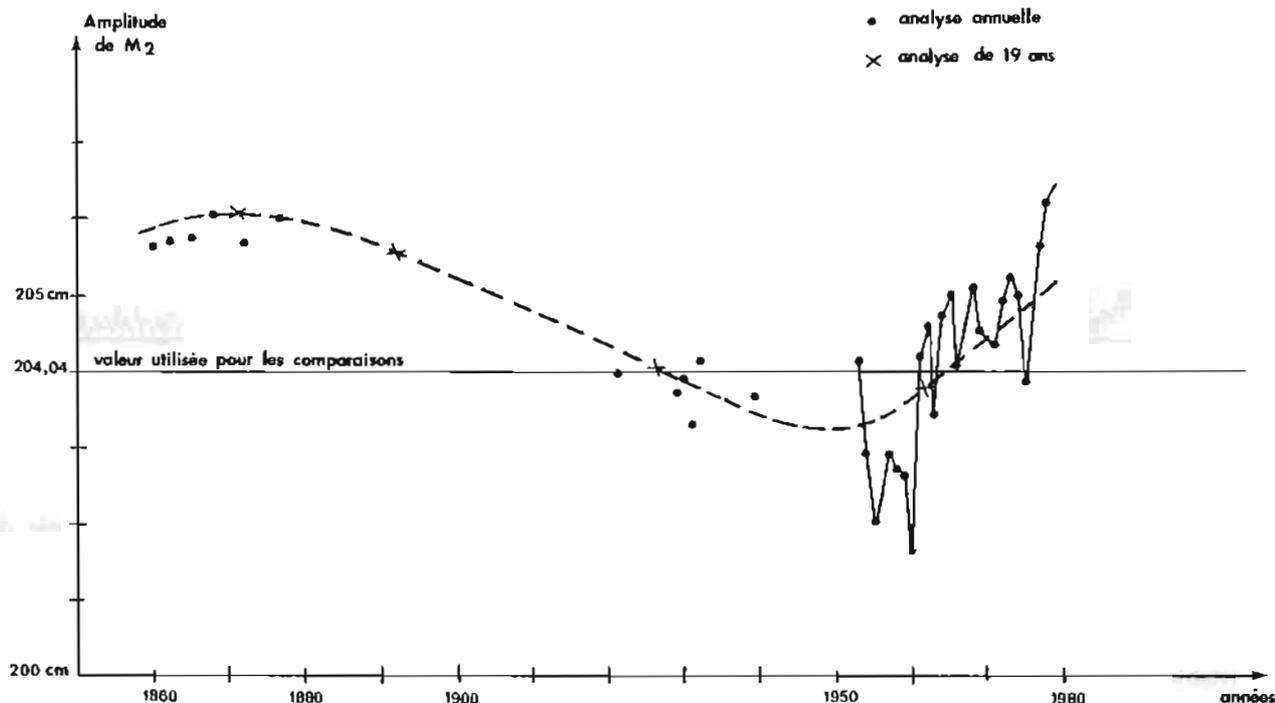


FIG. 4. — Variations de l'amplitude de M_2

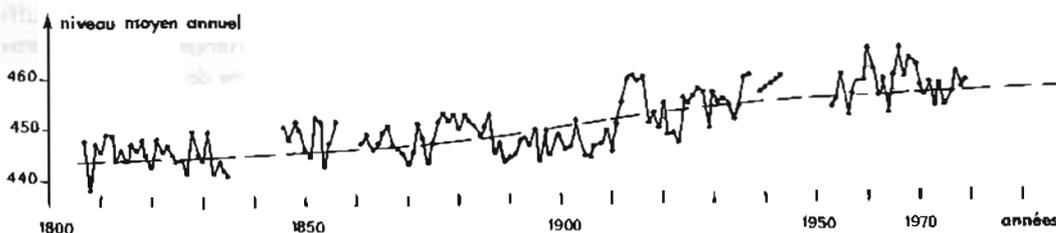


FIG. 5. — Variation du niveau moyen annuel à Brest

phase varie peu. Cartwright, en 1972, (*) analysant par la méthode de la réponse les observations des années 1864-84, 1898-1914, 1916-36 et de l'année 1960 avait cru pouvoir conclure à une diminution séculaire de l'amplitude de la marée à Brest. Ce qui semble contredit par l'augmentation que l'on constate actuellement précisément depuis 1960.

Les résultats de la prédiction harmonique seraient améliorés en adoptant pour l'amplitude de l'onde M_2 une valeur extrapolée obtenue à partir des valeurs observées les années précédentes.

IV.3. Evolution du niveau moyen

La figure 5 ci-dessus, montre que le niveau moyen à Brest a augmenté environ de 10 cm depuis l'époque de Chazallon.

De même que pour l'amplitude de M_2 , il est souhai-

(*) référence 6.

table, pour une prédiction, d'adopter une valeur extrapolée obtenue à partir des valeurs observées les années précédentes.

IV.4. Ondes à longues périodes

Les seules ondes stables sur les quatre analyses de 19 ans sont :

	Amplitude	Situation
S_a	4,66 cm	243,4°
S_{sa}	1,95 cm	84,4°
M_f	0,93 cm	171,1°

Ces valeurs sont déduites de 76 années d'observation. Elles doivent être préférées aux valeurs données par Chazallon, déduites de 5 années d'observation, qui servent encore aujourd'hui au calcul de l'annuaire.

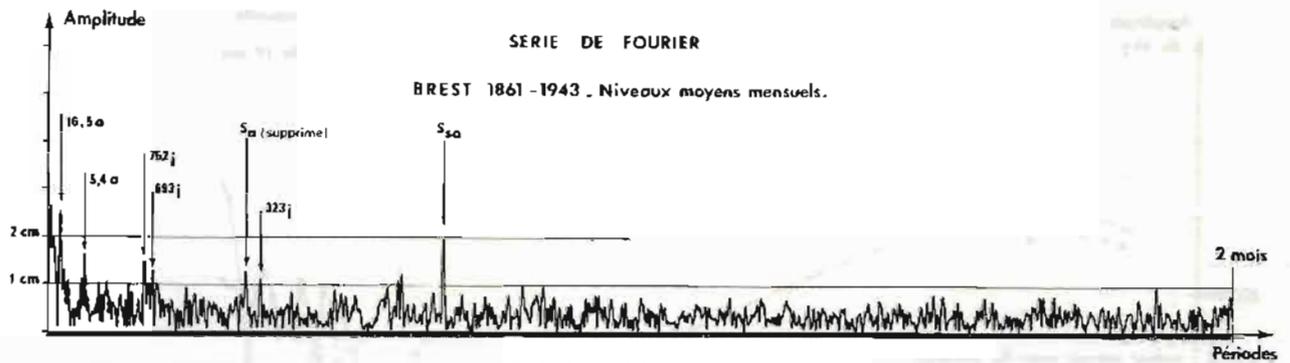


FIG. 6. — Série de Fourier

Une décomposition en série de Fourier des moyennes mensuelles de 1861 à 1943 a été calculée afin de rechercher d'autres ondes éventuelles : l'onde annuelle S_a a été retranchée des observations afin qu'elle ne perturbe pas l'onde qui pourrait se trouver à la période de Chandler (420 jours). La variation séculaire a aussi été retranchée. Aucun pic ne ressort du bruit de manière incontestable.

V. CONCLUSION GENERALE

A l'issue de cette étude, on ne peut s'empêcher d'être de l'avis de Hatt rappelé dans la conclusion de la première partie, à savoir qu'il serait plus satisfaisant pour l'esprit d'aboutir à des résultats exacts par une méthode dont "l'enchaînement logique serait irréprochable".

Mais celle-ci ne pourrait être en fait fondée que sur les lois rigoureuses de l'hydrodynamique et par suite n'est pas près de voir le jour.

Les méthodes de prédiction de marée resteront donc pendant encore de longues décennies empiriques, c'est-à-dire réglées sur l'observation. Le seul critère de choix d'une méthode entre plusieurs est donc, comme l'avaient bien compris les successeurs de Laplace, son efficacité non seulement du point de vue de l'exactitude des résultats, mais aussi de la quantité d'observations nécessaires et de la facilité du calcul ou de sa durée.

A ce point de vue, il n'est pas douteux que c'est la formule de Laplace étendue, proposée en deuxième partie, qui constitue actuellement la meilleure méthode :

- . elle respecte une plus grande rationalité
- . elle ne nécessite qu'une période d'observation limitée à un an
- . elle permet d'appréhender la courbe-marée toute entière sans se limiter aux pleines et basses mers.

Malheureusement nous restons prisonniers du passé dans la mesure où les tableaux de concordance établis par Courtier pour prédire la marée dans les autres ports à partir de celle de Brest, prédite selon la formule exposée en deuxième partie, confèrent à la marée de Brest un caractère de référence.

On ignore en effet quelles seraient les répercussions sur la prédiction des autres ports d'un changement de formule. D'un autre côté, l'utilisation d'une marée de référence pour la fabrication de l'annuaire rend plus difficile de conserver à cette marée une stricte conformité avec la réalité, car elle prendrait forcément en compte les caractères très locaux du site de référence. Il n'y a là aussi, aucune raison de penser que l'introduction de ces caractères locaux va améliorer la corrélation avec les autres ports.

Tout cela nécessite donc une analyse approfondie et explique que la formule originelle de Laplace-Chazallon qui fournit une précision suffisante pour le navigateur soit maintenue, au moins provisoirement, pour le calcul de la marée de Brest.

Par contre, cette dernière devenant une marée fictive a été intitulée Brest-référence pour lever toute ambiguïté.

Nous ne faisons qu'officialiser, au moins pour un temps, la notion de "Brest-rade" introduite par Courtier.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LAPLACE. — Mécanique céleste. Tome II et tome V, Livre XIII.
- [2] CHAZALLON (1854). — Note sur l'oscillation du niveau d'équilibre des mers : réflexions sur les échelles de marée, Comptes rendus de l'Académie des Sciences Tome XXXIX, page III.
- [3] ROLLET DE L'ISLE. (1905). — Observation, étude et prédiction des marées, Service Hydrographique de la Marine — n° 870 SH.
- [4] COURTIER (1934). — Données numériques concernant les marées des côtes de France, Service Hydrographique de la Marine, n° 14-1016 SH.
- [5] DOODSON. (1954). — Développement du potentiel générateur de la marée. *Revue Hydrographique internationale* Vol. 55, page 29.
- [6] CARTWRIGHT (1972). — Secular changes in the oceanic tide at Brest (1711-1936). *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 30, 433-449
- [7] SIMON. (1981). — Méthodes de prédiction de la marée en Gironde : *Annales hydrographiques*, n° 756.
- [8] DESNOËS, SIMON. (1977). — Analyse et prédiction de la marée. Application aux marées du Havre et de Brest. *Annales Hydrographiques*, n° 747.
- [9] BESSERO. — Cours de marées. ENSIETA, Edition provisoire.

ANNEXE I

Formule de Laplace généralisée : Valeurs numériques obtenues à partir des observations effectuées à Brest en 1978.

$$H_t = \text{Re} \left[b_0 P'_0 + b_1 U_1 + b_2 U_2 + b_3 U_3 + b_4 U_2^2 + b_6 U_2^3 + b_8 U_2^4 + b_{10} U_2^5 \right]$$

$$P'_0 = 445 + 5,8 \cos (h - 229,47) + 2,8 \cos 2 (h - 70,63)$$

$$U_1 = (P_1 + \rho_1 P'_1)$$

$$P_1 = 20,96 \text{ cm } i^3 \sin 2D e^{j(AH - \lambda_1)}$$

$$\rho_1 P'_1 = 8,5 \text{ cm } i^3 \sin 2D' e^{j(AH' - \lambda'_1)}$$

$$\lambda_1 = 50,60^\circ$$

$$\lambda'_1 = 46,79^\circ$$

$$U_2 = (P_2 + \rho_2 P'_2) / \overline{(P_2 + \rho_2 P'_2)} = \frac{(P_2 + \rho_2 P'_2) e^{-j14,47}}{211,30} \quad *$$

$$P_2 = 224,69 \text{ cm } i^3 \cos^2 D e^{j(2AH - \lambda_2)}$$

$$\rho_2 P'_2 = 81,41 \text{ cm } i^3 \cos^2 D' e^{j(2AH' - \lambda'_2)}$$

$$\lambda_2 = 198,5^\circ$$

$$\lambda'_2 = 203,2^\circ$$

$$U_3 = \cos^3 D e^{3jAH}$$

* $\overline{P_2 + \rho_2 P'_2}$ désigne la valeur moyenne de $P_2 + \rho_2 P'_2$ sur la période d'observation.

Posons $X = |U_2| - 1$

$$b_i = \beta_{i0} e^{j\alpha_{i0}} + \beta_{i1} e^{j\alpha_{i1}} X + \beta_{i2} e^{j\alpha_{i2}} X^2 + \beta_{i3} e^{j\alpha_{i3}} X^3 + \beta_{i4} e^{j\alpha_{i4}} D_C + \beta_{i5} e^{j\alpha_{i5}} \gamma_2$$

$i = (1 \dots 10)$

Espèces	β_{i0}	α_{i0}	β_{i1}	α_{i1}	β_{i2}	α_{i2}	β_{i3}	α_{i3}	β_{i4}	α_{i4}	β_{i5}	α_{i5}
0	1,030	0	0,014	0	-0,039	0	-0,037	0	0,000	0	-0,171	0
1	0,314	-6,0	0,115	-56,0	0,143	52,1	0,421	-62,1	0,007	105,9	4,340	134,6
2	215,488	15,9	33,583	-58,24	28,041	-129,82	44,364	88,37	1,200	73,92	406,70	174,4
3	2,307	2,7	4,349	36,6	3,405	-109,1	12,378	-95,37	0,198	175,96	103,92	-159,1
4	5,901	144,15	6,822	-19,8	13,607	174,9	9,860	-6,7	0,556	-57,57	161,99	58,61
6	4,675	10,77	10,446	-151,32	19,815	53,26	18,178	-113,59	0,335	91,20	118,45	-134,36
8	0,673	-123,86	2,314	90,1	6,160	-58,81	5,780	130,55	0,054	48,01	13,37	118,31
10	0,375	34,03	1,134	-138,54	2,23	40,31	1,952	-146,02	0,019	164,48	7,61	-101,79

APPLICATION DE LA MÉTHODE DES CONCORDANCES PAR ESPÈCE À LA MARÉE DANS LA LOIRE

par

K. J. GEORGE, B.Sc. (Hons.), M.Sc., Ph.D.
Department of Marine Science
Plymouth Polytechnic

RÉSUMÉ

La méthode des concordances par espèce, mise au point par Simon pour la Gironde, a été étendue à la marée dans l'estuaire de la Loire. Elle a été améliorée d'une manière significative par l'introduction d'une nouvelle formule. En plus, elle se prête aux modifications nécessaires pour tenir compte des variations du niveau fluvial, qui sont importantes dans la Loire.

ABSTRACT

The species concordance method, perfected by Simon for the Gironde, has been extended to the tide in the Loire estuary. It has been improved in a significant way by the introduction of a new formula. Moreover it lends itself to necessary modifications so as to take into account the river level variations which are important in the Loire.

Cette étude a été faite pendant le temps d'une bourse universitaire ("Plymouth Polytechnic Fellowship") pour l'année scolaire 1980-81.

Le travail a été réalisé à l'Établissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, sous un contrat de collaboration avec le Laboratoire d'Océanographie Physique de l'Université de Bretagne Occidentale.

1. INTRODUCTION

Les prédictions de la marée en Gironde ont été récemment améliorées par l'introduction d'une nouvelle méthode de prédiction, celle des concordances par espèce (Simon, 1981) (*). J'ai passé l'année scolaire 1980-81 à l'Établissement Principal du Service Hydrographique de la Marine en étudiant l'extension de cette méthode à la marée dans la Loire.

Il y a deux grands problèmes pour prédire le niveau de l'eau dans un estuaire :

- la déformation de la courbe de la marée
- l'effet de la variation du débit fluvial.

(*) *Annales Hydrographiques* (1981), n° 756, p. 32.

1.1. La déformation de la courbe de la marée

La courbe de la marée, qui peut être quasi-sinusoïdale à l'embouchure, devient déformée en amont, principalement à cause de la friction du fond. La basse mer est plus retardée que la pleine mer et en conséquence la courbe devient asymétrique ; la marée monte plus vite qu'elle ne descend. Dans les grands estuaires, la déformation de la courbe atteint un maximum en aval de la limite de la marée. Dans les cas extrêmes on peut avoir un mascaret. Après ce maximum, la marée est de plus en plus noyée par le débit fluvial, ce qui réduit la déformation de la courbe, mais la rend plus ou moins impossible à prédire longtemps à l'avance.

Pour tenir compte de l'asymétrie de la courbe, la méthode harmonique comporte beaucoup d'ondes de petits fonds, dont les fréquences sont des combinaisons des fréquences des ondes astronomiques principales.

Simon (1981) a montré qu'on peut l'utiliser même pour les courbes de marée ayant une discontinuité de dérivée de hauteur.

A Bordeaux, où ce phénomène se produit à la basse mer, on peut le traiter en tenant compte des constantes harmoniques jusqu'au vingt-huitième diurne. Normalement le grand nombre de constantes (479) que comporte une telle représentation rendrait trop long

le temps de calcul, surtout lorsqu'on a besoin d'une hauteur prédite toutes les dix minutes. Mais Simon a réussi à inverser la méthode des hauteurs de Demerliac (1973) il ne calcule une hauteur avec toutes les constantes qu'une fois par jour lunaire.

En plus, il a montré que les prédictions sont plus précises si l'on prédit les vecteurs réduits pour un port secondaire à partir de ceux pour le port de référence à l'embouchure. A la même étape, on peut introduire des corrections pour des perturbations météorologiques sur le niveau moyen à l'embouchure et pour des variations hydrologiques du niveau fluvial. Cette technique, qui s'appelle "concordances par espèce", est supérieure à la méthode harmonique.

1.2. L'effet du débit fluvial

La marée est aussi perturbée par la variation du débit fluvial. Contrairement à la déformation de la courbe, cette perturbation s'accroît progressivement de l'aval vers l'amont, jusqu'à la limite de la marée. En plus, elle est en grande partie stochastique (c'est-à-dire qu'on ne peut la prédire qu'à court terme), tandis que la marée océanique est en grande partie déterministe, ce qui permet la production d'annuaires des années en avance. Dans les annuaires pour la Gironde et la Loire, on prédit pour l'étiage, qui est un niveau fluvial si bas que la rivière ne descend au-dessous que rarement. L'utilisation de l'étiage a l'avantage, si l'on ne corrige pas pour l'effet du fleuve, d'avoir presque toujours plus de profondeur que ce qui est prédit.

Dans l'estuaire de la Loire, l'influence du niveau fluvial est particulièrement forte, peut-être plus qu'en Gironde. Pendant la période étudiée, il a varié entre - 0,09 m et 6,18 m, une portée qui excède le marnage extrême de la marée à l'embouchure. Pendant une crue, le niveau des basses mers en amont peut être élevé de plus de 3 m par rapport au niveau pour l'étiage (fig. 9). Evidemment, si l'on veut des prévisions assez précises

du niveau de l'eau en amont, il ne sert pas à grand-chose d'utiliser des prédictions pour l'étiage. Il faut absolument donc corriger des prédictions pour le niveau journalier du fleuve. On reviendra sur ce point dans la discussion.

2. TRAITEMENT DES OBSERVATIONS DE LA MAREE

Pour faire une étude valable, je voulais analyser une année entière et avoir en plus une autre période de 59 jours pour comparer les observations et les prédictions. Il fallait que pendant cette période de 14 mois il n'y ait pas de grands travaux de dragage, pour que le régime de la marée fut quasi-stable. On choisit la période : novembre 1976 à décembre 1977 incluse, qui était entre les dragages de 1975 et de 1978 et après la grande sécheresse anormale de l'été 1976.

Les hauteurs horaires observées à Saint-Gildas et à Saint-Nazaire étaient déjà disponibles à l'EPSHOM sous forme de cartes perforées.

Pendant la période sélectionnée, il y avait six autres ports dont le marégraphe fonctionnait assez bien (Figure 1). Pour ces ports, les hauteurs de la marée étaient fournies par le Port Autonome de Nantes-Saint-Nazaire, sous forme de photocopies de marégrammes.

Après un examen superficiel, il m'a semblé probable qu'aux ports en amont il y aurait des ondes de plus haute fréquence que 12 c/j (la fréquence de Nyquist pour des observations horaires). Je choisis donc une cadence d'échantillonnage de 15 minutes, ce qui donnait un domaine de fréquences analysables (sans aliasing) de 0 à 48 c/j.

Les hauteurs étaient donc relevées des marégrammes toutes les 15 minutes. Pour St Gildas et St Nazaire on a fait une interpolation entre les hauteurs horaires pour obtenir la même cadence d'échantillonnage.

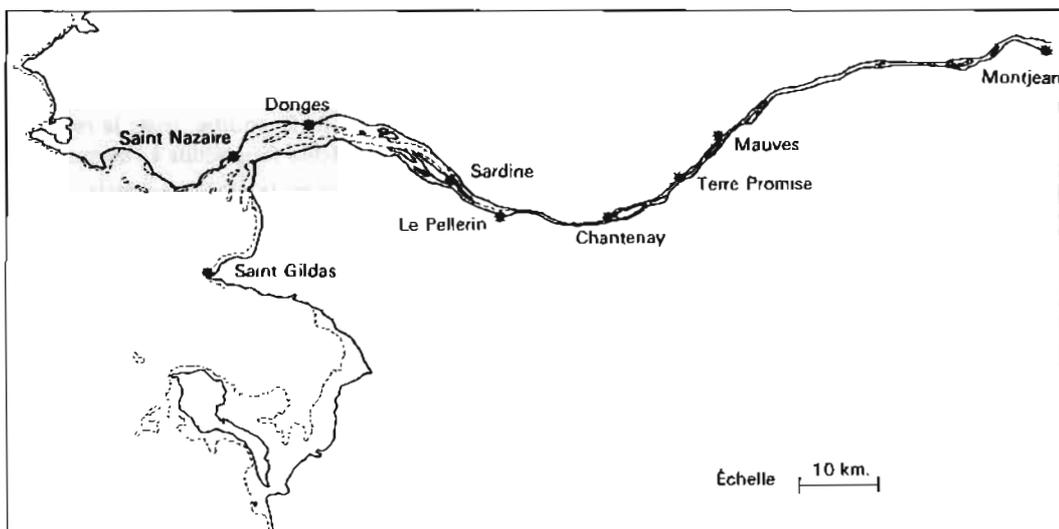


FIG. 1. - L'estuaire de la Loire.

Les lacunes ont été comblées par des interpolations convenables.

Toutes les hauteurs dans l'estuaire étaient rapportées à l'heure du fuseau de Greenwich (U.T.) et au zéro des cartes hydrographiques, soit 3,03 m au-dessous du zéro Lallemand, et enregistrées sur disque.

La hauteur fluviale à Montjean, qui a été relevée une fois par jour, a subi une même interpolation, mais les valeurs étaient toujours rapportées à l'étiage.

3. APERÇU PRELIMINAIRE DE LA MAREE

3.1. La marée maritime à Saint-Gildas

La marée à Saint-Gildas représente celle du large à l'entrée de la Loire.

Elle est semi-diurne, avec un "Formzahl" de 0,055, un marnage moyen en vive-eau de 4,75 m et un éta-bissement de 3 h 16 mn. Les autres chiffres sont :

Age de la marée semi-diurne : 34,3 heures

$$\text{Raison : } \frac{\text{marnage à morte eau}}{\text{marnage à vive eau}} = 0,46$$

La courbe de marée est légèrement déformée par des ondes de petits fonds, surtout en morte eau, quand les quart-diurnes provoquent une tenue de pleine mer,

qui se transforme à l'occasion en doubles pleines mers. Lorsque celles-ci ont lieu, elles se propagent vers l'amont.

3.2. Le débit fluvial à Montjean

Montjean est le dernier endroit sur la Loire où on mesure son débit avant qu'elle n'atteigne la mer.

La variation annuelle moyenne du niveau est tracée sur la figure 2.

Par contraste, la ligne continue la plus haute, montre le niveau observé à Montjean en 1977. Il y a eu une grande crue remarquable pendant la dernière semaine de février, plus haute que 6 mètres.

Une autre crue s'est produite pendant la première semaine de juin. La rivière était plus élevée que la normale pendant l'été et plus basse que la normale pendant les trois derniers mois. On voit qu'il ne sert pas à grand chose d'utiliser la variation annuelle moyenne pour prédire les hauteurs pour une année particulière.

3.3. L'interaction entre la marée et le débit fluvial

La courbe intermédiaire sur la figure 2, représente le niveau observé des basses mers à Chantenay. Les variations de ce niveau suivent de près celles du niveau fluvial, qui vraiment le domine. Ce n'est qu'en octobre et en novembre, lorsqu'il y avait peu d'eau dans la rivière, que la pulsation bimensuelle maritime se faisait sentir.

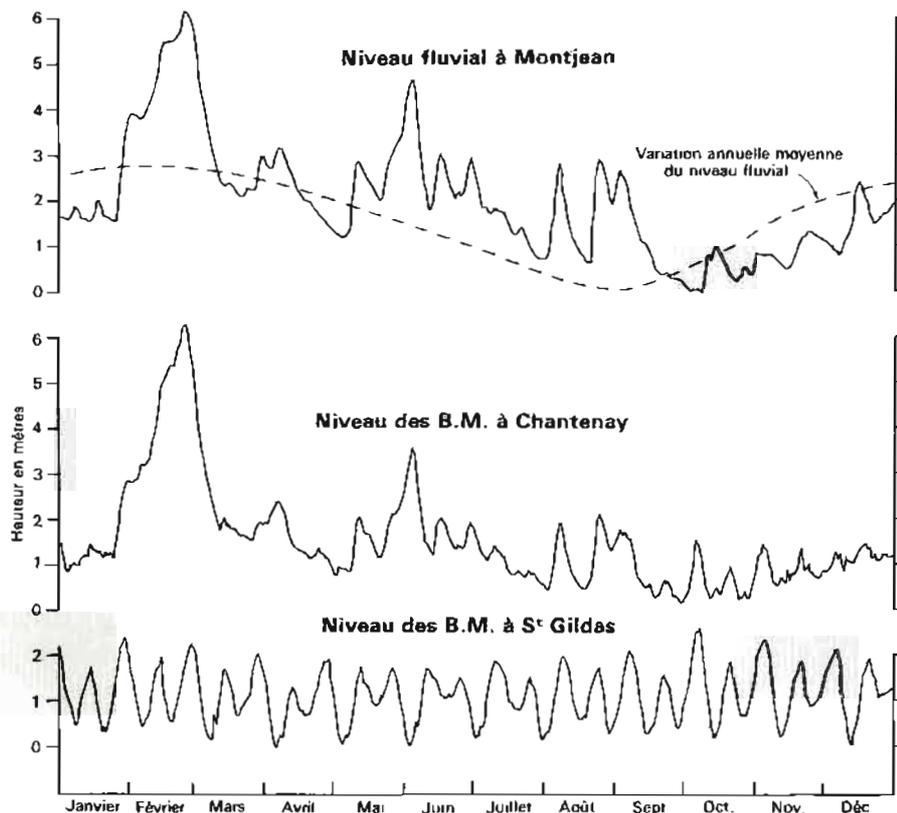


FIG. 2. — Variation moyenne du niveau fluvial pour l'année 1977.

La figure 3 provient d'un grand tracé (2,2 m x 0,9 m), établi pour étaler toutes les observations ensemble. Elle se rapporte à la période de la grande crue (23-26 février 1977). L'effet du niveau fluvial sur la marée est frappant. L'influence sur le niveau des basses mers, du

niveau fluvial, s'étendait vers l'aval jusqu'à Sardine. Le niveau des pleines mers était très sérieusement affecté. A Mauves, la marée a totalement disparu pendant trois jours.

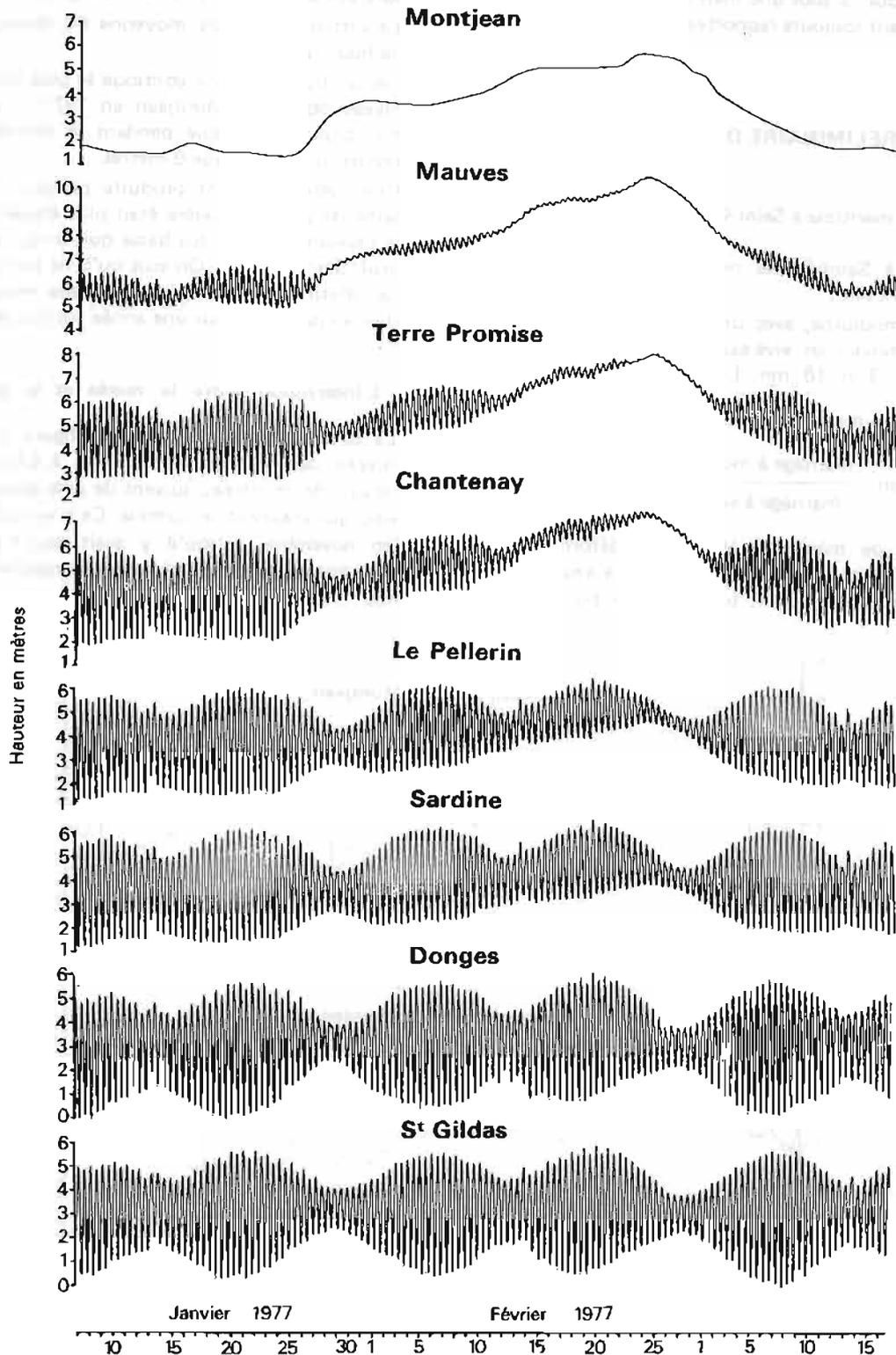


FIG. 3. — La grande crue de 1977.

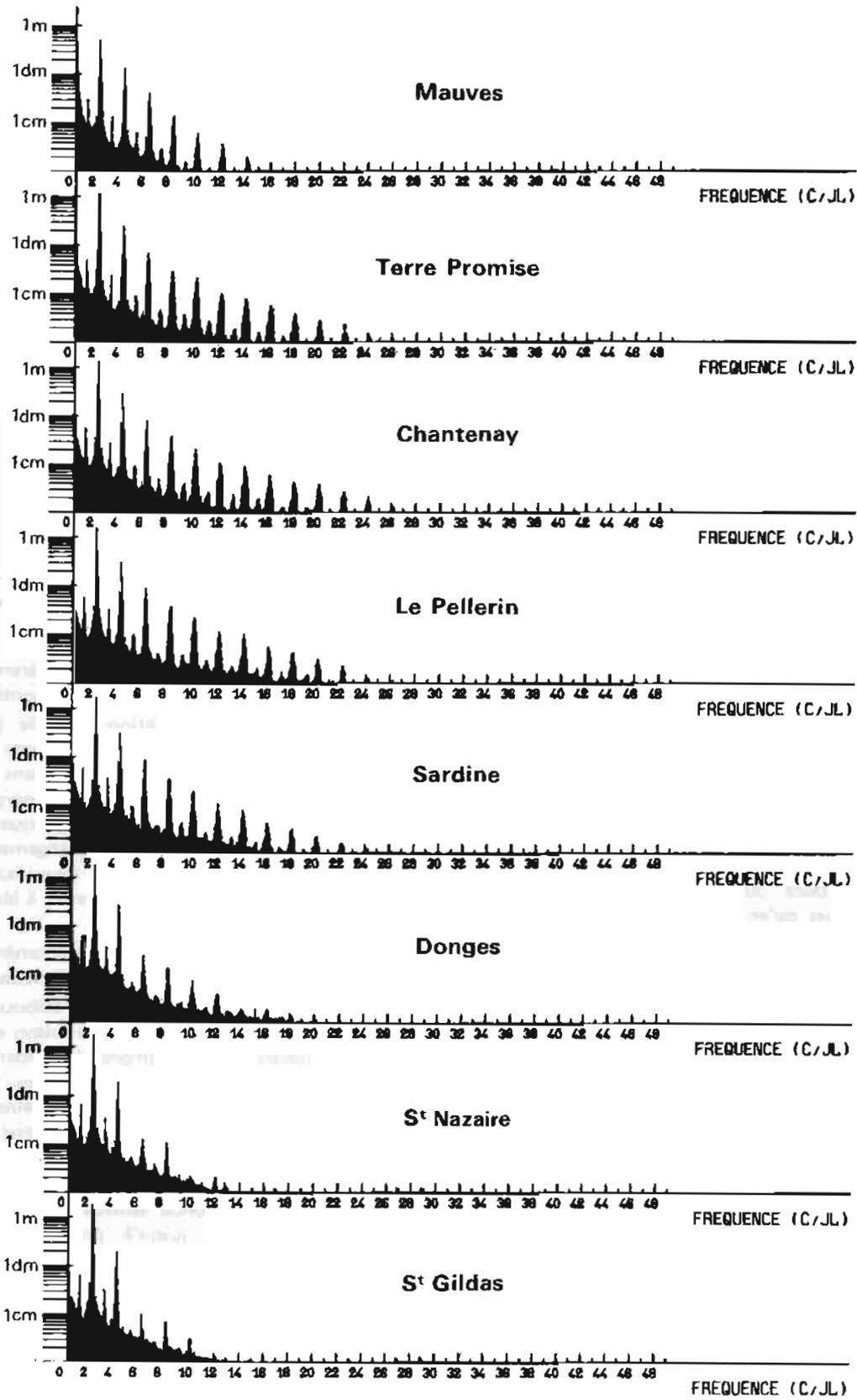


FIG. 4. — Représentation spectrale de la marée.

3.4. L'analyse spectrale générale de la marée

La figure 4 montre la répartition d'énergie dans le spectre de la marée. Elle représente la moyenne d'analyses par F.F.T. ("Fast Fourier Transform") de onze périodes consécutives de 32 jours lunaires.

On voit tout de suite que l'énergie de haute fréquence (> 12 c/j) s'accroît avec la distance de l'embouchure. Elle atteint un maximum à Chantenay, où les raies sont identifiables jusqu'au vingthuitième-diurnes. Plus en amont, il n'y a pas tellement d'énergie de haute fréquence.

Si l'on compare la figure 4 avec la figure correspondante en Gironde (Simon 1981) (*), il est évident que la marée en Loire est nettement moins déformée. Par exemple, le spectre de Chantenay ressemble le plus à celui de Pauillac en Gironde. Il y a donc quatre ports étudiés en Gironde qui ont des marées plus déformées que celle de Chantenay. On ne voit pas dans l'étude de Simon la diminution éventuelle en amont, mais sans doute elle existe au-delà de Bordeaux.

4. ANALYSE ET PREDICTION

Comme en Gironde, la méthode harmonique et la méthode des concordances par espèce ont été utilisées.

4.1. La méthode harmonique

Les techniques d'analyse et prédiction étaient les mêmes que celles de Simon (1981) (**). Les ondes fondamentales, dont 30 semi-diurnes et 22 diurnes, étaient les mêmes qu'en Gironde (sauf *NS1 qui fut remplacée par l'onde 117655).

Les autres ondes diffèrent en fréquence des ondes fondamentales par un multiple de la fréquence de M_2 (dénotée ω_m). Soit ω_{si} la fréquence de l'onde numéro i dans l'espèce s , pour les espèces d'ordre pair,

$$\omega_{si} = \omega_{2i} + \left(\frac{s-2}{2}\right)\omega_m \quad \text{et} \quad E_{si} = E_{2i} + \left(\frac{s-2}{2}\right)E_m$$

Il est à noter, à la différence de Simon, que j'utilisais des expressions semblables pour les corrections nodales, à savoir :

$$f_{si} = f_{2i} \times f_m^{(s-2)/2} \quad \text{et} \quad u_{si} = u_{2i} + \left(\frac{s-2}{2}\right)u_m$$

Pour les espèces d'ordre impair, 2 est remplacé par 1 dans ces formules.

Les résultats pour certaines ondes importantes sont présentés sur la figure 5.

(*) *Annales Hydrographiques* (1981), n° 756, p. 27.

(**) *Annales Hydrographiques* (1981), n° 756, p. 25.

PORT	ONDE					
	A_0 H (m)	S_a H (m)	$g(^{\circ})$	M_2 H (m)	$g(^{\circ})$	Δg (hmn)
St Gildas	3,161	0,087	285,1	1,698	99,5	0 00
St Nazaire	3,182	0,117	284,8	1,748	105,6	0 13
Donges	3,263	0,115	302,2	1,788	110,7	0 23
Sardine	3,692	0,251	340,6	1,603	126,7	0 56
Le Pellerin	3,770	0,326	324,7	1,468	134,5	1 12
Chantenay	4,256	0,593	347,1	1,260	153,2	1 51
Terre Promise	4,637	0,650	349,1	1,034	163,2	2 12
Mauves	5,881	1,053	358,6	0,450	188,1	3 03

PORT	ONDE			
	MSf H (m)	$M(SK)_2$ H (m)	$M(SK)_2$ H (m)	M_1 H (m)
St Gildas	0,029	0,036	0,039	0,007
St Nazaire	0,021	0,025	0,028	0,006
Donges	0,018	0,044	0,014	0,006
Sardine	0,133	0,104	0,082	0,015
Le Pellerin	0,165	0,126	0,087	0,019
Chantenay	0,227	0,164	0,111	0,024
Terre Promise	0,244	0,162	0,114	0,021
Mauves	0,144	0,137	0,124	0,014

FIG. 5. — Extrait des résultats de l'analyse harmonique.

Le niveau moyen (A_0) s'élève régulièrement à partir de l'embouchure, ce qui reflète la montée du fond.

L'amplitude de la variation annuelle (S_a) devient douze fois plus forte et sa phase augmente de plus que 70° . Bien que cette onde se trouve dans le potentiel générateur, en réalité la plupart de son énergie a une origine géophysique plutôt qu'astronomique. Dans l'estuaire de la Loire, on constate un changement progressif du régime maritime à Saint-Gildas (maximum de niveau le 20 octobre) jusqu'au régime fluvial à Mauves (maximum de niveau le 1^{er} janvier).

On constate le même genre de phénomène dans l'amplitude de l'onde luni-solaire semi-mensuelle (MSf).

Cette amplitude est faible à l'embouchure, mais beaucoup plus forte en amont. La raison est bien connue: les basses mers en amont descendent au même niveau à chaque marée (si le niveau fluvial reste constant), tandis que le niveau des pleines mers, qui n'est pas si dépendant sur le débit fluvial, varie entre vive eau et morte eau. Il y a donc une variation semi-mensuelle du niveau moyen qui constitue l'onde MSf.

L'amplitude de l'onde semi-diurne principale (M_2) s'accroît légèrement jusqu'à proximité de Donges, puis elle diminue; à Mauves elle devient faible ($< 0,5$ m). La phase M_2 augmente progressivement; la différence de phase avec celle de Saint-Gildas (Δg) exprimée en temps, montre le retard moyen de la marée. C'est cette valeur que l'on a utilisée dans la méthode des concordances par espèce (voir § 4.2).

Les ondes $M(SK)_2$ et $M(KS)_2$ sont des raies latérales de M_2 , dont elles représentent la modulation annuelle. Elles ne figurent pas sur la liste de Doodson. Elles ont été introduites par Horn pendant les années 1940. Mais

en pratique, la forte présence de ces ondes indique un défaut de marégraphe, ce qui a amené Simon à concevoir une méthode de recalage pour les mauvaises observations (Desnoës 1977) (*).

Dans la Loire, les amplitudes de $M(SK)_2$ et $M(KS)_2$ au-delà de Sardine sont très fortes, mais il ne s'agit pas d'un défaut de marégraphe. Elles sont fortes à cause de la variation annuelle importante du niveau moyen. Comme on le verra au chapitre 5, ce fait rend inutile la méthode harmonique.

Finalement, l'amplitude de M_1 subit une augmentation remarquable de même que celles de M_3 et M_5 .

(*) *Annales Hydrographiques* (1977), n° 747, p. 31.

Cette augmentation arrive en Gironde également, mais elle n'y est pas si évidente. Aucune explication ne se présente.

4.2. Amélioration de la méthode des concordances par espèce

Cette méthode est due à Simon, qui l'a amplement décrite dans son étude sur la marée en Gironde (1981)(**).

A partir des constantes harmoniques, on calcule les vecteurs réduits \mathcal{A} pour le port à l'embouchure.

(**) *Annales Hydrographiques* (1981), n° 756, p. 32.

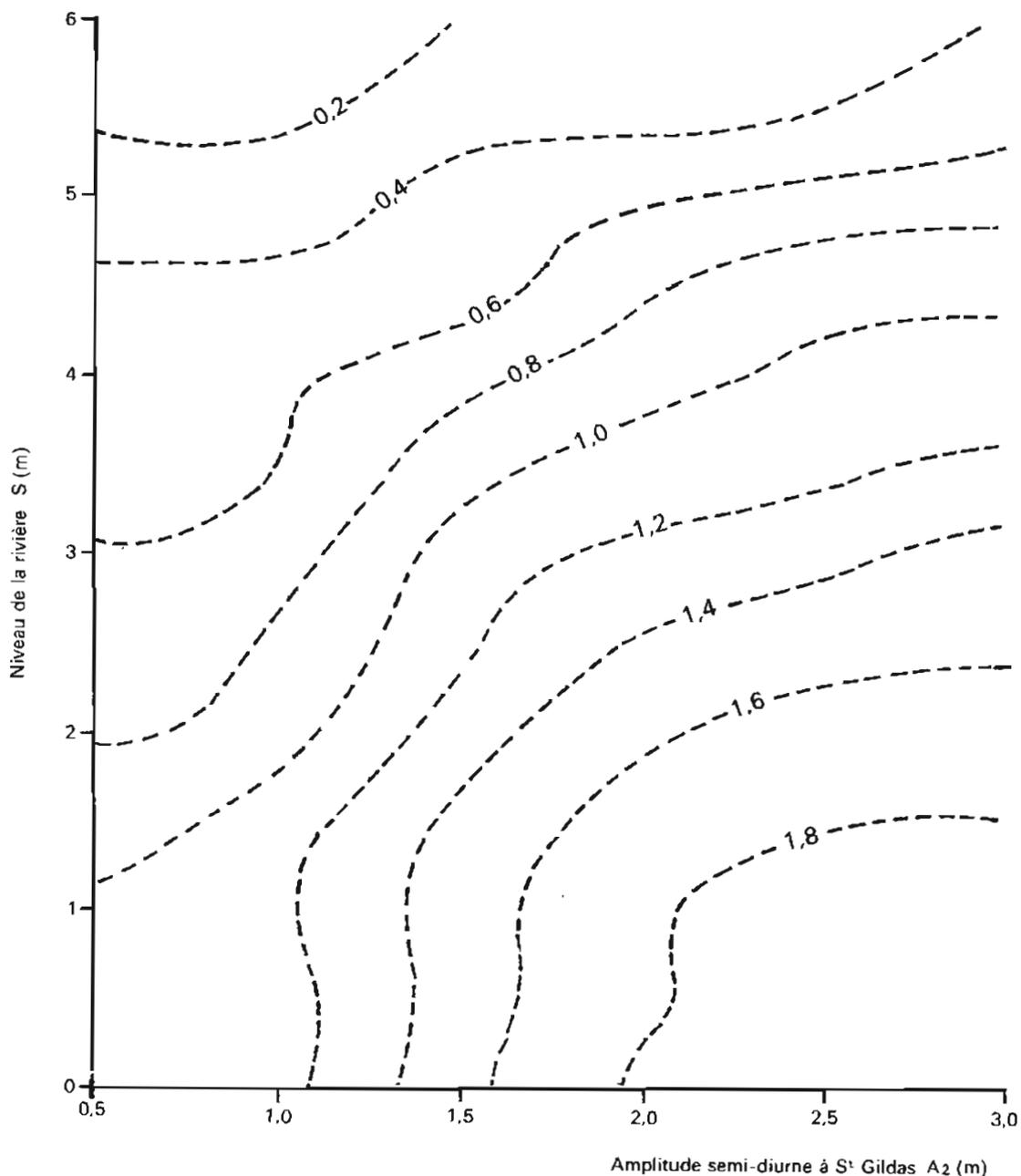


FIG. 6. — L'amplitude semi-diurne à Chantenay.

Port	Espèce						Autres espèces	Entre les espèces	Total
	0	1	2	3	4	6			
St Gilles	367,84 cm ² 1,97 %	42,82 0,24	17 401,30 95,82	7,80 0,04	273,80 1,51	0,86 0,00	3,06 0,02	54,35 0,30	18 141,83 cm ² 100,00 %
St Nazaire	374,84 cm ² 1,97 %	45,06 0,24	18 278,27 95,83	10,61 0,06	284,91 1,49	2,00 0,01	4,99 0,03	73,65 0,39	19 074,33 cm ² 100,00 %
Donges	337,87 cm ² 1,68 %	62,49 0,31	18 969,04 94,45	14,87 0,07	576,79 2,87	17,05 0,08	12,23 0,06	94,03 0,47	20 084,37 cm ² 100,00 %
Sardine	443,02 cm ² 2,97 %	71,39 0,48	13 377,43 89,54	15,92 0,11	695,70 4,66	77,26 0,52	40,23 0,27	220,01 1,47	14 940,96 cm ² 100,00 %
La Pellerin	631,30 cm ² 4,89 %	57,66 0,45	11 084,63 85,93	11,54 0,09	719,12 5,57	87,77 0,68	54,43 0,42	252,71 1,96	12 899,16 cm ² 100,00 %
Chantenay	1 667,02 cm ² 15,96 %	59,54 0,57	7 393,21 70,80	9,27 0,09	611,88 5,86	57,63 0,65	34,41 0,33	600,12 5,75	10 443,08 cm ² 100,00 %
Terre Promise	2 218,89 cm ² 28,01 %	55,85 0,70	4 467,28 56,64	14,71 0,19	396,68 5,01	57,04 0,72	26,27 0,33	665,91 8,41	7 922,83 cm ² 100,00 %
Mauves	6 274,48 cm ² 79,29 %	22,76 0,29	519,67 6,67	1,92 0,02	52,97 0,67	0,03 0,11	2,96 0,04	1 029,20 13,01	7 912,99 cm ² 100,00 %
Montjean	8 597,78 cm ² 89,40 %	10,77 0,11	2,68 0,03	1,21 0,01	0,68 0,01	0,30 0,00	1,88 0,02	1 002,20 10,42	9 617,51 cm ² 100,00 %

FIG. 7. — Répartition de variance dans les observations.

Pour un port en amont, on suppose que les vecteurs réduits pour une espèce quelconque s'expriment par $\beta = \mathcal{N}\alpha$ où \mathcal{N} est une fonction de :

- le niveau moyen à l'embouchure, A_0 ;
- l'amplitude semi-diurne à l'embouchure, A_2 ;
- le niveau fluvial, S .

Ainsi :

$$\mathcal{N} = f(A_0, A_2, S).$$

Il faut trouver la forme de la fonction f . Après avoir essayé plusieurs formules, Simon trouva qu'en Gironde :

$$\mathcal{N} = C_1 + C_2 A_2 + C_3 A_2^2 + C_4 A_2^3 + C_5 A_0 + C_6 S \quad (F1)$$

donnait des résultats satisfaisants.

On a ici un ensemble de six coefficients complexes pour chaque espèce traitée.

En pratique on remplace A_0 , A_2 et S par :

$$A'_0 = \frac{A_0}{\langle A_0 \rangle} - 1, \quad A'_2 = \frac{A_2}{\langle A_2 \rangle} - 1, \quad S' = \frac{S}{\langle S \rangle} - 1$$

pour que les équations normales qui donnent les coefficients soient bien conditionnées.

Simon a proposé quatre manières de modifier sa méthode, dont la plus importante est de changer la formule (F1). Pour le faire, on observe qu'en amont l'influence du niveau moyen à l'embouchure est beaucoup moindre que le niveau de la rivière et peut être négligée. La quantité \mathcal{N} devient donc une fonction des deux variables A_2 et S . Il s'ensuit que l'amplitude semi-diurne en amont (B_2) est également une fonction de A_2 et S . La variation de B_2 dans l'espace (A_2, S) est montrée dans la figure 6.

En tenant compte de la nature de la surface de B_2 , j'ai remplacé la formule (F1) par un polynôme du troisième degré en deux dimensions :

$$\mathcal{N} = C_{00} + C_{10} A_2 + C_{01} S + C_{20} A_2^2 + C_{02} S^2 + C_{11} A_2 S + C_{30} A_2^3 + C_{03} S^3 + C_{12} A_2 S^2 + C_{21} A_2^2 S \quad (F2)$$

5. COMPARAISON DES OBSERVATIONS ET DES PREDICTIONS

5.1. Introduction

Les analyses ayant été faites pour l'année 1977, on choisit une autre période pour la comparaison entre les prédictions subséquentes et les prédictions. C'est une période de 59 jours solaires (= 1,9979 lunaisons), centrée sur 0 heure U.T. le 29 novembre 1976.

Elle comprenait 114 basses mers et pleines mers.

Il faut remarquer ici que pour la Gironde, Simon a choisi exprès une période de comparaison de 15 jours, pendant laquelle les fleuves étaient à l'étiage. Ce choix

a éliminé l'effet du débit fluvial et rendait possible une comparaison juste entre la méthode harmonique et la méthode des concordances par espèce. La variation fluviale a été traitée statistiquement.

Mais dans la Loire, il n'y avait pas parmi les observations une telle période. Pendant les 59 jours, le niveau fluvial a varié entre 0,41 m et 4,47 m, ce qui a mis la méthode harmonique hors de compétition au-delà de Sardine.

5.2. Analyses de variance

Soit ζ la variance des observations, et ρ la variance des résiduels ;

on définit la variance qui peut être prédite par

$$\begin{cases} \text{var } \zeta - \text{var } \rho & \text{si } \text{var } \zeta > \text{var } \rho \\ \text{sinon zéro} \end{cases}$$

Le programme de comparaison pouvait calculer ces variances totales, et aussi les répartir entre les espèces, chaque espèce ayant une largeur de bande de 11 cycles par mois.

La variance dans les espèces 1, 2, 3, 4 et 6 augmente d'abord, mais elle diminue en amont (Figure 7). La situation du maximum dépend de l'espèce: elle augmente vers l'amont avec la fréquence. La variance dans l'espèce zéro (et aussi la variance entre les espèces, dont la plus grande part se trouve entre les espèces 0 et 1), est cependant de plus en plus influencée par la variation de longue période du niveau fluvial; elle augmente progressivement et devient vingt fois plus grande.

En aval, la variance semi-diurne domine, étant plus de 90 % du total, mais cette proportion diminue progressivement. Entre Terre Promise et Mauves (dans les parages de Thouaré), les contributions dans les espèces 0 et 2 sont égales; à Mauves même moins que 7 % de la variance totale se trouve dans l'espèce 2.

Dans le tableau, la variance du niveau fluvial à Montjean est également incluse: il existe plus de variance qu'à Mauves et Terre Promise. Parce que les niveaux fluviaux étaient relevés une fois par jour, la variance qu'on trouve dans les espèces 2, 3, ... tire son origine des calculs.

La méthode harmonique et la méthode des concordances par espèce avec la nouvelle formule (F2) ont été appliquées à tous les ports étudiés (à l'exception de St Gildas). Jusqu'à Donges, la nouvelle méthode est légèrement inférieure à la méthode harmonique (Figure 8), sans doute parce que le débit fluvial y est peu influent. En amont, la méthode harmonique devient très mauvaise, bien entendu parce qu'elle ne tient pas compte du débit, mais aussi à cause de présence anormalement forte de $M(SK)_2$ et $M(KS)_2$, qui modulent M_2 .

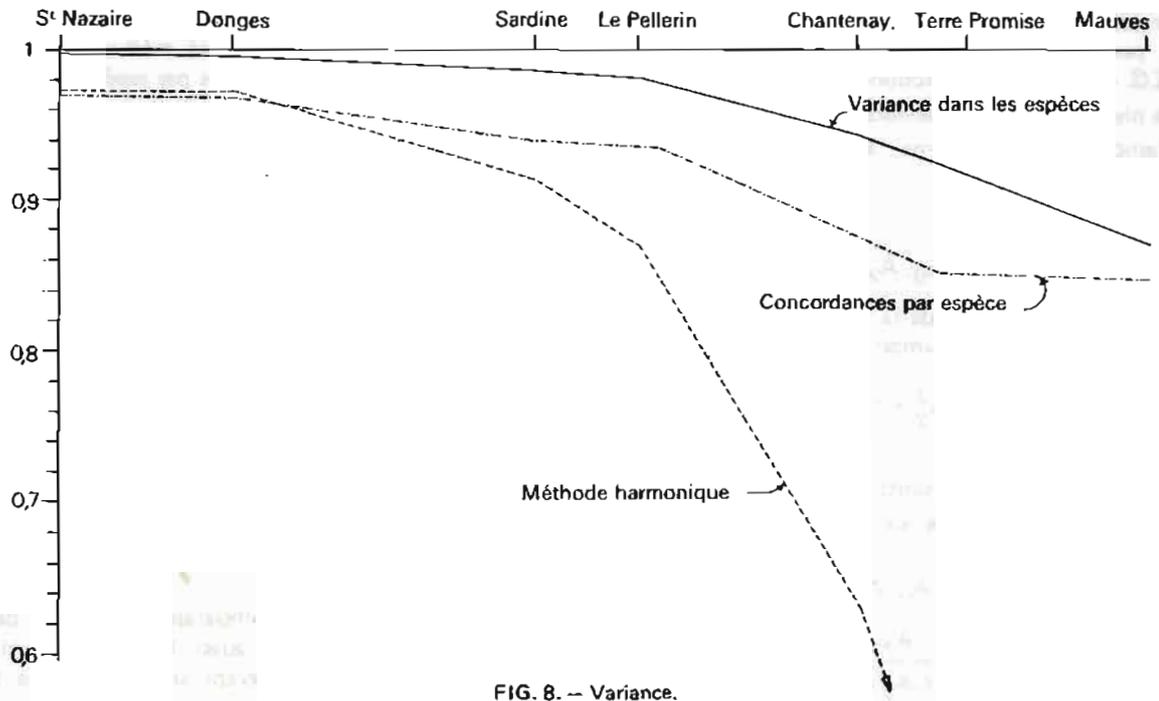


FIG. 8. — Variance.

5.3. Prédiction de la marée à Chantenay

La marée à Chantenay est la plus déformée de tous les ports étudiés, et elle est fortement perturbée par les variations du niveau fluvial. Elle constitue donc une épreuve difficile pour les méthodes de prédiction. En plus, parce que des navires assez grands naviguent

jusque là, l'étude de la marée y est peut-être moins abstraite que celle de la marée plus en amont. Pour ces raisons, on a choisi Chantenay comme exemple.

La figure 9 montre ce qui se passe si l'on essaie de prédire la marée à Chantenay en utilisant l'étiage au lieu du niveau fluvial observé de 4,4 m. (Les deux courbes avec la formule F1).

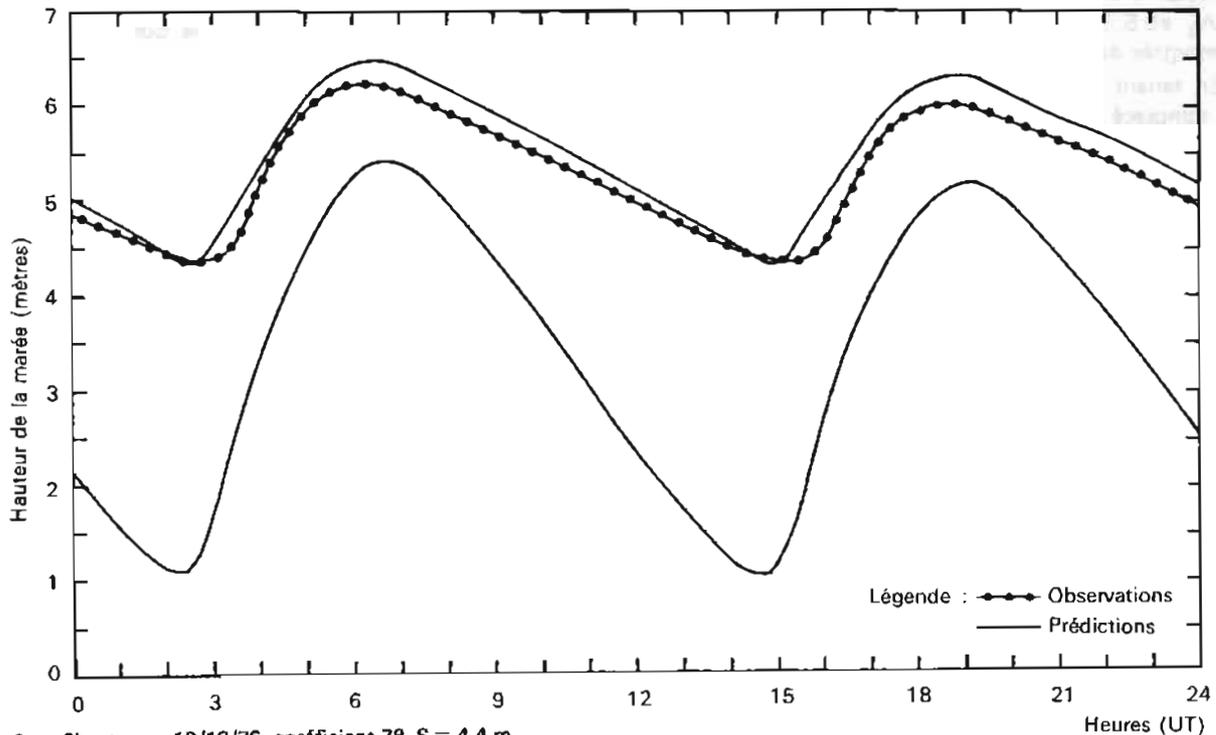


FIG. 9. — Chantenay, 10/12/76, coefficient 78, S = 4,4 m
 Prédiction avec niveau moyen observé : le niveau moyen prédit est trop élevé, les pleines mers sont en retard et les basses mers sont en avance.
 Prédiction pour l'étiage : les hauteurs prédites sont beaucoup trop basses.

Espèce	Observations	Prédictions par formule F1		Prédictions par formule F2	
			% par espèce		% par espèce
0	1 667,02 cm ²	1 291,31 cm ² 12,37 %	77,46	1 203,28 cm ² 11,52 %	72,18
1	59,54 cm ² 0,57 %	31,81 cm ² 0,30 %	53,42	32,11 cm ² 0,31 %	53,91
2	7 393,21 70,80	7 222,98 69,17	97,70	7 287,39 69,78	98,57
4	611,88 5,86	546,80 5,24	89,36	570,72 5,47	93,27
6	67,63 0,65	55,67 0,53	82,32	59,31 0,57	87,69
8	15,67 0,15	9,47 0,09	60,47	13,09 0,13	83,57
10	7,10 0,07	4,05 0,04	57,05	5,13 0,05	72,34
12	2,21 0,02	0,96 0,01	43,32	1,40 0,01	63,35
14	1,20 0,01	0,34 0,00	28,23	0,74 0,01	62,11
16	0,71 0,01	0,30 0,00	42,21	0,41 0,00	58,40
Autres espèces paires	0,89 0,01	0,22 0,00	24,72	0,42 0,00	47,19
Autres espèces impaires	23,82 0,23	1,03 0,01	4,32	1,45 0,01	6,09
TOTAL dans les espèces	9 842,96 94,25	9 164,92 87,76	93,11	9 175,44 87,86	93,22
Entre les espèces	600,12 5,75	zéro	zéro	zéro	
TOTAL GLOBAL	10 443,08 cm ² 100,00 %	9 164,92 cm ² 87,76 %		9 175,44 cm ² 87,86 %	

FIG. 10. — Comparaison de variance à Chantenay.

Les résultats pour la méthode des concordances par espèce sont présentés dans la figure 10, sous la forme de la variance dans chaque espèce.

La variance qu'on peut prédire est légèrement baissée dans l'espèce zéro, mais dans toutes les autres espèces paires, la méthode avec la formule (F2) est *nettement supérieure* à la même méthode avec la formule (F1)

qui était utilisée en Gironde. La supériorité est particulièrement marquée dans les espèces paires au-delà des dixième-diurne. L'inaptitude de la méthode à prédire les espèces impaires au-delà du diurne est attribuée à la présence anormalement forte de M_3 , M_5 , etc...

L'efficacité de la formule nouvelle se reflète dans les chiffres pour les pleines mers et basses mers :

Méthode	Basses mers				Plaines mers			
	Moyenne h	E.T. h	Moyenne m	E.T. m	Moyenne h	E.T. h	Moyenne m	E.T. m
	Formule F1	-0,08	0,28	0,00	0,25	-0,07	0,52	0,06
Formule F2	0,09	0,30	-0,15	0,35	-0,20	0,57	-0,10	0,30

On peut aussi comparer la figure 11 avec la figure 9.

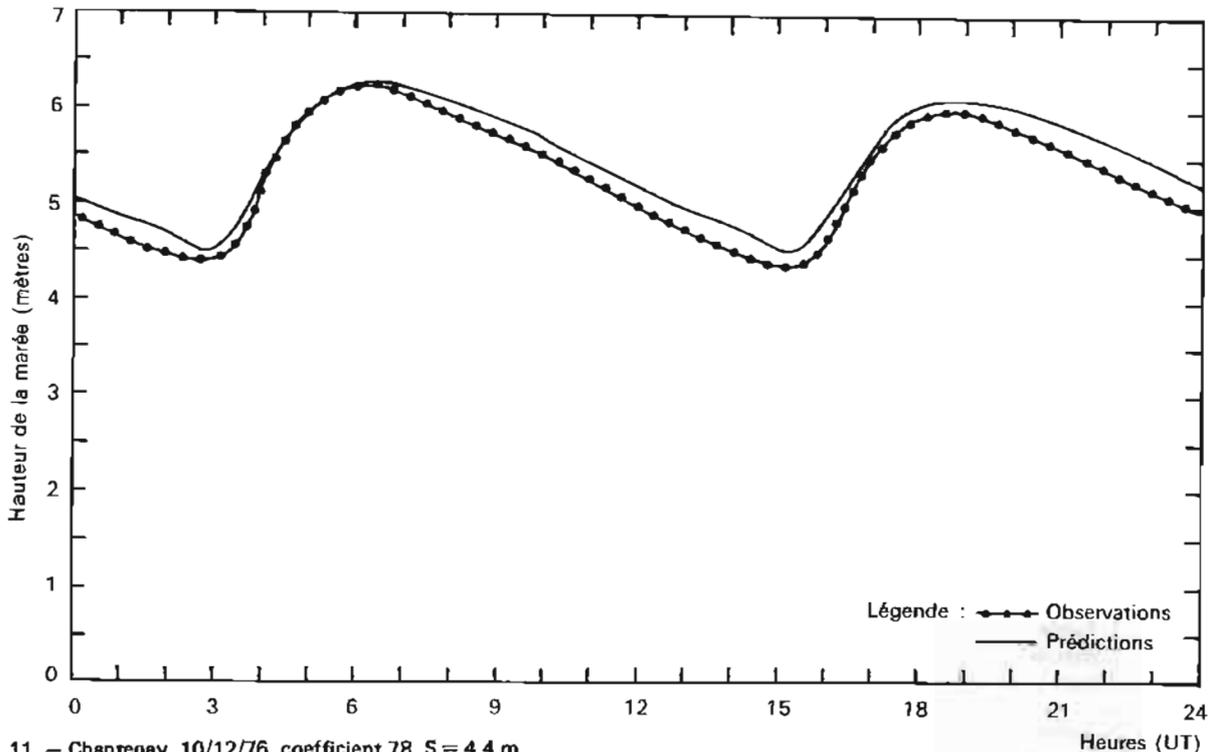


FIG. 11. — Chantenay, 10/12/76, coefficient 78, $S = 4,4$ m

Concordance par espèce avec la formule (F2) : le niveau moyen des prédictions est trop élevé de 20 cm ; la forme de la courbe est bien prédite.

6. DISCUSSION

On peut remarquer qu'il n'a pas été porté beaucoup d'intérêt aux perturbations hydrologiques de la marée. La partie d'un estuaire la plus en amont est habituellement peu profonde ; il n'y a pas beaucoup de circulation maritime et les commandants des bateaux qui y naviguent, connaissent très bien les vicissitudes locales de la rivière. Naturellement le service administratif du port s'intéresse plus à l'estuaire en aval. Trop souvent il s'ensuit que les marégraphes n'y existent pas ou sont mal entretenus. Heureusement, je pouvais utiliser les résultats de plusieurs marégraphes dans les secteurs en amont de la Loire.

Evidemment, il faut modifier des prédictions de la marée pour la hauteur actuelle du fleuve. En principe, ces modifications peuvent être faites n'importe où dans la chaîne de prédiction. Pour la méthode harmonique, on pourrait théoriquement avoir plusieurs ensem-

bles de "constantes", dont un pour chaque niveau fluvial, et utiliser celui qui correspond au niveau du jour. La méthode des concordances par espèce permet l'introduction de la hauteur fluviale observée à l'étape des vecteurs réduits.

La méthode des concordances par espèce a été déjà mise au point pour les prédictions quotidiennes dans l'annuaire local pour la Gironde.

Quant à la Loire, on espère introduire des prédictions par la même méthode dans l'annuaire pour 1984. Parce qu'il y a eu un dragage important après 1977, il faut analyser des observations plus récentes, pour tirer l'avantage de la nouvelle méthode. La méthode ne nécessite pas une durée d'observation d'une année, mais il est préférable qu'elle comporte des grandes crues.

Il faut rappeler que l'utilisateur moyen de l'estuaire ne dispose pas d'un ordinateur, et doit compter sur l'annuaire des marées. Il serait prudent, donc, de réviser les tableaux de corrections pour les pleines mers et

basses mers. Les heures prédites de l'annuaire local pour la période de comparaison et modifiées pour le niveau observé à Montjean, étaient trop tardives. Il semble que les corrections dans l'annuaire pour 1976 étaient fondées sur des observations déjà périmées, qui ont été faites pendant une période où la rivière était moins profonde et la marée plus retardée.

Un avantage de la méthode des concordances par espèce est qu'on peut prédire pour n'importe quel niveau fluvial. En principe, on peut prédire pour plusieurs niveaux (soit tous les 50 cm pour les ports en amont), et interpoler pour le niveau du jour. Pour prédire des hauteurs hors de pleines et basses mers, on pourrait introduire dans l'annuaire local des tableaux qui donnent la hauteur de la marée d'un port en amont en fonction de celle de Saint-Gildas et du niveau fluvial

à Montjean. Ces tableaux pourraient prendre la même forme que la "Table Permanente des Hauteurs d'eau" publiée par l'EPSHOM. On aurait un tableau pour chaque port et chaque niveau fluvial.

BIBLIOGRAPHIE

- DEMERLIAC A. (1973). — "Séparation des différentes familles d'ondes de marée". Rapport interne de l'EPSHOM.
- DESNOËS Y. (1977). — "Le bruit dans les analyses de marée" *Annales Hydrographiques*. (1977), n° 747, p. 31.
- SIMON B. (1981). — "Méthodes de prédiction de la Marée en Gironde". *Annales Hydrographiques*. (1981), n° 756, p. 26.

ÉTUDE DU FRONT DE MALTE

A partir de données de télédétection et de mesures in situ

par

M^{me} CHAMPAGNE-PHILIPPE, Centre de Météorologie Spatiale de Lannion
et MM. Daniel GUEVEL, Ingénieur de l'Armement, Robert FROUIN,
Etablissement Principal du Service Hydrographique
et Océanographique de la Marine

RESUME

L'association de mesures hydrologiques classiques et d'observations satellitaires régulières dans le temps, permet de faire du front de Malte une étude dynamique et temporelle.

L'identification des masses d'eau, la détermination des courants profonds et de la position du front découlent des mesures hydrologiques. Les thermographies de surface fournies par le radiomètre AVHRR donnent une représentation globale et instantanée de la signature de surface du front. La simultanéité des observations permet, pour ce qui est des grandes lignes, de conclure à une bonne corrélation entre hydrologie profonde et structure thermique de surface ; elle donne de plus l'occasion de tester les méthodes de correction atmosphérique du signal radiométrique. La comparaison statistique des mesures in situ et des observations satellitaires confirme cette corrélation, au moins pendant les mois d'été.

Les deux types de mesure mettent en évidence des oscillations et des tourbillons au niveau du front : une étude analytique en est faite en termes d'instabilité barocline ; la longueur d'onde des méandres fournie par le modèle est en bon accord avec les observations.

ABSTRACT

The association of classical hydrology measurements and regular in time remote sensing observations leads to a study of the dynamics and evolution of the Malta front zone.

Recognition of water masses, determination of deep currents and position of front derive from the hydrology measurements. Surface thermographies recorded by AVHRR give a global and instantaneous vision of the surface signature of the front. Simultaneity of observations let us conclude that a fairly good correlation exists as far as main features are concerned, between deep hydrology and surface thermal structure. It also gives the possibility of experimenting the methods of atmospheric correction. Statistical comparison between in situ measurements and remote sensing observations confirms this correlation, at least during summer.

Both types of observations reveal undulations and eddies in the frontal zone ; an analytical study is made in terms of baroclinic instability ; the wave length of undulations given by the model is in good agreement with observation.

INTRODUCTION

Le front de Malte, situé à l'Est de l'île de Malte dans la mer Ionienne, a été étudié de façon intensive ces dernières années par différents auteurs : en été par Woods et Watson (1970), Woods (1972) ; au printemps par Briscoe et al. (1974) et Johannessen (1976) ; en hiver par Johannessen et al. (1977). Sa position est étroitement corrélée à celle de la limite du talus continental, orientée approximativement Nord-Sud. Des gradients de salinité et de température respectivement de 1 ‰ et 1,5°C sur une distance horizontale de 1 à 10 km caractérisent typiquement le système frontal dans la couche de surface.

Toutes ces études étaient basées sur des observations hydrologiques classiques (bouteilles de Nansen, XBT), combinées avec des observations à partir d'avion (radiométrie infrarouge, AXBT). L'utilisation de l'avion s'est avérée essentielle, car elle permet une couverture rapide et assez complète du système frontal. Des caractéristiques importantes de celui-ci, qui échappaient à l'observation à partir des navires à cause de l'espacement entre stations, ont ainsi pu être mises en évidence, notamment la structure ondulée du front qui présente des déformations à des longueurs d'onde typiques de 10 km (Woods, 1972) et 20 km (Briscoe et al. 1974, Johannessen 1976).

Le satellite cependant plus que tout autre vecteur utilisé pour l'observation d'un tel système frontal,

permet une vision globale et quasi instantanée de sa signature thermique en surface. L'expérience AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) des satellites météorologiques de la NOAA (TIROS N, NOAA 6) offre la possibilité d'observer d'une manière systématique (4 orbites-jour) et précise (résolution au sol 1 km, bruit équivalent en température 0.12°C à 25°C) le front de Malte, ce qui permet d'en envisager une étude dynamique et temporelle.

En août 1979, des mesures hydrologiques ont été effectuées sur le front de Malte par le bâtiment océanographique *Origny* et les données du AVHRR sur la zone ont été parallèlement acquises par le CMS (Centre de Météorologie Spatiale de Lannion). L'objet de ce rapport est une comparaison entre ces deux types de mesures. L'observation simultanée in situ et par satellite a permis en particulier de tester la validité des algorithmes proposés pour restituer la température de surface à partir du signal radiométrique (Deschamps et Phulpin, 1980 ; McClain, 1980).

L'évolution du système frontal au cours de l'année est ensuite étudiée à l'aide de plus de 400 images du AVHRR acquises pendant la période qui va de mars 1979 à avril 1980. La position moyenne du front en été, obtenue par l'observation satellitaire, est comparée à la structure thermique moyenne correspondante en profondeur à partir d'une analyse statistique des profils bathythermiques (banque de données du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine).

I. CAMPAGNE ORIGNY 79

I.1. Mesures faites par l'Origny

Sur une zone définie à partir des traces frontales observées par satellite au cours des années précédentes, l'*Origny* a réalisé quatre coupes du front de Malte, espacées d'une trentaine de milles marins (fig. 1).

Le long de ces radiales on a effectué des stations hydrologiques espacées de vingt milles environ et allant jusqu'à une immersion maximale de 500 mètres.

Les mesures de température et de salinité ont été effectuées à l'aide d'une bathysonde Guildline avec une

précision de 0,01°C et 0,01‰ respectivement. La position et la date de ces stations sont indiquées sur la figure 1.

Entre chacune de ces stations, l'*Origny* a fait une détermination du profil de température (XBT) tous les 5 milles. Les sondes étaient des T4 de Sippican, dont l'immersion maximale est de 450 mètres et la précision absolue de $\pm 0,2^\circ\text{C}$. La position des lâchers de sonde est portée sur la figure 1.

La localisation de l'*Origny* était assurée par un récepteur LORAN C à affichage digital ; la précision absolue obtenue par ce système est de ± 0.3 milles marins et la précision relative de 0.2 milles dans cette zone et avec de bonnes conditions de réception.

I.2. Les observations satellitaires

Pour la période du 31 juillet au 3 août 1979, durée des mesures de l'*Origny*, 12 passages satellitaires (TIROS N et NOAA 6) ont été traités au Centre de Météorologie Spatiale pour obtenir des thermographies de la surface de la mer (voir dans le tableau ci-dessous la liste des orbites correspondantes).

Les thermographies sont réalisées à partir des mesures radiométriques AVHRR dans l'infrarouge thermique (3,7 μm et surtout 11 μm).

Ce capteur possède un pouvoir séparateur en température inférieur à 0, 15°C à 25°C pour une résolution spatiale de 1, 1 km à la verticale de l'instrument.

Compte tenu du mode de présentation choisi pour les thermographies : film noir et blanc à niveau de gris discrets, les traitements appliqués aux mesures ont consisté essentiellement en l'application de procédés d'amélioration du contraste.

Ces procédés : seuillages et dilatations de dynamique sont destinés à permettre une détection optimale des gradients thermiques à la surface de la mer (voir exemple sur la figure n° 2).

Si dans l'ensemble les thermographies obtenues sont de bonne qualité, il apparaît, cependant, sur certaines d'entre elles (orbites 485, 4113, 492, 4120, 499) un trouble atmosphérique "froid" qui dessine à la surface de la mer des isothermes d'une direction SSW-NNE très différente de celles qui correspondent aux structures

Tableau 1

TIROS N			NOAA 6			Remarques
n° orbite	Date	heure UT	n° orbite	Date	heure UT	
4099	31.7	2 h 50	478	31.7	6 h 30	
4106	31.7	14 h 30	485	31.7	19 h 00	Trouble atmosph. (sable)
4113	1.8	2 h 40	492	1.8	6 h 15	"
4120	1.8	14 h 20	499	1.8	18 h 30	" + bordure
4134	2.8	14 h 10	513	2.8	18 h 15	bord image
4141	3.8	2 h 20	521	3.8	6 h 00	bord image

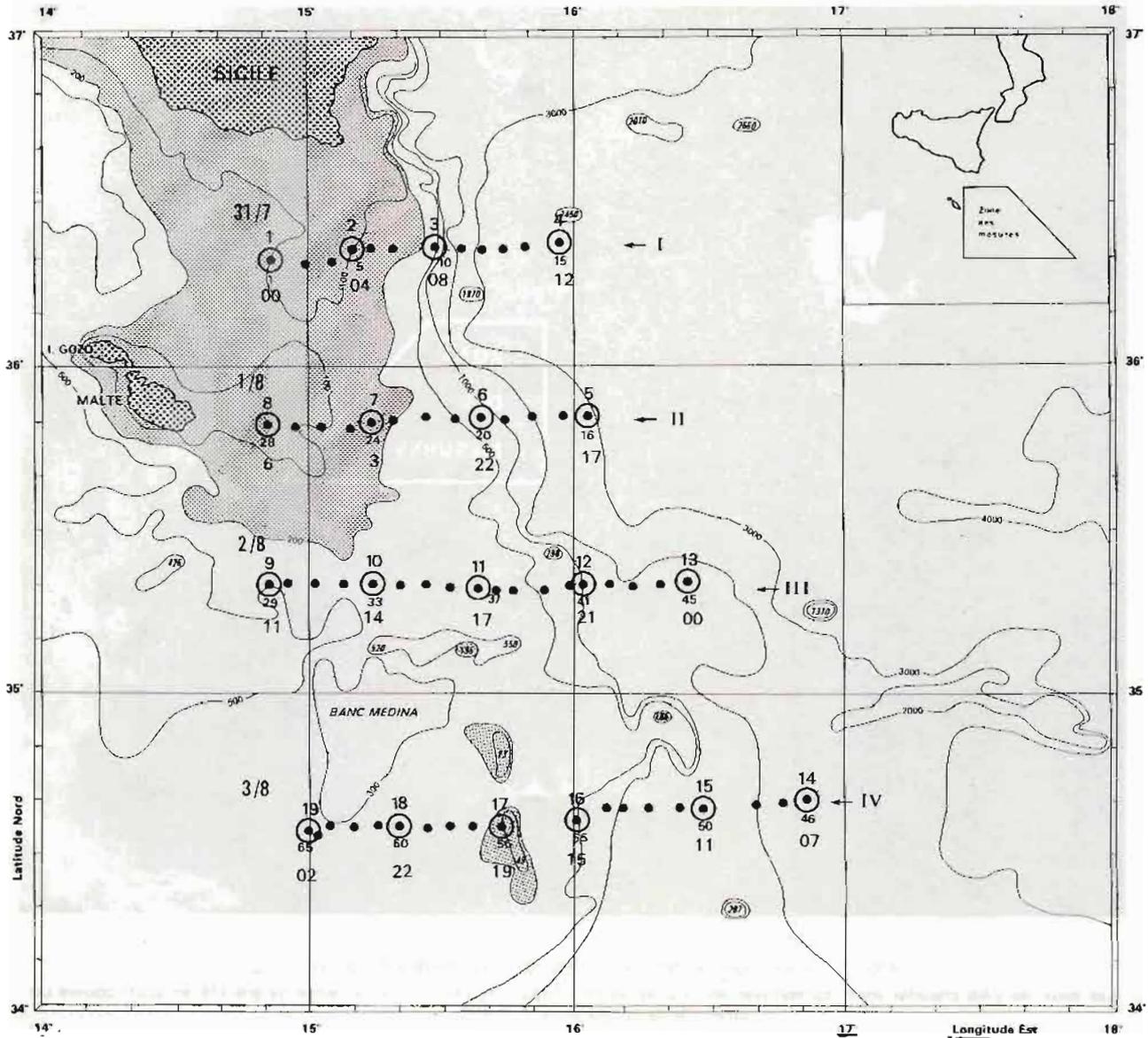


FIG. 1. — Schéma de localisation des mesures faites par l'Origny

Date
 n° de station
 n° XBT
 heure UT

● XBT
 ← I Numéro de profil

station hydrologique

marines. Ce trouble est probablement dû à un transport en altitude de sable Saharien.

On l'observe nettement, par exemple, sur l'orbite 499 (voir la figure 3 et la comparer à la figure 2)

1.3. Comparaison des mesures de température de surface satellitaire et in situ

Pour quatre thermographies NOAA 6 on a relevé les températures mesurées par le radiomètre aux points de

sondage Sippican effectués dans un délai de ± 6 heures par rapport à l'heure de passage du satellite.

La figure 4 permet de comparer en ces points les deux types de mesures.

Après avoir écarté les points radiométriques affectés par le trouble atmosphérique signalé plus haut, on constate que les sens et même les ordres de grandeur des variations de température enregistrées par le satellite et mesurées par le Sippican sont comparables. Les valeurs elles-mêmes diffèrent cependant fortement : les mesures satellitaires (11 μm) sont entre 2,75°C et 3,5°C plus faibles que celles obtenues par Sippican.

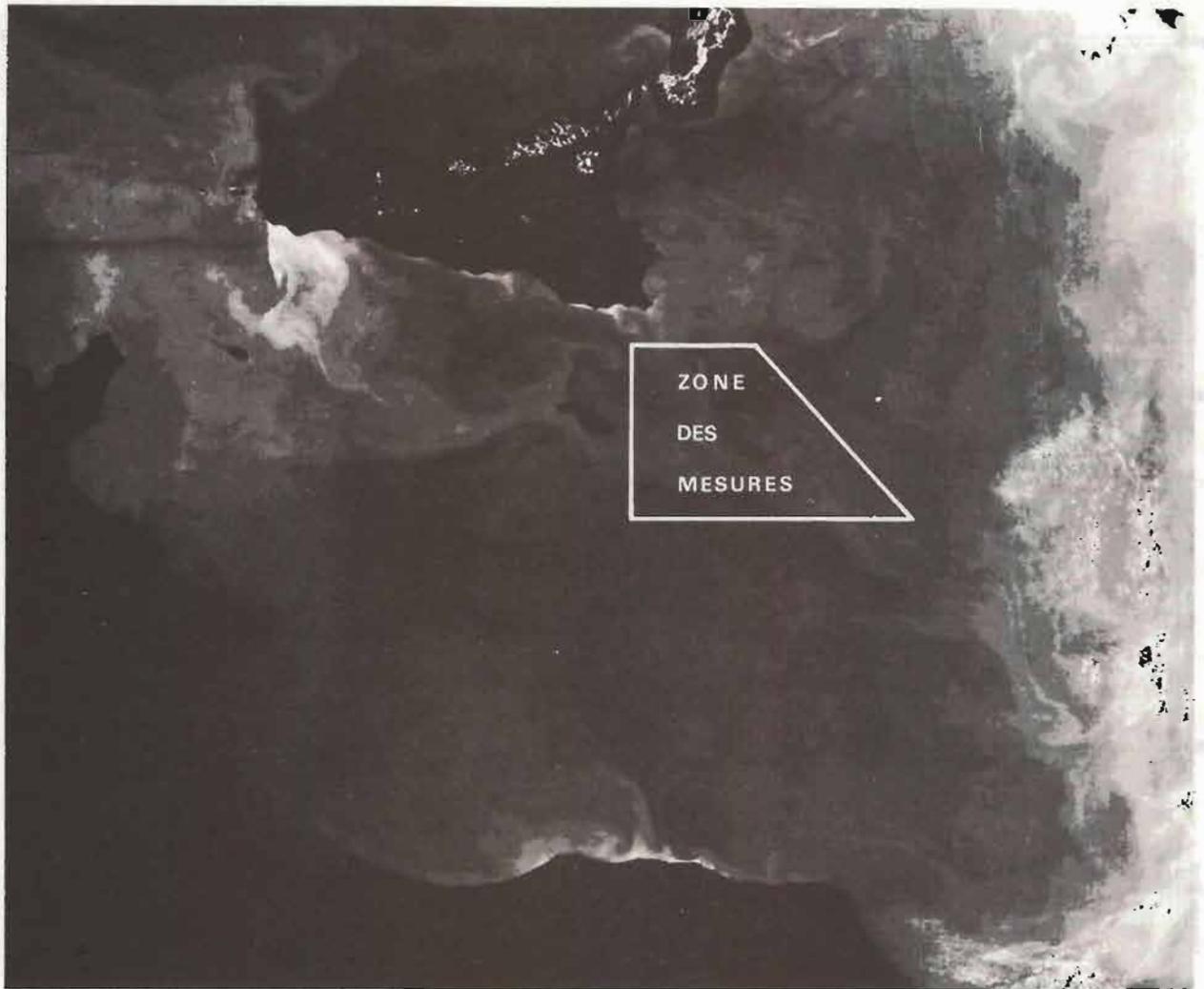


FIG. 2. — Thermographie NOAA 6 478 du 31 juillet 1979 à 6 h 30 UT

Les eaux les plus chaudes sont représentées en noir et les plus froides en blanc. Chaque teinte de gris (16 en tout) couvre un intervalle de température de 0,4°C.

Pour expliquer cette observation, il faut faire appel au principe de la mesure de température par satellite. La température satellitaire est obtenue en appliquant la fonction de Planck (rayonnement du corps noir) à l'énergie mesurée par le radiomètre à la longueur d'onde de 11 μm . Deux facteurs ne sont pas pris en compte : la mer ne rayonne pas comme un corps noir (émissivité < 1) et le rayonnement qu'elle émet est atténué par la traversée de l'atmosphère.

L'émissivité de la mer induit sur la température restituée une erreur de l'ordre de 0,5°C par ciel clair.

Le deuxième facteur, l'absorption atmosphérique, est de loin celui qui entraîne l'erreur la plus importante. Son effet peut varier entre 1°C pour une atmosphère sèche et froide et 10°C pour une atmosphère très humide.

Des détails sur la mesure de la température par satellite sont donnés dans l'annexe 1.

Il existe plusieurs méthodes pour corriger la mesure satellitaire : estimations climatologiques de l'absorption,

utilisation de radiosondages, mise en oeuvre d'algorithmes multi-spectraux faisant appel aux deux canaux infrarouges des AVHRR de TIROS N et NOAA 6.

Les mesures collectées pendant la campagne *Origny* ont été utilisées pour tester deux de ces méthodes. Les résultats obtenus sont présentés également dans l'annexe 1.

Ils montrent qu'actuellement les corrections ne sont pas réellement satisfaisantes, l'écart résiduel entre températures corrigées et températures mesurées reste toujours supérieur à 1°C.

La comparaison point par point des deux types de mesures se révèle donc être de peu d'intérêt, compte tenu de plus des incertitudes existant également sur la mesure de surface XBT, de celles qui sont liées au positionnement géographique sur les images satellitaires et des effets du réchauffement diurne ayant pu intervenir sur les mesures Sippican faites sur un intervalle de 12 heures.

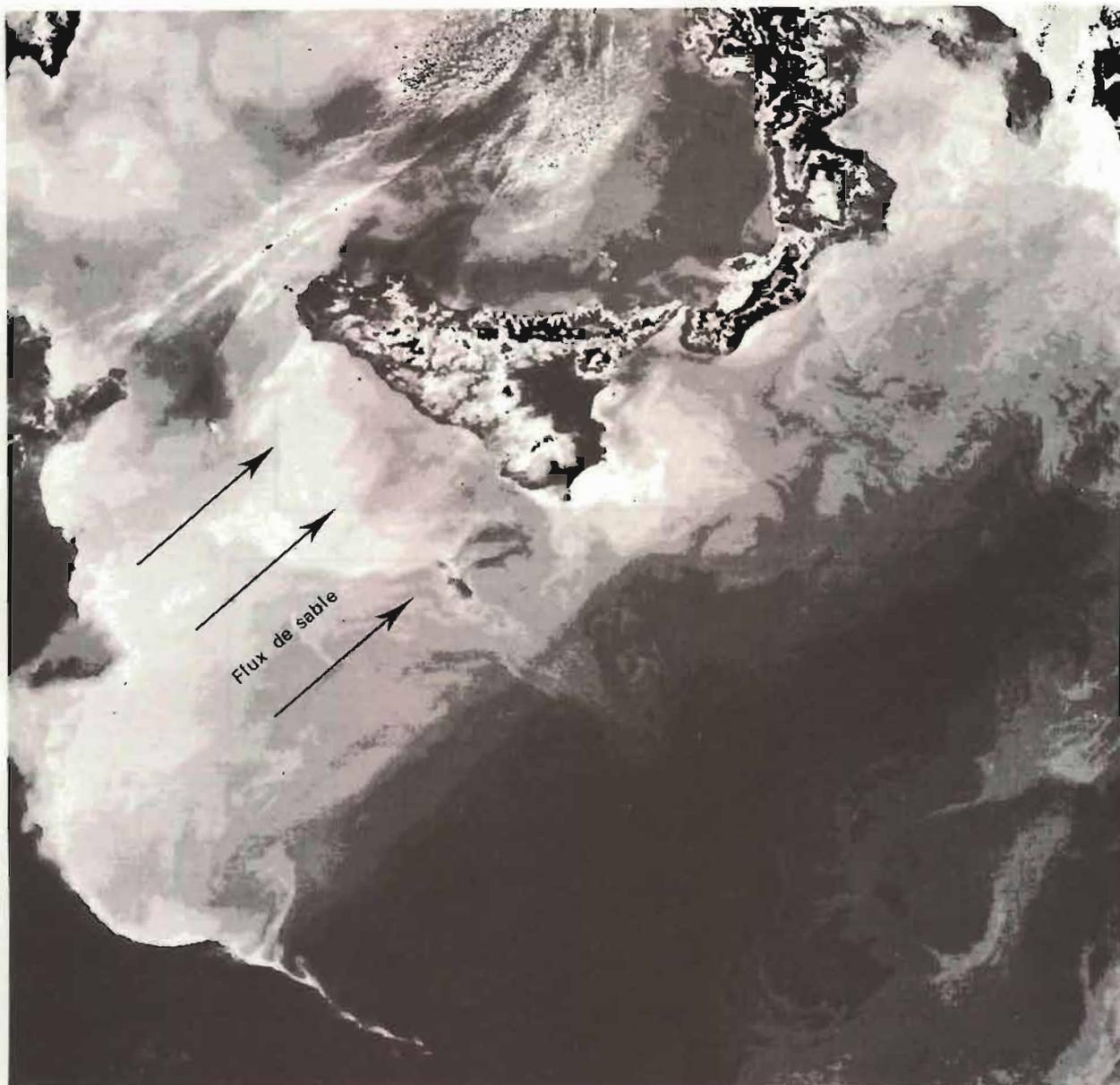


FIG. 3. — Thermographie NOAA 6 499 du 1^{er} août 1979 à 18 h 30 UT

Un trouble atmosphérique froid créant un refroidissement apparent de la surface de la mer pouvant atteindre 3°C se manifeste entre les côtes tunisienne, ouest libyenne et la Sicile.

Il apparaît plus loin que l'intérêt actuel des mesures satellitaires en océanographie réside non pas dans les valeurs de température qu'elles permettent d'obtenir, mais dans la vision globale et quasi instantanée qu'elles donnent des structures thermiques sur l'ensemble de la zone des mesures et de leur évolution temporelle.

1.4. Résultats et discussion

Les mesures hydrologiques permettent tout d'abord de définir les caractéristiques des masses d'eau présentes sur la zone du levé.

L'analyse des diagrammes T-S de la figure 5 fait apparaître trois types principaux de profils.

Les profils du type 1 que l'on rencontre au Sud-Est de la zone (stations 9, 16, 17, 18, 19) sont caractérisés par la présence d'une eau de salinité relativement constante (S de 38,1 à 38,2 ‰) au-dessus de l'eau intermédiaire Levantine (S > 38,7 ‰).

Les profils du type 2 (stations 1, 2, 7, 8, 10, 11, 12, 13) sont associés à un minimum de salinité (37,1 ‰).

Enfin, les diagrammes des stations 3, 4, 5 et 14 définissent un troisième type. Ce type, moins évident que les précédents, est caractérisé par des eaux de surfaces

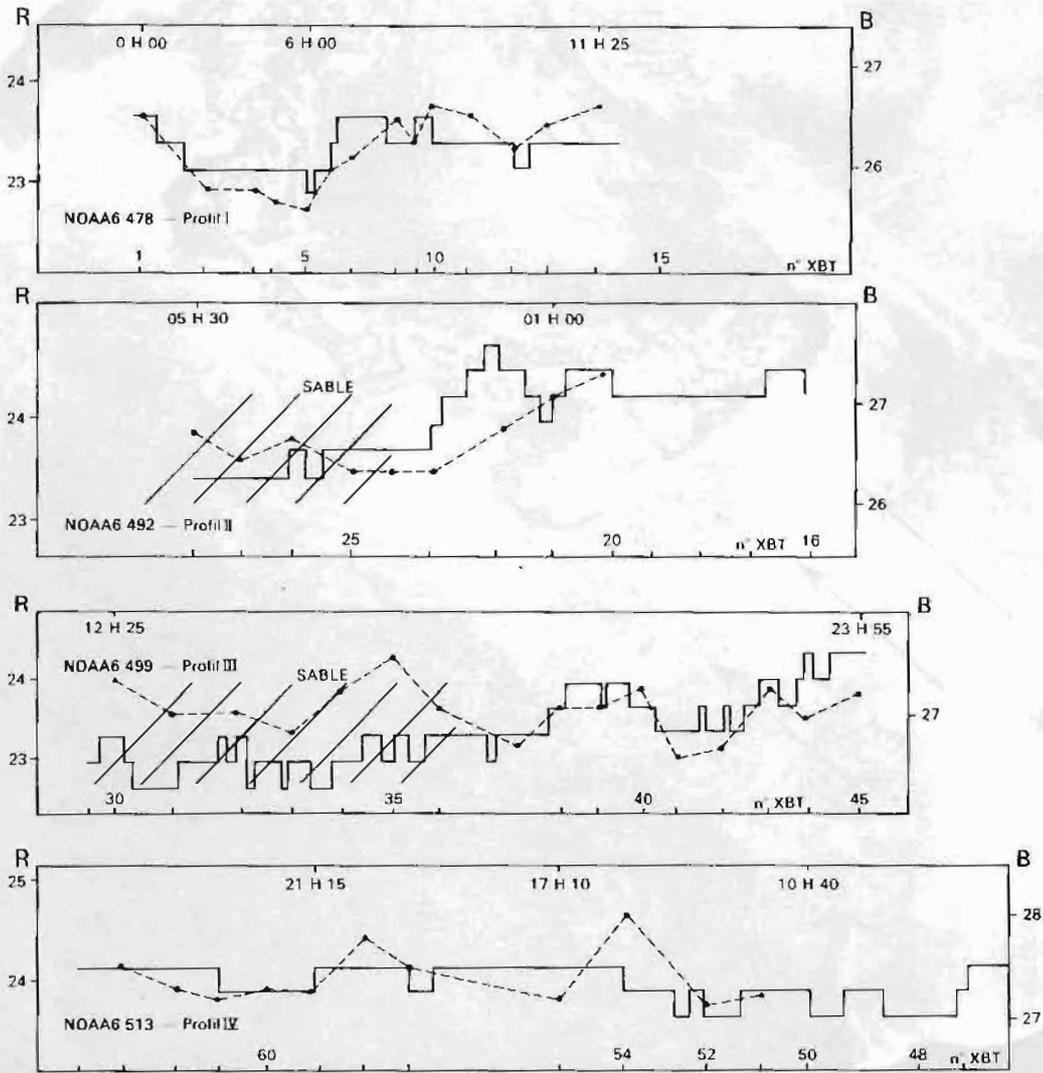


FIG. 4. — Comparaison entre la température radiométrique non corrigée et la température de surface XBT

— température radiométrique (R)

----- température XBT (B)

en abscisse : répartition des XBT le long du profil

en ordonnée :

à gauche (R), températures radiométriques

à droite (B), températures in situ

diverses, mais de forte salinité et surtout par la présence, dès 200 mètres, d'eau d'influence Levantine ; il correspond aux stations les plus orientales.

On peut préciser la nature de ces masses d'eau en faisant appel à ce que l'on connaît de la circulation générale dans cette région (Fig. 6).

Le courant Africain A qui transporte depuis Gibraltar et jusque dans le bassin Levantin des eaux d'origine Atlantique, franchit vers l'Est le canal de Sicile en passant en grande partie au Sud de Malte. A l'Est du détroit, ce courant s'écoule en direction de la Cyrénaïque où il se sépare en deux branches. Cette séparation induit un courant anticyclonique principal dans le golfe de

Syrte (S) et un circuit secondaire sur le plateau continental Tunisien. En mer Ionienne, il semble qu'il y ait une faible circulation cyclonique (O).

On peut alors interpréter les différents "types T S" de la façon suivante :

- . le type 1 correspond au circuit de la Syrte
- . le type 2 au courant Africain
- . le type 3 au circuit Ionien.

Sur les coupes verticales de salinité, les différentes masses d'eau seront caractérisées par :

- A : eau du courant Africain $S < 37,3 ‰$
- S : eau de Syrte $38,0 \leq S \leq 38,2$
- O : eau intermédiaire Levantine $S > 38,7 ‰$

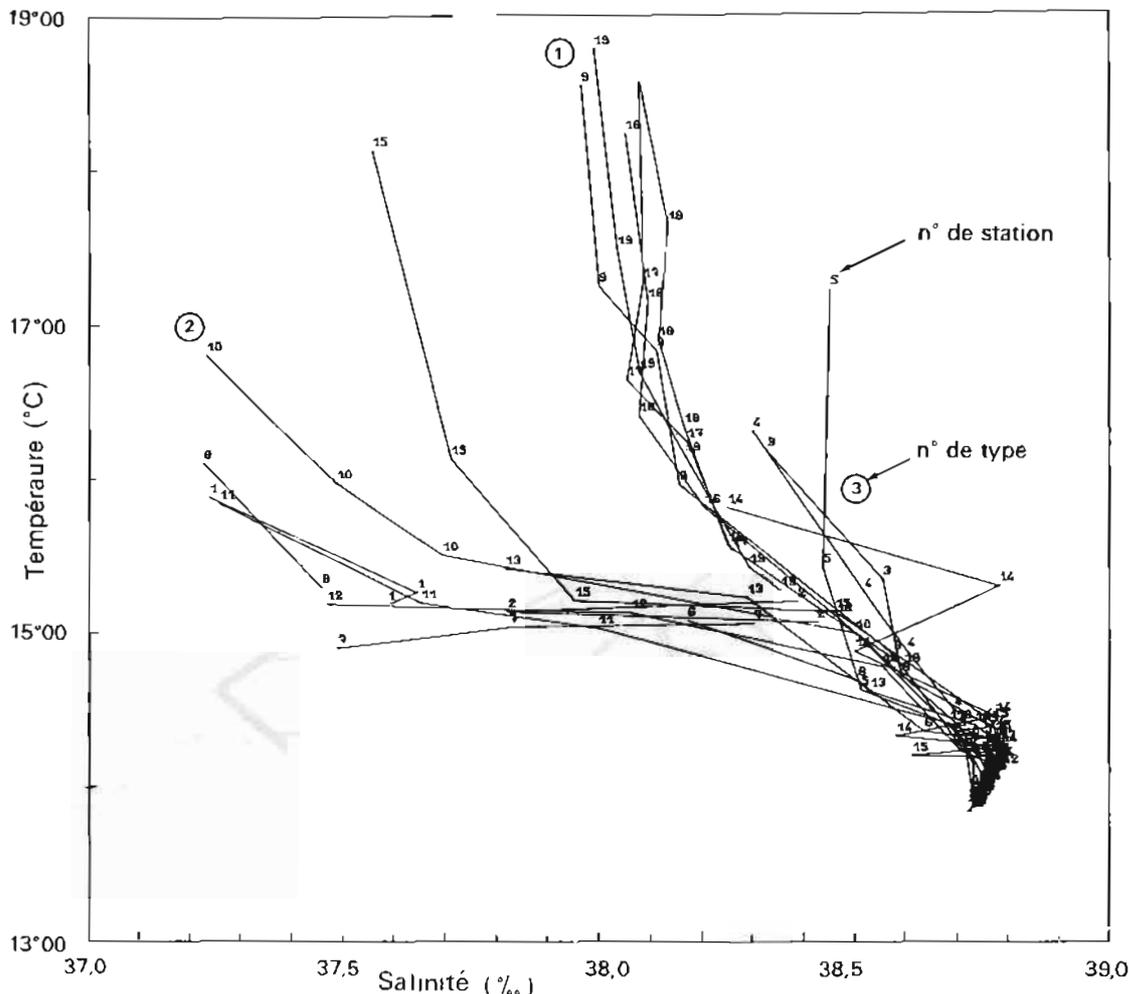


FIG. 5. — Trace T-S Stations Malte du 31-7 au 3-8-78 (Immersion supérieure à 30 mètres)

L'analyse frontale de la figure 7, qui est une interprétation schématique de l'ensemble des thermographies disponibles, reflète la répartition des masses d'eau et la circulation décrite ci-dessus.

On y retrouve deux régions d'eaux chaudes :

- . l'une au Nord-Est
- . l'autre au Sud-Est de la zone

correspondant respectivement au circuit Ionien et au circuit de la Syrte.

Les veines froides (A 1, A 2) apparaissant au Sud et à l'Est de Malte et qui continuent en direction de la Cyrénaïque (A) matérialisent le trajet du courant Africain.

Cette analyse frontale permet de dégager les zones "frontales" suivantes :

- . front principal (F 1) entre le circuit de la Syrte et le courant Africain,
- . de façon secondaire, le front de Malte (F 2) le long de la bordure Est de A 2.

A noter aussi (fig. 7 et 8) la présence de méandres et d'un ensemble de tourbillons (T3) au niveau de la

partie orientale du système frontal, une tache froide (T1) dans le circuit de la Syrte.

Les méandres et tourbillons observés sont étudiés dans l'annexe II. Le phénomène est examiné en termes d'instabilité barocline, cette instabilité ayant pu être déclenchée par la présence du talus continental perturbant l'écoulement moyen. La longueur d'onde des méandres prévue par la théorie (55 km) est en bon accord avec l'observation satellitaire (50 ± 10 km).

Ayant observé une certaine corrélation entre la circulation générale, l'hydrologie et les thermographies de surface, il semble intéressant d'entrer dans le détail de cette corrélation. Les coupes verticales utilisées par la suite sont placées à la fin de ce paragraphe (figures 11, 12, 13 et 14).

Le front repéré F 1 sur les thermographies (fig. 7) apparaît également comme le front principal sous la surface, il est placé exactement à la limite orientale des eaux de la Syrte

A cette limite on observe sur les coupes (Fig. 13, 14) un système frontal complexe entre, d'une part l'eau de

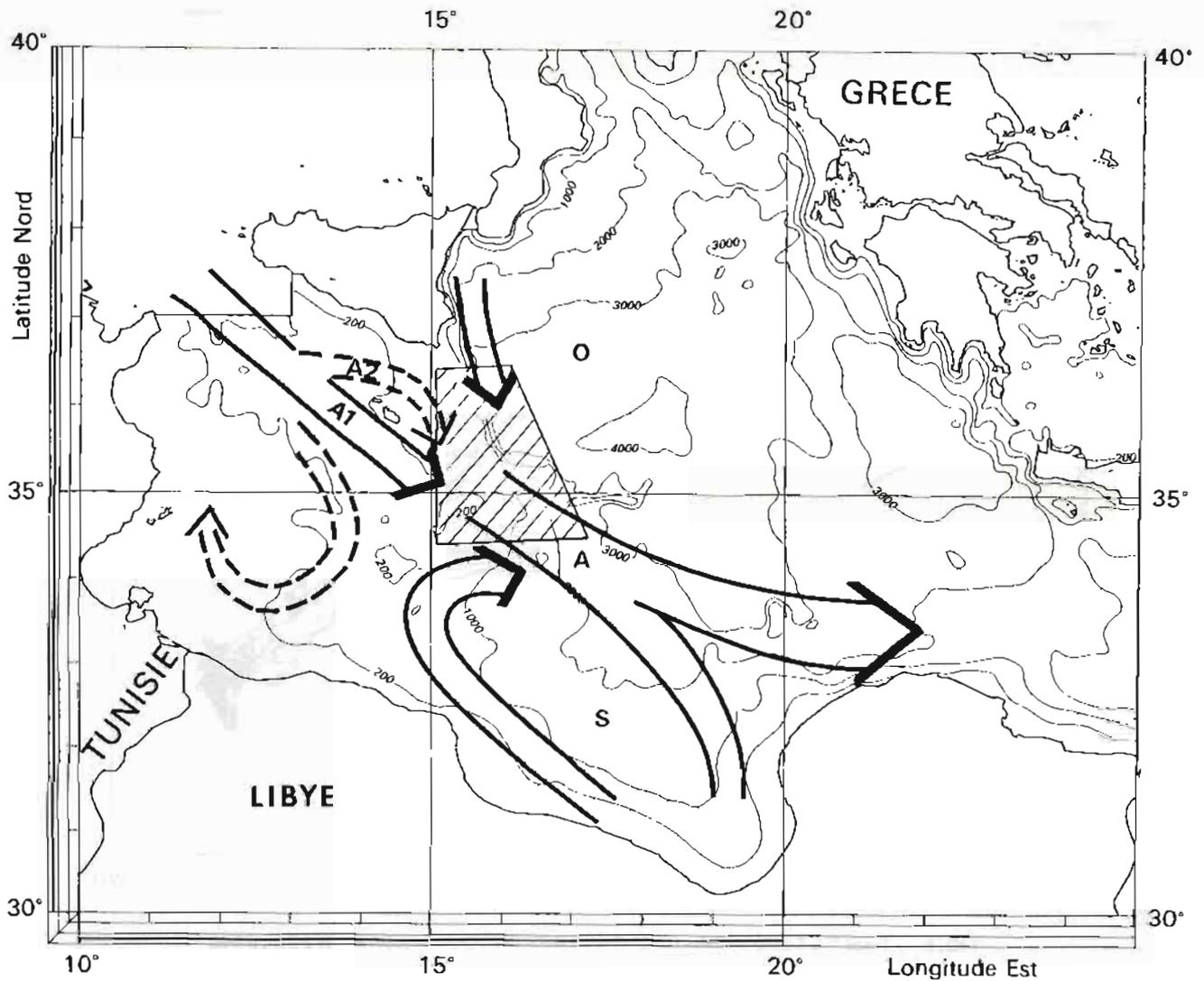


FIG. 6. — Circulation générale superficielle dans le canal de Sicile

- | | |
|--|--|
|  Zone levée | S Tourbillon de la grande Syrte |
| A Veine d'eau «Atlantique» | O Circulation en mer Ionienne |

Les caractères intermittents ou incertains sont en pointillé.

Syrte à l'Ouest et les eaux du courant Africain (A) et de l'eau Levantine (O) à l'Est. Les écarts de température et de salinité entre les deux bords du front sont de 2°C et de 0,5‰ au maximum.

On remarque sur les coupes verticales des figures 13 et 14 que ce front s'accompagne d'une déformation des isothermes : à l'Ouest du front les isothermes plongent, tandis qu'à l'Est elles remontent. Cette déformation est associée à des mouvements verticaux de sens opposés de chaque côté du front. Ces mouvements se traduisent en surface par l'apparition d'une bande chaude le long du bord Ouest du front (Fig. 8).

Le front F2, connu sous le nom de front de Malte est situé à la limite orientale du plateau Sicilo-Maltais.

Sur les coupes verticales (Fig. 11, 12, 13) le front de Malte apparaît essentiellement comme un front de salinité (1‰) entre la veine A2 de courant Africain et l'eau du bassin Ionien.

Du point de vue des températures, la trace superficielle est plus diffuse que celle de F1 et l'on n'observe pas de front thermique sous la surface mais plutôt une succession d'ondulations des isothermes à l'Est du talus.

Ce front perd son identité vers le Sud entre les profils III et IV (figure n° 9) entre lesquels le minimum de salinité passe brusquement de 37,1 à 37,8‰ et où la trace de surface (Fig. 8) présente un aspect "instable" ; (pour mémoire on notera que c'est à ce niveau que se situe le seuil du canal de Sicile par lequel transitent les eaux Levantines).

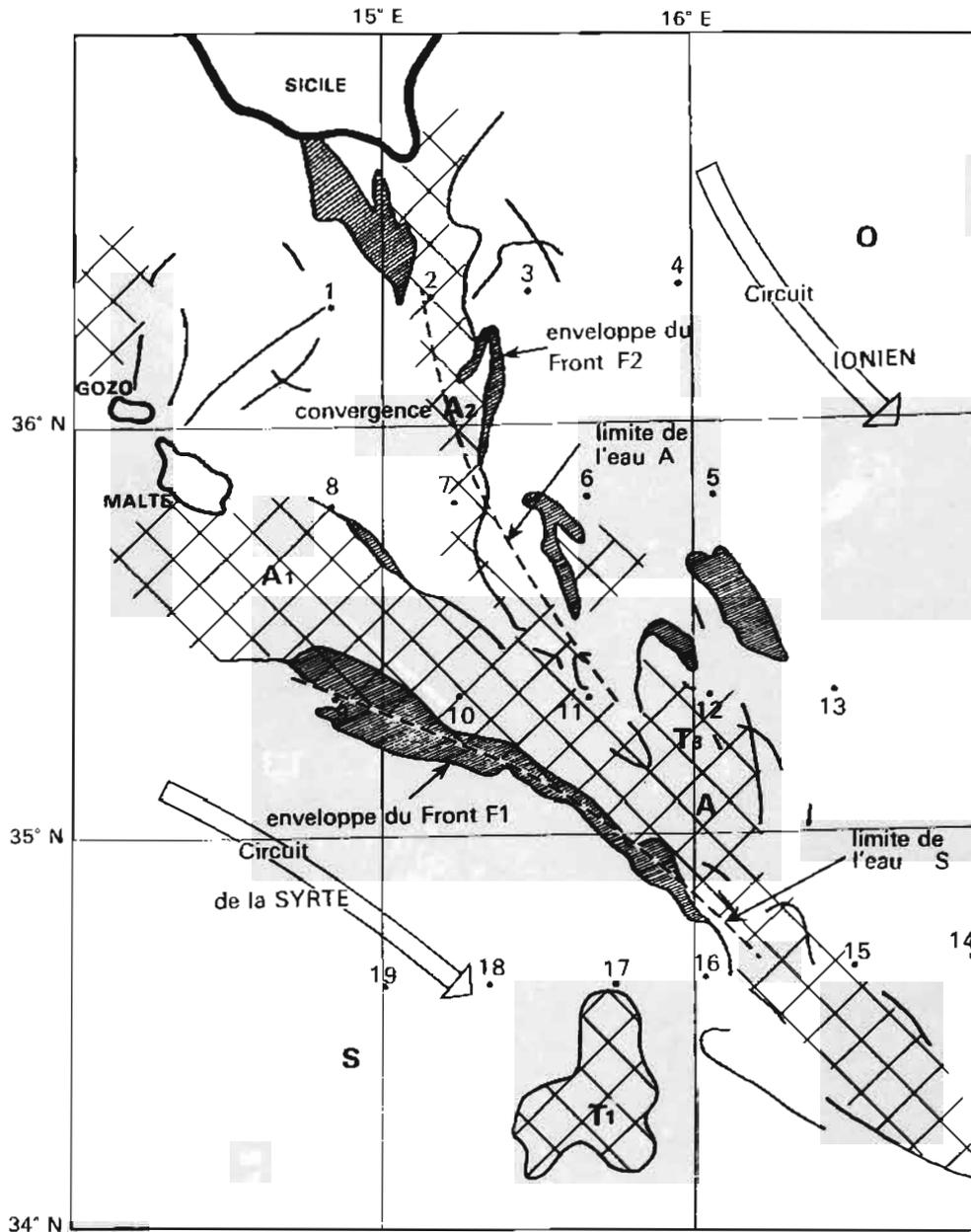


FIG. 7. — Organisation des zones frontales d'après l'analyse des orbites 478, 485, 492, 499 et 513.



L'hypothèse d'une origine ondulatoire des traces thermiques est corroborée par une coupe faite en été par le *Marion Dufresne* (Terres Australes et Antarctiques Françaises) et présentée sur la figure 10.

On note également une certaine alternance de zones chaudes et froides, le long du profil II sur la photographie de la figure 8. Si on compare cette alternance avec les oscillations des isothermes, on constate que les zones chaudes en surface apparaissent entre un sommet d'oscil-

lation à l'Ouest et un creux à l'Est, tandis que les zones froides sont associées à un sommet à l'Est et un creux à l'Ouest.

Compte tenu des mesures dont on dispose, ce caractère ondulatoire reste encore une hypothèse.

Sur la coupe de température du profil IV (fig. 14), on observe une importante dépression des isothermes au-dessous de 75 m, au niveau des stations XBT n° 57, 58 et 59. Cette structure ne présente aucune signature

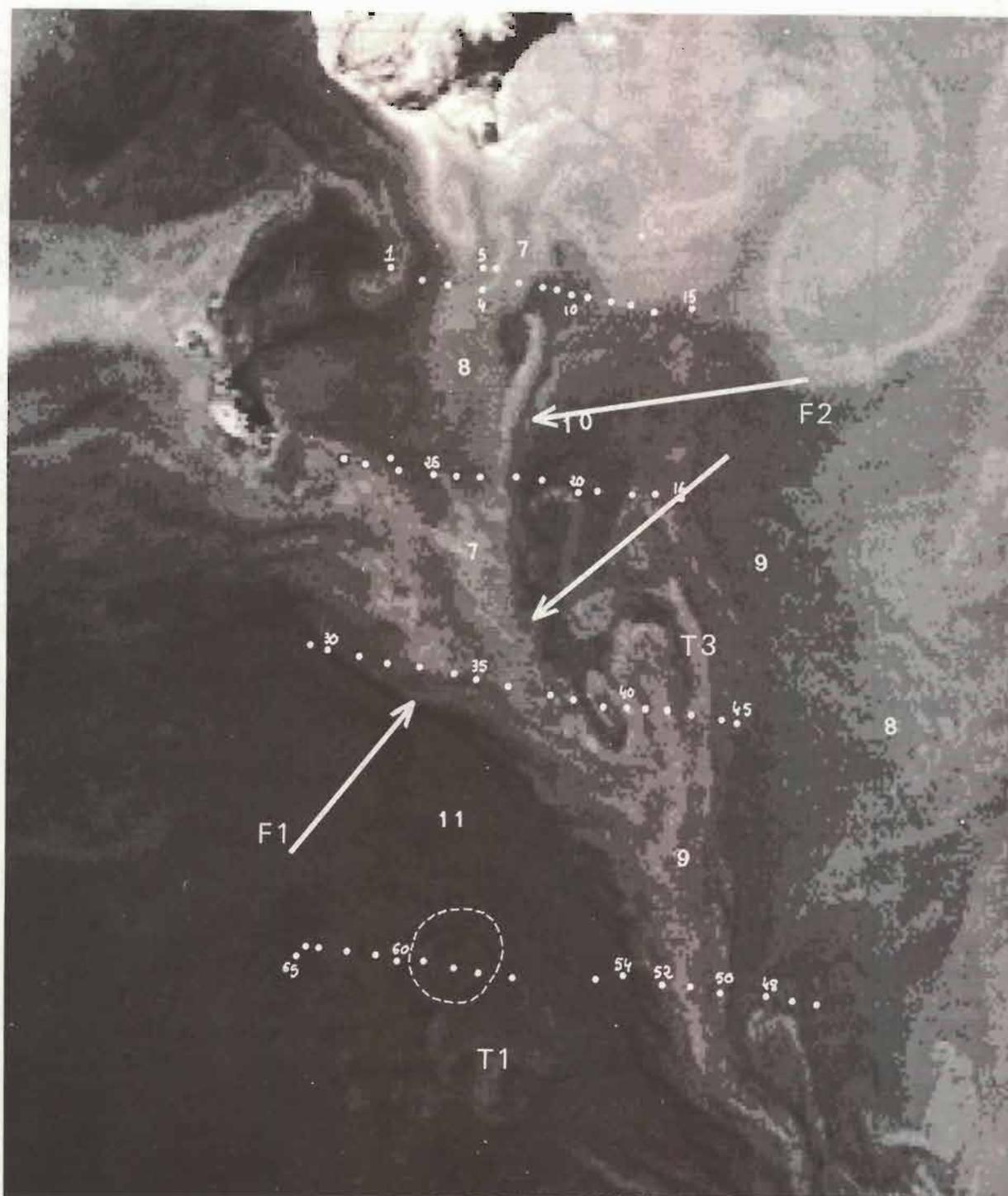


FIG. 8. — Secteur de 400 x 400 pixels du canal 3 de l'AVHRR de NOAA 6. Orbite 485 du 31-7-79 à 19 h 00 UT

superficielle discernable du bruit (fig. 8). La tache froide T1 placée juste au Sud est due à un haut fond de 50 mètres (fig. 9).

En conclusion, les accidents thermiques décelés sur les coupes hydrologiques au niveau et en-dessus de la thermocline n'ont pas tous de signature superficielle décelable sur les thermographies. Une zone frontale, comme la zone F1 (limite entre courant africain et circuit de la Syrte), se marque nettement en surface

et en subsurface. Pour le front de Malte proprement dit qui est affecté sur les thermographies de nombreuses perturbations à caractère tourbillonnaire, la corrélation entre traces de surface et sections hydrologiques n'est pas clairement définie.

Donc, si dans le détail, la correspondance entre thermographie de surface et structure hydrologique profonde, ne peut pas être toujours établie, on a pu montrer cependant que les grandes lignes de la structure

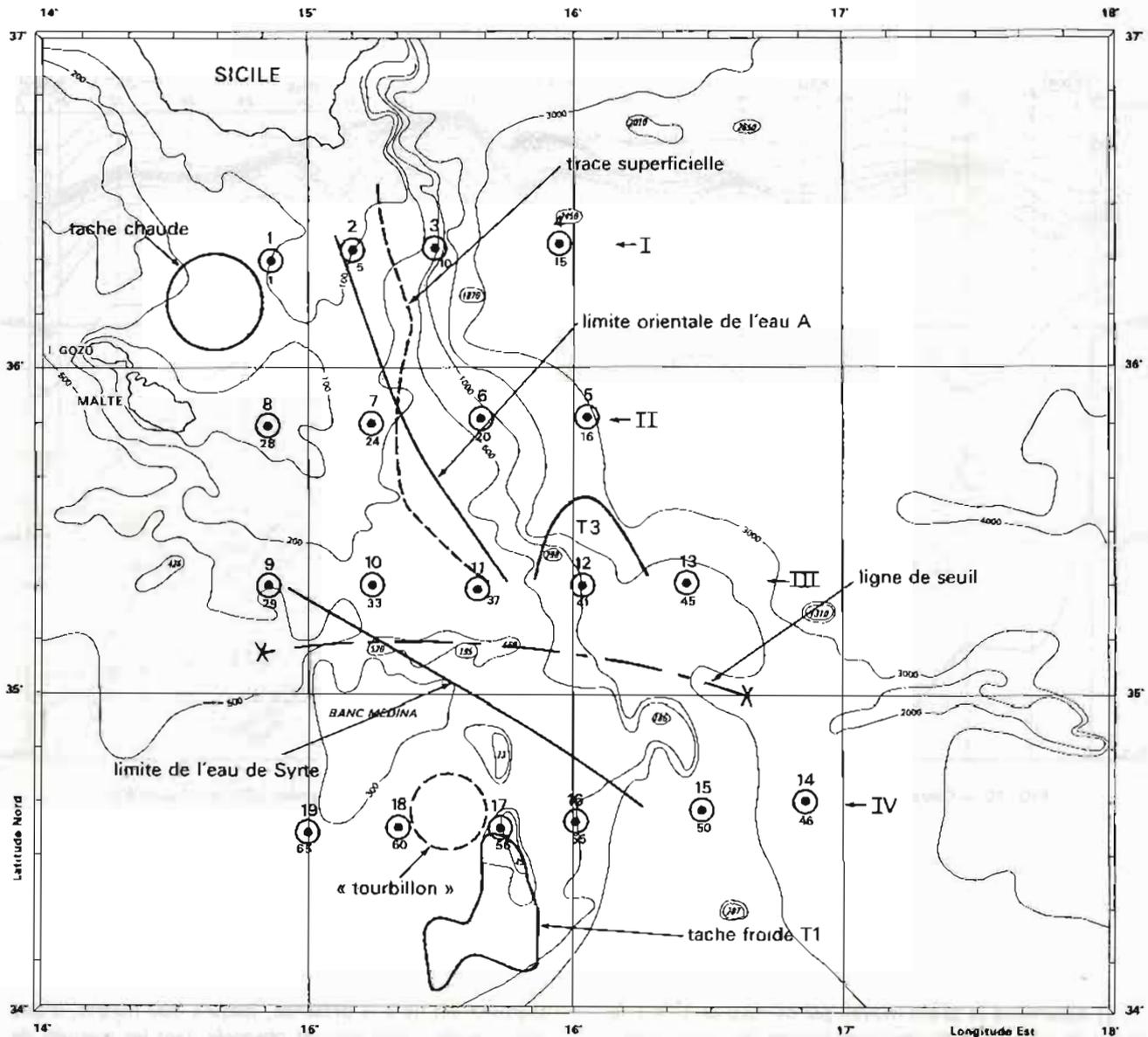


FIG. 9. — corrélation entre les «fronts» et la bathymétrie

thermique tracées à partir des images satellitaires correspondaient à des divisions hydrologiques réellement observées in situ : circuit Ionien, courant Africain et circuit de la Syrte.

Il apparaîtra dans le paragraphe suivant qu'une telle correspondance peut être retrouvée en travaillant sur une échelle de temps plus grande (saison) et en utilisant les fichiers d'archives hydrologiques.

II. ETUDE STATISTIQUE DES CONDITIONS BATHY-THERMIQUES

A partir des données AVHRR du canal de Sicile et du fichier historique des XBT de l'Établissement Prin-

cipal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, nous avons tenté de vérifier s'il existe une relation statistique entre la bathythermie moyenne et la situation frontale moyenne en surface. Plus précisément, nous avons recherché si les zones bathythermiques, c'est-à-dire les zones caractérisées par un même type de profil vertical de température et les zones frontales, c'est-à-dire limitées par des fronts thermiques superficiels, sont confondues.

Cette comparaison n'a été faite, à titre d'essai, que pour les mois d'été, bien qu'il soit possible comme on le verra ensuite, d'utiliser les thermographies d'archives pour suivre l'évolution annuelle des fronts thermiques de surface dans cette région.

Pour définir des zones bathythermiques moyennes sur le canal de Sicile en été, nous avons :

COUPE C-D

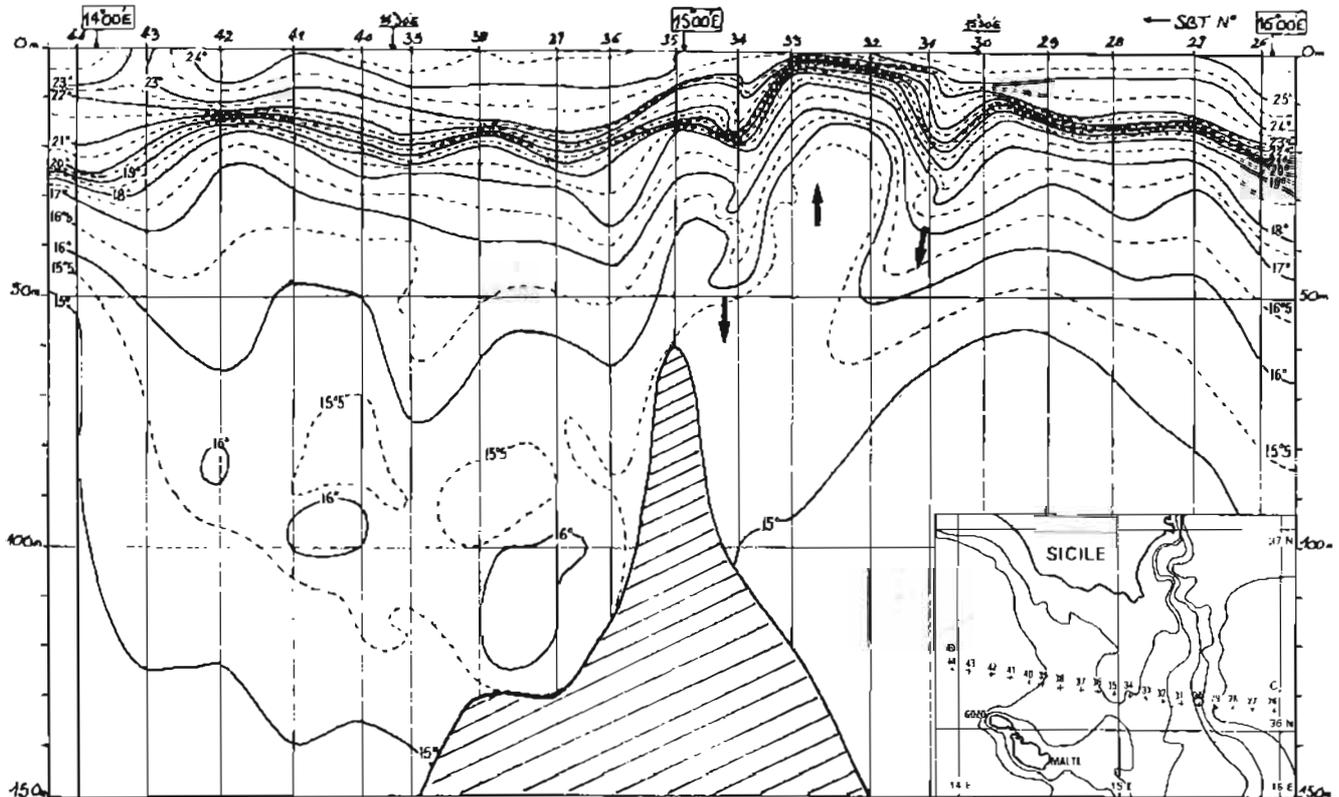
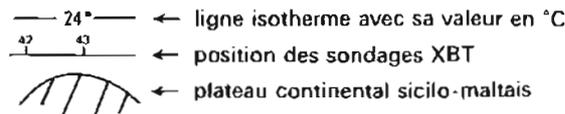


FIG. 10. - Coupe réalisée à partir des mesures XBT «Marion Dufresne» 30 juin 1979. Segment CD (voir figure B3)



1) déterminé le profil moyen par carreau de $1^\circ \times 1^\circ$ à partir de tous les bathythermogrammes des mois juillet, août et septembre ;

2) regroupé les carreaux présentant un profil moyen semblable. Les paramètres pris en compte dans cette classification sont l'existence d'une couche de mélange et la forme de la thermocline.

Cette classification nous a amené à considérer trois zones bathythermiques d'été dans lesquelles le profil de température est assez homogène (Fig. 15). On donne sur la figure 15b les trois profils moyens de température caractéristiques de chacune des zones.

Zone A : Canal de Sicile

Le profil bathythermique ne présente pas de couche de mélange (fig. 15 b.). Une analyse plus détaillée des profils permet de dégager quatre "sous-zones" A 1, A 2, A 3 et A 4.

Zone B : mer Ionienne

Zone C : Grande Syrte :

Il existe une couche de mélange et le segment sous la thermocline est très différent de celui de la zone B. Ce

segment est lié à la présence, jusqu'à 300 mètres, d'une eau chaude. Cette eau est observée dans les mesures de l'*Origny* et nous l'avons appelée S dans le paragraphe 1. On a distingué deux sous-zones.

Les thermographies AVHRR recueillies en août 1979 permettent par ailleurs de dégager les grands traits de l'organisation des fronts thermiques sur le canal de Sicile pendant cette période.

Sur la figure 16, on a porté en noir les zones dans lesquelles ont été observés des fronts et en pointillé la position moyenne de certaines limites thermiques à caractère non frontal ; on considère qu'il y a front thermique si le gradient est supérieur ou égal à $1^\circ\text{C}/5\text{ km}$.

L'examen de la figure 16 permet de faire les commentaires suivants :

a) la tache chaude de la mer Ionienne correspond exactement à la zone bathy B, d'autre part

b) la tache chaude de la grande Syrte correspond à la zone bathy C 1.

Cependant la zone C 2 qui apparaît du point de vue frontal comme un prolongement vers le Sud-Est du cou-

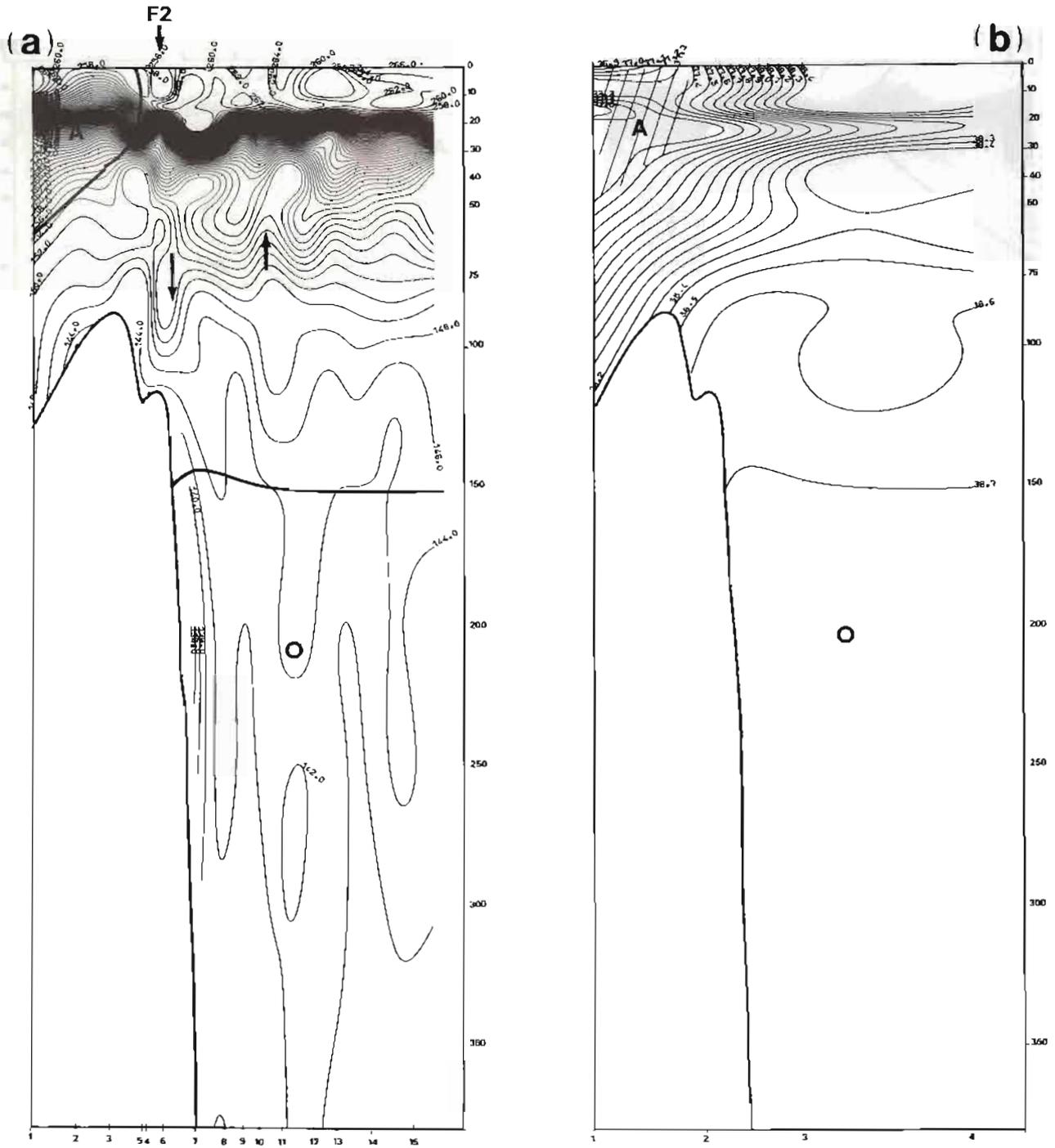


FIG. 11. — Coupes de température (a) et de salinité (b) du profil I
 Les températures sont exprimées en dixièmes de degré et les salinités en ‰.

- O** eau intermédiaire de Méditerranée Orientale
- A** eau de surface de Méditerranée Occidentale

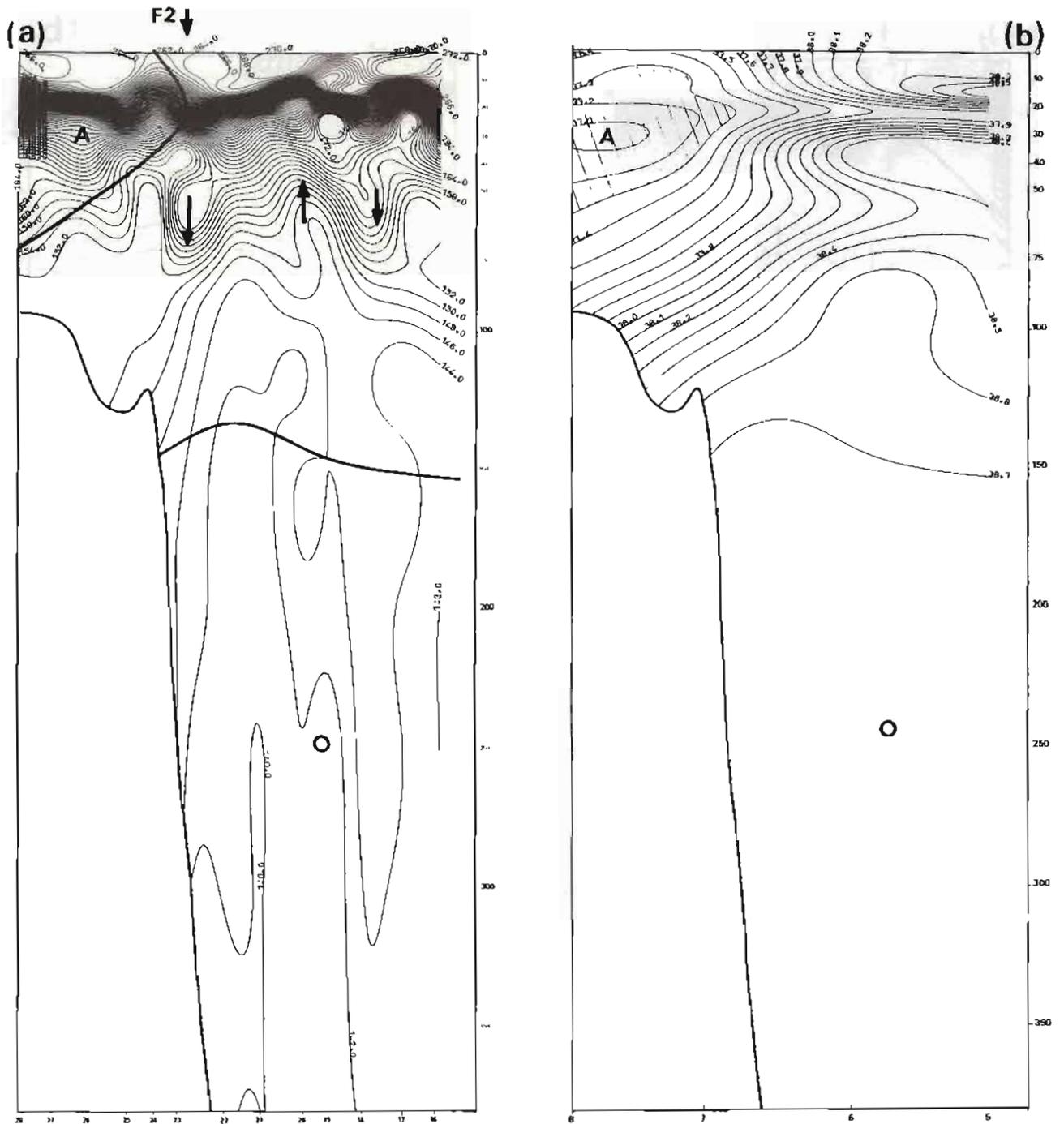


FIG. 12. — Coupes de température (a) et de salinité (b) du profil II
 Les températures sont exprimées en dixièmes de degré et les salinités en ‰

- O** eau intermédiaire de Méditerranée Orientale
- A** eau de surface de Méditerranée Occidentale

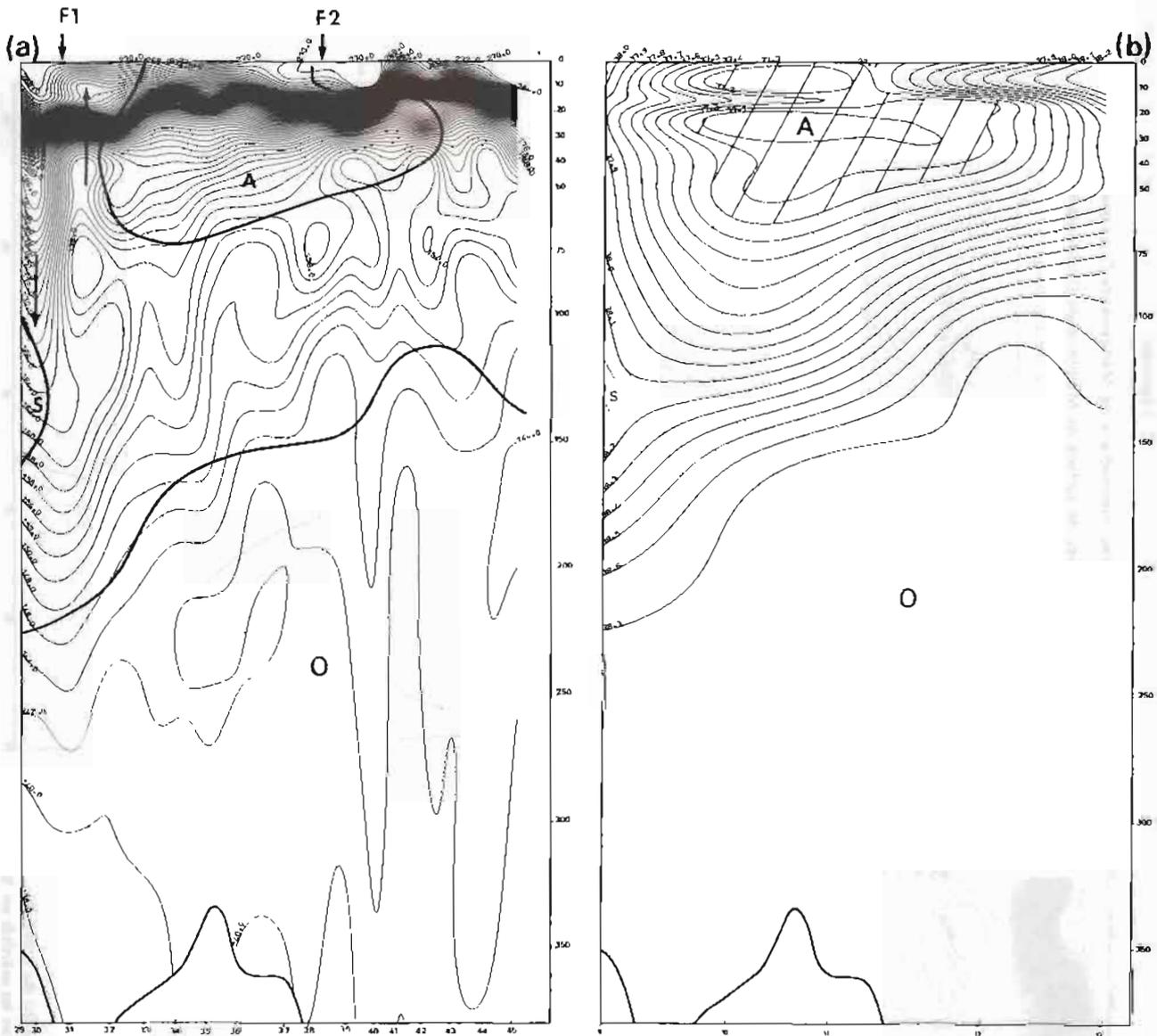


FIG. 13. — Coupes de température (a) et de salinité (b) du profil III
 Les températures sont exprimées en dixièmes de degré et les salinités en ‰.

O eau intermédiaire de Méditerranée Orientale A eau de surface de Méditerranée Occidentale S eau du tourbillon de la Grande Syrte

rant Africain, correspond du point de vue bathythermique à une transition entre les types C 1 et B.

c) la zone bathy A est délimitée à l'Est par le front de Malte et au Sud par la tache chaude de la Syrte.

Cette assez bonne corrélation entre zones bathy et traces frontales peut s'expliquer par le fait que la plupart des fronts thermiques superficiels sont dus à des remontées de la thermocline sous l'influence de la circulation (générale ou atmosphérique) ou de phénomènes ondulatoires (topographie...).

Cette propriété n'est pas propre au canal de Sicile comme le montre la figure 17 sur laquelle on observe également cette corrélation pour le bassin algéro-provençal, pour une période allant d'août à décembre.

Elle peut être moins nette à d'autres périodes où la structure bathythermique est moins stable et il conviendrait d'étudier toutes les saisons avant de conclure sur la possibilité de définir des zones bathythermiques évolutives en fonction de la situation frontale.

Comme la structure thermique et la circulation, les fronts thermiques de surface présentent un cycle saisonnier. Ce cycle a été étudié à partir de 400 thermographies reçues d'avril 1979 à mars 1980.

Cette évolution est illustrée par les figures 18 à 21 sur lesquelles on a regroupé les situations mensuelles correspondant à une même saison.

Il ressort de cette analyse qu'il y a deux saisons (hiver

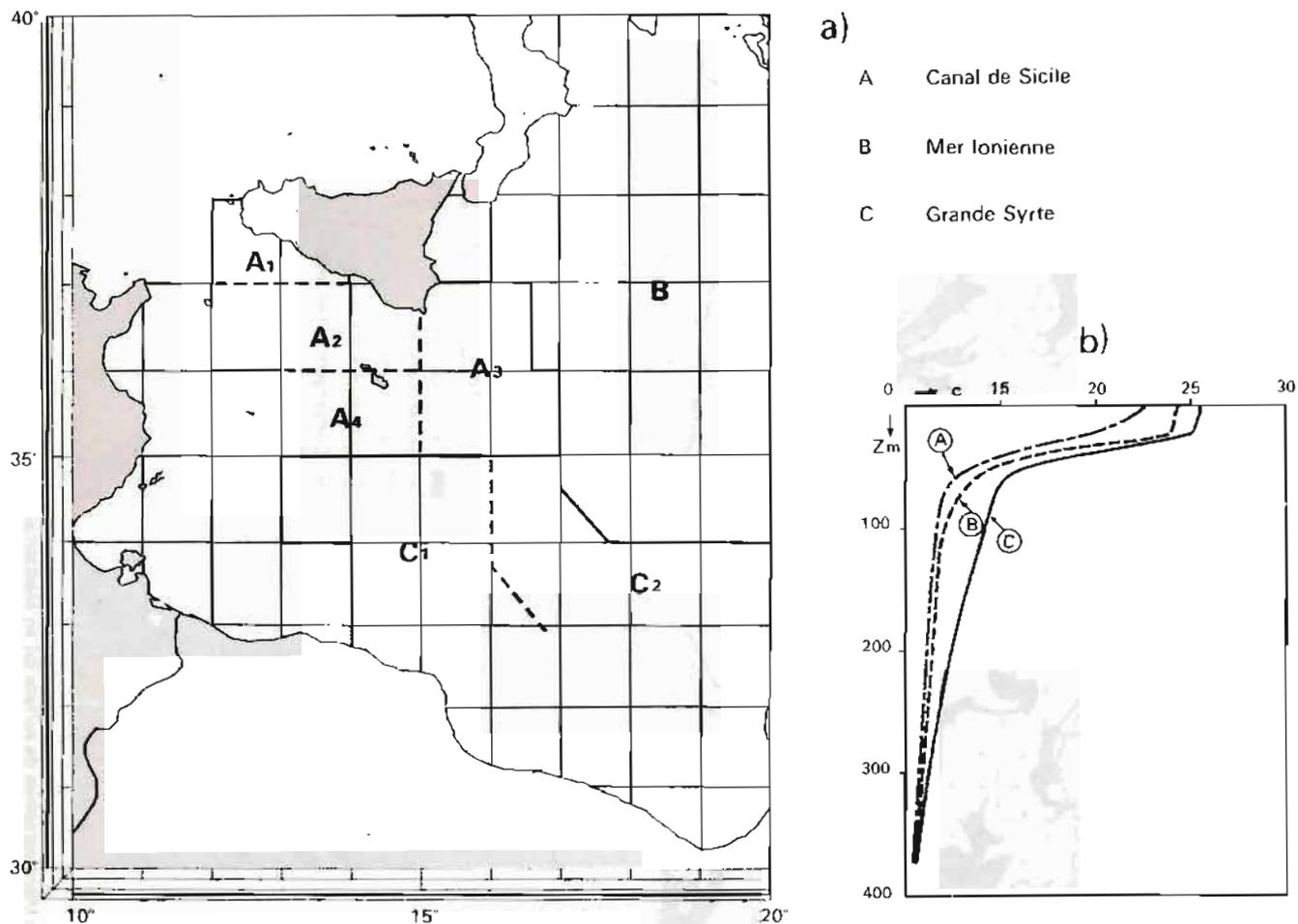


FIG. 15. — Zones bathythermiques (a) et les profils de températures caractéristiques (b) du canal de Sicile

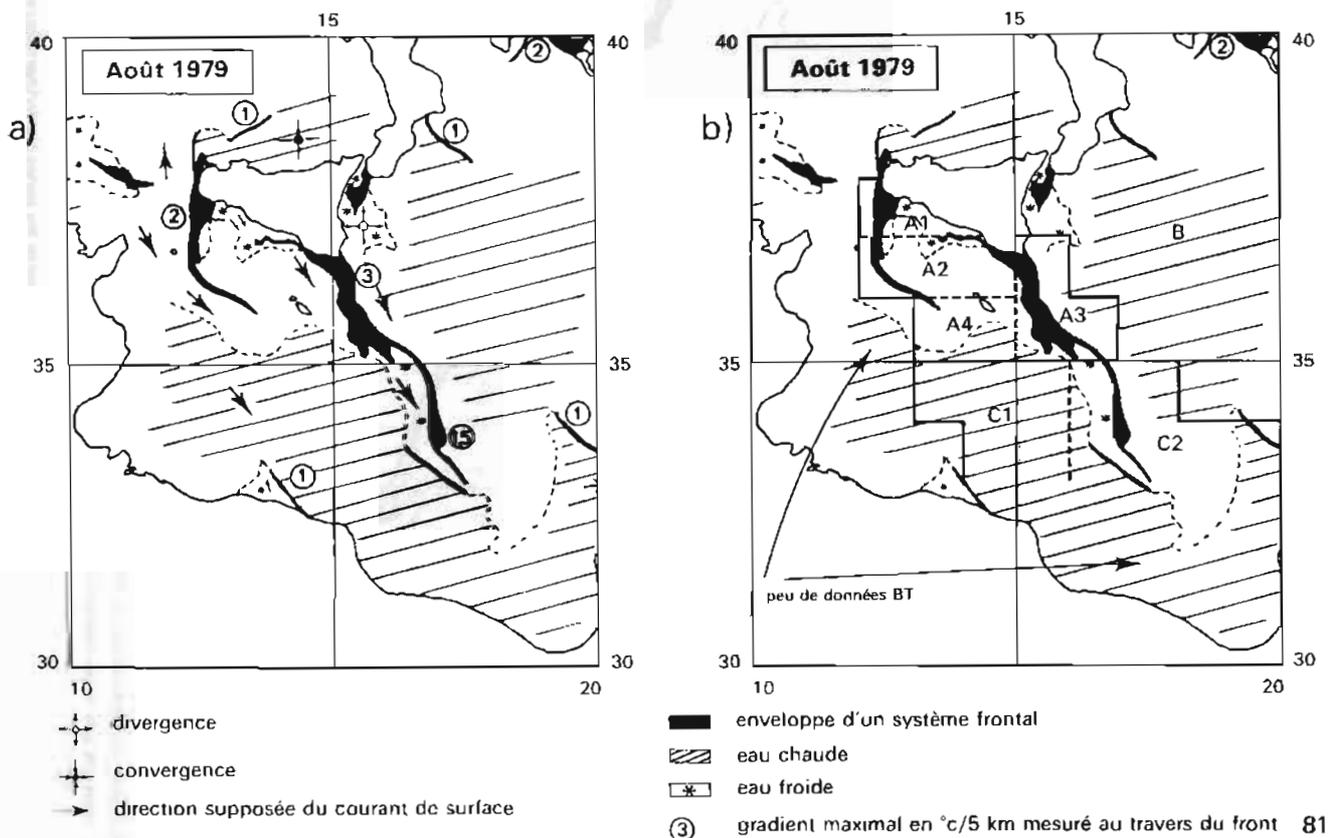
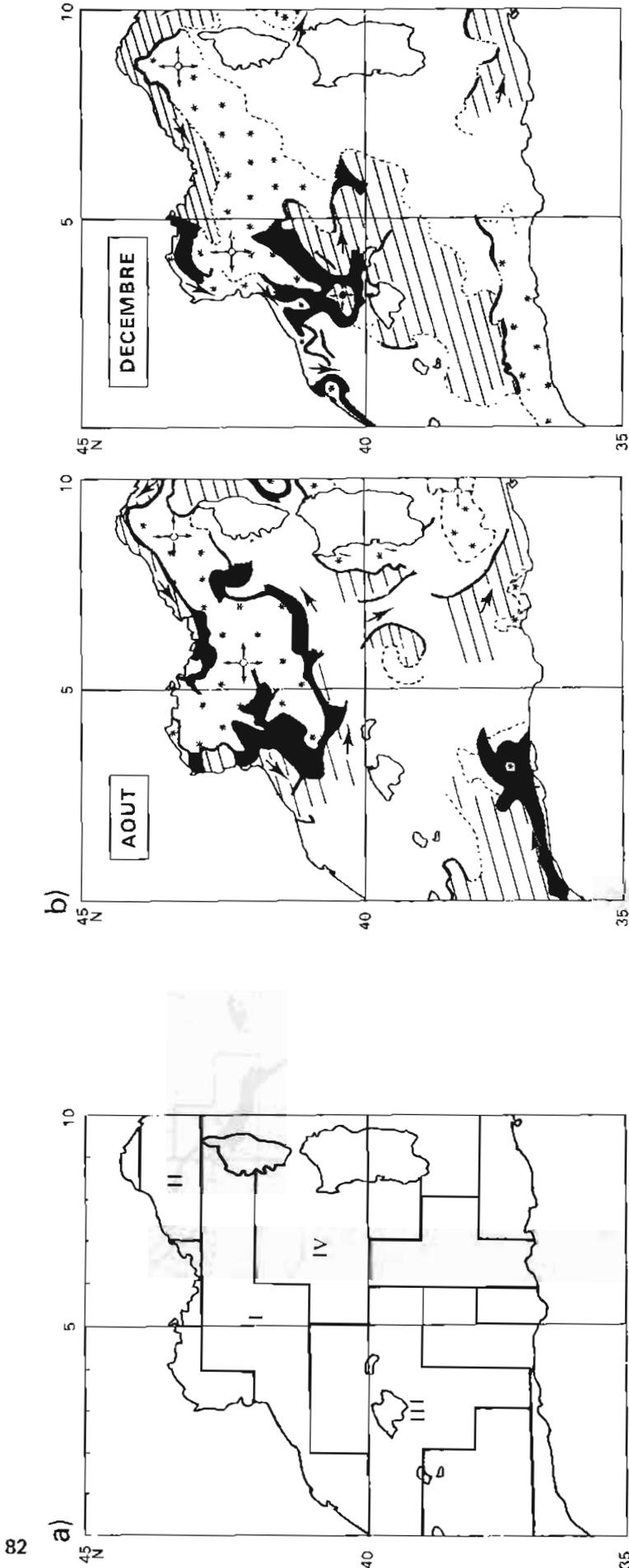
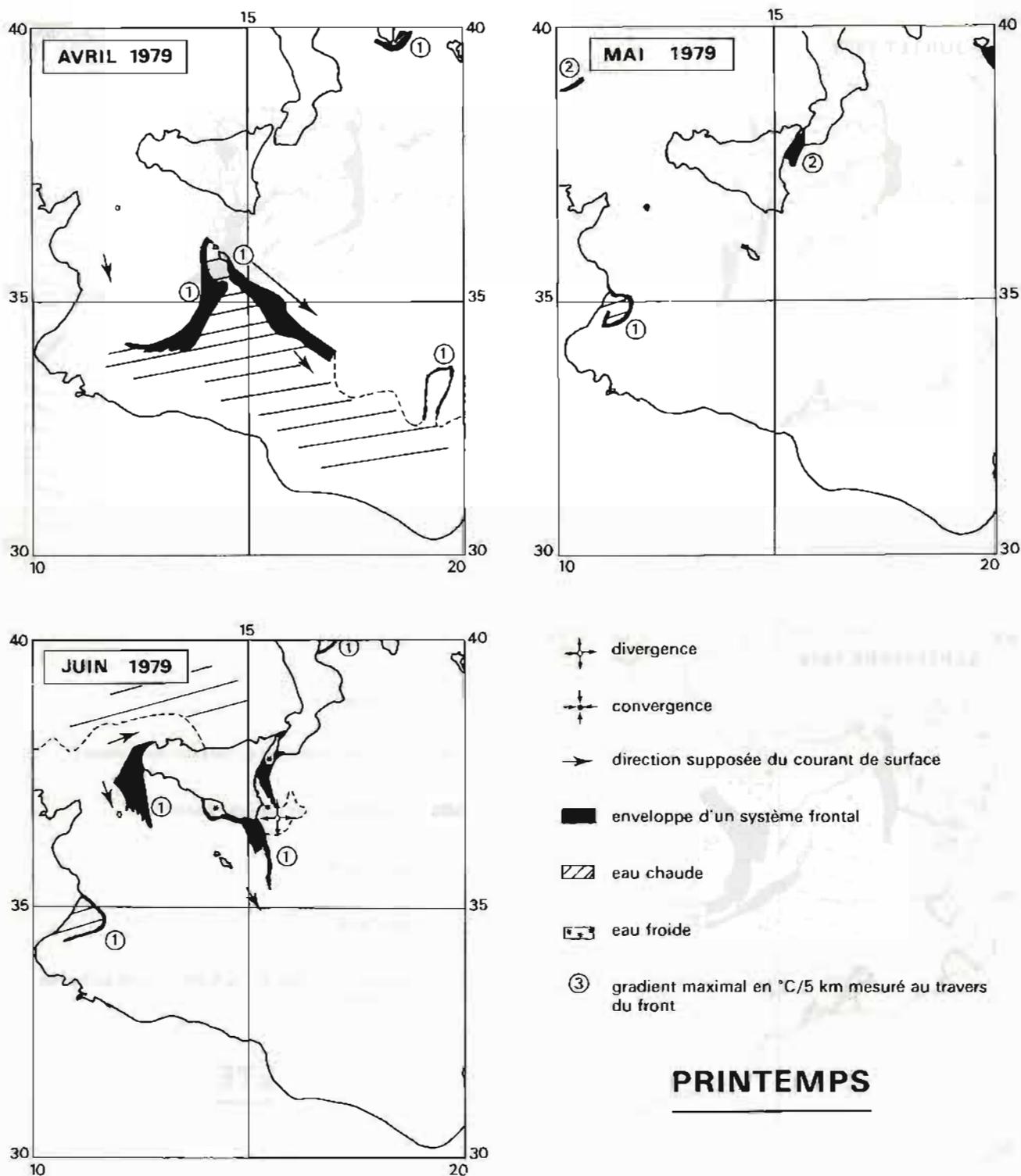


FIG. 16. — a) analyse frontale d'août 79
b) comparaison entre les zones bathythermiques et les fronts



a) Zones bathythermiques moyennes d'août à décembre et profils bathythermiques moyens par sous-carreaux Marsden pour les principales zones

17. — Comparaison entre les zones bathythermiques (a) et les thermographies de surface (b) en Méditerranée occidentale



PRINTEMPS

FIG. 18. — Le printemps (avril, mai, juin) est une période intermédiaire durant laquelle on peut observer : en avril des fronts qui se rapprochent de ceux détectés en hiver, en mai une absence totale de fronts (gradients $\geq 1^\circ\text{C}/5\text{ km}$) et en juin l'apparition de fronts d'upwellings qui ne sont visibles que lorsque les eaux sont stratifiées.

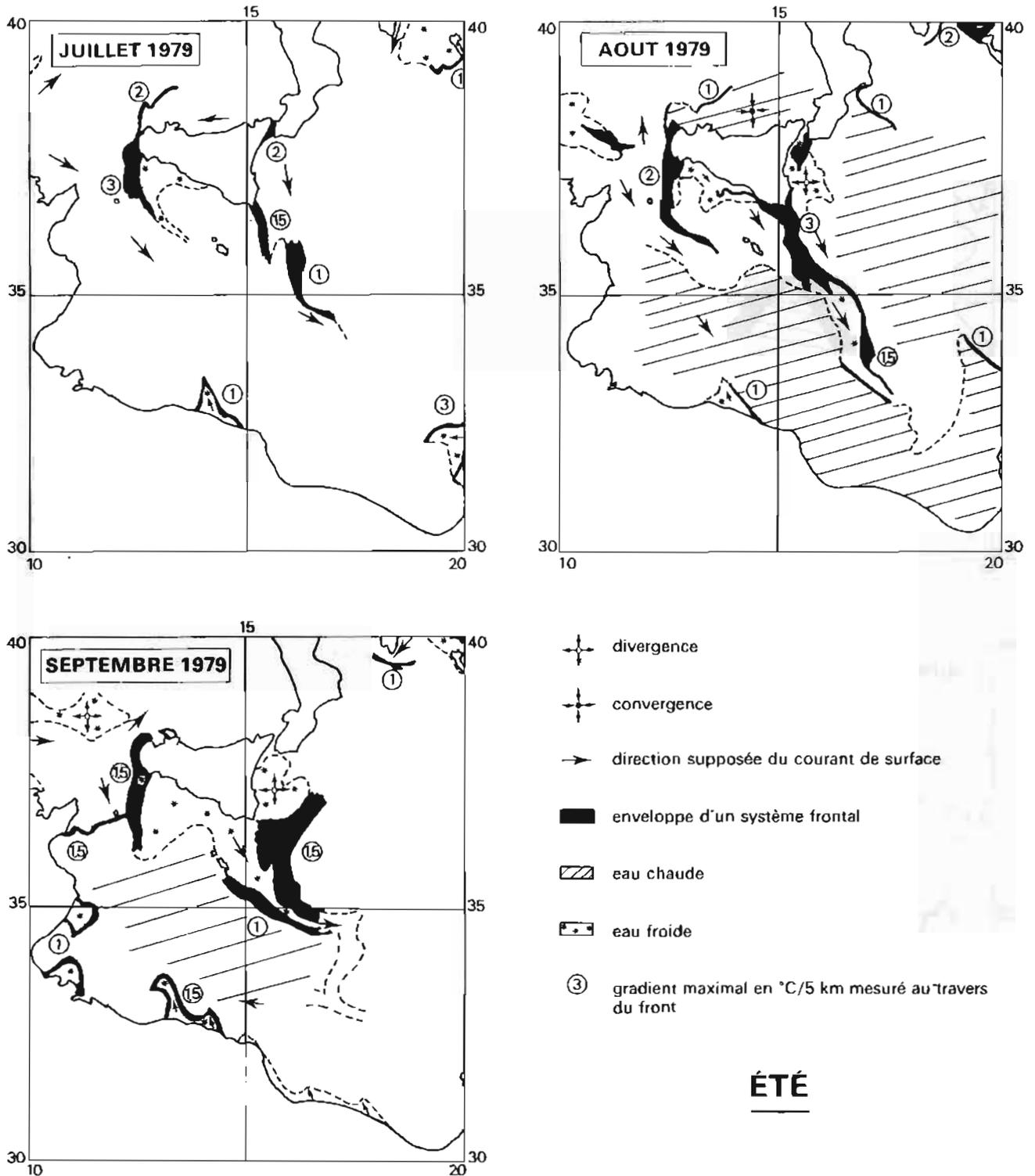
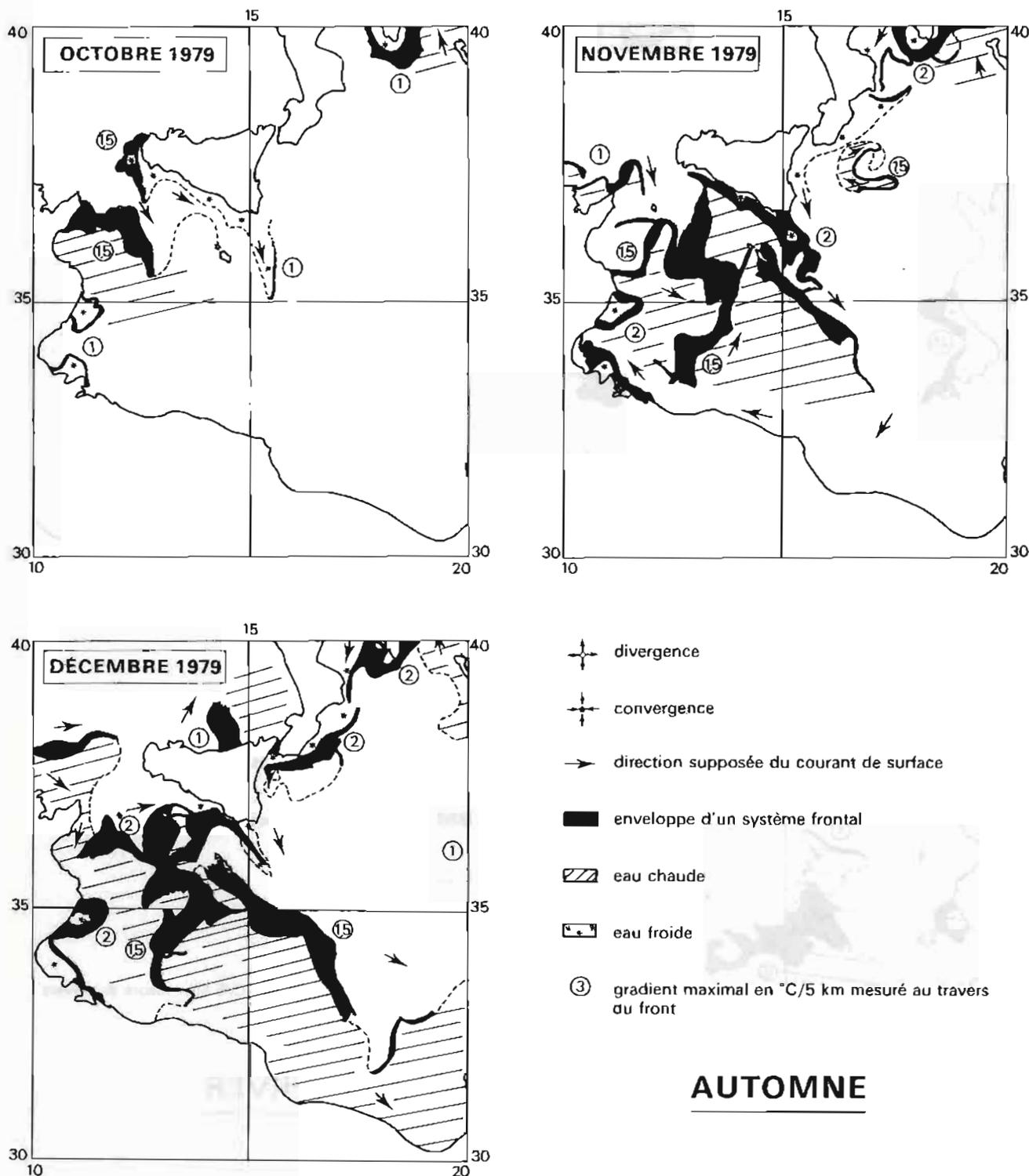
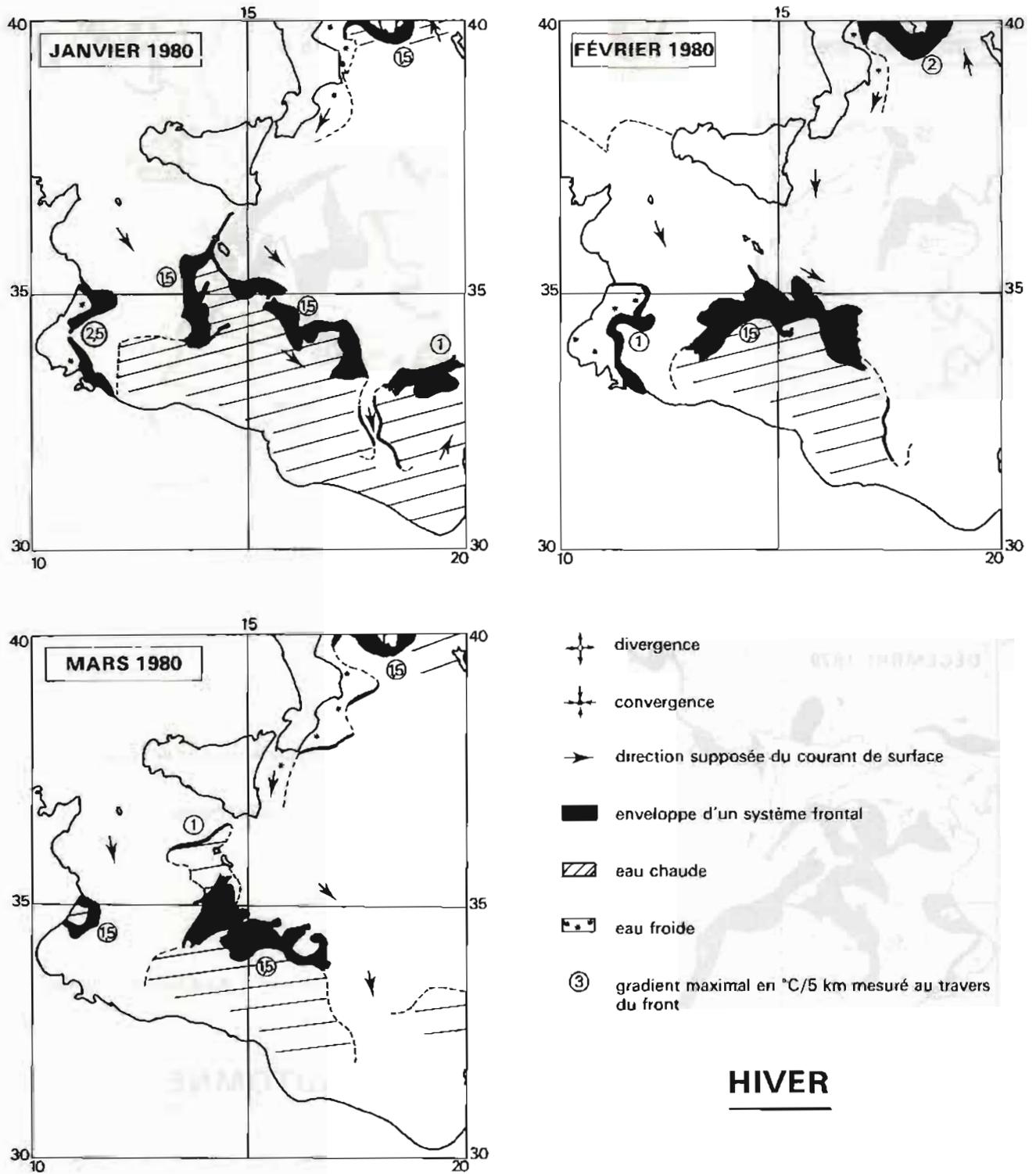


FIG: 19. — En été (juillet, août, septembre) les fronts sont liés aux puwellings induits sur la côte sud de la Sicile par les vents dominants de secteur nord-ouest et au courant africain qui interagit avec les upwellings et subit l'influence des plateaux continentaux étendus.



AUTOMNE

FIG. 20. - L'automne (octobre, novembre, décembre) est la saison la plus complexe pendant laquelle un nombre maximal de fronts peut être détecté. Certains s'apparentent au système estival : Banc de l'Aventure, front de Malte ; d'autres au système hivernal : circuit de la Syrte. D'autres enfin, n'apparaissent qu'en cette saison. Il s'agit en particulier de structures qui se développent à l'est de la Tunisie, suivant un axe approximatif cap Bon-Pantelleria-Linosa-Gaza
 Les gradients maximaux sont un peu plus faibles qu'en été de 1 à 2°C/5 km.



HIVER

FIG. 21. — En hiver (janvier, février, mars), les fronts se développent sur la bordure septentrionale du circuit de la Syrte, là où les eaux atlantiques qui se répandent sur le plateau continental tunisien rencontrent les eaux chaudes de ce circuit.

et été) durant lesquelles on observe une certaine stabilité des fronts.

En ce qui concerne les saisons intermédiaires, il est difficile de définir une situation frontale type. Au printemps, avril se rapproche de la situation d'hiver et juin de celle de l'été ; seul mai présente une situation nouvelle. En automne la situation se rapproche de celle d'été, mais est beaucoup plus complexe.

Conclusion

L'exploitation simultanée de thermographies d'archives et de profils bathythermiques extraits d'une banque de données a montré qu'il existe, en été, une corrélation certaine entre les régions délimitées par les images satellitaires par les fronts thermiques superficiels et les zones bathythermiques.

L'analyse des autres saisons doit être réalisée si l'on désire définir des zones bathythermiques variables en fonction des images de satellites.

CONCLUSION

Dans les limites de cette étude, les thermographies infrarouges reflètent bien les modifications de la bathythermie sous l'influence de la circulation et des phénomènes ondulatoires. Certaines structures subsuperficielles n'étaient cependant pas décelables par ce moyen.

Ces mesures très utiles doivent être complétées par toutes les autres possibilités de la télédétection (SAR, CZCS, altimètre). Leur intérêt provient de la vision synoptique qu'elles apportent de la bathythermie et de la circulation.

La détermination de la température de surface par satellite n'est pas encore très précise ($\sim 1^\circ\text{C}$) pour ces atmosphères chaudes et humides.

La comparaison avec des mesures in situ est essentielle pour la connaissance des possibilités offertes par la télédétection. En particulier l'utilisation militaire des satellites ne progressera qu'à l'aide de campagnes sur les principaux fronts et à diverses saisons. Ces campagnes peuvent être complétées par des études statistiques des données satellitaires d'archives.

RECEVUE PAR LE BUREAU CENTRAL DE RECHERCHES Océanographie de la Défense

ANNEXE 1

PRINCIPE DE LA MESURE DE TEMPERATURE EN RADIOMETRIE SATELLITAIRE ESSAIS DE CORRECTION DE L'ABSORPTION ATMOSPHERIQUE

I. PRINCIPE DE LA MESURE

I.1. Choix de la longueur d'onde

C'est dans l'infrarouge thermique que, en raison de sa température, la mer émet la plus grande part de son rayonnement propre. Celui-ci est directement fonction de cette température. Les radiomètres AVHR de TIROS N et NOAA 6 possèdent deux canaux de mesure dans cette gamme de longueur d'onde : l'un à $3,7 \mu\text{m}$ et l'autre à $11 \mu\text{m}$. Ce dernier permet de thermographier la surface de la mer, en l'absence de nuages, de jour comme de nuit. Il n'en est pas de même pour le canal à $3,7 \mu\text{m}$ qui, de jour, mesure une quantité d'énergie fonction non seulement de la température de la mer mais aussi du rayonnement solaire réfléchi par la surface de la mer. Cela apparaît clairement si l'on compare la "température" restituée à $11 \mu\text{m}$ et $3,7 \mu\text{m}$ pour une orbite de jour, ainsi que le montre la figure 22 pour l'orbite 478 du 31 juillet 1979 à 06 h 30 UT. Le soleil est à droite de l'image. Les différences, point par point, entre les mesures à 11 et à $3,7 \mu\text{m}$ (voir figure 23 bas) sont directement corrélées à la réflexion dans le visible, telle qu'elle peut être mesurée dans le canal 2 (autour de $0,9 \mu\text{m}$) (voir figure 23 haut).

I.2. L'équation de Planck

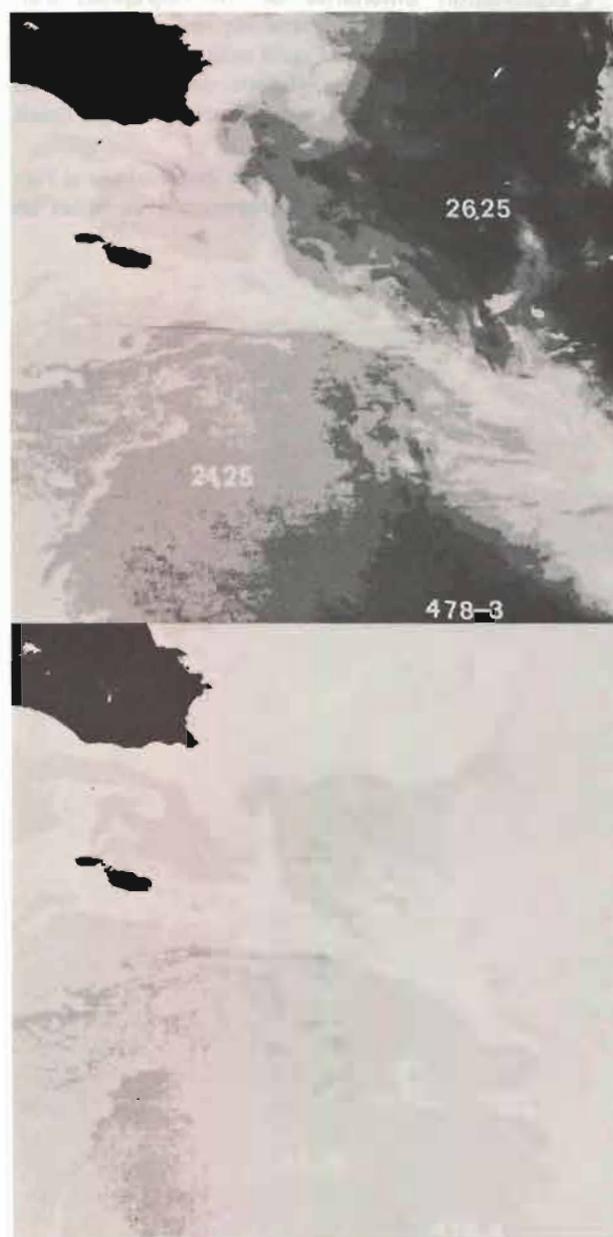
On suppose que le canal de mesure choisi est non influencé par le rayonnement solaire ($11 \mu\text{m}$ ou $3,7 \mu\text{m}$ de nuit). Si la mer rayonnait comme un corps noir et si le radiomètre était placé immédiatement au-dessus de sa surface on pourrait remonter, pour une mesure faite à la longueur d'onde λ , de l'énergie émise à la température par l'intermédiaire de la fonction de Planck

$$B(\lambda, T_M) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T_M}} - 1 \right)} \quad \text{W. m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

T_M : température de la mer
 h : constante de Planck
 c : vitesse de la lumière
 k : constante de Boltzman

I.3. Influence de l'émissivité de la mer

La mer en fait ne rayonne pas comme un corps noir. Dans l'infrarouge thermique son émissivité est de l'ordre de 0,98.



FIG' 22. — Orbite 478, secteur de 400×400 pixels du 31/7/79 à 06 h 30 UT.

En haut, canal 3 ($^{\circ}\text{C}$). En bas, canal 4 ($^{\circ}\text{C}$)
 24, 25 $24,00 < T < 24,50^{\circ}\text{C}$ pour la teinte de gris considérée. Il s'agit de températures radiométriques. Il y a $0,5^{\circ}\text{C}$ par teinte de gris

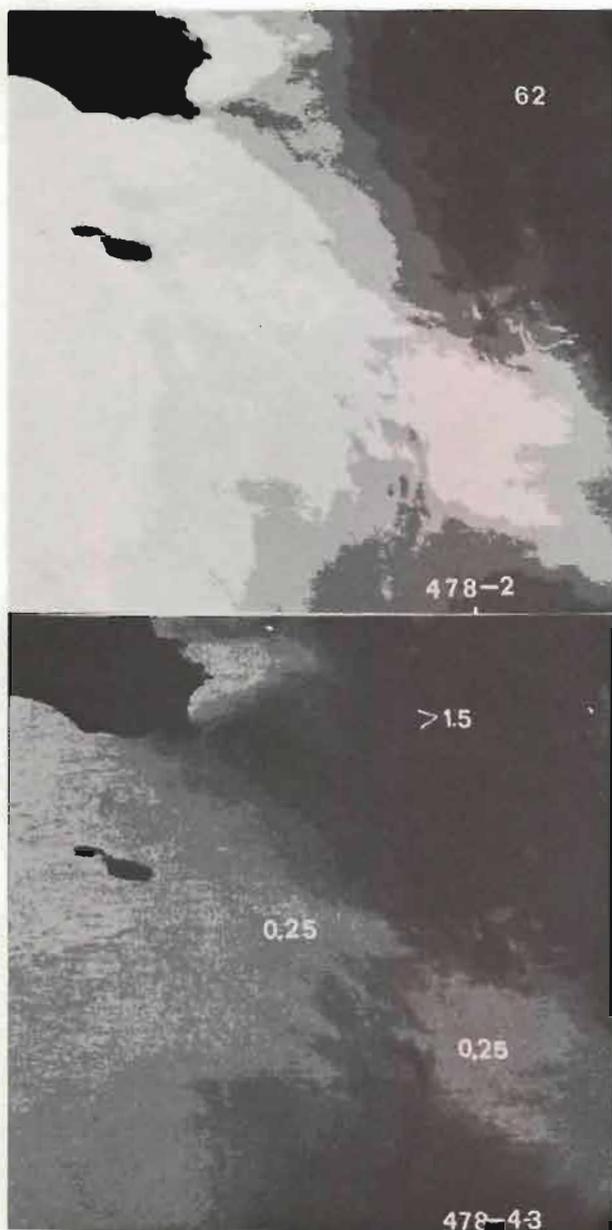


FIG. 23. — Orbite 478, secteur de 400 x 400 pixels
En haut, canal 2, (comptes numériques). Les zones les plus foncées sont les plus réfléchantes (influence du soleil maximale). En bas, différence entre le canal 4 et le canal 3 ($^{\circ}\text{C}$, températures radiométriques). Il y a $0,5^{\circ}\text{C}$ par teinte de gris.

Cela a deux conséquences :

- . la mer émet, pour une même température un rayonnement inférieur à celui d'un corps noir ;
- . la mer réfléchit une partie du rayonnement émis par le ciel à la longueur d'onde de la mesure et reçu sur sa surface.

L'effet de l'émissivité sur la température restituée est de l'ordre de $0,5^{\circ}\text{C}$ par ciel clair.

1.4. Le transfert radiatif mer-satellite

Dans le cas de l'exploitation des mesures AVHRR le radiomètre est situé non pas au voisinage immédiat de

la surface de la mer, mais à bord d'un satellite placé à plusieurs centaines de kilomètres au-dessus de celle-ci. Il en résulte que :

. le rayonnement subit au cours de son trajet atmosphérique une absorption due à divers constituants : CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4 et surtout dans les fenêtres atmosphériques où opère l'AVHRR ($11\ \mu\text{m}$ et $3,7\ \mu\text{m}$) à la vapeur d'eau H_2O . Il ressort donc atténué de l'atmosphère.

. les différentes couches de l'atmosphère émettent, elles aussi, à la longueur d'onde de la mesure une fraction de leur rayonnement propre qui peut être ensuite absorbée également par les autres couches . . .

L'effet du transfert radiatif (transmission du rayonnement et interactions atmosphériques) est de loin celui qui introduit l'erreur la plus grande dans la température restituée. Il peut varier entre 1°C pour une atmosphère polaire froide et sèche et 10°C pour une atmosphère humide de basses latitudes.

II. CORRECTION DE L'EFFET ATMOSPHERIQUE

Plusieurs méthodes ont été proposées pour corriger les températures radiométriques de l'effet de l'absorption atmosphérique : estimation climatologique de la correction à appliquer par zone et époque de l'année, calcul à partir des modèles de transmission atmosphérique et de radiosondages in situ et enfin méthode multispectrale s'appuyant sur les mesures faites simultanément pour plusieurs longueurs d'onde de l'infrarouge thermique. Des essais de correction utilisant des méthodes des deux derniers types ont été conduits à partir des mesures campagne *Origny*.

II.1. Utilisation de radiosondages

Ce travail a été effectué par T. Phulpin. Il a injecté dans un modèle de transmission atmosphérique (LOWTRAN 3 B) les données des radiosondages disponibles dans la région des mesures.

Les résultats sont présentés dans le tableau 2 pour 6 situations. Ils mettent en évidence que, à $3,7\ \mu\text{m}$ et de nuit, la correction calculée apparaît globalement satisfaisante. Par contre à $11\ \mu\text{m}$ la correction calculée présente une dispersion beaucoup plus grande que celle estimée à partir de la différence entre mesures in situ et mesures satellitaires. Cette dernière varie entre $2,5^{\circ}\text{C}$ et $3,2^{\circ}\text{C}$ tandis que la valeur calculée va de $1,4$ à $5,7^{\circ}\text{C}$. Cela serait dû à des faiblesses dans la modélisation de la transmission atmosphérique par LOWTRAN 3 B à $11\ \mu\text{m}$ et en particulier à une prise en compte incorrecte des effets du continuum de la vapeur d'eau.

Les résultats obtenus avec le canal $3,7\ \mu\text{m}$ de jour sont encourageants. Il faudrait cependant tester la méthode sur un grand nombre d'autres situations correspondant à des températures de la mer et à des caractéristiques atmosphériques différentes. Ceci s'est avéré

jusqu'à présent difficile car le canal 3,7 μm de TIROS N, très limité dès le lancement du satellite, n'a jamais pu être utilisé et celui de NOAA 6 est devenu également bruyé au bout de quelques mois de fonctionnement.

II.2. Utilisation de méthodes multispectrales

Une deuxième méthode de correction de l'effet atmosphérique consiste à appliquer un algorithme bispectral du type de ceux développés par Deschamps et Phulpin (1980) et Mac Clain (1980). Ces algorithmes exploitent les mesures faites simultanément par le radiomètre dans deux canaux infrarouges.

La formule choisie ici est celle de Mac Clain :

$$T_M = T_{11} + 1,42 \times (T_{3,7} - T_{11}) + 1,28 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Elle est très peu différente de celle proposée par Deschamps et Phulpin.

On voit dans la formule ci-dessus que le terme correctif est directement fonction de la différence des températures radiométriques mesurées à 3,7 μm et à 11 μm .

La figure 24 montre pour l'orbite 485 (orbite de nuit) la distribution des températures radiométriques dans le canal 4 (11 μm) et la différence point par point entre ces mesures et celles du canal 3 (3,7 μm). Cette différence est faiblement négative. Cela n'est pas en accord avec les valeurs prévues par les simulations qui ont servi à la construction de l'algorithme employé. La figure 25, réalisée par Mac Clain, montre que pour des valeurs d'absorption comme celles relevées sur le site ($\cong 3^\circ\text{C}$), l'écart $T_{3,7} - T_{11}$ devrait être nettement positif ($\cong 1^\circ\text{C}$). La figure 26 présente pour l'orbite 485, en haut, l'image après application de la correction et en bas le champ de cette correction (différence entre image corrigée et image à 11 μm). Les résultats sont décevants

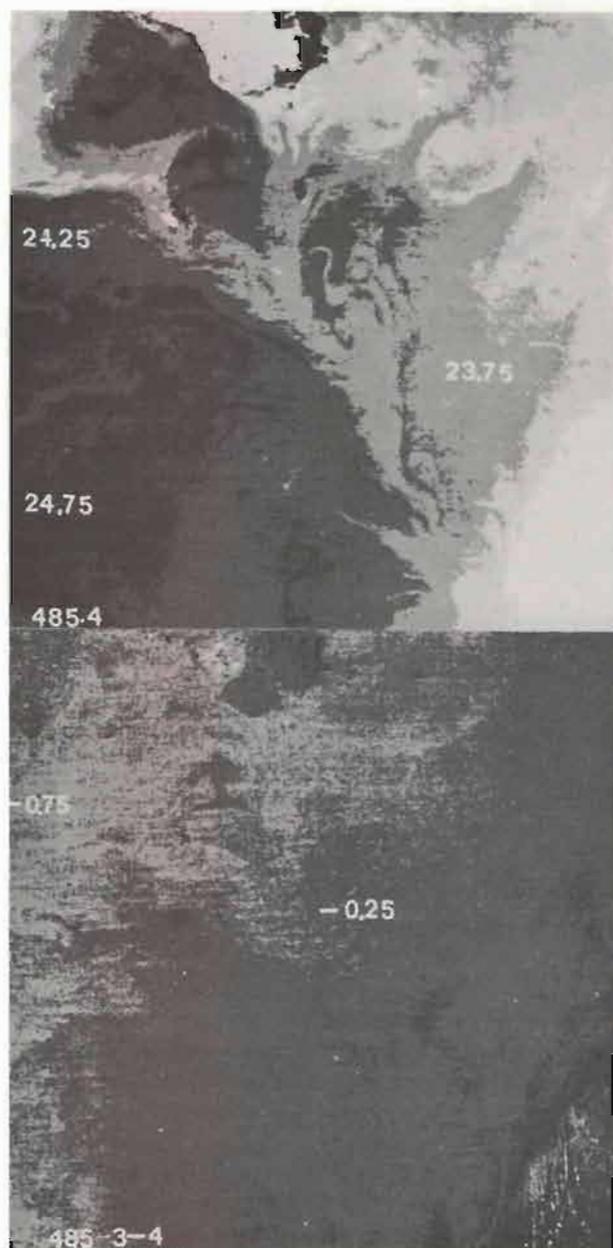


FIG. 24. — Orbite 485, secteur de 400 x 400 pixels en haut, canal 4 ($^\circ\text{C}$). En bas, différence entre canal 3 et canal 4 ($^\circ\text{C}$)

Tableau 2 — Evaluation de la correction atmosphérique (absorption + réflexion) à partir de radiosondages et modèle de transmission atmosphérique (T. Phulpin)

n° orbite	radiosondage	T_{IS3} ($^\circ\text{C}$)	T_{R3} ($^\circ\text{C}$)	T_{IS4} ($^\circ\text{C}$)	T_{R4} ($^\circ\text{C}$)
478	TRAPANI	3.1 \pm 0.2	2.4	2.7 \pm 0.3	1.4
485	TRAPANI			2.7 \pm 0.2	2.8
492	TRAPANI	2.8 \pm 0.2	3.1	2.5 \pm 0.2	2.7
499	TUNIS			3.1 \pm 0.3	5.1
513	TUNIS	2.9 \pm 0.5	2.8	3.2 \pm 0.4	5.7
513	TRAPANI	2.9 \pm 0.5	2.8	3.2 \pm 0.4	4.4

Ecart moyen

T_{IS3} : $T_{\text{in situ}} - T_{\text{radiomètre}} (3,7 \mu\text{m})$ calculé à partir des points de mesures (SIPPICAN) effectués à moins de 6 heures du passage du satellite.

T_{R3} : correction calculée pour le canal 3,7 μm

T_{IS4} : même paramètre que T_{IS3} , mais pour le canal 11 μm

T_{R4} : correction calculée pour le canal 11 μm

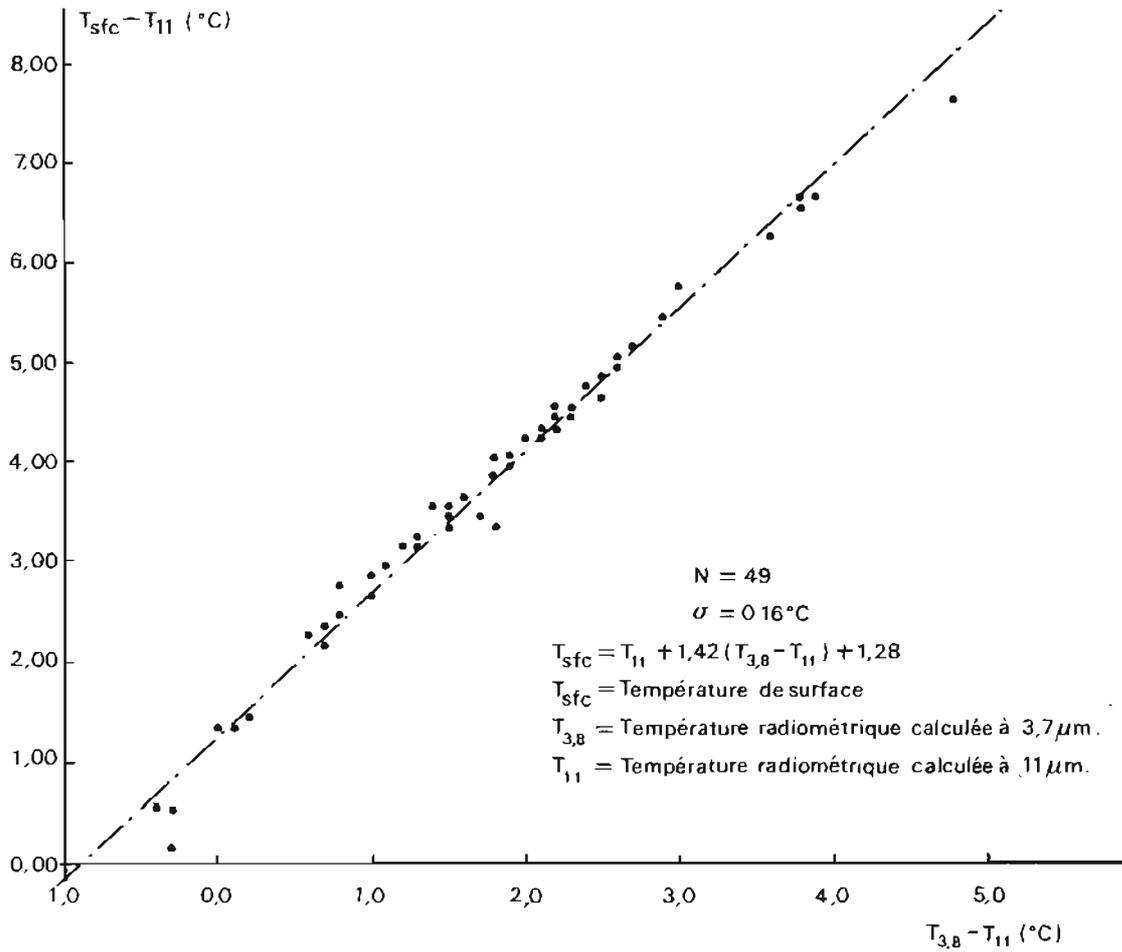


FIG. 25. — Représentation de l'absorption atmosphérique, en fonction de l'écart $T_{3.8} - T_{11}$, obtenue par une simulation (AVHRR-T(ROS N) utilisant des données de radiosondage et les modèles de transmission atmosphérique de Weinreb (Mac Clain, 1980)

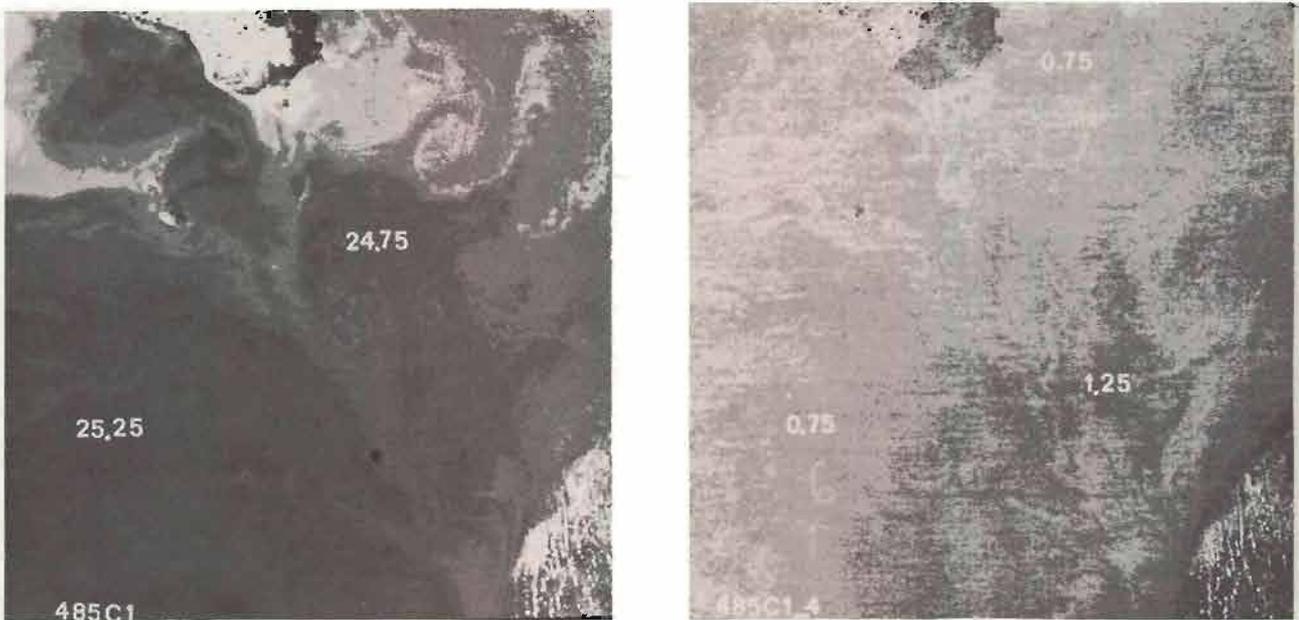


FIG. 26. — Orbite 485, secteur de 400×400 pixels
 En haut, régression $1,42 T_{3,7} - 0,42 T_{11} + 1,28$ (°C)
 En bas, différence entre la précédente et le canal 4 (°C)

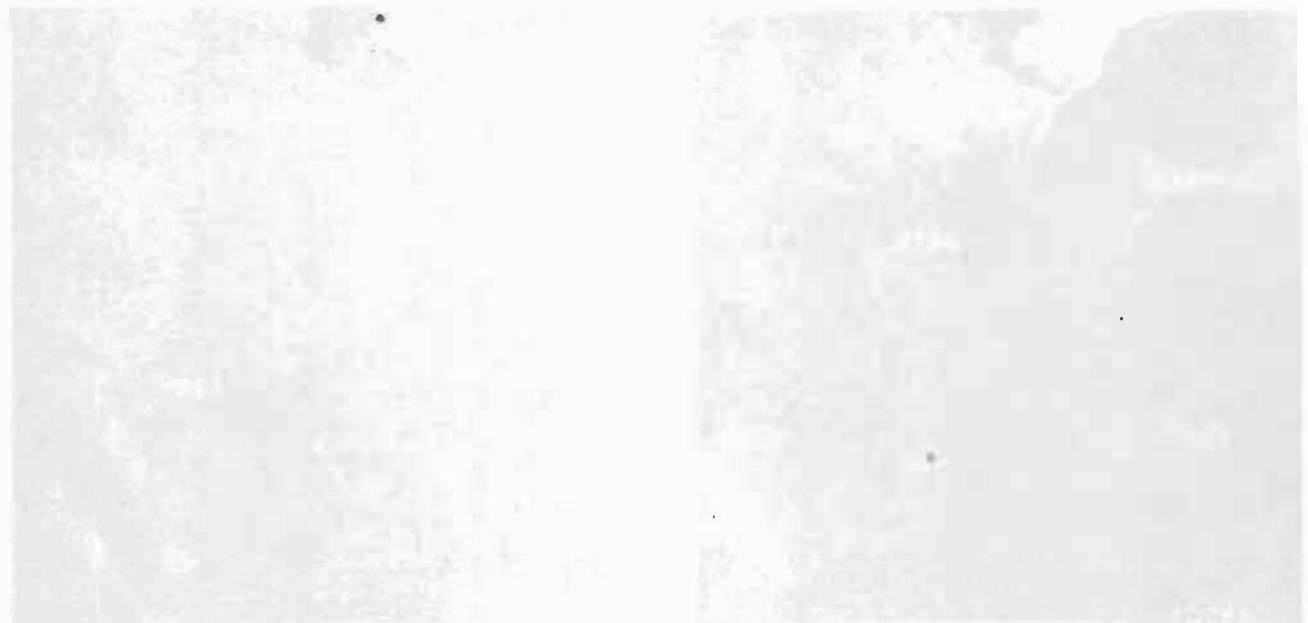
et même si on ajoutait aux températures un terme correctif supplémentaire de l'ordre de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ pour prendre en compte l'effet de réflexion non calculé par l'algorithme bispectral, les valeurs restituées resteraient inférieures de 1 à 1.5°C à celles mesurées in situ.

Les algorithmes bispectraux ont été établis à partir de simulations de l'effet atmosphérique conduites à l'aide de modèles de transmission atmosphérique, tel le LOWTRAN 3 B exploité également dans le paragraphe précédent. On a vu que de tels modèles pouvaient être imparfaits (mauvaise prise en compte du continuum de H_2O à $11\ \mu\text{m}$, mais aussi négligence des effets des aérosols à $3,7\ \mu\text{m}$ par exemple). Si donc, à l'échelle d'une exploitation statistique des températures satellitaires sur tout un océan, des chercheurs comme Mac Clain ont pu se déclarer satisfaits des résultats obtenus par l'application de ces algorithmes (écart quadratique

inférieur à 1°C), il ne semble pas que les résultats obtenus à une échelle fine (pixel par pixel) et avec des situations précises soient aussi probants.

III. CONCLUSION

La température de surface de la mer est donc difficile à obtenir avec une précision à partir des mesures satellitaires. Encore s'est-on limité à l'évocation des erreurs liées au trajet atmosphérique et à la réflexion solaire, les problèmes associés à la définition même d'une "température de surface" n'ayant pas été abordés. Ceci explique que pour l'exploitation de mesures satellitaires de la campagne *Origny* on ne se soit intéressé qu'à la signification des seuls gradients thermiques.



ANNEXE II

INSTABILITE BAROCLINE DU FRONT DE MALTE

I. OBSERVATIONS

Les observations satellitaires du front de Malte pendant la période allant du 31 juillet au 2 août 1979 (Fig. 27) mettent en évidence la présence de méandres et de structures tourbillonnaires au niveau de la partie orientale du système frontal. Les méandres, localisés au Nord, évoluent jusqu'à formation d'un tourbillon (Fig. 27-c du 1er août 1979 dans la partie Sud du système frontal où on note déjà le 31 juillet 1979 (Fig. 27a) la présence de tourbillons bien développés. Le 2 août 1979 (Fig. 27-d) la plupart des structures précédemment mentionnées ont disparu. La longueur d'onde moyenne des méandres observés est de 50 ± 10 km ; l'échelle des tourbillons varie entre 20 et 30 km.

Les mesures hydrologiques effectuées par l'*Origny* pendant cette période montrent clairement par ailleurs (Fig. 28) que les eaux de surface (0-50 m) sont nettement plus stratifiées que les eaux de sub-surface (50-250 m) : le gradient de densité atteint 0.06 kg/m^4 dans la couche superficielle, alors qu'au-delà de la profondeur de 50 m il ne vaut en moyenne que 0.002 kg/m^4 . L'océan dans la région du front de Malte peut donc être considéré comme un fluide à deux couches jusqu'au niveau de l'eau levantine intermédiaire : une couche supérieure d'épaisseur $H_1 = 50$ m, de fréquence de Brunt-Vaisala $N_1 = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ et de rayon interne de déformation $R_1 = N_1 H_1 / f = 14$ km (f est le paramètre de Coriolis à la latitude considérée : $0,9 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) ; une couche inférieure d'épaisseur $H_2 = 200$ m, de fréquence de Brunt-Vaisala $N_2 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et de rayon interne de déformation $R_2 = N_2 H_2 / f = 16$ km.

Les observations de courant rapportées par Johannessen (1976) (Fig. 29) indiquent de plus que les vitesses horizontales sont orientées approximativement Nord-Sud, c'est-à-dire dans la direction du front, et qu'il existe un gradient vertical de vitesse (shear) constant dans les eaux superficielles, de l'ordre de 10^{-3} s^{-1} (couche barocline). Des vitesses atteignant $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ sont rencontrées en surface.

Il apparaît, d'après ces données hydrologiques, que le phénomène mis en évidence sur les images satellitaires peut être examiné en termes d'instabilité barocline. Cette instabilité pourrait avoir été déclenchée par la présence du talus continental, perturbant l'écoulement moyen du fluide. On peut aussi avancer l'hypothèse d'une instabilité barocline induite par le vent. Cependant, pendant toute la période concernée (et les jours qui précédaient) le vent est resté faible (5 à 10 noeuds) ou nul.

2. MODELE D'INSTABILITE BAROCLINE

Compte tenu des caractéristiques du fluide, le modèle d'instabilité barocline développé par Tang (1975) est applicable. Dans ce modèle, on considère qu'entre la surface ($z = H_1$) et la limite inférieure du fluide ($z = -H_2$), le courant zonal moyen décroît de façon linéaire jusqu'à une profondeur intermédiaire ($z = 0$) depuis la valeur U jusque la valeur nulle. En-dessous de cette profondeur, la vitesse reste nulle (Fig. 30). La méthode consiste alors à rechercher des solutions aux équations du mouvement quand on introduit une perturbation de faible amplitude au profil de courant moyen. Le modèle de Tang a été utilisé avec succès par Gascard (1978) dans la région Nord-Baléares, où se forment les eaux profondes méditerranéennes et par Crépon et al. (1981) en mer Ligure, où les méandres se développent à l'interface entre l'eau centrale et le courant côtier.

Pour de petites perturbations, les équations de l'hydrodynamique s'écrivent, dans le cas de l'approximation quasi-géostrophique :

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \nabla^2 \psi' = f \frac{\delta w'}{\delta z} \quad (1-a)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \frac{\partial \psi'}{\partial x} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{N^2}{f} w' = 0 \quad (1-b)$$

où ψ' désigne la perturbation du potentiel de courant (stream function), w' celle de la vitesse verticale, N est la fréquence de Brunt-Vaisala (considérée constante), et \bar{u} est le courant zonal moyen dans la direction x . L'approximation quasi-géostrophique est justifiée ici, car le nombre de Rossby R_0 associé aux méandres de longueur d'onde $L = 50$ km observés est de l'ordre de 0.1 ($R_0 = U/fL = 0,5 \text{ m.s}^{-1} / 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \cdot 50 \cdot 10^3 \text{ m}$).

Supposons que les perturbations ψ' et w' soient de la forme :

$$\psi' = R_e \psi e^{i k(x-ct)} \quad (2-a)$$

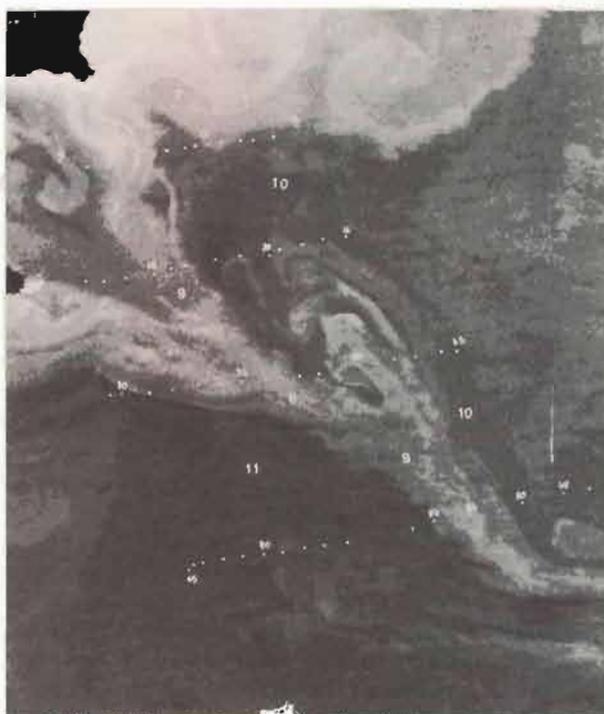
$$w' = R_e w e^{i k(x-ct)} \quad (2-b)$$

où $\psi(z)$ et $w(z)$ sont des fonctions complexes, $k = 2\pi/L$ est le nombre d'onde dans la direction x , c est la vitesse de phase et R_e désigne la partie réelle des expressions.

Cette forme périodique pour ψ' et w' n'impose aucune perte de généralité, car chaque nombre d'onde peut être sommé (intégrale de Fourier) pour représenter la perturbation réelle.



a) 31/7/79, 19h00 UT.



b) 01/8/79, 06h15 UT



c) 01/8/79, 18h30 UT.



d) 2/8/79, 18h15 UT

FIG. 27 — Evolution de la signature thermique en surface du front de Malte pendant la période allant du 31/7/79 au 2/8/79. Données du radiomètre AVHRR des satellites TIROS-N et NOAA-6. Les teintes les plus sombres correspondent aux températures les plus élevées 0.25° C par niveau de gris.

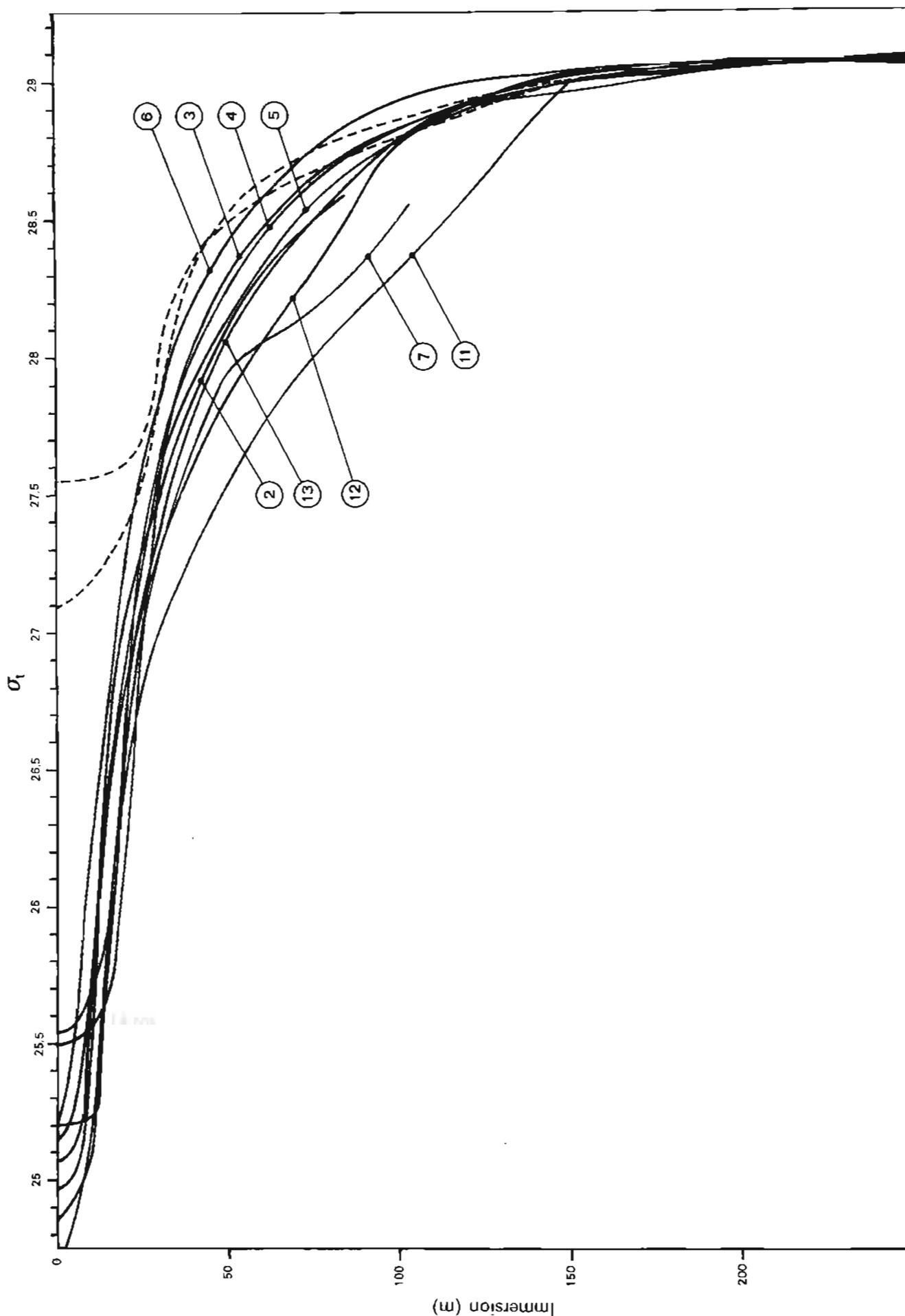


FIG. 28. — Profils verticaux de densité au niveau du front de Malte, d'après les mesures effectuées par Y'Origny (31/7/79-3/8/79). En traits traités ont été reportées les observations de JOHANNESSEN (1976).

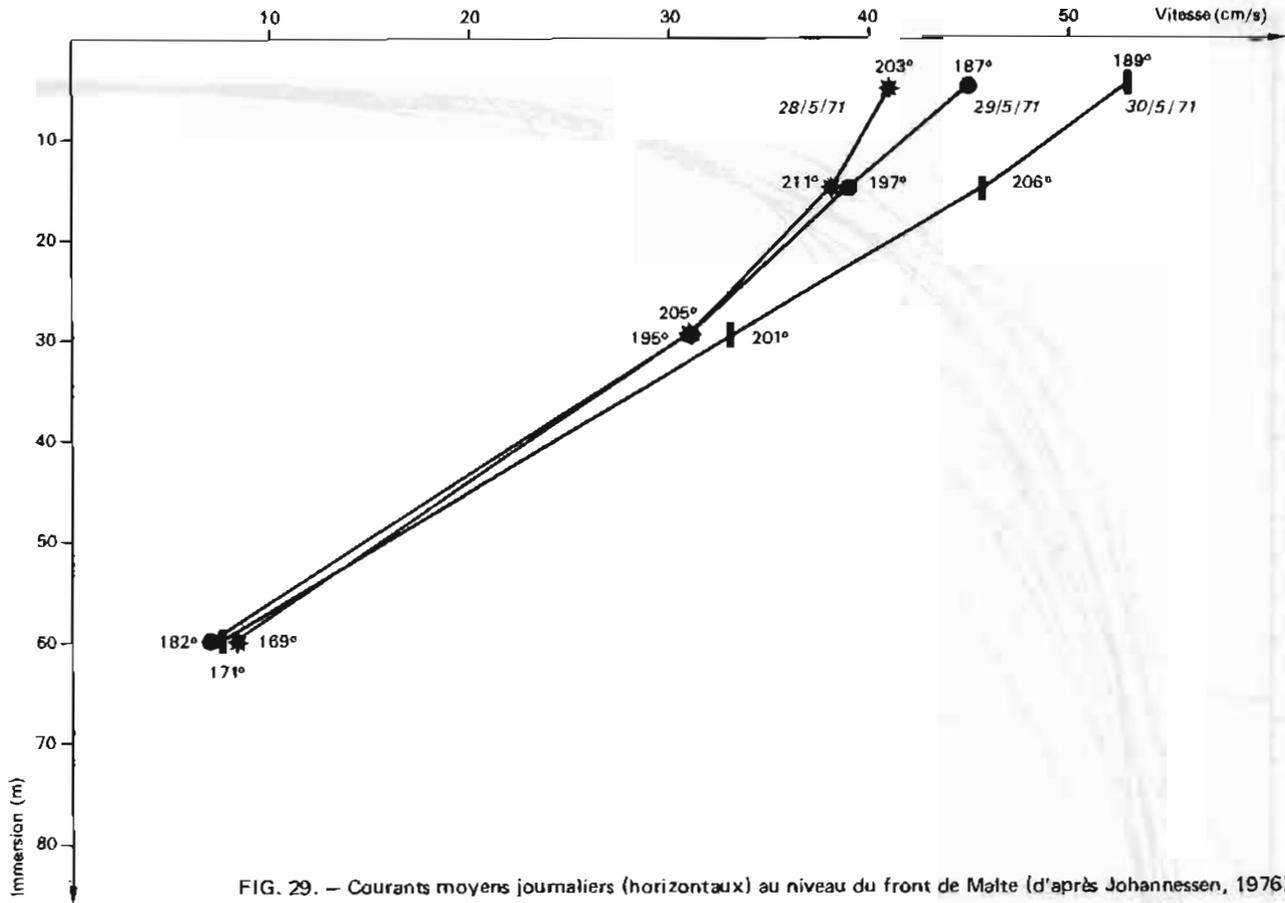


FIG. 29. — Courants moyens journaliers (horizontaux) au niveau du front de Malte (d'après Johannessen, 1976).

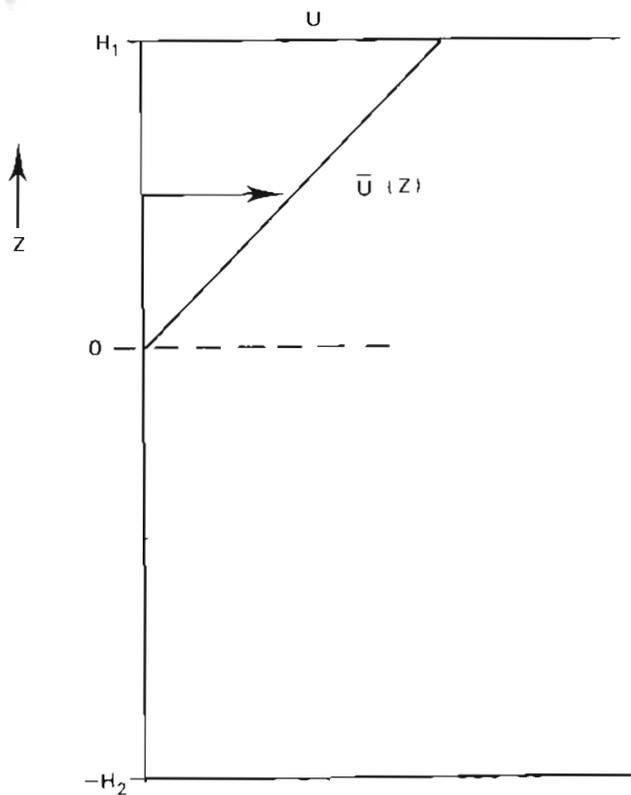


FIG. 30. — Représentation schématique du profil de courant utilisé dans le modèle d'instabilité barocline (d'après Tang, 1975).

Les équations (1) sont appliquées à chaque couche. La solution générale est :

$$\psi_1 = A_1 \exp(K_1 z/H_1) + B_1 \exp(-K_1 z/H_1)$$

dans la couche supérieure,

$$\psi_2 = A_2 \exp(K_2 z/H_2) + B_2 \exp(-K_2 z/H_2)$$

dans la couche inférieure avec

$$K_1 = k N_1 H_1 / f$$

$$K_2 = k N_2 H_2 / f$$

Les conditions aux limites sont que la vitesse verticale s'annule à la surface et au bas de la couche inférieure et qu'il y a continuité du mouvement à l'interface. Elles s'expriment mathématiquement sous la forme :

1) pour $z = H_1$

$$(U - c) \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{U}{H_1} \psi_1 = 0$$

2) pour $z = -H_2$

$$\frac{\partial \psi_2}{\partial z} = 0$$

3) pour $z = 0$

$$\psi_1 = \psi_2$$

$$c \frac{\partial \psi_1}{\partial z} + \frac{U}{H} \psi_1 = M^2 \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \text{ où } M = N_1/N_2$$

En remplaçant dans ces équations ψ_1 et ψ_2 par leurs expressions, on obtient pour c (Tang, 1975) :

$$c = \frac{U}{2} \left[1 - \frac{MK \operatorname{th} K_1}{K_1 (1 + MK)} \right] \pm \frac{U}{2} \frac{K_1 - \operatorname{th} K_1}{K_1 (1 + MK)} \left[(MK + a)(MK + b) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

avec

$$K = \operatorname{th} K_2 / \operatorname{th} K_1$$

$$a = 2 [K_1/2 - \operatorname{th} (K_1/2)] / (K_1 - \operatorname{th} K_1)$$

$$b = 2 [K_1/2 - \operatorname{coth} (K_1/2)] / (K_1 - \operatorname{th} K_1)$$

3. STRUCTURE HORIZONTALE DES MEANDRES BAROCLINES

Dans l'expression (3) donnant la vitesse de phase, le terme $MK + a$ est toujours positif car a est toujours positif ($K_1 > \operatorname{th} K_1$). Par contre le terme $MK + b$ peut être négatif. La vitesse de phase peut donc avoir une partie imaginaire non nulle et s'écrire sous la forme :

$$c = c_r + i c_i$$

où c_r et c_i désignent respectivement la partie réelle et imaginaire.

Les solutions de la forme (2) obtenues avec $c_i > 0$ sont celles auxquelles on s'intéresse, car la perturbation croîtra alors de façon exponentielle :

$$\psi' = e^{k c_i t} R_e \psi e^{i k (c_r - x t)}$$

$$w' = e^{k c_i t} R_e w e^{i k (c_r - x t)}$$

Dans ces expressions, le nombre d'onde k est réel car les solutions ψ' et w' doivent rester périodiques dans la direction x . Le terme $k c_i$ est le taux de croissance de la perturbation.

La longueur d'onde de coupure L_c séparant les modes stables des modes instables correspond donc à $c_i = 0$, c'est-à-dire $MK + b = 0$. Avec les valeurs des paramètres physiques du fluide indiquées au début de l'étude, on obtient pour L_c la valeur de 37 km.

Le taux de croissance $k c_i$ est donné sur la figure 31. Il atteint un maximum significatif ($1/1.1 \text{ jour}^{-1}$) pour $k_0 = 0.114 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, indiquant que les déformations baroclines doivent être bien représentées par ce mode le plus instable. La longueur d'onde L_0 associée à ce mode est donnée par :

$$L_0 = \frac{2\pi}{k_0} = 55 \text{ km}$$

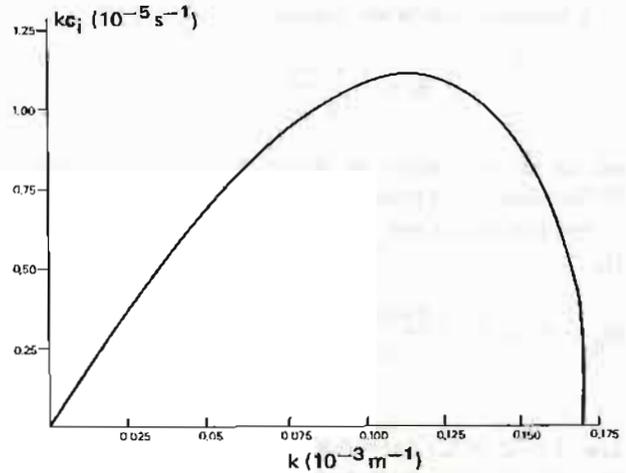


FIG. 31. — Taux de croissance $k c_i$ de la perturbation en fonction du nombre d'onde k .

Cette valeur est en bon accord avec celle de $50 \pm 10 \text{ km}$ observée sur les images satellitaires.

La période s'écrit :

$$T = \frac{2\pi}{k_0 c_1} = 6,5 \text{ jours}$$

Elle n'a pu être observée, l'étude n'ayant porté que sur une période de 3 jours.

Bien que la théorie indique une structure périodique pour les déformations baroclines (ce qu'on observe effectivement sur la partie Nord du front de Malte), au bout d'un temps suffisamment long la perturbation devient importante et les termes non linéaires ignorés dans les équations de l'hydrodynamique utilisées ne peuvent plus être négligés.

La déformation perd alors son caractère périodique dans l'espace et il apparaît des structures tourbillonnaires.

4. TRANSFERT DE CHALEUR A TRAVERS LA ZONE FRONTALE PAR LES TOURBILLONS BAROCLINES

Les tourbillons transportent de l'énergie et en particulier de la chaleur à travers la zone frontale. La quantité de chaleur Q_E transportée peut être estimée en utilisant, par analogie, la théorie développée par Green (1970) pour les tourbillons atmosphériques à grande échelle (3000 km).

Q_E s'exprime alors par :

$$Q_E = \bar{\rho} C_p \alpha W \Delta T \quad (\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

où W est une vitesse thermodynamique caractérisant la dissipation d'énergie potentielle à travers la zone frontale, $\bar{\rho}$ est la densité moyenne du fluide, C_p sa capacité calorifique et ΔT est le gradient de température au niveau du front. α est un paramètre sans dimension qui dépend du rapport des constantes de temps d'amplification et de dissipation des tourbillons. En estimant ce rapport à 1/5 dans le cas de la troposphère, Green prend pour α la valeur 0.0016.

L'expression de W est donnée par :

$$W = \left(\frac{g}{12} \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} D \right)^{1/2}$$

où $\Delta\rho$ est le gradient de densité au niveau du front et D l'épaisseur de la couche barocline.

En appliquant ces formules à notre cas il vient pour Q_E :

$$Q_E = C_p \alpha \Delta T \left(\frac{g \bar{\rho} \Delta\rho D}{12} \right)^{1/2} \\ \sim 0.025 \text{ (cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

avec $T = 0.75^\circ\text{C}$, $\Delta\rho = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $D = 50 \text{ m}$ (d'après les mesures hydrologiques effectuées par l'*Origny*) et en prenant pour α la valeur donnée par Green pour la troposphère, ce que suggèrent les constantes de temps déterminées au paragraphe précédent.

A partir de Q_E on peut obtenir un ordre de grandeur du coefficient de diffusivité thermique turbulent K_E dû aux tourbillons :

$$K_E = \frac{Q_E}{\rho C_p \Delta T} L \sim 0.9 \cdot 10^5 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$$

avec $L = 25 \text{ km}$, soit environ 10^{10} fois plus important que le coefficient de diffusivité thermique moléculaire.

La valeur Q_E obtenue, nettement supérieure au flux solaire net en surface à cette époque (juillet-août) dans la région considérée ($\sim 0.005 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), et la valeur élevée de K_E mettent en évidence l'importance au niveau régional des échanges de chaleur à travers la zone frontale. Cette importance a déjà été mentionnée par Pingree (1979) pour les tourbillons baroclines observés en bordure des fronts de marée en mer Celtique, qui jouent un rôle prépondérant dans le mécanisme d'érosion de la thermocline en fin de période estivale.

5. CONCLUSION

L'évolution de la signature thermique en surface du front de Malte pendant la période de mesures de l'*Origny* (du 31 juillet au 3 août 1979) a été étudiée à partir de l'imagerie fournie par le radiomètre AVHRR des satellites opérationnels de la NOAA (NOAA 6, TIROS N). Les images ont mis en évidence la présence de méandres et de tourbillons se développant dans la partie Nord et en bordure orientale du système frontal. La longueur d'onde caractéristique des méandres est de $50 \pm 10 \text{ km}$, l'échelle des tourbillons varie entre 20 et 30 km.

Les mesures hydrologiques effectuées par l'*Origny* et les mesures de courant rapportées par Johannessen (1976) ont montré que le phénomène peut être interprété en termes d'instabilité barocline. La longueur d'onde prévue par la théorie (55 km) est en bon accord avec l'observation satellitaire.

Plusieurs auteurs ont observé à partir des mesures hydrologiques (*in situ* et par avion) cette structure ondulée

du front de Malte avec des déformations à des échelles typiques de 10 km (Woods, 1972) et 20 km (Briscoe et al., 1974 ; Johannessen, 1976). Woods considère que les déformations sont associées à un déplacement d'ensemble du système frontal. Il est probable cependant que ces observations correspondent au phénomène d'instabilité étudié ici avec des valeurs différentes pour les paramètres physiques du fluide.

Les estimations du transfert de chaleur à travers la zone frontale des tourbillons baroclines ($\sim 0.025 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) suggèrent que ceux-ci jouent un rôle non négligeable dans la climatologie de la région sicilo-maltese (redistribution de la chaleur, de la salinité et des sels nutritifs dans les régions adjacentes au front).

Ces résultats illustrent l'intérêt de l'observation satellitaire dans l'étude de la dynamique océanique ; grâce à son caractère répétitif, la vision globale et quasi instantanée qu'elle permet et bien que l'information fournie ne soit qu'une signature en surface des phénomènes, des quantités associées à la propagation d'un phénomène d'onde dans l'océan ont pu être déterminées.

BIBLIOGRAPHIE

- BRISCOE M.G., JOHANNESSEN O.M., VINCENZI S. (1974). — The Maltese Oceanic front : a surface description by ship and aircraft. *Deep Sea Res.*, 21, 247-262.
- CREPON M., WALD L., MONJET J.M. (1981). — Low frequencies waves in the Ligurian Sea during December 1977. A paraître dans *J. Geophys. Res.*
- DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T. (1980). — Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3,7, 11 and 12 μm . *Boundary layer Meteorology*, Vol. 18, pp. 131-143.
- GASCARD J.C. (1978). — Mediterranean deep water formation. Baroclinic instability and oceanic eddies. *Oceanol. Acta*, 1, 3-315-330.
- GREEN J.S.A. (1970). — Transfer properties of the large scale eddies and the general circulation of the atmosphere. *Quart. J.R. Met. Soc.*, 96, 157-185.
- JOHANNESSEN O.M., GOOD D., SMALLENBURGER C. (1977). — Observation of an Oceanic front in the Ionian Sea during early winter 1970. *J. Geophys. Res.*, 82, 9, 1381-1391.
- JOHANNESSEN O.M. (1976). — The Maltese oceanic front during spring. *Sacl. Mem.*, SM-28, Saclant ASW center, Italie.
- MAC CLAIN E.P. (1981). — Multiple atmospheric window techniques for satellite derived sea surface temperatures. COSPAR/SCOR/IUCRM Symposium, Venice, May.
- PHULPIN T. (1978). — Utilisation de la radiométrie infrarouge multispectrale pour la détermination de la température de surface. Thèse de Docteur de Spécialités. Université des Sciences et Techniques de Lille, 7 novembre.
- PINGREE R.D. (1979). — Baroclinic eddies bordering the Celtic Sea in late summer. *J. Mar. Biol. Ass. UK*, 59, 689-698.
- TANG C.M. (1975). — Baroclinic instability of stratified shear flows in the ocean and the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 80, 9, 1168-1175.
- WOODS J.D., WATSON N.R. (1970). — Measurement of thermocline fronts from the air. *J. Und Science and Techn.*, 2, 6, 90-99.
- WOODS J.D. (1972). — The structure of fronts in the seasonal thermocline. *Sacl. Proc.* n° 7, Saclant ASW center, Italie.

DEUXIÈME PARTIE



LES VEDETTES HYDROGRAPHIQUES EN SERVICE EN 1981

par

M. Patrick SOUQUIÈRE

Ingénieur principal de l'Armement (hydrographe)
Directeur de la Mission Océanographique du Pacifique

1. — INTRODUCTION

Les bâtiments du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) ont traditionnellement été équipés avec des vedettes hydrographiques dérivées directement d'embarcations existantes.

C'est ainsi que l'ancienne vedette hydrographique de 8 mètres (VH8), conçue à la fin des années cinquante, était une copie à peine modifiée des vedettes d'officiers ou de commandant, en service sur les grands bâtiments de la Marine Nationale.

Au début des années soixante dix, lorsque le renouvellement d'une partie des bâtiments hydrographiques en service a justifié l'étude d'une nouvelle vedette hydrographique, le SHOM s'est naturellement adressé à la Direction Technique des Constructions Navales (DTCN) et plus particulièrement à la Direction des Constructions et Armes Navales (DCAN) de Cherbourg, spécialisée dans la fabrication des embarcations.

Une construction en matière plastique s'est tout de suite imposée. Le petit nombre d'exemplaires à construire (*) ne paraissant pas justifier l'étude d'une coque originale et la confection du moule correspondant, le choix s'est rapidement porté sur la vedette de drome de 9 mètres (VD9) dont un prototype était en achèvement. L'architecture générale étant imposée, le SHOM a pu se contenter de définir les grandes lignes de l'aménagement intérieur ainsi que les équipements spécifiques.

C'est en 1975 seulement que fut livré un prototype de vedette hydrographique de 9 mètres (VH9) qui n'était en fait qu'une extrapolation de l'ancienne vedette de 8 mètres, plus marine, plus rapide et offrant un volume habitable plus important bien que ridiculement petit rapporté aux dimensions de la vedette.

Les essais de cette vedette prototype permirent d'apprécier la tenue à la mer de la nouvelle embarcation, ainsi que sa vitesse de transit élevée (de l'ordre de 11 nœuds). Les critiques déjà faites au sujet de la séparation existant, sur les anciennes VH8, entre le

barreur et le chef d'équipe, furent bien entendu renouvelées; des critiques plus graves, concernant la fragilité de l'adaptation du gouvernail Kitchen sur la coque de la VD9, l'exposition aux intempéries du barreur et de ses instruments de contrôle, la fermeté de la commande de barre, ont retenu l'attention du chantier constructeur qui a effectué des modifications importantes donnant à la vedette son aspect définitif.

En 1978, le remplacement des vedettes de 8 mètres en service sur les bâtiments hydrographiques de 2ème classe fut à son tour étudié. La VH9, destinée aux bâtiments hydrographiques de 1ère classe, ne put être retenue en raison de son poids élevé et de ses dimensions qui auraient imposé de très importantes modifications sur les bâtiments eux-mêmes.

La DCAN de Cherbourg étant dans l'incapacité de reconstruire des vedettes de 8 mètres à coque en bois, il était nécessaire de définir une nouvelle vedette hydrographique de 8 mètres dont la coque serait en matière plastique (VH8 MP). Outre les bâtiments hydrographiques de 2ème classe, cette vedette équiperait aussi la Recherche; sept vedettes de ce type étaient donc à construire (**).

L'étude et la réalisation d'une vedette prototype furent tout de suite écartées car cette procédure retardait de deux ans environ la livraison de la première vedette "de série".

Mettant à profit l'expérience acquise dans la transformation des VD9 en VH9, la DCAN de Cherbourg étudia une coque originale, avec des formes ventrues à l'avant et une hélice sous voûte à l'arrière, assurant ainsi une bonne protection des coquilles du gouvernail Kitchen en cas de choc sur un haut-fond. Une transmission classique "en ligne" fut retenue en raison de sa robustesse, conduisant à placer le groupe propulseur à l'avant de la vedette de façon à dégager un important volume utilisable dans la partie centrale de la coque, conformément aux souhaits exprimés par les utilisateurs.

Entrée en service pratiquement en même temps que la VH9, la VH8 MP est très vraisemblablement la première des vedettes hydrographiques utilisées sur un bâtiment

(*) Trois pour le D'Entrecasteaux, deux pour l'Espérance et deux pour l'Estafette

(**) Trois pour la Recherche, deux pour l'Astralabe et deux pour la Boussole.

du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine à avoir été étudiée et construite, en fonction de ses missions, sur des spécifications du SHOM.

2. — LA VELETTE HYDROGRAPHIQUE DE 9 METRES

2.1. — Caractéristiques techniques

Longueur hors tout : 9,8 mètres

Largeur hors tout : 2,8 mètres

Tirant d'eau : 1,1 mètres

Poids lège : 5,6 tonnes (7,0 tonnes en charge)

Moteur : Baudouin type DF 6SM ; diésel, six cylindres en V à 90°, 156 CV à 2 800 t/mn.

Propulsion : Arbre unique avec inverseur réducteur à commande hydraulique entraînant une hélice à trois pales fixes de 0,60 mètre de diamètre. Gouvernail type Kitchen à commandes hydrauliques séparées pour l'ouverture et l'orientation des coquilles.

Coque : Complexe Verre Résine (CVR) avec défense en caoutchouc Klèber ceinturant l'embarcation. Deux pièces métalliques fixées de part et d'autre de la quille sur l'avant de l'hélice jouent un rôle de "pare-chocs" au profit des coquilles du gouvernail.



VH9. — En sondage avec Trident dans le lagon de l'île de la Surprise (Nouvelle Calédonie)



VH9. — En transit, en rade de Brest

Alimentation électrique : 24 V continu fourni par 2 jeux de batteries indépendants de 200 ampères heure chacun. Un commutateur à trois positions permet de charger l'un et l'autre séparément ou les deux jeux de batterie simultanément à l'aide d'un alternateur attelé de 1 500 Watts. Ce commutateur fonctionne sans micro-coupures et permet d'alimenter directement, à partir de l'un ou l'autre des deux jeux de batteries (circuit pur et circuit normal), les équipements électriques embarqués.

Combustible : 570 litres de gas-oil (2 x 285)

2.2. — Performances

Vitesse : 10,8 nœuds à 2 800 t/mn
6,5 nœuds à 1 400 t/mn

Autonomie : 160 milles à 2 800 t/mn
550 milles à 1 400 t/mn

	allure (t/mn)	durée (s)	diamètre (m)
giration complète :	2 800	30	20
(Bd ou Tb toute)	1 400	40	15
		durée (s)	distance (m)
Arrêt d'urgence :	avec Kitchen	6	8
(2 800 t/mn)	avec inverseur	7	10

2.3. — Equipements

Sondeur acoustique (vertical) : Atlas type Deso 10, bifrèquence (30 et 210 kHz), portée 280 mètres.

Localisation radioélectrique (au choix) : Interrogateur Trident III (Thomson/CSF) ou récepteur Toran type P à 3 lieux (Sercel). A ces matériels peuvent être associés des enregistreurs graphiques, des imprimantes, des indicateurs de profil, ou même une table traçante (cas du Toran).

Sondeur latéral (remorqué) : EG et G Mark IB

Radio : E/R VHF TRVP 13 (Thomson/CSF)

Autres équipements : — Potence orientable amovible sur l'arrière (CMU 250 kg)

— Touret amovible pour le câble de remorquage du sondeur latéral.

— Touret de drague amovible avec chaumards à rouleaux amovibles sur chaque bord.

— Fixations pour mât amovible à l'aplomb des transducteurs du sondeur vertical. (mât à viser ou mât support d'antenne).

— Feu clignotant rouge en tête de mât.

— Fontaines filetées dans le cockpit et sur la plage arrière permettant la fixation de certains équipements amovibles.

2.4. — Aménagements

La vedette comprend deux compartiments :

Dans le compartiment avant se trouvent :

— Le poste de pilotage en position surélevée au-dessus du capot du moteur, à partir duquel on a une vue très dégagée sur l'avant comme sur l'arrière de la vedette.

— L'ensemble moteur et transmission, ainsi que les batteries disposées sous le plancher de part et d'autre du moteur.

— Un grand nombre de tableaux électriques, boîtiers de raccordement et diverses prises qui tapissent les cloisons de façon disparate.

Dans la cabine arrière, réservée à l'équipement hydrographique, sont disposés :

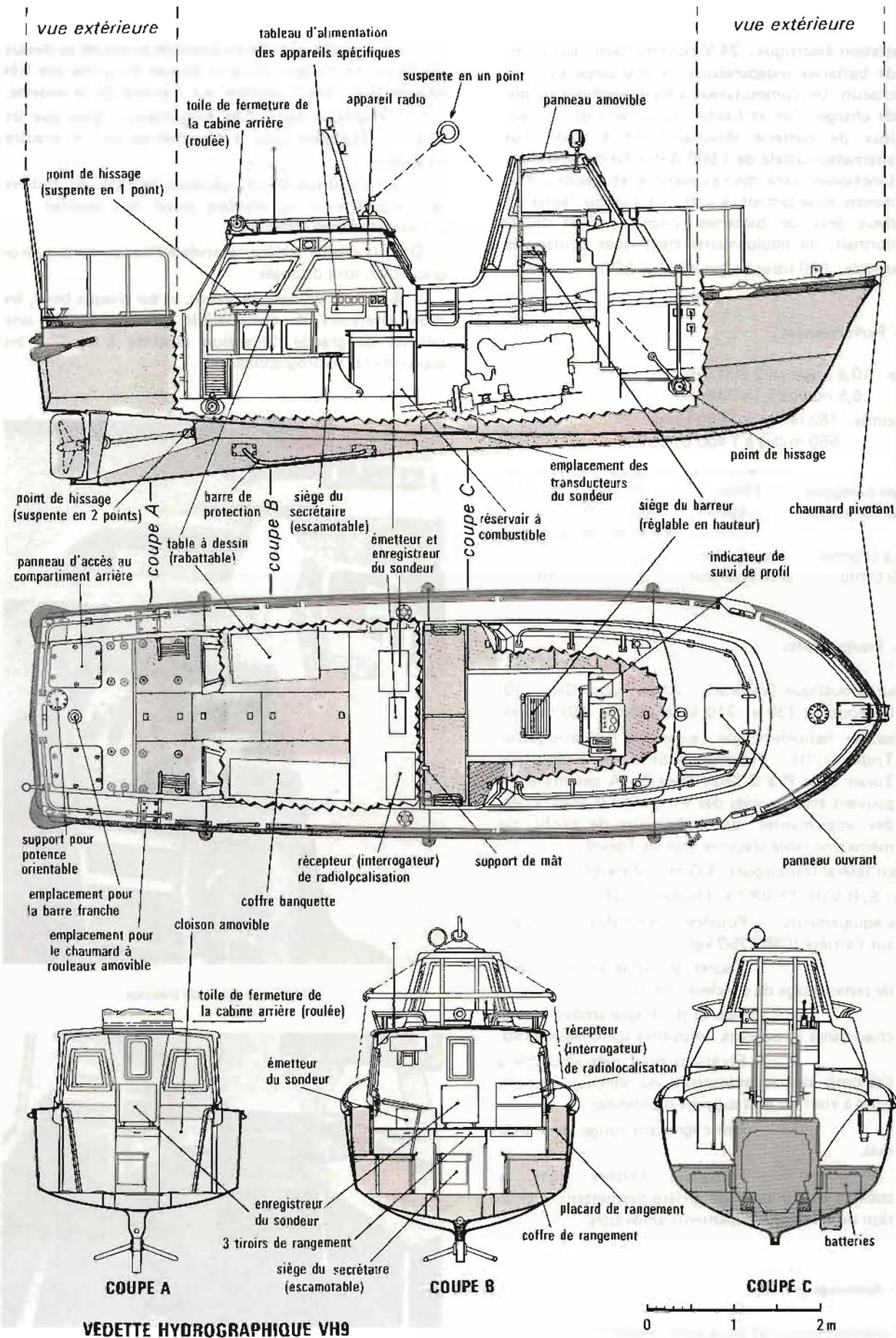
— A l'avant du compartiment, et sur chaque bord, les deux réservoirs de combustible qui soutiennent une tablette de grande dimension destinée à recevoir les équipements hydrographiques.

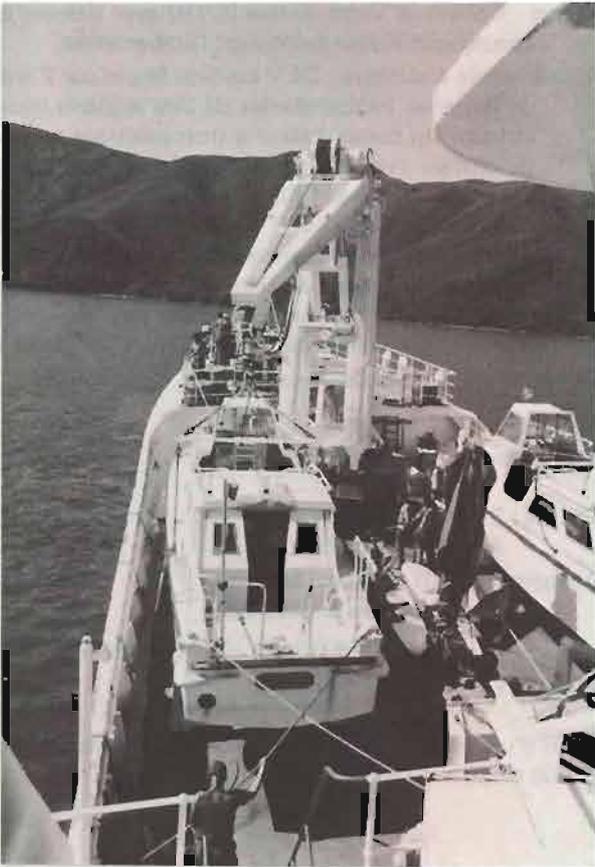


VH9. — Le poste de pilotage



VH9. — Vue de la cabine arrière.





Mise à l'eau d'une VH9 de l'Estafette

— Deux coffres banquette sur chaque bord, dans l'axe du compartiment, l'un deux étant surmonté d'une table à carte rabattable.

Deux demi cloisons amovibles ferment en partie ce compartiment et permettent, une fois enlevées, d'agrandir le cockpit arrière pour les opérations de dragage hydrographique.

Le peak avant contient une ligne de mouillage qui doit être disposée dans le compartiment contigu avant d'être utilisée; un caisson à l'extrême arrière abrite l'appareil à gouverner et peut éventuellement servir de plate-forme pour les observations au cercle hydrographique.

Aucun équipement particulier n'a été prévu pour la vie à bord de la vedette. L'équipage, composé normalement de quatre hommes, emporte des repas froids lorsque le programme des travaux prévus ne permet pas d'envisager un retour sur le bâtiment de soutien au moment du déjeuner.

3. — LA VEDETTE HYDROGRAPHIQUE DE 8 METRES (Matière plastique)

3.1. — Caractéristiques techniques

Longueur hors tout : 8,8 mètres

Largeur hors tout : 2,75 mètres

Tirant d'eau : 0,9 mètre

Poids lège : 4,4 tonnes (5,5 tonnes en charge)

Moteur : Couach type RC 80 D; diesel quatre cylindres en ligne, 65 CV à 2 500 t/mn.

Propulsion : Arbre unique avec inverseur réducteur à commande hydraulique entraînant une hélice à trois pales fixes de 0,60 mètre de diamètre. Gouvernail type Kitchen à commandes hydrauliques séparées pour l'ouverture et l'orientation des coquilles.

Coque : Complexe Verre Résine (CVR) avec défense en caoutchouc Kléber ceinturant l'embarcation.

Alimentation électrique : 24 V continu fourni par 2 jeux de batteries indépendantes de 200 ampères heure chacun. Un commutateur à trois positions permet de charger l'un et l'autre séparément ou les deux jeux de batteries simultanément à l'aide d'un alternateur attelé de 1 500 Watts. Ce commutateur fonctionne sans micro-coupures et permet d'alimenter directement à partir de l'un ou l'autre des deux jeux de batteries (circuit pur et circuit normal), les équipements électriques embarqués.

Combustible : 250 litres de gas-oil (2 x 125).

3.2. — Performances

Vitesse : 8 nœuds à 2 500 t/mn

4,9 nœuds à 1 250 t/mn

Autonomie : 120 milles à 2 500 t/mn

400 milles à 1 250 t/mn

Giration complète :	allure (t/mn)	durée (s)	diamètre (m)
(Bd ou Tb toute)	2 500	25	10
	1 250	45	10

Arrêt d'urgence :		durée (s)	distance (m)
(2 500 t/mn)	avec Kitchen	8	12
	avec inverseur	8	10

3.3. — Equipements

Sondeur acoustique (vertical) : Atlas type Deso 10, bifréquence (30 et 210 kHz) portée 280 mètres.

Localisation radioélectrique (au choix) : Interrogateur Trident III (Thomson/CSF) ou récepteur Toran type P à 3 lieux (Sercel). A ces matériels peuvent être associés des enregistreurs graphiques, des imprimantes, des indicateurs de profil, ou même une table traçante (cas du Toran).

Sondeur latéral (remorqué) : EG et G Mark IB.



VHB. -- En sondage devant Vala (Nouvelle Calédonie)

Radio : E/R VHF TRVP 13 (Thomson/CSF).

Autres équipements : — Touret amovible pour le câble de remorquage du sondeur latéral.

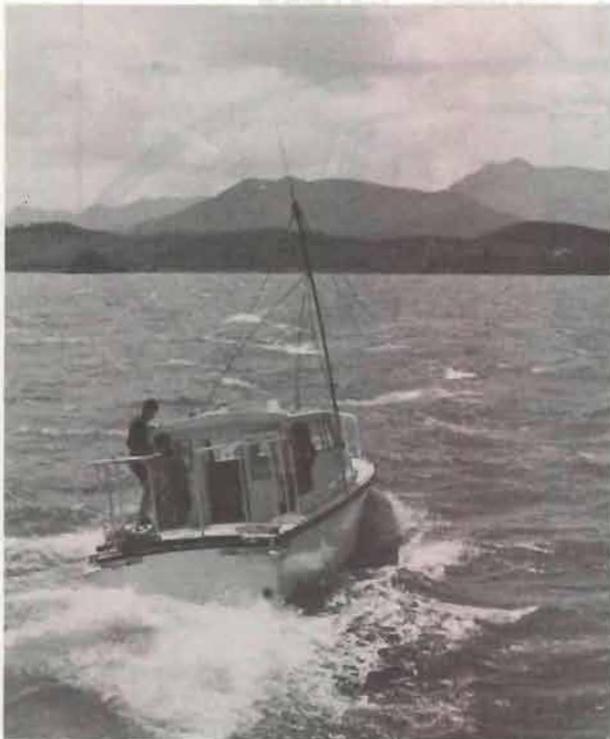
— Touret de drague amovible avec chaumards à rouleaux amovibles sur chaque bord.

— Fixations pour mat amovible pratiquement à l'aplomb des transducteurs du sondeur vertical (mât à viser ou mât support d'antenne).

— Feu clignotant rouge en tête de mât.

— Fontaines filetées dans le cockpit et sur la plage arrière permettant la fixation de certains équipements amovibles.

— Cabestan manuel à l'avant associé à un chaumard pivotant permettant la mise à l'eau et le relevage de petites charges.



VH8. — Départ en sonde dans le lagon de Koumac (Nouvelle Calédonie), avec l'antenne pour E/R TRPP 13.

3.4. — Aménagements

De l'avant à l'arrière de la vedette on peut distinguer trois tranches. L'ensemble moteur et transmission occupe un compartiment situé dans le tiers avant, accessible depuis la cabine par une porte. Un panneau amovible situé à la partie supérieure de ce compartiment permet la dépose du moteur. La cabine elle-même, située dans la partie centrale, abrite le poste de pilotage et l'ensemble des équipements hydrographiques actuellement utilisés ou prévus (un emplacement est réservé

pour un système d'acquisition automatique des données en cours de réalisation). Ces équipements hydrographiques prennent place devant les cloisons latérales de la cabine, ménageant ainsi une coursive centrale qui permet d'accéder au poste de pilotage et au compartiment moteur.

La cabine elle-même peut être entièrement fermée, mais le manque de rigidité des panneaux ouvrants, la mauvaise qualité des joints mis en place, et le manque de soins apporté à la finition, ne permettent pas d'obtenir une étanchéité satisfaisante. Les réservoirs de combustible sont situés sous le plancher de ce compartiment.

A l'arrière de la vedette on trouve un cockpit auto-vidueur, plus vaste que celui qui existe sur la VH9, sous lequel prennent place les batteries. Le peak avant contient une ligne de mouillage qui peut être mise en service, directement depuis le pont, tandis qu'un caisson situé à l'extrême arrière abrite l'appareil à gouverner et peut éventuellement servir de plate-forme pour les observations au cercle hydrographique.

Comme sur les VH9, aucun équipement particulier n'est prévu pour la vie à bord.

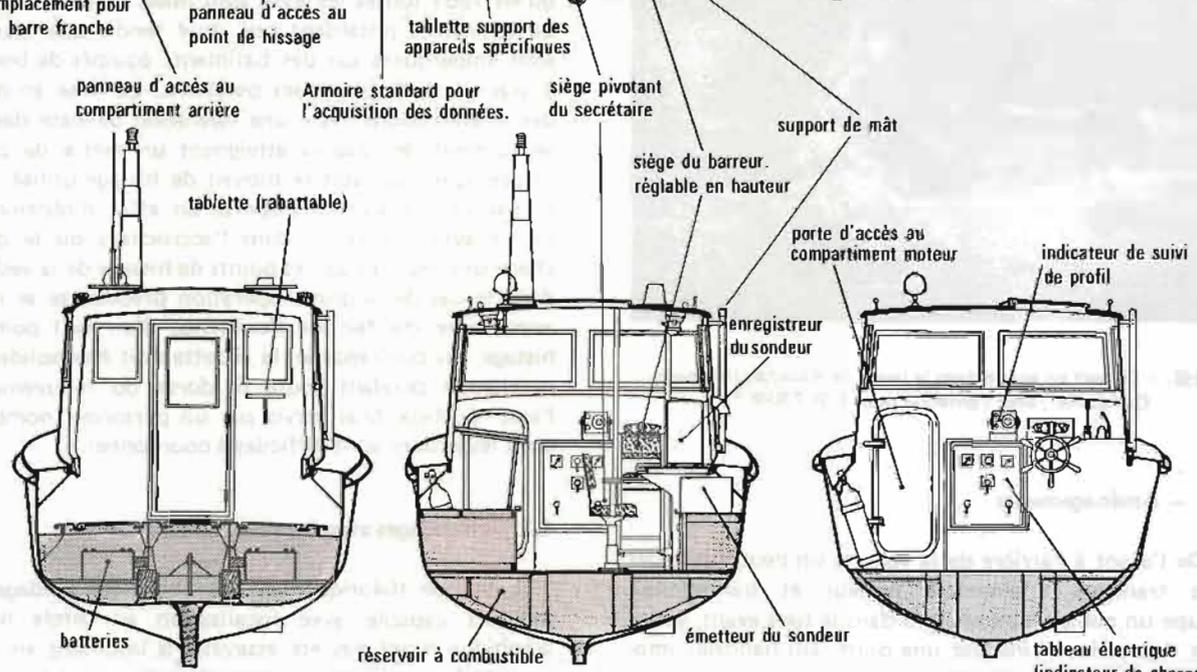
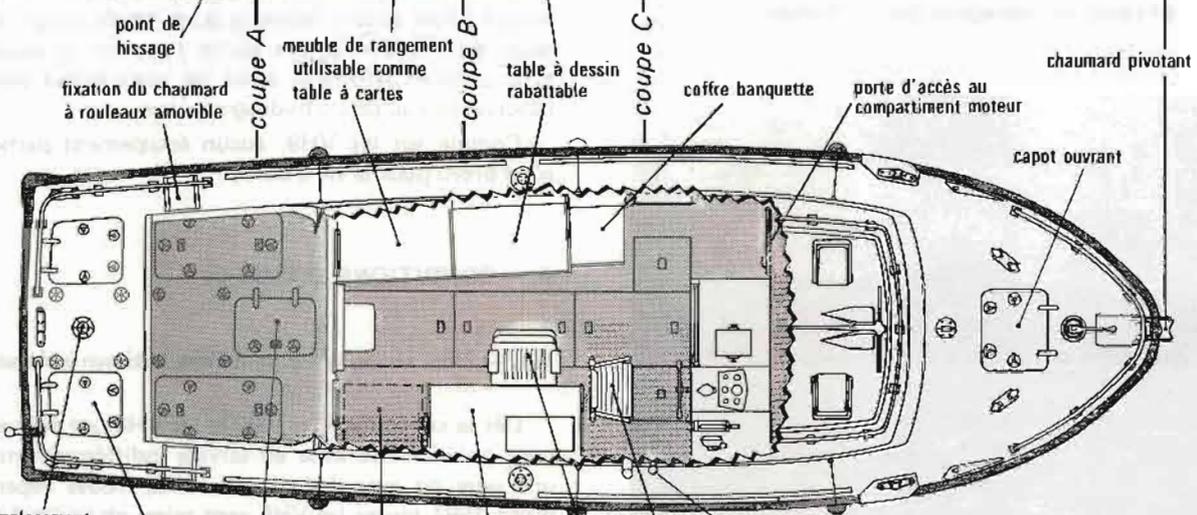
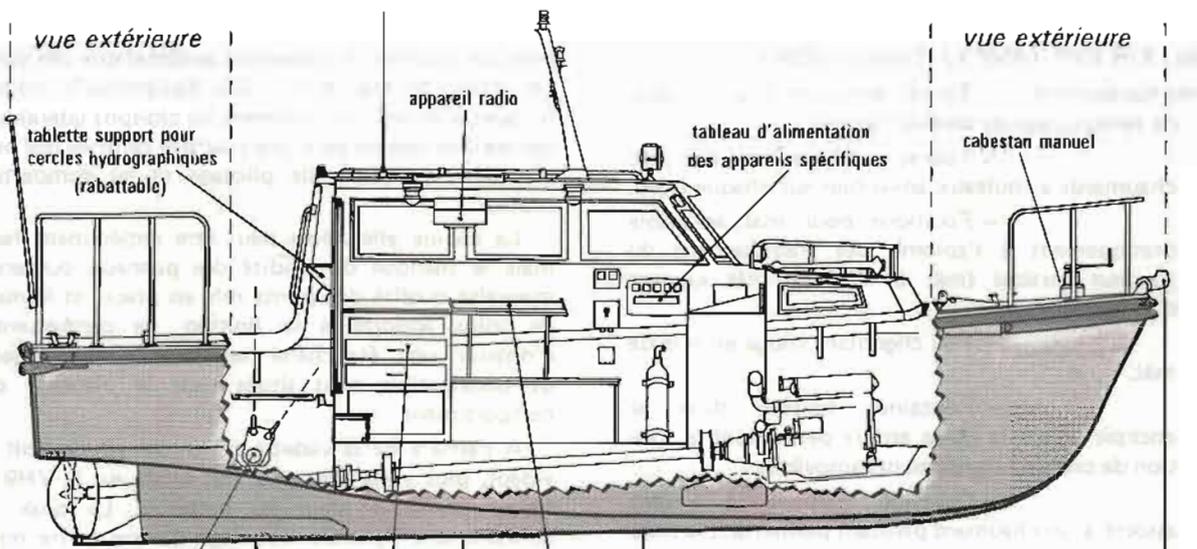
4. — CONDITIONS D'EMPLOI

4.1. — Mise en œuvre à partir des bâtiments de soutien

Dès la conception, les VH9 et les VH8 ont été prévues pour pouvoir être mise en service indifféremment avec une grue ou avec des bossoirs. Il se trouve cependant qu'en 1981 toutes les VH9 sont mises en œuvre à partir de bâtiments possédant une grue tandis que les VH8 sont embarquées sur des bâtiments équipés de bossoirs à gravité ou de portiques oscillants. La mise en œuvre des embarcations reste une opération délicate dès que se forment des vagues atteignant un mètre de creux, et ceci quel que soit le moyen de hissage utilisé. Dans le cas des bossoirs il importe en effet d'obtenir une bonne synchronisation dans l'accrochage ou le décrochage des moufles sur les points de hissage de la vedette ; dans le cas de la grue l'opération précédente se révèle assez aisée du fait de l'existence d'un seul point de hissage, en contrepartie, la vedette doit être solidement maintenue pendant toute la durée du mouvement à l'aide de faux bras servis par un personnel nombreux dont les actions sont difficiles à coordonner.

4.2. — Sondages avec localisation optique

Bien que théoriquement possibles, les sondages sur segment capable avec localisation au cercle hydrographique n'ont pas été essayés. Ils imposent en effet, sur les deux vedettes, une position de conduite acrobatique pour le barreur qui est contraint de gouverner avec ses pieds à partir du poste de pilotage, à moins qu'il ne préfère utiliser la barre franche directement depuis l'arrière, ce qui est tout aussi malaisé.



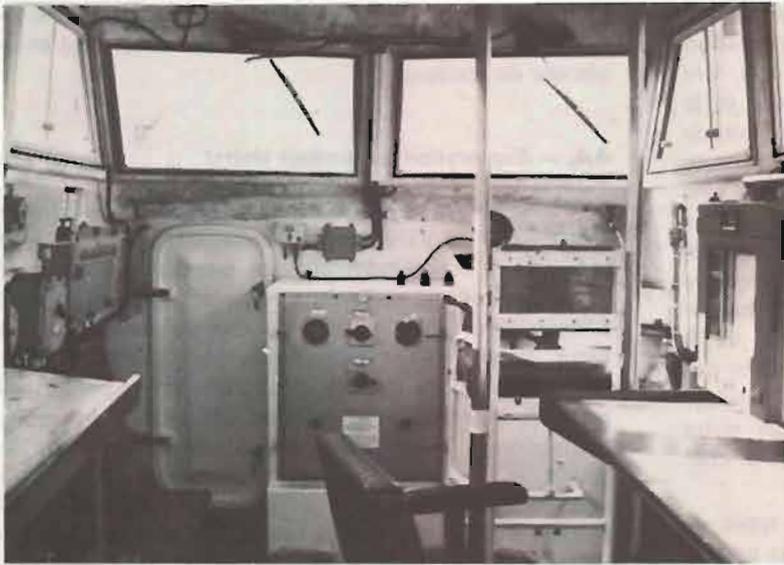
COUPE A

COUPE B

COUPE C

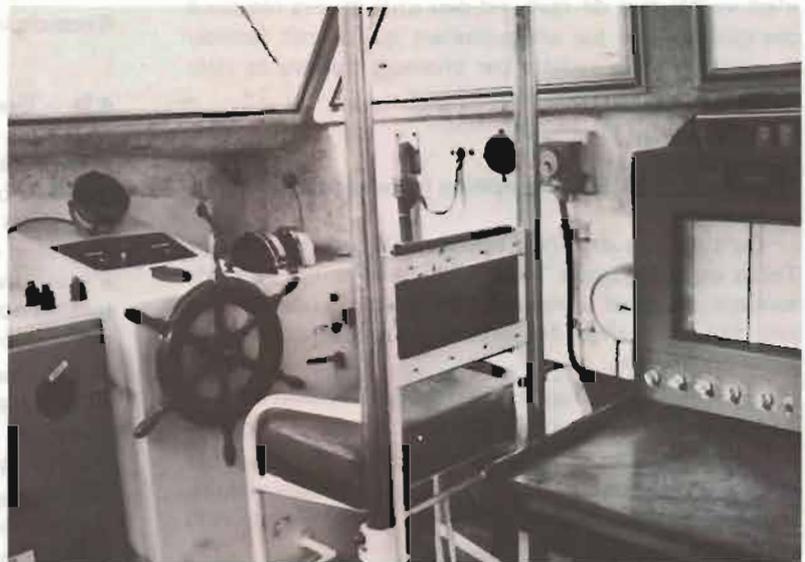
VELETTE HYDROGRAPHIQUE VH8 MP



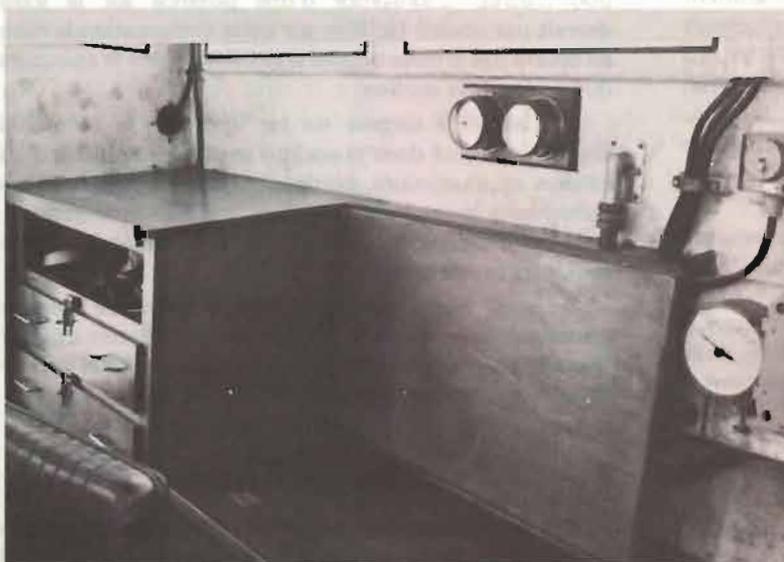


VH8. — Vue de la cabine avec le poste de pilotage et le siège du secrétaire de sonde

VH8. — Le poste de pilotage



VH8. — Vue de la cabine avec meuble de rangement et table à cartes rabattable



Le gouvernail Kitchen

Depuis l'installation, en 1981, sur les vedettes des E/R TRVP 13, le radioguidage est une opération qui ne présente plus de difficultés particulières. Les problèmes de communications entre le barreur et le chef d'équipe, qui existaient sur la VH9 du fait de l'éloignement des intéressés et sur la VH8 MP à cause du bruit ambiant, ont en effet été résolus par une utilisation judicieuse des accessoires livrés avec les ensembles UCVP 13 (*). L'homme de barre reçoit ainsi un casque avec écouteurs et microphone tandis que le chef d'équipe dispose d'un haut-parleur sur le boîtier duquel est adapté le combiné classique de l'E/R TRVP 13 (**). Sans modifier le fonctionnement des liaisons entre la vedette et les équipes de guidage installées à terre, cette installation permet en outre des communications aisées entre le barreur et le chef d'équipe en jouant le rôle d'un interphone.

Le phare orientable qui équipe les deux types de vedettes est un équipement bien conçu, précieux pour le guidage dès que les conditions de visibilité se détériorent. Par contre le feu clignotant rouge en tête du mât, qui n'est visible que de nuit, est peu utile et sera remplacé dès que possible par un gyrophare qui devrait faciliter le repérage de la vedette par plusieurs stations de visée optique simultanément.

4.3. — Sondages avec localisation radioélectrique

Qu'il s'agisse des VH9 ou des VH8 MP, du système Toran ou du système Trident III, les premiers essais de sondage effectués avec une localisation radioélectrique ont fait apparaître des brouillages gênants entre les appareils suivants :

sondeur Deso 10 avec interrogateur Trident et E/R TRVP 13 avec récepteur Toran.

Après quelques tâtonnements, ces brouillages ont été soit complètement supprimés, soit grandement réduits, en éloignant sensiblement l'un de l'autre les appareils concernés.

C'est ainsi que lors des sondages effectués avec le système Toran l'antenne de réception est normalement située à l'emplacement prévu au-dessus des transducteurs du sondeur, tandis que l'antenne de l'E/R TRVP 13 est placée sur un mât à l'extrémité arrière de la vedette, ce mât étant lui-même fixé directement sur les rambarde existantes. L'utilisation sur l'E/R TRVP 13 d'une fréquence élevée permet également de réduire les interférences qui peuvent encore exister.

Les parasites qui apparaissent sur les enregistrements du sondeur Deso 10 lors des sondages effectués avec le système Trident ont de la même façon été pratiquement supprimés en plaçant l'antenne de l'interrogateur Trident sur la rambarde arrière de la vedette, loin du transducteur du sondeur, et en veillant également à

(*) UCVP 13 : unité collective pour E/R TRVP 13 permettant de transformer ceux-ci en E/R TRVP 13 installés à poste fixe.

(**) Ce bricolage est nécessaire car l'E/R TRVP 13 ne possède que deux prises pour le branchement des combinés, casque ou haut-parleur.

ce que le câble de liaison entre l'antenne et l'interrogateur ne passe trop près des boîtiers émetteur et enregistreur du sondeur.

4.4. — Exploration au sondeur latéral

Cette opération, qui a été effectuée à plusieurs reprises sur les VH9 comme sur les VH8 MP, avec une localisation entièrement optique ou mixte, optique et Toran ou optique et Trident, n'a posé aucun problème. L'enregistreur était en général disposé sur la table à carte, tandis que le câble souple de 50 mètres était enroulé sur un touret fixé sur la plage arrière par l'intermédiaire des fontaines filetées existantes. Un câble, confectionné à cet effet, assurait la liaison entre le touret et l'enregistreur ; un fort sandow fixé entre l'arrière de la vedette et le câble de remorquage permettait d'éviter que les mouvements brutaux de l'embarcation dans le clapot ne soient transmis directement au poisson remorqué.

La vitesse de remorquage était choisie entre 4 et 6 nœuds, en fonction de l'état de la mer.

4.5. — Dragage hydrographique

Comme dans le cas du sondeur latéral, la mise en œuvre d'une drague hydrographique n'a pas posé de problèmes particuliers. Une drague de 900 mètres de long avec deux grosses bouées d'extrémité a été utilisée à plusieurs reprises avec les vedettes VH8 MP, la manutention des grosses bouées d'extrémité étant assurée par le bâtiment de soutien.

Seulement quelques essais ont pu être effectués avec les VH9 en utilisant une drague plus courte, de 300 mètres de long environ, et après avoir déposé les cloisons mobiles qui ferment en partie l'arrière de la cabine.

Compte tenu du volume utilisable et de l'aménagement de son cockpit avec un plancher surélevé, la VH8 MP se prête sans doute mieux que la VH9 à la mise en œuvre, dans de bonnes conditions d'une drague de 900 mètres. L'existence d'une potence sur la VH9 devrait par contre faciliter sur cette embarcation la mise en œuvre des grosses bouées d'extrémité sans le concours du bâtiment de soutien.

Sur les VH9 comme sur les VH8 MP, le touret de drague était fixé dans le cockpit par l'intermédiaire d'un caisson en aluminium, confectionné sur place, dont les dimensions avaient été adaptées, pour chaque vedette, à la profondeur du cockpit et à la disposition des fontaines filetées existantes.

On peut noter que lors des opérations de dragage effectuées avec les VH8 MP, l'une des vedettes utilisait une table traçante Toran T6 sur laquelle avait été définie la route à suivre.

4.6. — Mouillage et relevage d'instruments

Les opérations de mouillage ou de relevage des courantomètres qui ont pu être effectuées avec les VH9

ou les VH8 MP l'on été sans jamais utiliser ni la potence orientable, ni le cabestan dont elles sont l'une ou l'autre équipée.

4.7. — Localisation des récifs à l'aide du système Transit

Cette opération qui peut être faite, semble-t-il sans aucune difficulté, à l'aide d'un récepteur de satellites JMR4, n'a pas encore été effectuée, mais est prévue pour les semaines à venir.

Une vedette VH9 équipée d'un récepteur Transit devrait ainsi mouiller à proximité immédiate de récifs identifiés sur des photographies aériennes pendant toute la durée d'un passage de satellite.

Cette solution présente un intérêt certain dans les zones étendues où existent de nombreux récifs gênant la navigation de bâtiments relativement importants.

5. — CONCLUSION

Les vedettes hydrographiques actuellement utilisées par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine ne représentent pas l'aboutissement d'une longue réflexion ni le résultat d'une laborieuse mise au point. Le très mauvais état général des anciennes

vedettes hydrographiques de 8 mètres impliquait en effet le remplacement des quatorze vedettes existantes entre 1976 et le printemps 1981. Ces délais, qui furent respectés par la DCAN de Cherbourg, ne permettaient pas de corriger des imperfections mineures ni de soigner les détails de l'aménagement ou de la finition.

Ces vedettes sont en définitive des outils de travail sains et fiables qui paraissent suffisamment robustes dans des conditions normales d'emploi. On peut porter au crédit de la VH9 un comportement marin très sûr et une vitesse élevée qui permettent de faire progresser de façon satisfaisante les travaux habituellement confiés aux embarcations.

Plus petite, la VH8 a des qualités marines moins évidentes ; la puissance modérée de son moteur limite par ailleurs sa vitesse normale d'utilisation à 7 nœuds ; ces deux facteurs se conjuguent pour en faire une vedette moins performante que la VH9. Malgré une mauvaise étanchéité, sa cabine, offre aux différents équipements électriques et électroniques installés à bord une protection bien supérieure à celle que donne la VH9 ; on peut ainsi craindre que cette dernière vedette ne vieillisse moins bien.

Il est tentant d'imaginer pour la prochaine décennie une vedette hydrographique de 9 mètres reprenant, dans son esprit, l'aménagement intérieur de la vedette hydrographique de 8 mètres, et dont la réalisation serait confiée à un chantier réputé pour le sérieux et la finition de ses réalisations.

MISSION HYDROGRAPHIQUE DE CIRCONSTANCE DE L'OcéAN INDIEN (Décembre 1980 – Avril 1981)

par

M. François HABERT
Ingénieur Principal de l'Armement (hydrographe)

SOMMAIRE

Chapitre I. – GENERALITES SUR LA MISSION HYDROGRAPHIQUE DE CIRCONSTANCE DE L'OcéAN INDIEN

1. Personnel.
2. Bâtiments et embarcations.
3. Véhicules.
4. Programme de la MHC1.
5. Calendrier de la MHC1.
6. Signification des sigles rencontrés dans le texte.

Chapitre II. – METHODES, MATERIELS ET EQUIPEMENTS

1. Préparation de la documentation.
2. Equipements spécifiques.
3. Documentation de la MHC1.

Chapitre III. – MAYOTTE

1. Géodésie.
2. Marée.
3. Levé de la baie de Longoni.
4. Levé en baie de Pamanzi.
5. Information nautique.

Annexe A : Fiches d'amers et de points géodésiques.
Annexe B : Hauts fonds et obstructions.

Chapitre IV. – LES ILES

1. Juan de Nova.
2. Les Glorieuses.
3. Agalega.

Chapitre V. – LA REUNION

1. Sainte-Rose.
2. De Saint-Denis à la Possession.
3. Information nautique.

Annexe A : La projection Gauss-Laborde de La Réunion.
Annexe B : Fiches d'amers et de points géodésiques.

Annexe I. – *Le Champlain.*

Annexe II. – Le LCVP N° 2 du *Champlain.*

Annexe III. – Le BAME 9084.

Annexe IV. – La vedette P 779.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA MISSION HYDROGRAPHIQUE DE CIRCONSTANCE DE L'OCEAN INDIEN (MHCI)

La Mission Hydrographique de Circonstance de l'Océan Indien (MHCI) a été constituée au début de 1981 pour réaliser des levés hydrographiques à Mayotte, à La Réunion, dans certaines îles éparses de l'Océan Indien : les Glorieuses et Juan de Nova ainsi qu'à Agalega, possession de l'île Maurice.

Directement rattachée au Commandant de la Marine à La Réunion et relevant du Commandant des forces maritimes en Océan Indien, la MHCI était embarquée à bord des bâtiments mis pour emploi par cette autorité : le *Champlain* et, pendant la majeure partie du séjour à Mayotte, le BAME 9084.

Le programme des travaux, le calendrier suivi ainsi que la signification des sigles rencontrés dans le texte sont donnés ci-après (§ 1-4, 1-5 et 1-6).

Le personnel ayant pris part aux travaux, les bâtiments et les embarcations mis en œuvre, les méthodes et les équipements utilisés sont présentés ci-dessous et au chapitre II.

1.1. PERSONNEL

Le personnel hydrographe de la MHCI comprenait l'Ingénieur Principal de l'Armement Habert chef de Mission, l'Ingénieur des Etudes et Techniques d'Armement Mouscardés et trois officiers marins. Il faut noter que les officiers étaient affectés à la Mission tandis que les officiers marins, détachés pour emploi, conservaient leur affectation de métropole, la Mission Océanographique de Méditerranée (MOM). Les uns et les autres étaient embarqués à bord des bâtiments prenant part aux travaux, et administrés par l'Unité Marine de La Réunion.

Ce personnel constituait un noyau de direction et d'encadrement et il est clair que la réalisation des travaux à la mer n'a été possible qu'avec la participation massive des états-majors et des équipages des bâtiments, ainsi que des Services de la Marine. Se posait d'emblée le problème de la formation d'unités dont la vocation première n'était pas l'hydrographie. Il n'était guère possible, compte tenu du temps imparti, d'organiser des séances d'instruction. Aussi les opérateurs(*) ont-ils été formés "sur le tas" pendant les levés. Ce rôle de formation, à reprendre en permanence à cause des inévitables rotations de personnel, s'ajoutait aux tâches

(*) Patrons d'embarcation, observateurs, opérateurs au sondeur, secrétaires, porte-mires...

normales des hydrographes, lesquels devaient être omniprésents et ont beaucoup payé de leur personne. Le succès de l'entreprise a été favorisé par la disponibilité et la bonne volonté qui animaient les équipages.

Il a même été possible de conserver pendant toute la campagne quelques "permanents" qui ont dépassé le niveau d'opérateur élémentaire. Le certificat d'aide-hydrographe leur a été attribué.

En conclusion, on peut dire que la réalisation des levés prescrits à la MHCI a exigé un engagement total de la part du personnel des petites unités. Signalons enfin qu'avec deux hydrographes supplémentaires, les ingénieurs auraient pu être dégagés des tâches d'exécution, ce qui aurait permis de prévenir ou d'éviter certaines fautes.

1.2. BATIMENTS ET EMBARCATIONS

Le *Champlain* et le BAME 9084, celui-ci stationnaire de Mayotte, ont joué le rôle de bâtiment hydrographe de circonstance et ont supporté l'essentiel du poids de la Mission.

Le Patrouilleur Rapide *Epée*, stationnaire de Mayotte, a apporté un concours précieux pour le recueil de l'information nautique dans cette île. Citons aussi la vedette P 770 utilisée pour des missions de liaison et des mesures de courant au point fixe.

A Mayotte et dans les îles, le LCVP N° 2 du *Champlain* a été utilisé comme embarcation hydrographique.

A La Réunion, le Patrouilleur *Altair*, stationnaire, avait été, à l'origine, désigné comme élément naval de la Mission. Il est rapidement apparu que cette unité ne présentait que peu d'aptitude pour accueillir plusieurs hydrographes en supplément à son effectif et surtout pour soutenir une embarcation le long d'une côte accore, exposée et loin de tout abri, comme l'est celle de Sainte-Rose.

La vedette P 770, unité de surveillance côtière de la gendarmerie, a donc été retenue par le Commandant de la Marine pour les travaux à La Réunion. Le personnel hydrographe restait basé sur le *Champlain*, alors à Port des Galets.

Quelques rappels sur les caractéristiques principales des bâtiments et des embarcations mis en œuvre, ainsi que des observations sur leur aptitude aux travaux classiques d'hydrographie, sont formulés en annexes I à IV à ce rapport.

I.3. VEHICULES

Il n'avait pas été attribué de véhicule à la Mission qui a du reste opéré le plus souvent à partir de la mer. Selon les besoins et les circonstances les unités locales ont été sollicitées.

A Mayotte, le Commandant du Détachement de la Légion Etrangère a toujours répondu aux demandes occasionnelles de la Mission, en mettant une jeep à sa disposition.

A La Réunion, le Commandant de la Marine a prélevé sur son parc un HY Citroën, pendant la durée des travaux.

I.4. PROGRAMME DE LA MISSION HYDROGRAPHIQUE DE CIRCONSTANCE DE L'OCEAN INDIEN

1. A Mayotte

- Levé de la baie de Longoni.
- Levé d'un beaching à Dzaoudzi, en baie de Pamanzi.
- Vérification de la voie recommandée entre la passe de M'Zamboro et Dzaoudzi.
- Contrôle des documents nautiques et revue d'amers.
- Vérification de hauts-fonds en baie de Mamoutzu.

2. A La Réunion

- Levé à Sainte-Rose.
- Contrôle des documents nautiques dans la région de Port des Galets.
- Levé entre la Possession et Sainte-Marie.

3. Dans les Iles Eparses

- Aux Glorieuses: compléments de bathymétrie dans la zone levée par la Mission Hydrographique des Glorieuses (MHG) en 1977.
- A Juan de Nova: localisation de deux balises d'aide au chenilage; contrôle des documents nautiques et revue d'amers.

4. A Agalega

- Levé du mouillage de Saint-James.

I.5. CALENDRIER DE LA MISSION HYDROGRAPHIQUE DE CIRCONSTANCE DE L'OCEAN INDIEN

29.12.1980	Départ par avion de Paris pour La Réunion
30.12.	Arrivée à La Réunion - Embarquement sur le <i>Champlain</i>
02.01.1981	Appareillage pour les Glorieuses
05.01.	Arrivée aux Glorieuses; escale technique
05.01.	Appareillage pour Mayotte
06.01.	Arrivée à Mayotte; début des travaux
17.01.	Transfert du <i>Champlain</i> sur le BAME 9084
17.02.	Transfert du BAME sur le <i>Champlain</i> et appareillage pour Juan de Nova
18.02.	Arrivée à Juan de Nova; début des travaux
19.02.	Appareillage de Juan de Nova pour Mayotte (*)
20.02.	Arrivée à Mayotte
21.02.	Transfert du <i>Champlain</i> sur le BAME et reprise des travaux
26.02.	Fin des travaux à Mayotte; transfert du BAME sur le <i>Champlain</i> et appareillage pour les Glorieuses
27.02.	Arrivée aux Glorieuses; début des travaux
01.03.	Fin des travaux aux Glorieuses et appareillage pour La Réunion
04.03.	Arrivée à La Réunion; début des travaux à Sainte-Rose
10.03.	Suspension des travaux à Sainte-Rose et appareillage à bord du <i>Champlain</i> pour Maurice
11.03.	Arrivée à Maurice
14.03.	Appareillage de Maurice vers Agalega
16.03.	Arrivée à Agalega; début des travaux
18.03.	Fin des travaux à Agalega
19.03.	Appareillage vers la Réunion
21.03.	Arrivée à La Réunion
23.03.	Reprise des travaux à Sainte-Rose
28.03.	Fin des travaux à Sainte-Rose
30.03.	Début des travaux entre la Possession et Saint-Denis
14.04.	Fin des travaux à La Réunion Maintenance du matériel, rangement, mise en caisses et en container; expédition vers la métropole
19.04.	Départ par avion pour la métropole

(*) Travaux interrompus par la présence d'une dépression tropicale.

I.6. SIGNIFICATION DES SIGLES RENCONTRES DANS LE TEXTE

AH	Annales Hydrographiques	IGN	Institut Géographique National
BAME	Bâtiment Atelier de Mécanique et d'Electricité	IN	Instructions Nautiques
DCAN	Direction des Constructions et Armes Navales	LCVP	Landing Craft Vehicle and Personnel
DDE	Direction Départementale de l'Equipe-ment	MHCI	Mission Hydrographique de Circons-tance de l'Océan Indien
EPHOM	Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine	MHG	Mission Hydrographique des Iles Glo-rieuses
IETA	Ingénieur des Etudes et Techniques d'Armement	MHM	Mission Hydrographique de Madagascar
		MHOT	Mission Hydrographique de l'Océan Indien
		MOM	Mission Océanographique de Méditer-ranée
		SHOM	Service Hydrographique et Océanogra-phi-que de la Marine

CHAPITRE II

METHODES, MATERIEL ET EQUIPEMENTS

Si la MHC n'a été effectivement constituée qu'à son arrivée à La Réunion, au début de janvier 1981, c'est dès le mois de septembre 1980 que la documentation a été préparée, le matériel approvisionné et rassemblé.

II.1. PREPARATION DE LA DOCUMENTATION

A Mayotte, la Mission avait à opérer sur des sites déjà fréquentés par la Mission Hydrographique de Madagascar (MHM) en 1953 et la Mission Hydrographique de l'Océan Indien (MHOI) en 1958 et en 1963 ; aux Glorieuses par la Mission Hydrographique des Glorieuses (MHG) en 1977 ; à Juan de Nova par la MHM en 1953.

Une abondante documentation put ainsi être rassemblée.

Les projections de préparation ont été établies à l'EPSHOM à partir d'agrandissements photographiques des cartes marines, ainsi que les fonds de schéma à compléter au fur et à mesure de l'avancement des travaux et à joindre aux comptes-rendus périodiques adressés à la direction du SHOM. L'objectif était d'avancer les travaux de bureau en sachant que les possibilités de rédaction à bord des bâtiments seraient très limitées.

II.2. EQUIPEMENTS SPECIFIQUES

Les équipements spécifiques délivrés par l'EPSHOM comprenaient plus de deux cents articles différents, dont certains en plusieurs exemplaires, sans compter les fournitures de bureau. L'ensemble, réparti dans trente-huit caisses, pesait environ six tonnes. Ces caisses ont été rassemblées dans un container qui a été embarqué sur le *Champlain* le 23 octobre à Brest. La MOM, pour sa part a approvisionné les matières consommables (bois, ciment, câbles, peinture, outillage, quincaillerie, pile...) et six ensembles émetteurs-récepteurs VHF TRPP 13 qui ont été embarqués à bord du *Champlain* à l'occasion d'une escale le 5 novembre à Toulon. La plupart de ces équipements, entreposés en magasin dans l'attente de la constitution d'une Mission de Circonstance, n'avaient pas servi depuis longtemps. Il était donc impératif de procéder, avant la mise en caisses, à des essais à terre ou à la mer, en particulier de tous les appareils comprenant de l'élec-

tronique, de l'électromécanique ou de l'optique. Ces essais ont été justifiés et l'intervention de la DCAN de Brest sur un des sondeurs verticaux et sur le sondeur latéral a été nécessaire.

Ces essais étaient d'autant plus utiles qu'il ne fallait pas s'attendre à trouver des possibilités de dépannage dans les îles ou à bord des bâtiments. Dans cette perspective, les appareils ont été doublés chaque fois que cela était possible. Ainsi, à Mayotte, un sondeur étant tombé en panne irréparable localement, le levé a été poursuivi sans interruption grâce à la mise en service du sondeur de rechange. Par contre, un composant de l'unique enregistreur du sondeur latéral ayant fait défaut, également à Mayotte, il a fallu suspendre le levé complémentaire et attendre un rechange parvenu dix jours après sa commande à Brest, délai tout à fait acceptable mais important par rapport au temps imparti pour les travaux.

Les principaux équipements utilisés sont présentés ci-après, par types d'opérations, avec les observations suscitées par leur mise en œuvre dans des conditions climatiques sévères.

a) Localisation à la mer

Les embarcations en cours de levé étaient localisées exclusivement par moyens optiques, essentiellement à partir de visées issues de théodolites centrés sur des points rattachés au système géodésique local.

Il faut signaler ici l'excellent théodolite Wild T16, précis et commode, dont la manipulation peut être confiée à des opérateurs n'ayant reçu qu'une instruction rapide.

L'efficacité de ce moyen de localisation est fondée sur l'existence de bonnes liaisons en phonie VHF entre l'embarcation et les stations à terre. Six ensembles TRPP 13 avaient, dans cette intention, été mis à la disposition de la Mission par différents Services détenteurs. Ce matériel s'est révélé d'excellente qualité et très fiable.

b) Détection sous-marine

La Mission avait emporté deux sondeurs NUBS 12 A à base hors-bord. Ces sondeurs ont été installés, avec des moyens de fortune, sur le LCVP N° 2 du *Champlain* et sur la vedette P 779 de la Marine à La Réunion. Ils étaient équipés, selon les circonstances, en gamme A (0-280 mètres) ou B (0-1200 mètres). Signalons que le mécanisme d'enroulement du papier d'un enregistreur étant tombé en panne, l'utilisation d'un sondeur de rechange a évité de prendre du retard sur un programme très chargé. Un sondeur latéral Edgerton a été mis en œuvre à partir du LCVP. A Mayotte, sur des fonds de

quarante à cinquante mètres, à deux ou trois nœuds, il fallait filer au moins soixante à soixante-dix mètres de câble pour maintenir le poisson à une dizaine de mètres au-dessus du fond. Le câble de cinquante mètres étant évidemment trop court, c'est le touret de cent cinquante mètres qui a été installé. Quelques indications sont données à ce sujet, en annexe II. Sans treuil à contacteur tournant, la manipulation de plusieurs dizaines de mètres de câble sur l'arrière du LCVP a été particulièrement laborieuse, d'autant que des remontées urgentes, en présence de formations coralliennes par exemple, pouvaient survenir de façon inopinée. La présence permanente d'un matelot auprès du touret était indispensable.

Très fins et très contrastés, les enregistrements des fonds coralliens ont été excellents.

c) Géodésie

L'objet essentiel des travaux de géodésie était le rattachement des stations de visée optique destinées à localiser les embarcations sur profil. Points d'extension à la côte du réseau local ou stations de visée optique, tous les points répondaient aux normes du cinquième ordre. Les méthodes classiques de la géodésie expéditive ont été largement utilisées. Avec un théodolite Wild T3, deux théodolites Wild T2, un géodimètre AGA 14, un ensemble telluromètre MRA 5 et un niveau Zeiss, panoplie complétée par un oculaire coudé et un oculaire prismatique pour les visées astronomiques, la MHCI était en mesure de faire face à tous les cas d'espèce. Signalons le remarquable outil constitué par le couple théodolite Wild T2 - Géodimètre AGA 14 qui, en donnant à volonté des angles associés à des distances, a évité bien des manipulations et des polygonations laborieuses, en particulier à Mayotte, sur un terrain accidenté et recouvert d'une végétation impénétrable.

Les calculs ont été conduits sur calculateur HP 67 ou HP 41 C, avec les programmes en usage dans les Missions du SHOM.

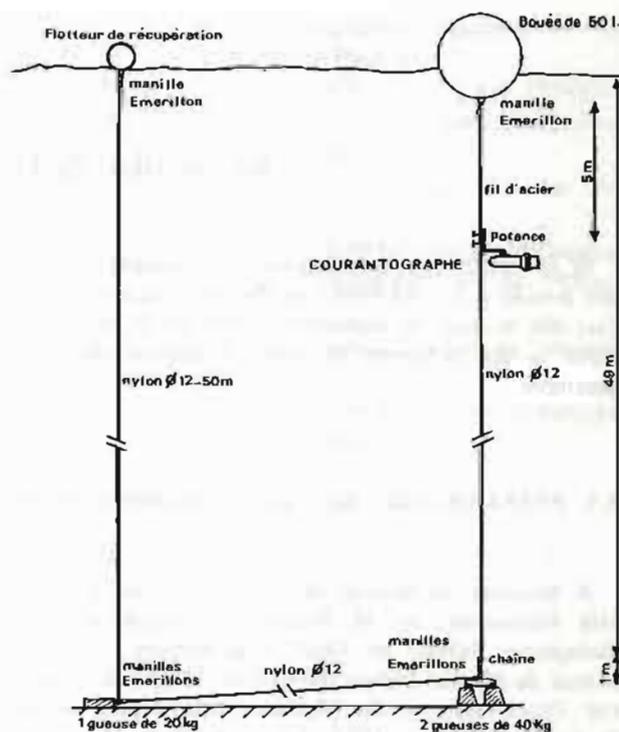
d) Marée et courants

La marée a été régulièrement enregistrée sur un marégraphe OTT R16 qui a toujours bien fonctionné.

Deux stations d'observation permanente de courant ont été mises en place à Mayotte, avec des courantographes Mécaboliér à enregistrement photographique au dixième d'heure. Les lignes de mouillage sont représentées sur le schéma ci-dessous (Pl. 1).

En conclusion, la MHCI était bien équipée pour réaliser des levés classiques, mais faisaient défaut:

— un radiolocalisateur à courte portée dont la présence aurait été très justifiée en baie de Longoni à Mayotte et entre la Possession et Saint-Denis à La Réunion;



PL. 1. — Ligne de mouillage.

— un treuil à contacteur tournant pour le sondeur latéral.

II.3. DOCUMENTATION DE LA MHCI

Publications du SHOM

MHM 1952-54; George; *Annales Hydrographiques* 4ème série tome 7, (1956); p. 219.

MHOI 1962-64; Schrupf; *Annales Hydrographiques* 4ème série tome 13, (1965); p. 89.

MHOI 1964-65; Pasquay; *Annales Hydrographiques* 4ème série tome 14, (1967); p. 201.

MHG 1977; Thouin; *Annales Hydrographiques* 5ème série (1980); n° 754; p. 145;

Publications de l'IGN

Répertoire des coordonnées et altitudes de points géodésiques de l'archipel des Comores; fascicule 2, île de Mayotte; édition de juin 1953.

Répertoire des coordonnées et altitudes des points géodésiques de La Réunion; édition de mai 1955.

La Réunion; photogrammétrie, répertoire général, année 1978.

CHAPITRE III

MAYOTTE

GENERALITES

La MHCI a opéré à Mayotte entre le 6 janvier et le 26 février 1981(*) pour y effectuer les travaux suivants :

- le levé de la baie de Longoni ;
- un levé à grande échelle en baie de Pamanzi ;
- une recherche de haut-fond à Mamoutzou ;
- une revue d'amers entre Longoni et Dzaoudzi ainsi qu'à Bandélé.

Jusqu'au 17 janvier, les travaux à la mer ont été conduits à partir du *Champlain*. Chargé d'autres missions à partir de cette date, ce bâtiment a été relevé par le BAME 9084. Son LCVP N° 2 a cependant été laissé à la disposition de la Mission.

La progression des travaux a été en permanence contrariée par les mauvaises conditions météorologiques rencontrées à cette époque de l'année. En particulier en baie de Longoni, exposée au Nord, les séances de bathymétrie ont été interrompues presque chaque jour par des grains très violents pendant lesquels la visibilité n'excédait pas quelques mètres.

Soumis alternativement à un soleil torride et à des averses torrentielles, les hydrographes ont soutenu un rude effort d'acclimatation et il faut souligner que ce type de levé s'adresse à du personnel jeune et en parfaite condition, tant physique que morale.

A Longoni encore, signalons que trois rivières se déversent au fond de la baie qui est envasée par leurs alluvions. Au contact de l'eau trouble, chargée de micro-organismes, les moindres plaies s'infectent en quelques heures et des soins médicaux sont nécessaires. C'est ainsi que le personnel de la Mission a été traité par antibiotiques pendant toute la durée du séjour à Longoni. Dans le même ordre d'idées, il faut rappeler que l'île étant très impaludée, la consommation de nivaquine est obligatoire.

Les travaux à Mayotte sont présentés ci-dessous.

III.1. GEODESIE

Le système géodésique de Mayotte a été mis en place par l'IGN en 1950. A ce système sont associés l'ellipsoïde international et la projection UTM,

(*) A l'exception d'une interruption de quatre jours entre les 17 et 21 février pendant laquelle la Mission s'est rendue à Juan de Nova.

fuseau 38. Le document en vigueur est le répertoire des coordonnées et altitudes des points géodésiques de l'archipel des Comores : fascicule 2, île de Mayotte, édition de juin 1953. Le réseau des points géodésiques est très détérioré et la MHCI a largement utilisé les points déterminés par les Missions Hydrographiques qui se sont succédées depuis cette époque en se référant à l'IGN : la Mission Hydrographique de Madagascar en 1953 et la Mission Hydrographique de l'Océan Indien en 1962 et 1964. Les points géodésiques repris ou déterminés par la MHCI ont fait l'objet de fiches de géodésie listées en annexe A.

III.2. MAREE

La marée à Mayotte a été enregistrée sans interruption du 9 janvier au 26 février 1981 à l'aide d'un marégraphe OTT R16 installé à l'extrémité de la jetée Issoufaly, jetée Est de Dzaoudzi. L'échelle des enregistrements était de 16 mm/heure pour les temps, de 1/25 pour les hauteurs. Les heures portées sur les marégrammes, comme sur tous les documents de Mayotte, sont exprimées en TU + 3, heure en service. Bien que son pied découvre pendant les marées de grande vive-eau, la jetée Issoufaly, sous la surveillance de la Marine, a été préférée à la jetée Serali, jetée Ouest de Dzaoudzi, qui avait été choisie par la MHCI en 1962 et en 1964.

L'observatoire a été rattaché à trois repères :

a) le repère fondamental scellé dans le mur Est de la citerne de l'hôtel du Rocher, utilisé depuis 1953. Le zéro des sondes à Mayotte est à 6,92 mètres sous ce repère. Toutes les sondes écrites par la MHCI sont réduites à ce niveau ;

b) un canon en fer, enfoncé dans le sol, situé à l'entrée du boulevard des Crabes, côté mer ;

c) le socle en béton du mât de pavillon érigé devant le casernement de la Légion Etrangère.

Signalons que le repère SH 1962, boulon scellé dans un cube en béton à l'enracinement de la jetée Serali, auquel se réfère l'annuaire des marées, n'a pas été retrouvé.

III.3. LEVE DE LA BAIE DE LONGONI

A l'origine de ce levé, se trouve un projet de construction d'un port en eau profonde à la pointe de



L'observatoire de marée de Dzaoudzi.

Longoni, pouvant accueillir des navires d'un tirant d'eau de plus de dix mètres.

Les travaux ont compris :

- le levé de la baie proprement dite, étendu jusqu'à recouvrir le levé de 1953 au Sud de M'Zamboro ;
- le levé topographique de la partie côtière entre Bandraboua et la pointe de Longoni ;
- un levé complémentaire au sondeur latéral sur la voie d'accès au futur port, entre la pointe de Longoni et la bouée des Bancs Jumeaux ;
- deux stations d'observation de courant au point fixe sur ces voies d'accès ;
- le prélèvement de natures de fond en baie de Longoni ;
- une recherche de haut-fond, près de la balise du Vaucluse, hors de la zone de bathymétrie régulière.

Les travaux sont présentés de façon synthétique sur les planches 2 et 3.

a) Bathymétrie

La partie Est de la baie a été sondée selon un profil tous les cinquante mètres et cet espacement a été resserré à vingt-cinq mètres aux abords du site retenu pour le futur port de Longoni. L'espacement des profils dans la partie occidentale est de cent mètres au plus. Aucun haut-fond ni obstruction dangereux pour la navigation n'ont été relevés mais il n'est pas rare d'observer sur les enregistrements des remontées de dix à quinze mètres sur des fonds de trente à quarante mètres. Le levé régulier a été complété par des profils intercalaires et six recherches localisées en vue de préciser

les accidents du relief tels que ceux cités plus hauts, dus à la présence de formations coralliennes.

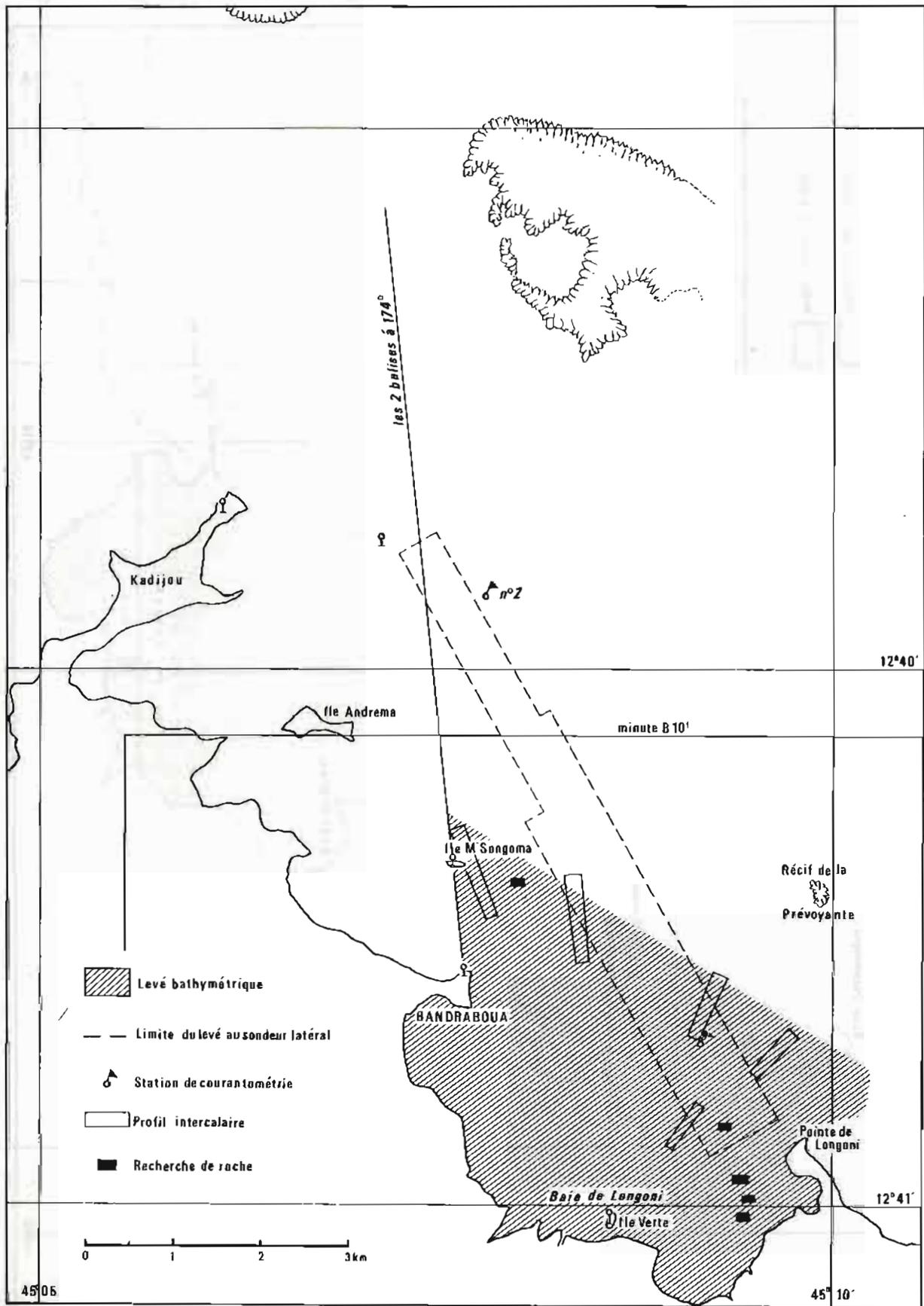
Les résultats des recherches de hauts-fonds sont les suivants :

- dans le 111 à 980 mètres de la balise de M'Songoma, un pâtre de corail a été coté à 2,6 mètres au lieu des 20 mètres portés sur la carte marine 6240 ;
- dans le 136 à 590 mètres de la balise du Vaucluse, sur le tronçon au 174 des alignements d'accès à Mayotte par la passe de M'Zamboro, un massif de corail, coté à 11,2 mètres a été arasé à l'explosif puis recherché. La nouvelle cote observée est de 9,2 mètres. Le cratère dû à l'explosion, bien marqué sur l'enregistrement, a été reconnu par un plongeur.

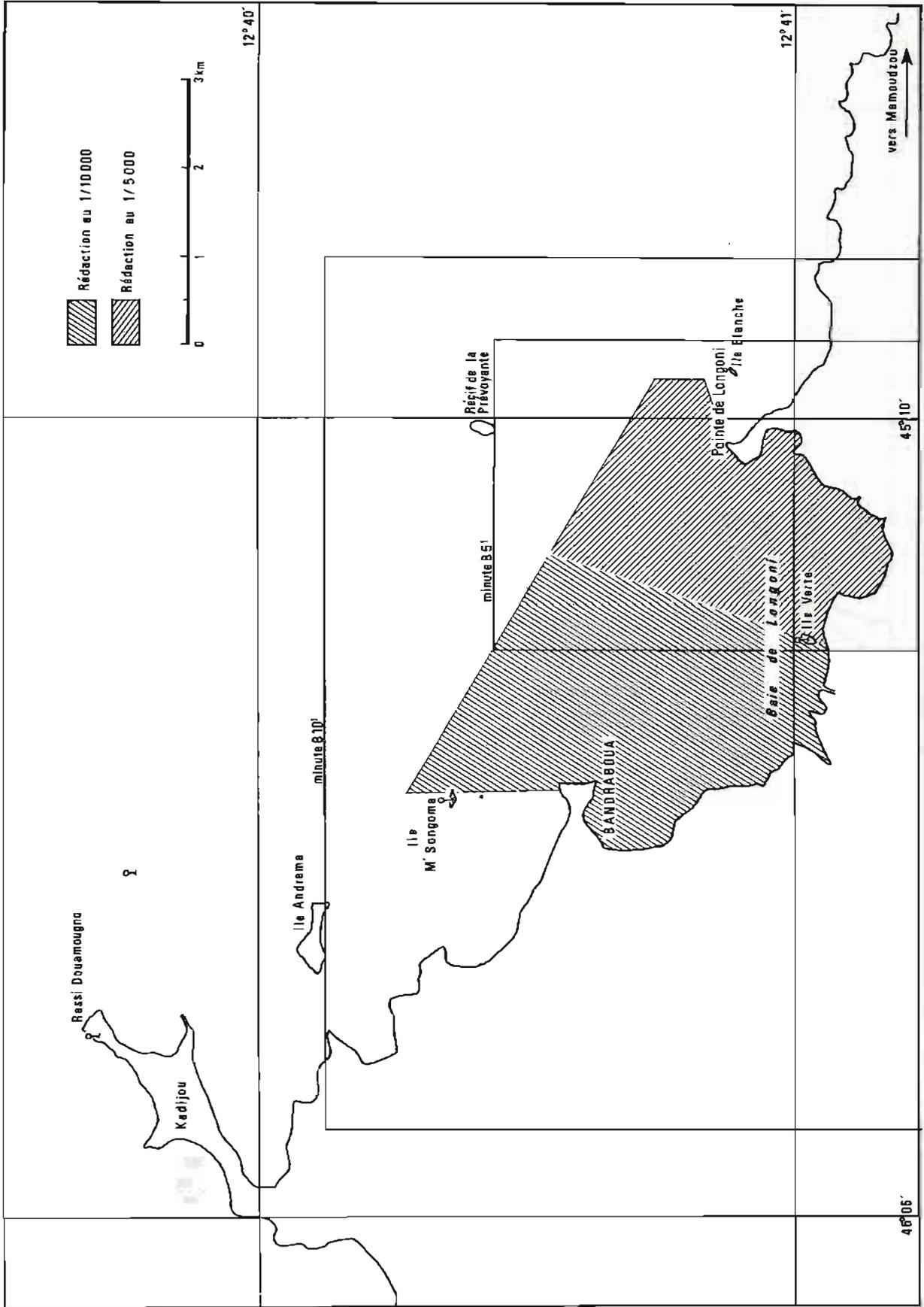
N'ont pas été recherchés :

- un haut-fond coté 13,5 mètres, dans le 317 à 2250 mètres de l'île Verte, parmi des sondes de 25 mètres ; situé au fond de la baie ;
- les nombreux pâtes de coraux aux abords immédiats de l'île M'Songoma ;
- les formations coralliennes à proximité de l'île verte.

La voie d'accès au futur port, entre Longoni et la balise des Bancs Jumeaux, a été explorée au sondeur latéral. Sept profils espacés de cent vingt-cinq mètres ont été suivis, définissant deux bandes de quatre cent cinquante mètres de part et d'autre d'une route d'accès au 150. Le fond a ainsi été insonifié deux fois sous deux incidences opposées. L'examen des enregistrements a révélé un relief régulier parsemé de formations coralliennes plus ou moins développées. La cote des plus marquées d'entre elles, déterminée de façon appro-



PL. 2. — MAYOTTE, Baie de Longoni.



PL. 3. — MAYOTTE, Baie de Longoni.

chée à partir de la mesure de leur ombre portée, ne s'est pas révélée assez importante pour justifier des recherches localisées.

b) Topographie et natures de fond

La côte entre Longoni et Bandraboua a été levée par restitution des photographies au 1/20 000ème prises par l'IGN en 1969, avec l'aide de la couverture au 1/5 000ème réalisée par la *Jeanne d'Arc* en 1977. Certaines zones du récif, qui n'apparaissent pas nettement sur les photos, ont été levées par la méthode classique.

A partir de ces clichés, ont été déterminés :

– la laisse de basse mer, marquée sur les documents par une différence de teinte entre l'estran, toujours très envasé, et l'eau libre ;

– les limites du platier qui coïncident en général avec la laisse de basse mer :

– le trait de côte, quand il n'est pas masqué par les palétuviers, en extension depuis 1969, qui envahissent le fond de la baie et s'étendent sur l'estran. La limite maritime de la mangrove a donc été levée sans recourir aux vues aériennes.

Le levé topographique a été complété par des stations sur le platier où des sondes ont été prises à la perche.

Des natures de fond ont été prélevées dans la baie à raison d'un échantillon tous les cent mètres, soit un par carreau de projection au 1/10 000ème. L'eau, claire dans le lagon et à l'ouvert de la baie, devient de plus en plus trouble et chargée en vase à l'approche de la terre. En particulier, entre Bandraboua et l'île Verte, où se déversent trois rivières, la vase devient saturante. Et les palétuviers trouvent sur l'estran, humide et riche en alluvions, un terrain favorable à leur croissance.

Ces échantillons de fond sont constitués de vase mollasse, fine et gluante, rouge ou parfois brune, et dégageant une odeur putride.

c) Courantométrie

Deux stations d'observation de courant au point fixe ont été mise en place sur le dernier tronçon des voies d'accès au futur port de Longoni : la première dans le 027 à 2340 mètres de l'île Verte, la seconde dans le 108 à 3155 mètres de la balise Douamougnou.

Les courantomètres ont été activés du 4 au 7 février et du 11 au 14 février.

d) Documents définitifs de la rédaction

Les documents définitifs de la rédaction des travaux en baie de Longoni sont les suivants :

- une minute de bathymétrie B 10¹ : baie de Longoni ;
- une minute de recherches R 10¹ : baie de Longoni ;
- une minute de bathymétrie B 5¹ : baie de Longoni ;
- une minute de recherches R 5¹ : baie de Longoni ;

– une minute de topographie et de nature de fonds TN 10¹ : baie de Longoni ;

– une minute de topographie et de nature de fonds TN 5¹ : baie de Longoni ;

Cette dernière, agrandissement au pantographe de la TN 10¹ a été établie pour contrôler le recouvrement entre la topographie et la bathymétrie.

- une fiche de marée : Mayotte, Dzaoudzi ;
- 12 fiches de géodésie, listées en annexe A ;
- deux dossiers de courantométrie.

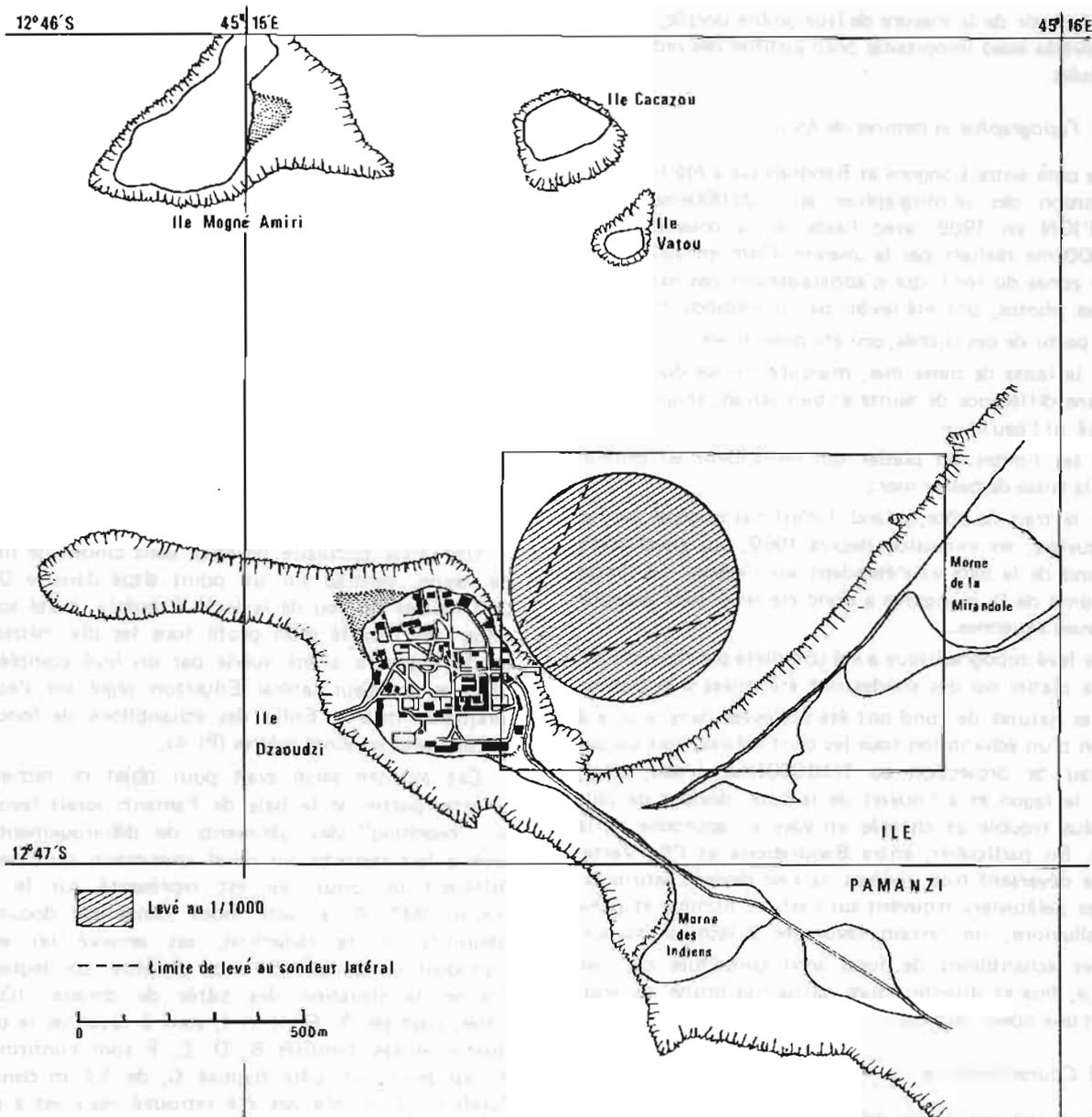
III.4. LEVE EN BAIE DE PAMANZI

Une zone circulaire de deux cent cinquante mètres de rayon, centrée sur un point situé dans le 052 à 250 mètres du feu de la jetée Issoufaly, a été sondée selon une densité d'un profil tous les dix mètres. La sonde régulière a été suivie par un levé complémentaire au sondeur latéral Edgerton réglé sur l'échelle cinquante mètres. Enfin des échantillons de fond ont été pris tous les vingt mètres (Pl. 4).

Cet examen serré avait pour objet de rechercher si cette partie de la baie de Pamanzi serait favorable au "beaching" des bâtiments de débarquement. Ce levé a fait ressortir un relief sous-marin quelque peu différent de celui qui est représenté sur la carte marine 987. A la carte index jointe aux documents définitifs de la rédaction, est annexé un encart reproduit en annexe B à ce chapitre, sur lequel est figurée la situation des pâtés de coraux. (Quatre pâtés, baptisés A, G, H et I, sont à rayer de la carte ; quatre autres, baptisés B, D, E, F sont confirmés et à maintenir ; un pâtre baptisé C, de 1,4 m dans des fonds de 7 m, n'a pas été retrouvé mais est à maintenir, faute de recherches supplémentaires. Enfin, deux nouveaux pâtés, K et L, sont à introduire).

La baie de Pamanzi est bien typique des sites à eaux coralliennes, avec un fond sableux parsemé de coraux. La présentation d'un bâtiment d'un tirant d'eau d'environ 3,5 mètres peut être envisagée. La zone d'approche finale et un point précis d'échouage restent à déterminer et à adopter.

Au levé de la baie de Pamanzi, a été associée une recherche de haut-fond dans l'anse Choa, en face de Mamoutzou (Pl. 5). Un pâtre découvrant à 0,9 m, situé dans le 082 à 550 mètres du feu de Mamoutzou, a été arasé à l'explosif. Une recherche au sondeur, avec le concours d'un plongeur, sans conduire à son identification certaine, a amené à la découverte d'un pâtre découvrant à 0,7 m dans le 081 à 550 mètres du feu de Mamoutzou. Baptisé L sur la carte index, ce pâtre en forme d'aiguille n'est sans doute pas le seul et fait partie d'une famille difficile à détecter et invisible dans ces eaux troubles.



PL. 4. — MAYOTTE, Baie de Pamanzi.

Documents définitifs de la rédaction

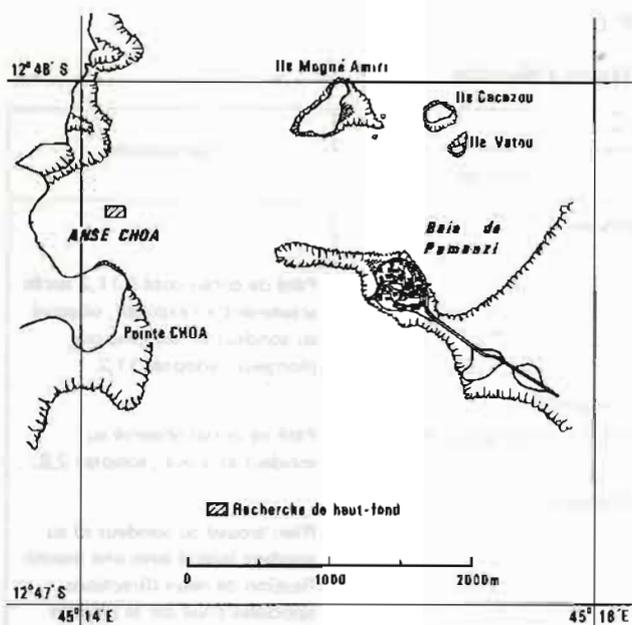
- une minute de bathymétrie B 1¹ : baie de Pamanzi avec une cartouche : Mamoutzou, anse Choa ;
- une minute de natures de fond N 1¹ : baie de Pamanzi ;
- une carte index en cartouche de la carte marine 987.

III.5. INFORMATION NAUTIQUE A MAYOTTE

Le contrôle des documents nautiques publiés par le SHOM, une revue d'amers dans la partie Nord-Est

de la Grande Terre, entre la passe M'Zamboro et Dzaoudzi, ainsi que dans la passe Bandélé, ont été sous-traités auprès du patrouilleur rapide (Patra) *Epée*, stationnaire de Mayotte. Nul n'était plus qualifié pour cette tâche que ce bâtiment, rompu à la navigation aux abords de l'île. Le commandant de l'*Epée* a remis un dossier comprenant :

- quinze planches de vues de côte de M'Zamboro à Dzaoudzi, ainsi qu'à Bandélé. Les positions des prises de vue, numérotées de I à XV, ont été reportées sur les cartes index. Sur chaque planche sont indiquées :
 - le numéro des photos, correspondant à celui des négatifs,
 - la position et l'azimut des prises de vue ;
 - des corrections proposées au volume IX de la série L des instructions nautiques (IN) ;



PL. 5. — MAYOTTE, Anse Choa.

— des photographies renseignées des amers et du balisage fixe ou flottant entre M'Zamboro et Dzaoudzi, et dans la passe Bandélé. Des fiches d'amers ont été ouvertes. Certains amers nouveaux, situés hors des zones de levé de la MHCI, n'ont pas été rattachés. Leur position sur la carte a seulement été contrôlée par l'*Epée* à l'aide de ses instruments de navigation.

Les fiches d'amers, qui contiennent une rubrique géodésie, sont peu adaptées à de tels cas, ainsi qu'au balisage flottant, une bouée ne pouvant guère être assimilée à un point géodésique. 12 feuillets photographiques renseignés ont été rédigés.

Les pièces de ce dossier font partie des documents définitifs de la rédaction ainsi que deux cartes index des amers et des hauts-fonds :

- Carte 987 ; Ile Mayotte : de Dzaoudzi à la pointe Saziley ;
- Carte 6240 ; Ile Mayotte : partie Nord.

ANNEXE A

Mayotte : fiches d'amers et de points géodésiques rédigées par la MHCI

Nom du point	Déterminé par	Observations
1) Baie de Longoni et ses abords		
Balise de Douamougno	IGN 1950 + MHOI 1962	
Balise du vaucluse	MHOI 1963	
Balise de M'Songoma	MHM 1953 + MHCI	balise et repère excentré
Balise de Bandraboua	MHM 1953	
Pointe de Bandraboua	MHCI	repère
Maison blanche à toit rouge de Bandraboua	MHCI	amer
Jetée de M'Goudajou	MHCI	repère
Ile Verta	MHM 1953 + MHCI	balise et repère excentré
Longoni : repère tige de fer	MHCI	repère
Pointe de Longoni	Cabinet Chanliau	repère NGM 26
Pointe de Longoni	MHCI	repère et signal
Balise de l'Ile Blanche	MHCI	
2) Passe Bandélé		
Balise Sud de la passe Bandélé	IGN 1950	
Balise d'alignement de la passe Bandélé	MHM 1953	
3) Dzaoudzi		
Dzaoudzi : feu de la jetée Serali	MHCI	
Dzaoudzi : feu de la jetée Issoufaly	MHCI	
Morne des Indiens	MHCI	repère
Morne de la Mirandole	MHM 1953 + MHCI	repère
Clocher de Dzaoudzi	MHM 1953	
Balise d'alignement de Pamanzu	MHM 1953	
Mamoutzou : feu de la jetée	MHCI	

ANNEXE B

Hauts fonds et obstructions à Mayotte

Baptême	Sonde		Position		Observations
	Carte	Observée	Carte	Observée	
			1) M'Zamboro		
A	9,2	11,2	353 Bal. M'Songoma 3 226 m		Pâté de corail coté à 11,2 après arasement à l'explosif, observé au sondeur et reconnu par plongeur ; adopter 11,2.
			2) Baie de Longoni		
B	20	2,6	111 Bal. M'Songoma 920 m	112 Bal. M'Songoma 990 m	Pâté de corail observé au sondeur et à vue ; adopter 2,6.
			3) Baie de Pamanzi		
A	<u>0,5</u>	—	083 feu Issoufaly 200 m		Rien trouvé au sondeur ni au sondeur latéral avec une insonification de deux directions opposées situé sur le passage quotidien des barges de la Marine ; à supprimer.
B	5,8	5,4	084 feu Issoufaly 240 m	086 feu Issoufaly 245 m	Confirmé ; adopter 5,4.
C	1,4	—	105 feu Issoufaly 180 m		Rien trouvé ; maintenir 1,4.
D	4,2	4,5	082 feu Issoufaly 335 m	082 feu Issoufaly 330 m	Corail ; confirmé au sondeur et par plongeur ; adopter 4,5.
E	10	10,1	006 feu Issoufaly 220 m	010 feu Issoufaly 230 m	Confirmé ; adopter 10,1.
F	5,5	6	036 feu Issoufaly 220 m	036 feu Issoufaly 245 m	Corail ; confirmé par plongeur ; porté en bleu sur la projection de construction ; conserver 5,5.
G	2,1	—	045 feu Issoufaly 180 m		Rien trouvé au sondeur ni au sondeur latéral avec insonification de deux directions opposées ; supprimer.
H		—	046 feu Issoufaly 145 m		Mêmes observations que pour G.
I	3,6	—	049 feu Issoufaly 130 m		Rien trouvé au sondeur ni au sondeur latéral avec une seule insonification ; supprimer.
J	—	3,1		049 feu Issoufaly 155 m	Observé au sondeur et au sondeur latéral avec insonification de deux directions opposées ; porté en rouge sur la projection de construction.
K	—	6,0		093 feu Issoufaly 285 m	Corail ; observé uau sondeur et par plongeur.
			4) Anse Choa		
L	<u>0,9</u>	<u>0,7</u>	082 feu de Mamoutzou 550 m	081 feu de Matmouzou 550 m	Observé au sondeur et à la perche ; adopter <u>0,7</u> .

CHAPITRE IV

LES ILES

1. JUAN DE NOVA

Les travaux à Juan de Nova comprenaient la localisation de deux balises d'alignement et la mise à jour de l'information nautique. Trois journées, du 18 au 21 février 1981, devaient leur être attribuées. Mais, moins de vingt-quatre heures après l'arrivée de la Mission, une dépression tropicale étant annoncée, le *Champlain* était contraint de quitter son mouillage en pleine côte et d'appareiller sans délai pour Mayotte.

Des deux balises d'alignement placées par la MHM en 1953, la balise Sud, située dans l'axe de la piste d'aviation, a été démantelée ; la balise Nord, construction monumentale en maçonnerie, est masquée par les filhaos. Aucune information complémentaire sur les balises à localiser n'a pu être recueillie par ailleurs, ni auprès des autorités maritimes à la Réunion, ni auprès des bâtiments, essentiellement le *Champlain*, qui assurent la liaison régulière avec Juan de Nova.

De nombreuses épaves découvertes, portées sur la carte marine 6643, ont été reconnues à marée basse, sur la platier alors émergé.

Enfin, les amers ont été reconnus. Seuls sont à retenir le phare et la balise Est. Le wharf, qui n'est plus entretenu, tombe en ruines et le feu porté sur la carte marine est par conséquent à supprimer.

Telles sont les observations, partielles, qui ont été recueillies sur place.

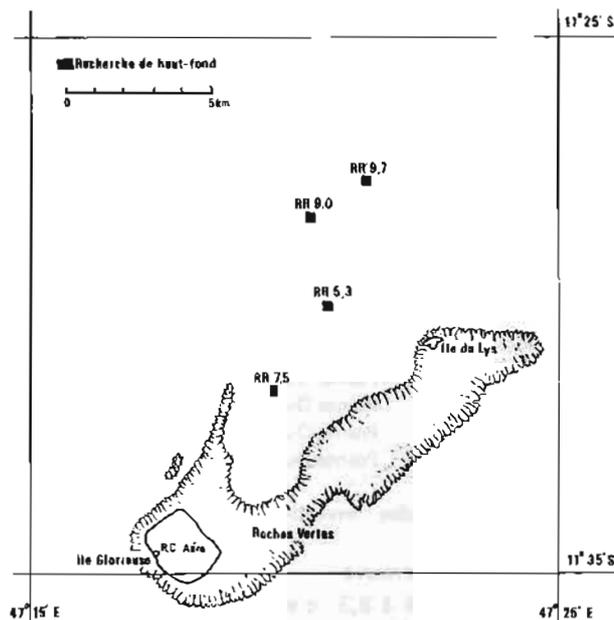
Documents rédigés

Ils se répartissent comme suit :

- une carte index des amers et des épaves n° 6643 : Juan de Nova ;
- six fiches d'épaves ;
- une fiche d'amer : — le phare de Juan de Nova.

2. LES GLORIEUSES

Du 27 février au 1er mars, la MHCI a séjourné aux îles Glorieuses pour combler certaines lacunes du levé de 1977. Au programme étaient inscrites quatre recherches de hauts-fonds et la reprise d'un profil régulier qui avait été omis à l'époque, laissant ainsi un blanc sur une coupure de la MHG (Pl. 6).



PL. 6. — LES GLORIEUSES.

a) Géodésie

Toutes les positions observées sont rapportées au système géodésique mis en place en 1977 par la MHG (*), dont le réseau ne comprenait plus en 1981 que trois points identifiés : la citerne à eau douce du "beaching", la pyramide du Lys et le cocotier remarquable de cette même île. Les coordonnées des points sont exprimées dans un système local avec :

$$(X)_{UTM(38)} = (X)_{local} + (740\ 960)$$

$$(Y)_{UTM(38)} = (Y)_{local} + (8\ 710\ 500)$$

L'embarcation de sonde a été localisée à partir de stations de visées optiques situées à la pyramide du Lys, à la citerne du beaching et au point "M1" reconstitué (*).

Les deux recherches les plus au Nord étaient situées partiellement au-delà de la portée optique. L'embarcation a été localisée à partir de visées optiques issues de la pyramide du Lys et d'angles au cercle pris sur

(*) *Annales Hydrographiques* (1980), n° 754, p. 145.

le cocotier remarquable du Lys et le *Champlain* embossé, son mât rattaché au système géodésique ayant servi de signal.

b) Marée

Une échelle a été érigée à proximité du beaching et la marée a été observée pendant les séances de sonde. Le zéro des sondes de 1977, coté à 5,61 mètres sous le bouchon de vidange de la citerne à eau douce, repère fondamental, a été repris. Un repère secondaire — la plaque commémorative du *Champlain* — a été rattaché.

Les temps portés sur les documents sont ceux du fuseau TU + 3, heure en service aux Glorieuses.

c) Bathymétrie

Quatre pâtés coralliens, qui n'avaient pas été recherchés en 1977, ont été explorés. Leur cote et leur position, issues du rapport de la MHG (*), sont les suivantes : vantes :

	Cote	Position		
(1)	9,7	341	Pointe Ouest de l'île du Lys	6 200 m
(2)	9,0	318	Pointe Ouest de l'île du Lys	5 900 m
(3)	7,5	254	Pointe Ouest de l'île du Lys	5 500 m
(4)	5,3	294	Pointe Ouest de l'île du Lys	3 650 m

Les résultats des investigations sont indiqués ci-dessous :

- (1) n'a pas été trouvé ;
- (2) a été repéré à 8,3 ; c'est une aiguille de corail qui ne pouvait être détectée au sondeur qu'en passant à sa verticale ;
- (3) observé à 7,4, est un pâté isolé dans le sable ;
- (4) également pâté isolé dans le sable, a été coté 6,5.

Le profil 32° 30' issu de la station M 1 de 1977, situé dans le chenal d'accès à la côte Nord-Est de l'île Glorieuse, n'a pas été sondé. En effet, une faute de localisation a été commise, qui n'a été décelée qu'après coup. Le blanc sur la minute B 5² de la MHG subsiste donc.

d) Documents définitifs de la rédaction

Ce sont :

- une minute de recherches R 10¹ : Iles Glorieuses ;
 - une fiche de marée : Iles Glorieuses ;
- février 1981.

3. AGALEGA

Le programme des travaux à Agaléga, possession mauricienne, comportait le levé du mouillage de Saint-James et de ses accès. Entrepris en réponse à une demande du gouvernement de l'île Maurice, il avait pour objectif de remettre un document nautique à

(*) *Annales Hydrographiques* (1980), n° 754, p. 155.

l'aide duquel l'accès maritime à cette terre isolée serait amélioré.

Le levé a été exécuté en trois journées, du 16 au 18 mars 1981, les conditions météorologiques étant excellentes.

a) Géodésie

Les coordonnées géographiques du mât du wharf de Saint-James ont été relevées sur la carte marine n° 2950, (retirée du portefeuille du SHOM en 1973) et transformées en coordonnées UTM dans le fuseau 40 :

$$\varphi = 10^{\circ} 19' 57'' \text{ S} \longrightarrow X = 453\,224,48$$

$$G = 56^{\circ} 34' 22'' \text{ E} \longrightarrow Y = 8\,857,780,55$$

Une station excentrée par rapport à ce mât, située sur le calvaire de Saint-James, a été adoptée comme terme Nord d'une base géodésique dont la longueur, mesurée à l'aide d'un géodimètre AGA 14 est, rapportée à la projection, de 474,78 mètres. Le gisement du terme Sud a été déterminé à partir d'une station centrée sur le terme Nord d'où l'azimut du soleil a été observé. La valeur adoptée pour ce gisement est de 181° 23,2'.

Les coordonnées des termes de la base ont pour valeur :

terme Nord	453 344,70	453 333,20
terme Sud	8 857 951,66	8 857 476,92

La bathymétrie et la topographie de Saint-James ont été rapportées à ce système géodésique sommaire.

b) Marée

Un observatoire a été installé sur le wharf de Saint-James où la marée a été enregistrée de façon continue du 16 au 19 mars.

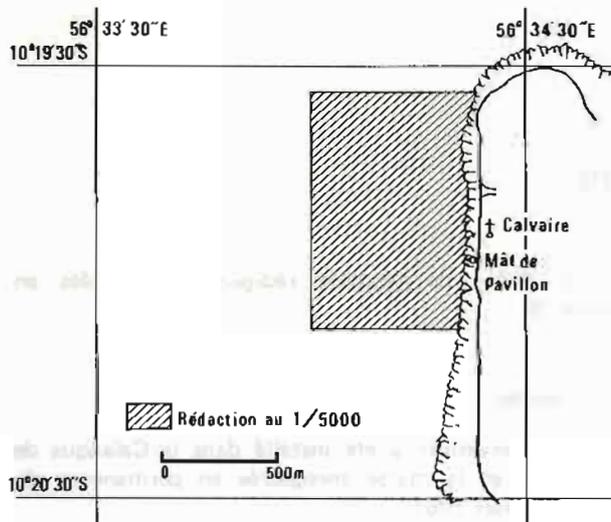
Le zéro des sondes à Agaléga a été déterminé à partir des résultats de ces trois journées d'observation. Sur l'échelle du wharf, le niveau de l'eau à basse mer, correspondant à l'affleurement du platier, a été noté. Par ailleurs, une ébauche de concordance avec la marée de la Réunion a été établie.

Ce zéro, adopté au voisinage des plus basses mers, est à 5,91 mètres sous le repère de nivellement SHOM scellé dans la façade du magasin à coprah de Saint-James, repère fondamental.

Sur les documents de la Mission, les heures à Agaléga sont exprimées en TU + 4.

c) Bathymétrie et topographie

La bathymétrie a été réalisée en suivant des profils espacés de cinquante mètres jusqu'à l'isobathe cinquante mètres, un profil sur deux étant prolongé jusqu'à perdre le fond aux accores du plateau continental. Le rivage est marqué par un récif corallien peu développé, dont la limite coïncide avec la laisse de basse mer. Le fond descend ensuite régulièrement jusqu'à une douzaine de mètres, à environ deux cent cinquante mètres du



PL. 7. — AGALEGA, Saint-James.

rivage, profondeur qui marque la limite du plateau continental.

Le relief très régulier n'a justifié aucune recherche

de hauts-fonds. L'eau est d'une limpidité incomparable, et le fond sableux parsemé de formations coralliennes se décèle, par mer calme, jusqu'à vingt-cinq mètres depuis la surface.

Le levé topographique a été limité au trait de côte, à ses abords et au récif frangeant où quelques sondes à la perche ont été prises.

d) Documents définitifs de la rédaction (Pl. 7)

Ce sont :

- une minute d'écriture B 5¹ : mouillage de Saint-James ;

- une minute définitive BT 5¹ : mouillage de Saint-James ;

Celle-ci comprend le dessin de la topographie et un choix de sondes issues de la B 5¹.

- quatre fiches de géodésie :

- balise d'alignement,
- mât du wharf,
- calvaire,
- terme Sud,

- une fiche d'observatoire de marée : Agaléga, mars 1981.

CHAPITRE V

LA REUNION

GENERALITES

En mars et avril 1981, la MHCI a réalisé deux levés bathymétriques à La Réunion : l'un à Sainte-Rose, l'autre entre Saint-Denis et la Possession. Les conditions météorologiques, pendant cette période, ont été assez médiocres et le levé sur la côte Nord, entre Saint-Denis et la Possession a été contrarié pendant le passage d'une dépression tropicale.

a) Géodésie

Le système géodésique de la Réunion a été mis en place en 1947-49 par l'IGN. Une projection de Gauss-Laborde, dont les principaux éléments sont rappelés en annexe A, lui est associée.

Les deux documents de l'IGN utilisés sont les suivants :

- La Réunion : répertoire des coordonnées et altitudes des points géodésiques - Edition mai 1955 ;
- La Réunion : photogrammétrie, répertoire général - année 1978.

b) Marée

A Port-des-Galets, la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) dispose d'un observatoire où la marée est enregistrée en permanence à l'aide d'un marégraphe OTT R16.

Le zéro des sondes à Port-des-Galets est à 8,56 mètres sous le repère fondamental fixé sur le pignon Nord du bureau, dit des ponts et chaussées, dans les anciens ateliers du port.

1. SAINTE-ROSE

Il s'agissait de rechercher, devant Sainte-Rose, des fonds favorables à l'implantation de canalisation sous-marines d'eau douce, et à la construction d'un terminal destiné à recevoir des supertankers. Un levé régulier, réalisé en trois journées, a montré que le site envisagé, rocheux et très en pente, entaillé par des canyons, n'était guère favorable à la poursuite de ce projet.

a) Géodésie

Les mesures géodésiques avaient pour objet de rattacher au réseau de l'IGN les stations de visée optique à partir desquelles était localisée la vedette de sonde.

Les fiches de géodésie rédigées sont listées en annexe B.

b) Marée

Un observatoire a été installé dans la Calanque de la marine et la marée enregistrée en permanence du 24 au 28 mars 1981.

L'échelle des enregistrements était de 1,6 cm/heure pour les temps et de 1/25 pour les hauteurs. Les temps portés sur les marégrammes, comme sur tous les documents des levés à La Réunion, sont rapportés à l'heure en service, soit TU + 3.

L'observatoire était rattaché à trois repères :

- le repère SHOM scellé dans le mur de la jetée de Sainte-Rose, repère fondamental ;
- le sommet de la borne située à 10 mètres de l'extrémité de cette jetée ;
- l'organeau scellé dans un rocher près de l'enracinement de la jetée.

Le zéro des sondes, déterminé en concordance avec celui de Port-des-Galets, à partir de seulement cinq journées d'observation, est à 4,99 mètres sous le repère fondamental.

c) Bathymétrie

Il était prévu de sonder la zone en suivant des profils espacés de cinquante mètres jusqu'à l'isobathe 100 mètres, un profil sur deux étant prolongé jusqu'à perdre le fond. En fait, dès le rivage, la pente était si forte, supérieure à 20 %, que le fond était perdu bien avant de franchir cette isobathe 100 mètres.

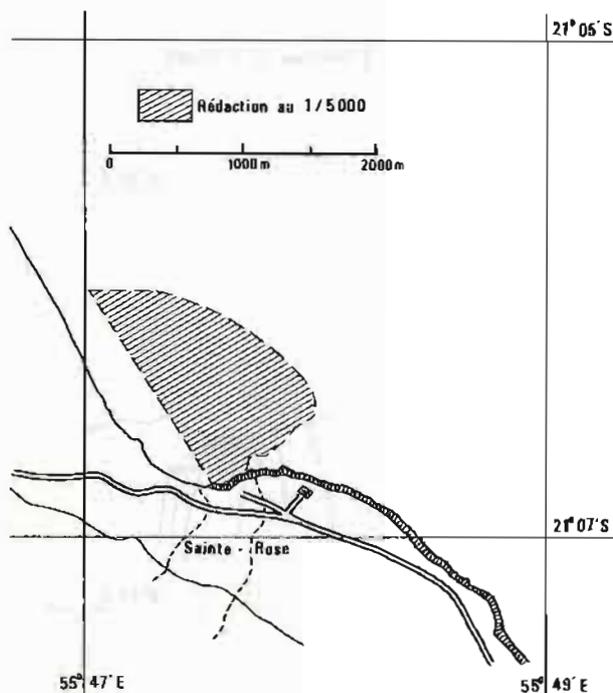
La rédaction de la bathymétrie fait ressortir la présence de canyons qui marquent profondément le relief sous-marin.

En raison de cette configuration tourmentée, l'exploration au sondeur latéral et les observations de courant, qui auraient dû compléter le levé régulier n'ont pas été entreprises.

d) Documents définitifs de la rédaction (Pl. 8)

Ils se composent de :

- une minute bathymétrie B 5¹ : La Réunion, Sainte-Rose ;
- une fiche d'observatoire de marée : Sainte-Rose, mars 1981 ;
- six fiches de géodésie.



PL. 8. — LA REUNION, Sainte-Rose.

2. DE SAINT-DENIS A LA POSSESSION

Saint-Denis est relié à Port-des-Galets par une autoroute côtière qui, jusqu'à la Possession, longe la falaise surplombant une côte montagneuse et accore. Cette voie, rapportée sur la mer, en est protégée par un rem-

part de tétrapodes en béton sur lesquels la houle se brise. Ce rempart artificiel travaille et son entretien requiert en permanence des travaux de génie civil. Les efforts exercés par la mer ne sont d'ailleurs pas répartis uniformément. Aussi, un modèle de propagation de la houle apportera probablement des informations intéressantes en vue de la mise en place et de la répartition des tétrapodes.

En préalable à une éventuelle réalisation de ce modèle, une convention a été passée, entre la Marine et la DDE de la Réunion, pour l'exécution d'un levé bathymétrique.

La zone couverte par ce levé concerne également les abords d'un futur port à la Possession.

Les instructions notifiées à la Mission prescrivaient par ailleurs d'étendre les travaux jusqu'à Sainte-Marie. La durée du séjour étant limitée, et la MHC1 ayant reçu des ordres pour quitter La Réunion à la mi-avril 1981, il n'a pas été possible de progresser au-delà de Saint-Denis. (Pl. 9).

a) Géodésie

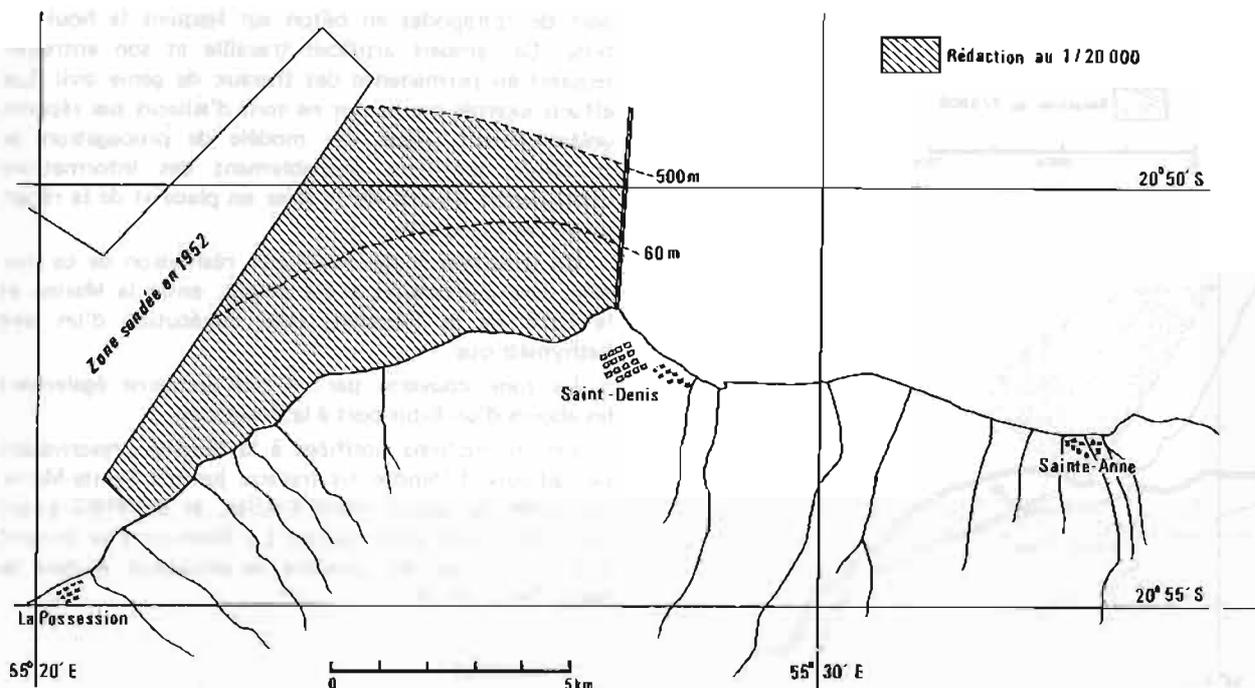
Les opérations d'extension à la côte du réseau de l'IGN, entre la Possession et Saint-Denis, ont été soustraitées, par l'intermédiaire de la DDE, auprès du cabinet de monsieur Dezaubris, géomètre à Port-des-Galets. Celui-ci a effectué, avec un ensemble théodolite-géodimètre, une polygonation de Saint-Denis à Port-des-Galets. Longue de vingt-six kilomètres, cette polygonale comprend neuf sommets et la fermeture a pour valeur:

$$\Delta x = + 26 \text{ cm}$$

$$\Delta y = + 37 \text{ cm}$$



La route côtière entre Saint-Denis et la Possession. Une station de visées optiques (noter en contrebas, les tétrapodes de protection de l'ouvrage).



PL. 9. — LA REUNION. De Saint-Denis à la Possession.

Les sommets, situés sur le bas-côté de l'autoroute, n'ont été que sommairement repérés. Des engins de travaux publics évoluant en permanence sur les bas-côtés de l'autoroute, les repères n'ont aucune pérennité. Aucune fiche de géodésie n'a donc été ouverte.

b) *Marée*

Les sondes ont été réduites, à partir de la marée enregistrée à Port-des-Galets, au zéro des sondes de ce port.

c) *Bathymétrie*

En s'appuyant sur les sommets de la polygone Dezaubris, des stations de visées optiques, à raison d'une tous les deux cents mètres, ont été rattachées. Ces stations, situées en bordure de l'autoroute, gêneraient des profils parallèles, orientés à peu près perpendiculairement à la côte et espacés de deux cents mètres.

Ces profils ont été suivis jusqu'à l'isobathe 60 mètres, un sur deux étant prolongé au large jusqu'à l'isobathe 500 mètres et, pratiquement, jusqu'à perdre le fond. A terre, la sonde a été interrompue, pour des raisons de sécurité, peu après l'isobathe 10 mètres au-delà de laquelle la houle grossit avant de déferler et de briser sur les tétrapodes.

Aucun levé complémentaire ni aucune recherche localisée n'ont été entrepris et il y a lieu de signaler les lacunes suivantes :

— deux profils manquent à l'Est, laissant un blanc dans le levé ;

— le suivi de quelques profils intercalaires, dans la partie centrale, aurait été utile pour préciser, au vu des résultats du levé régulier, le relief entre les isobathes 50 et 60 mètres.

d) *Topographie*

Le parapet de protection de l'autoroute, qui la protège des embruns, est pratiquement figuré par le trait de côte. Il a été levé et tracé sur la minute de bathymétrie.

e) *Document définitif de la rédaction*

C'est le suivant :

— une minute de bathymétrie B 20¹ : de Saint-Denis à la Possession.

3. INFORMATION NAUTIQUE

A l'occasion des séjours du *Champlain* à Port-des-Galets (représenté en cartouche sur la carte n° 1224), la Mission a reconnu le balisage de ce port. Un dossier comprenant une carte-index des amers et dix feuillets photographiques renseignés et deux fiches d'amer a été constitué.

ANNEXE A

La projection Gauss Laborde de La Réunion

C'est une double projection conforme:

1) de l'ellipsoïde international sur la sphère de courbure moyenne au point 0:

$$0 \begin{cases} \varphi_0 = 21^\circ 07' S \\ G_0 = 55^\circ 32' E \end{cases}$$

2) de la sphère sur le plan sans coefficient de réduction d'échelle.

Elle peut être assimilée dans son champ d'application à une projection UTM du fuseau $n = 39,75555...$ avec une dilatation de $1/0,9996$, inverse du coefficient de réduction d'échelle de l'UTM.

Le point origine 0 a pour coordonnées rectangulaires:

$$0 \begin{cases} X = 160\,000 \\ Y = 50\,000 \end{cases}$$

Avec les notations classiques de la projection UTM, le processus de transformation des coordonnées géogra-

phiques en coordonnées rectangulaires, et vice-versa, est le suivant:

$$(\varphi, G) \iff (X, Y) \iff (\Delta E, N) \iff (X, Y)$$

UTM $n = 39,7555...$ Gauss Laborde

Les formules de transformation sont indiquées ci-dessous:

$$\begin{pmatrix} \Delta E \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_{UTM\ n = 39,7555...} + \begin{pmatrix} -500\,000 \\ -10^7 + 210^6 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \frac{1}{0,9996} \begin{pmatrix} \Delta E \\ -N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 160\,000 \\ 385\,223,40 \end{pmatrix}$$

Gauss Laborde

$$\begin{pmatrix} \Delta E \\ N \end{pmatrix} = 0,9996 \begin{pmatrix} X \\ -Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -160\,000 \\ 385\,223,40 \end{pmatrix}$$

Gauss Laborde

ANNEXE B

La Réunion : fiches d'amers et de points géodésiques rédigés par la MHCI

Nom du point	Déterminé par Sainte-Rose	Observations
Centrale hydro-électrique de Sainte-Rose	DDE	Borne Est
Centrale hydro-électrique de Sainte-Rose	MHCI	Douille
Centrale hydro-électrique de Sainte-Rose	DDE	Borne M 20
Pointe Bonne Espérance	MHCI	Douille
La Ravine Sèche	IGN	Borne de l'IGN
Monument de Sainte-Rose	MHCI	Amer

ANNEXE I

"LE CHAMPLAIN" «*ГЛАВНОЕ*»

Il appartient à la classe dite des "bâtiments de transport léger" (Batral), conçus pour recevoir du matériel en container ou en vrac, ainsi que des unités de combat avec leurs véhicules. Ces navires peuvent beacher et débarquer ou embarquer des véhicules par leur porte d'étrave.

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Déplacement : 1 300 tonnes
Tirant d'eau : 3,4 mètres
Longueur : 80 mètres
Largeur : 13,8 mètres
Vitesse : 13 nœuds

Leur effectif comprend six officiers, dix-sept officiers mariniers et vingt-sept quartiers-maîtres et matelots. Tous les locaux vie, à l'exception des postes de passagers, sont climatisés. Il n'y a pas, normalement, de restrictions d'eau douce.

Pendant le séjour de la MHCI, la "chambre du gouverneur" a été attribuée au directeur de la Mission, l'IETA

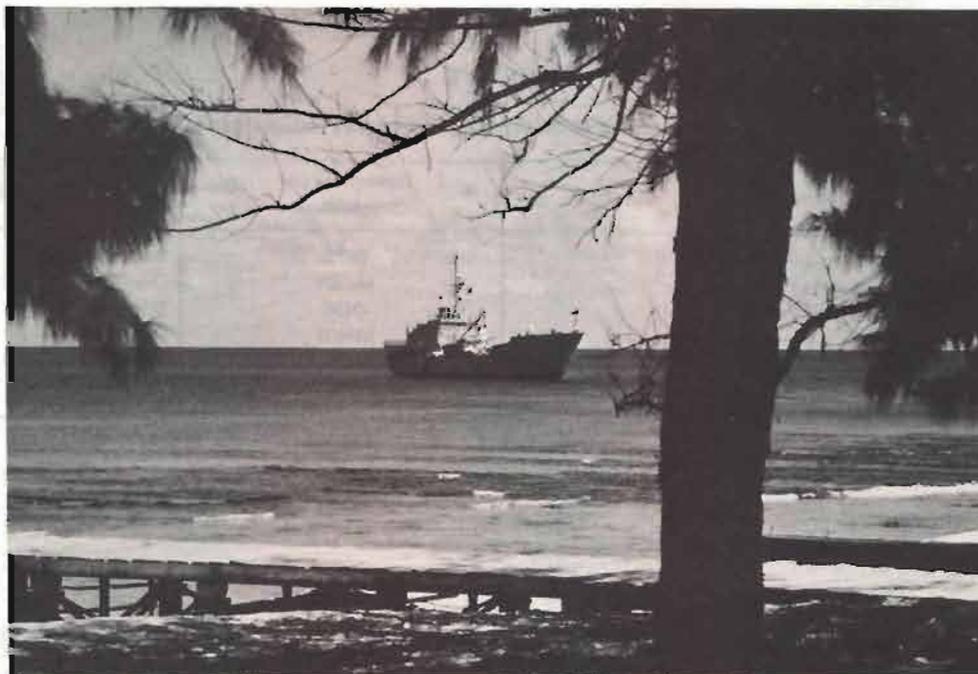
a partagé la chambre de l'officier en troisième et les trois officiers mariniers hydrographes ont occupé les places disponibles d'un poste de quartiers-maîtres.

Le matériel spécifique, ainsi que les documents d'observation et de rédaction, ont été entreposés dans un poste de passagers : le matériel lourd, tel que le bois, les tourets des câbles du sondeur latéral, le ciment... restant dans le hangar.

La chambre des cartes, climatisée, où une projection de format A₀ peut être déployée, a été utilisée comme salle de dessin. La rédaction des levés a été entreprise pendant la campagne. La "chambre du gouverneur" a servi également de bureau de calcul.

La drôme du *Champlain* comprend deux LCVP et deux dinghies, l'un de douze places, l'autre de six. Ces dinghies ont joué un rôle essentiel pour les liaisons avec les stations à terre. Le LCVP n° 2 a été utilisé pendant toute la campagne, sauf à La Réunion, comme embarcation d'hydrographie.

Sa description figure en annexe II.



Le *Champlain* à Agaléga, au mouillage de Saint-James.

ANNEXE II

LE LCVP N° 2 DU "CHAMPLAIN"

Le LCVP (Landing Craft Vehicle and Personnel) est une embarcation de transport de personnel et de véhicules légers. A fond plat, il peut beacher pour embarquer ou débarquer son chargement par la porte d'étrave.

Les caractéristiques sont les suivantes :

Déplacement en charge :	12,4 tonnes
Longueur :	10,4 mètres
Largeur :	2,6 mètres
Vitesse en transit :	7 nœuds
Moteur :	un moteur Baudoin 6 cylindres de 80 CV.

Le LCVP N° 2 du *Champlain*, déjà utilisé par la Mission hydrographique des Glorieuses (MHG) en 1977, a été sommairement équipé — par les moyens du bord — en embarcation d'hydrographie. Ont été embarqués :

- un sondeur NUBS 12 A à base hors-bord,
- un sondeur latéral Edgerton,
- un émetteur récepteur VHF TRPP 13.

La plaque de fixation de la base hors-bord du sondeur vertical a été vissée sur un support en bois, lui-même vissé une fois pour toutes sur le plat-bord de l'embarcation, à toucher la face avant de

la cloison qui sépare la cuve du compartiment arrière. Les ensembles enregistreur et émetteur-récepteur ont pris place dans un rack calé sur une caisse, à tribord, à proximité de la base.

Sur la plage arrière, un touret, porteur du câble de cent cinquante mètres du sondeur latéral, a été installé sur une structure en bois, le poisson étant saisi, au repos, sur une caisse vide faisant office de berceau.

Quelques tables de camping, — une pour le secrétariat, une pour la projection d'embarcation, une pour la valise du sondeur latéral —, ont été disposées à l'arrière de la cuve transformée ainsi en P.C. hydrographique spacieux et commode. L'ensemble était abrité par un prélat, protection indispensable contre le soleil implacable et des pluies torrentielles. En dehors des séances à la mer, tous les appareils restaient bâchés pour les protéger autant que possible de l'humidité et de l'air salin.

Le sondeur vertical était alimenté sous 24 volts par les batteries de bord chargées en tampon par l'alternateur du moteur, tandis que le sondeur latéral prélevait son énergie sur des batteries de 100 Ah, embarquées pour la circonstance et rechargées pendant la nuit. La capacité de 70 Ah des batteries de bord était en effet



LCVP 2 du *Champlain* (noter le poisson et le touret à l'arrière).



LCVP 2 du *Champlain*. Détail de la plaque d'embase du soudeur.

insuffisante pour alimenter en même temps ces deux sondeurs.

Enfin, un mâtereau portant pavillon a été érigé, signal sur lequel étaient prises les visées optiques nécessaires à la localisation.

Le LCVP est, au demeurant, une embarcation puissante, mais lourde et peu manœuvrante, sensible à

la dérive due au vent, tossant volontiers dans le clapot. Sa tenue de route sur profil requiert par conséquent la présence d'un patron confirmé. Mais, spacieux et robuste, d'un faible tirant d'eau, cet engin de débarquement s'est en définitive révélé, après une période d'entraînement et de mise au point, tout à fait apte à remplir sa mission.

ANNEXE III

LE BAME 9084

Bâtiment atelier de mécanique et d'électricité, il soutient les unités stationnées à Mayotte. Son effectif comprend un major, commandant, six officiers mariniers et seize quartiers-maîtres et matelots.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

Déplacement : 650 tonnes
Tirant d'eau : AV 1,2 m AR 1,7 m
Longueur : 59 mètres
Largeur : 11,9 mètres
Vitesse : 9 nœuds

Pendant la majeure partie des travaux à Mayotte, la mission est restée embarquée à bord du BAME 9084. En accueillant le personnel hydrographe, en assurant la maintenance du LCVP du *Champlain*, en apportant le concours de son équipage, en mettant des locaux à la disposition de la Mission, le BAME a joué de façon exemplaire son rôle de bâtiment hydrographe.

L'officier en second avait laissé sa chambre au directeur de la Mission tandis que l'IETA et les officiers mariniers étaient installés dans le poste des seconds-maîtres. Tous les locaux sont climatisés et l'eau douce est distribuée sans restriction.

Chaque séance de bathymétrie requérait, de la part

du BAME, la désignation d'un patron d'embarcation et de quatre ou cinq secrétaires, à prélever sur un effectif déjà restreint. Cette servitude s'ajoutait, naturellement, à celles du service ordinaire à bord et il a fallu, pour armer l'embarcation et les stations à terre, faire appel au Détachement de la Marine à Mayotte.

Le BAME ne disposait pas, bien entendu, de salle de dessin ; la rédaction a donc été poursuivie dans le carré, mis à la disposition par le commandant, ainsi que dans la chambre des cartes et, surtout, dans le poste des seconds-maîtres où une planche de contre-plaqué avait été posée sur la bannette d'un hydrographe.

Les équipements étaient entreposés dans les locaux avant, en abord de la cuve, qui elle-même offrait toutes facilités pour abriter le bois, les tourets, dérouler des câbles, préparer des lignes de mouillage pour les courantomètres. De plus, la manutention était très aisée par la rampe qui, au mouillage, restait abaissée en permanence.

Les liaisons avec la terre, en particulier pour armer les stations de visées optiques, étaient assurées par un dinghy dont les pannes du moteur, hors d'âge, ont causé bien des soucis. De nombreuses pertes de temps en ont résulté.



BAME 9084 à Mayotte, en route près de l'île Andréma.

ANNEXE IV

LA VEDETTE P 779

C'est une vedette de surveillance côtière armée par la Gendarmerie. Sa coque est en matière plastique. Ses caractéristiques sont les suivantes ;

Longueur : 21 mètres
Largeur : 4,4 mètres
Tirant d'eau : 1,2 mètres
Déplacement : 27 tonnes
Vitesse maximum : 23 nœuds
Vitesse minimum : 7 nœuds

Il est cependant possible, en freinant une ligne d'arbre, de soutenir une allure inférieure à sept nœuds, au détriment toutefois de l'aptitude à gouverner et par conséquent de la tenue sur profil.

Pendant la durée des travaux à La Réunion, la P 779 a été équipée d'un sondeur vertical à base hors-bord, avec le concours du Service des Constructions et Armes Navales (SCAN) de La Réunion.



VEDETTE P 779.

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

	Pages
J. BOURGOIN : L'ingénieur Hydrographe Général Henri DYEVE (1893-1982)	3

PREMIERE PARTIE

B. SAINT-GUILY : Ondes de frontières dans une mer stratifiée dont le fond est incliné	7
M. FORMERINO et G. CHABERT D'HIERES : Etude des courants de la marée M_2 dans la Manche à l'aide du modèle réduit de Grenoble	13
B. SIMON : Prédiction de la marée à Brest	33
K.J. GEORGE : Application de la méthode des concordances par espèce à la marée dans la Loire	51
M. CHAMPAGNE-PHILIPPE, D. GUEVEL et R. FROUIN : Etude du front de Malte à partir de données de télédétection et de mesures in-situ	65

DEUXIEME PARTIE

P. SOUQUIERE : Les vedettes hydrographiques en service en 1981	101
F. HABERT : Mission Hydrographique de Circonstance de l'Océan Indien (décembre 1980-avril 1981)	113

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

	Pages
J. BOURGOIN : L'ingénieur Hydrographe Général Henri DYEVE (1893-1982)	3

PREMIERE PARTIE

B. SAINT-GUILY : Ondes de frontières dans une mer stratifiée dont le fond est incliné	7
M. FORMERINO et G. CHABERT D'HIERES : Etude des courants de la marée M_2 dans la Manche à l'aide du modèle réduit de Grenoble	13
B. SIMON : Prédiction de la marée à Brest	33
K.J. GEORGE : Application de la méthode des concordances par espèce à la marée dans la Loire	51
M. CHAMPAGNE-PHILIPPE, D. GUEVEL et R. FROUIN : Etude du front de Malte à partir de données de télédétection et de mesures in-situ	65

DEUXIEME PARTIE

P. SOUQUIERE : Les vedettes hydrographiques en service en 1981	101
F. HABERT : Mission Hydrographique de Circonstance de l'Océan Indien (décembre 1980-avril 1981)	113

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
Publications scientifiques et littéraires
05002 GAP - Tél. : (92) 51.35.23
Dépôt légal : 492 - Octobre 1982