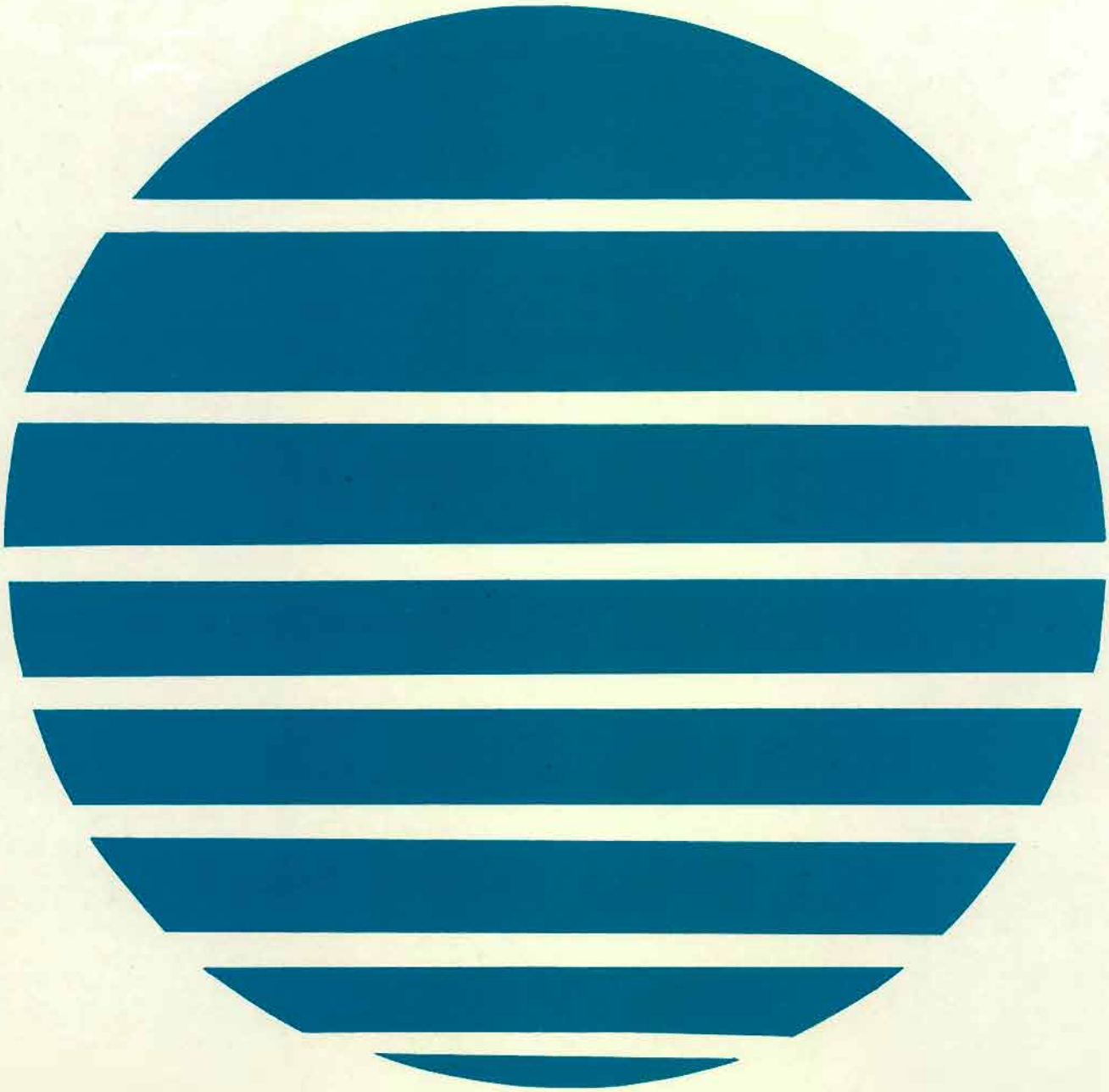
ISSN 0373-3629

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

5ème Série - Vol. 14 - 1986

N° 761



Service Hydrographique
et Océanographique de la Marine - Paris

761 - ZTL

- 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.
- Les idées exprimées dans les articles sont celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement le point de vue du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
- 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.

ERRATUM

aux

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

(4ème série, Tome 16, 1970)

p. 111 : avant dernière ligne, lire dX = 1,62 m au lieu de dX = 2,62 m.

ANNALES HYDROGRAPHIQUES

TABLE DES MATIÈRES

Première partie

Pages

Etude analytique d'un modèle des marées littorales à l'aide des multiplicités bicaractéristiques. Troisième partie (A) : étude qualitative de singularités a priori rencontrées au voisinage de la frontière côtière. Application aux baies et aux caps, par MM. Y. BIOLLAY, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne (Suisse) et J. KRAVTCHENKO, Université Scientifique et Médicale, Grenoble 5

Localisation d'un avion au cours de missions photoaériennes, par MM. J.M. CHIMOT et M. LE GOUIC, Ingénieurs Principaux de l'Armement (Hydrographe) 33

Partie 1. — Choix d'un modèle d'évolution à court terme de la couche de mélange océanique, par M. J. SAUVEL, Ingénieur de l'Armement (Hydrographe) 41

Partie 2. — Test sur une utilisation opérationnelle simple d'un modèle d'évolution à court terme de la couche de mélange océanique, par M. J. SAUVEL, Ingénieur de l'Armement (Hydrographe) 49

Partie 3. — Echelles temporelles et verticales pour la température et pour ses variations à court terme au point P (50° N, 145° W) par M. J. SAUVEL, Ingénieur de l'Armement (Hydrographe) 57

Deuxième partie

Mission Océanographique du Pacifique (1er octobre 1982 — 30 avril 1984) par M. J.P. THOUIN, Ingénieur en Chef de l'Armement (Hydrographe) 69

Mission Océanographique de Méditerranée (14 octobre 1983 — 7 octobre 1985) par M. J. LAPORTE, Ingénieur Principal de l'Armement (Hydrographe) 131

5e Série, Vol. 14 — 1986
N° 761

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE ANALYTIQUE D'UN MODÈLE DES MARÉES LITTORALES À L'AIDE DES MULTIPLICITÉS BICARACTÉRISTIQUES

TROISIÈME PARTIE (A)
ÉTUDE QUALITATIVE DE SINGULARITÉS A PRIORI RENCONTRÉES AU VOISINAGE DE LA FRONTIÈRE CÔTIÈRE APPLICATION AUX BAIES ET AUX CAPS

par

Yves BIOLLAY, Ecole Polytechnique Fédérale, CH-1007 Lausanne (Suisse)
Julien KRAVTCHENKO, Université Scientifique et Médicale, F-38100 Grenoble (France)

RÉSUMÉ

Nous abordons, dans les premiers paragraphes de cette partie, l'étude qualitative des solutions singulières du système (E) déterminées à l'aide des surfaces bicaractéristiques, et de l'allure de celles-ci au voisinage des caps et des baies.

ABSTRACT

We tackle, in the first sections of this part, the qualitative study of the singular solutions of the system (E) determined by the characteristic surfaces, and of the behaviour of these in the neighborhood of the capes and of the bays.

Note typographique

Comme déjà pratiqué dans les précédentes parutions, on affectera de l'indice I, II ou III les références se rapportant respectivement à la première partie, deuxième partie (A) ou deuxième partie (B) (cf. *Annales Hydrographiques*, volume 11, fasc. 758 (1983), p. 1-12; vol. 12, fasc. 759 (1984), p. 5-14; vol. 13, fasc. 760 (1985), p. 7-26).

3. ÉTUDE DE QUELQUES TYPES DE SINGULARITÉS DES SOLUTIONS DE (E)

3.1. Introduction

Nous avons montré au § $(2.3)_{II,III}$ qu'une solution régulière $(1.1)_I$ d'un système (e) associé à (E) pouvait être considérée comme une représentation paramétrique d'une solution régulière de (E), même lorsque les surfaces coordonnées S_α, S_β, S_γ possèdent des plans tangents parallèles à Ot. Nous traiterons quelques applications de ce résultat en en combinant l'emploi avec les propriétés des enveloppes d'une famille à un paramètre de surfaces porteuses des multiplicités bicaractéristiques de (E). On établit ainsi que la *zone d'influence* des conditions initiales de (E) [cf. $(2.3.6)_{III}$] (c'est-à-dire le domaine de $Oxyt$ où la solution de (E) est déterminée uniquement par les données de Cauchy $u(x, y, 0)$, $v(x, y, 0)$, $\zeta(x, y, 0)$, définies dans le domaine d [cf. notations au $(\S\ 1.5)_I$]) peut admettre pour une partie de sa frontière une surface bicaractéristique très irrégulière, comportant des arêtes ou des points coniques.

Il en est toujours ainsi en particulier lorsqu'une portion de $\overline{d}_2$ (frontière terrestre) comporte des points anguleux (caps ou baies) dont on veut déterminer l'influence sur le mouvement des eaux océanes. L'allure des inconnues u, v, ζ pour $t > 0$ en des points singuliers de $\overline{d}_2$ sera précisée dans

une publication ultérieure, dans laquelle nous adapterons les raisonnements développés ci-après à l'étude de la situation qu'on vient de décrire.

Mais les singularités des inconnues peuvent avoir une autre origine, car dans la plupart des problèmes aux limites mixtes, posés relativement à (E), apparaît une discontinuité entre les données initiales et les conditions aux limites imposées le long de la frontière marine $\overline{d}_1 \subset \overline{d}$. En effet, très souvent, les numériciens supposent le liquide au repos à l'instant initial, c'est-à-dire qu'ils choisissent $u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = \zeta(x, y, 0) \equiv 0$, $\forall (x, y) \in d$. Par ailleurs, ils se donnent a priori le long de $\overline{d}_1$ soit la répartition des vitesses normales V_n, soit celle des dénivellations ζ. V_n ou ζ sont généralement exprimés sous forme de polynômes trigonométriques et multipériodiques en t. La pulsation de chaque terme est une donnée, alors que son amplitude et sa phase sont des fonctions de $(x, y) \in \overline{d}_1$ qu'on choisit de manière à représenter au mieux les valeurs naturelles de ces deux grandeurs, a priori très mal connues. Il s'ensuit que pour $t = 0$, V_n et ζ sont $\neq 0$ en général, d'où résulte la discontinuité indiquée.

Remarquons que le choix ci-dessus des conditions aux limites traduit analytiquement le problème de l'établissement du régime multipériodique sur le modèle réduit de laboratoire destiné à l'étude expérimentale des marées littorales. En effet, les eaux enfermées dans le bassin de l'installation sont toujours au repos à l'instant initial, où elles sont mises en mouvement à l'aide de batteurs simulant l'action excitatrice des eaux océanes sur la mer littorale étudiée. Mais il se trouve que la formulation précédente des conditions aux limites s'avère utile même dans l'étude des phénomènes in situ, bien que les conditions initiales réalistes soient toujours différentes du repos. Cela tient à ce que les termes frottements de (E) amortissent très rapidement l'influence des conditions initiales, en sorte que le régime établi est quasi-indépendant de celles-ci et ne dépend pratiquement que des données frontières imposées le long de $\overline{d}_1$.

Ainsi — et contrairement à ce qui se passe dans le voisinage des caps et des baies — nous n'avons plus affaire, sur $\overline{d}_1$, à des singularités ponctuelles isolées mais à une ligne singulière. En vue d'étudier l'allure pour $t > 0$ de u, v, ζ dans le voisinage de celle-ci, nous introduirons une hypothèse a priori, limitant peut-être la portée de notre analyse, mais qui paraît physiquement plausible et qui semble suffisante pour couvrir tous les cas pratiques.

Observons d'abord que le tracé de $\overline{d}_1$ est dans une large mesure arbitraire; on peut alors, sans restreindre la généralité, supposer cette courbe régulière. Soient $M_0(x_0, y_0, 0)$ un point courant de $\overline{d}_1$ et $M(x, y, t)$ un point du demi-cylindre D, extérieur à la zone d'influence des conditions initiales, dont la frontière sera notée S_0 et qui est une surface bicaractéristique de (E). Notons L une courbe régulière décrite par M et dont M_0 est une des extrémités. Nous admettrons que $u(M)$, $v(M)$, $\zeta(M)$ sont des fonctions régulières de M sur L, de telle sorte que $\lim_{M \to M_0} f(M)$, $f = u, v$ ou ζ, existent pour chaque L; mais *ces limites dépendent de* L. Dès lors, si (cf. fig. 7) :

i) L est tracée sur la surface latérale de D, ces limites se raccordent continûment avec les valeurs en M_0 de V_n ou de ζ ;

ii) L est tracée sur S_0, les limites ci-dessus sont nulles.

On peut montrer alors que dans le voisinage $\mathcal{V}(\overline{d}_1)$ de $\overline{d}_1$, limité par S_0 et la surface latérale

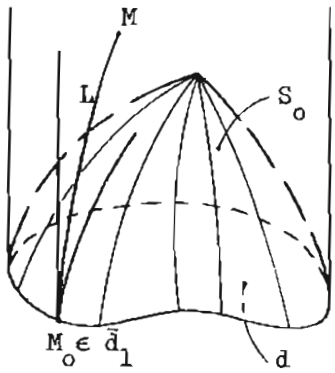


FIG. 7

de D, il existe une solution d'un système (e) convenablement choisi, régulière dans $\mathcal{V}(\overline{d}_1)$, mais ne vérifiant plus la condition $(1.2)_{\text{I}}$ sur $\overline{d}_1$.

Nous étudierons en détail, *localement*, cette solution et préciserons la nature des discontinuités que u, v, ζ présentent le long de cette ligne. C'est l'extension au système (E) de la méthode, dite de régularisation, dont l'emploi s'est déjà révélé efficace en plasticité statique plane (cf. $[1]_{\text{I}}$).

Ces résultats permettent de définir un algorithme régulier de calcul approché des inconnues dans $\mathcal{V}(\overline{d}_1)$ et d'éviter ainsi aux numériciens le recours à des méthodes de lissage plus ou moins appropriées.

Nous pensons que cette étude de la solution de (E) dans $\mathcal{V}(\overline{d}_1)$, fondée sur l'utilisation des variables caractéristiques α, β, γ contribuera à mettre en évidence l'intérêt théorique et pratique de leur emploi systématique. De plus, il convient de remarquer qu'on peut adapter nos raisonnements à d'autres types de systèmes hyperboliques à 3 inconnues de 3 variables indépendantes, en particulier dans l'analyse des singularités a priori que peuvent présenter les solutions de problèmes concrets des ondes planes, soit qu'il s'agisse des ondes de gravité se propageant en liquide parfait dans un canal à houle de laboratoire, ou des ondes se propageant dans un solide à l'état plastique.

3.2. Construction des surfaces intégrales de $(2.11)_{\text{II}}$ douées de singularités

3.2.1. Remarques préliminaires

Considérons encore une solution (u, v, ζ) de (E), donnée et définie dans le cylindre $(D + \overline{D})$ $[(x, y) \in d, -\infty < t < \infty]$ où elle est régulière $R^{(2)}$. Nous nous proposons de construire dans D les surfaces S, intégrales de $(2.11)_{\text{II}}$ et qui présentent des singularités coniques et des lignes doubles (arêtes); cf. $(2.3.6)_{\text{III}}$ et, en particulier, la fig. 5. Nous avons, du reste, annoncé à plusieurs reprises l'existence de telles surfaces, porteuses des multiplicités $m(S, u, v, \zeta)$ bicaractéristiques de (E), attachées à toute solution régulière de ce système. C'est ce point que nous allons justifier ci-après en toute rigueur. La démonstration est fondée sur la théorie des enveloppes d'une famille des surfaces dépendant d'un paramètre, sommairement rappelée en $(2.3.4)_{\text{III}}$. Pour simplifier et unifier l'exposé, nous admettrons que toutes les fonctions, toutes les courbes et les surfaces que nous aurons à considérer sont régulières $R^{(2)}$, sauf les surfaces S, introduites ci-dessus et qui peuvent, d'après ce qui précède, présenter des points singuliers dont on vient de préciser la nature. Ces hypothèses de régularité seront admises tout au long de cet alinéa : sans être toutes nécessaires, elles sont commodes et, aussi, largement suffisantes pour assurer la validité des énoncés qui suivent.

3.2.2. Construction et propriétés des surfaces S possédant un seul point conique

Soient : P, un point arbitraire $\in$ D; C (P), le cône caractéristique de (E) en P; π (P), un plan passant par P et orienté dans l'espace en ce point; f une droite quelconque, passant par P et $\subset \pi$ (P); $(p_0, q_0, -1)$, les paramètres directeurs d'un des deux plans passant par f et tangents à C (P), de sorte que p_0 et q_0 sont liés par $(2.11)_{\text{II}}$, où u (P), v (P), ζ (P) sont des données. Nous supposons, pour simplifier les raisonnements qui suivent, que C (P) n'admet pas de plan tangent parallèle à Ot. Rappelons à ce propos que cette hypothèse est pratiquement toujours satisfaite (cf. par exemple, les § $(2.3.3.)_{\text{I}}$ et $(2.3.6)_{\text{III}}$). Mais il serait aisé de lever la restriction que celle-ci impose.

De ce qui précède, il résulte que les inégalités $(2.49)_{\text{III}}$ sont vérifiées. Comme π (P) est orienté dans l'espace, on peut résoudre $(2.11)_{\text{II}}$ en q_0 par exemple, et écrire : $q_0 = q_0(p_0)$, le second membre étant une fonction analytique régulière — donc, a fortiori, régulière $R^{(2)}$ — de son argument lorsque f balaie π (P) en tournant autour de P.

Soit $\Gamma(P, p_0, q_0(p_0))$, la caractéristique de $(2.11)_{\text{II}}$, issue de P; cette courbe, dont les deux extrémités $\in$ D, est donc régulière $R^{(2)}$. Comme $q_0(p_0)$ est une fonction de p_0 régulière $R^{(2)}$, il en résulte que la surface S (P), engendrée par $\Gamma(P, p_0, q_0(p_0))$ quand p_0 varie, possède la même propriété, sauf en P, qui est l'unique point singulier (conique) de S (P) (cf. $2.3.4)_{\text{III}}$; on voit, de plus, que S (P), d'après sa construction même, est porteuse d'une multiplicité bicaractéristique de (E). Comme $q_0(p_0)$ est indépendante du choix de π (P), la surface S (P) est unique. Ainsi, les raisonnements qui précèdent établissent, d'une part, l'existence des surfaces intégrales de $(2.11)_{\text{II}}$, douées d'un seul point singulier conique et prouvent, d'autre part que, $\forall$ P $\in$ D, il existe une surface S (P) et une seule de l'espèce indiquée dont P soit le seul point singulier conique (c'est le cas de S_0 de la fig. 7). La forme géométrique de S (P) et son mode de génération au moyen de $\Gamma(P, p_0, q_0(p_0))$ justifie le nom de conoïde caractéristique qu'on lui donne (cf. la fin de $(2.3.4)_{\text{III}}$ et $[12]_{\text{II}}$ pp. 102-103). Signalons à ce propos que dans le cas des ondes acoustiques Th. de DONDER a donné à S (P) le nom très suggestif de « cornet acoustique », (cité d'après $[12]_{\text{II}}$ p. 72). Ce terme se justifie aisément en se rappelant qu'en acoustique S (P) est identique à C (P) — dans les conditions usuelles, tout au moins —. Or, S (P) est engendré par les courbes $\Gamma(P, p_0, q_0(p_0))$ qui jouent le rôle de « rayons » le long desquels se propagent les ondes dans l'espace-temps Oxyt [cf. § $(2.3.4)_{\text{III}}$ in fine]. Il est clair que C (P) n'a pas de signification concrète dans l'espace physique $Oxyz$ (Oz étant la verticale locale en 0).

Ce qui suit doit être interprété comme une transposition à $Oxyt$ d'un phénomène bien connu

en acoustique : notons Σ le domaine, de frontière $\overline{\Sigma}$, découpé par S (P) sur une surface $\subset (D + \overline{D})$ et orientée dans l'espace. D'après ce qui précède, $\overline{\Sigma}$ et la portion de S (P), comprenant P et limitée par $\overline{\Sigma}$, constitue la frontière d'une des deux zones d'influence de $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ que, sans restreindre la généralité, nous pouvons supposer incidente [cf. $(2.3.6)_{III}$]. Rappelons alors que $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$ sont univoquement déterminés par la donnée de la multiplicité $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$; on indiquera ci-après que les ondes, décrites par le système (E), étant diffusives, les données $\underline{u}(M)$, $\underline{v}(M)$, $\underline{\zeta}(M)$, $\forall M \in (\Sigma + \overline{\Sigma})$, contribuent effectivement à définir le mouvement en P. Ainsi S (P) joue bien le rôle de cornet acoustique qui recueille toutes les informations — et celles-là seulement — nécessaires au calcul en P de la solution du problème de Cauchy posé relativement à (E) et à $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$.

Cela étant, rappelons quelques propriétés des conoïdes caractéristiques qui permettent de décrire certains aspects du phénomène général de la propagation des ondes : ce qui suit est une application au système (E) — dont le cône caractéristique se décompose en C (P) et δ_P — des raisonnements classiques que l'on trouvera développés tout au long de $[12]_{II}$. Coupons $S[P(x_0, y_0, t_0)]$ par un plan $t = t_1 =$ cte, noté $\pi(t_1)$, tel que $t_0 \neq t_1$, ($t_0 > t_1$, pour fixer les idées). Soient : $\widehat{PM} \subset (D + \overline{D})$, $M \in \overline{D}$, les arcs des courbes caractéristiques de $(2.11)_{II}$, génératrices de $\overline{S}(P)$, frontière de S (P); L, l'ensemble de points $\subset \overline{S}(P) \cap \pi(t_1)$. Plusieurs cas sont alors à distinguer. Si $\widehat{PM} \cap d(t_1)$ ($d(t_1)$ étant, rappelons-le, le domaine du plan $\pi(t_1)$ occupé par les eaux de la mer littorale considérée) est vide, $\forall M \in \overline{D}$, il en sera de même de L. Mais il peut se faire qu'à côté des arcs $\widehat{PM}$ de l'espèce précédente il en existe tels que $\widehat{PM} \cap d(t_1)$ ne soit pas vide. Alors, L peut se décomposer en plusieurs arcs disjoints — ou se réduire à un arc ouvert — en sorte qu'il n'existe pas de domaine $\subset d(t_1)$ dont L soit la frontière totale. La configuration correspondante de L peut être très complexe si le domaine $d(t_1)$ contient des îles. Enfin il existe des cas (cf. ci-après) où L est une courbe fermée simple. Nous plaçant dans cette éventualité, notons : $d(L, t_1)$, le domaine $\subset \pi(t_1)$, intérieur à S (P), dont L est la frontière; $m[d(L, t_1), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$, la multiplicité (normale, comme on l'a vu), attachée à la solution envisagée de (E). Reprenons alors les résultats et les notations de $(2.3.6)_{III}$ — à cela près que nous substituerons le plan $t = t_1$ au plan $t = 0$, le domaine $d(L, t_1)$ au domaine $d(L)$ et désignons par $S^+(P)$, la portion de S (P), comprise entre les plans $t = t_0$ et $t = t_1$ qui correspond à S_Y^+, d'une part, et par $\Delta^+[d(L, t_1)]$, le domaine $\subset D$, correspondant à $\Delta^+(L)$, d'autre part. D'après cela, $\Delta^+[d(L, t_1)]$ est la zone d'influence incidente de $m[d(L, t_1), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$ (cf. $2.3.6)_{III}$. On notera que la conclusion analogue s'applique à la zone d'influence rétrograde de m. Comme on l'a vu, il s'ensuit qu'une perturbation de u, v, ζ produite dans une portion quelconque du domaine marin $\pi(t_1)$, extérieure à $d(L, t_1)$, n'exerce aucune influence sur les valeurs de ces inconnues en P.

Supposons, toujours pour simplifier, que le domaine $d(L, t_1)$, défini, comme ci-dessus, à partir d'une surface $\overline{S}(P)$, frontière d'un conoïde caractéristique, soit simplement connexe. Il suffit à cet effet de prendre $t_0 - t_1$ assez petit. On obtient ainsi des exemples de domaines $d(L, t_1)$ de frontière L régulière $R^{(2)}$, dont la zone d'influence admet une telle $\overline{S}(P)$ comme frontière; cette surface, d'après ce qui précède, est régulière $R^{(2)}$ en dehors de son seul point singulier conique P. Mais c'est là une propriété très exceptionnelle des surfaces $\overline{S}(P)$, déterminées univoquement par les courbes $L \subset \pi(t_1)$ pour une solution donnée de (E); il semble, en effet, impossible de caractériser d'une manière précise et générale à la fois, les propriétés géométriques de L de façon à ce que la surface $\overline{S}(P)$ correspondante possède un point singulier et un seul en P. En général, une $\overline{S}(P)$ ainsi définie présentera non seulement des points coniques mais, aussi, des lignes-arêtes (cf. $2.3.6_{III}$, fig. 5b et 5c ainsi que la définition des zones d'influences, d'une part et l'alinéa 3.2.3 ci-après, d'autre part).

Pour compléter les résultats qui précèdent, cherchons à déterminer l'ensemble Q (P) des points $M \in D$, $t > t_0$, tels que le mouvement du liquide en M ne dépende pas des valeurs des inconnues u, v, ζ en P, notées, comme ci-dessus : $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$, d'une part, et l'ensemble $Q_1(P)$ des points $M \in D$, $t < t_0$ qui *peuvent* influencer les quantités $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$.

Voici l'intérêt physique de la question posée. Dans l'étude de la propagation d'une onde incidente il peut être utile de délimiter, a priori, sur l'ensemble $D^+ \subset D$ de points tels que $t > t_0$, l'ensemble de ceux qui sont atteints par la perturbation ponctuelle en P. Or c'est le complémentaire de Q (P) par rapport à D^+. De même, il importe, dans certaines applications pratiques, de connaître sur l'ensemble D^- de points tels que $t < t_0$ l'ensemble de ceux qui ne contribuent pas à déterminer les valeurs des inconnues en P. Or c'est le complémentaire de $Q_1(P)$ par rapport à D^-. D'après cela, la détermination de Q (P) entraîne celle de $Q_1(P)$ par la même méthode et inversement.

Pour traiter ces questions, nous modifions légèrement, en les complétant, les notations antérieures. Supposant $t_1 > t_0$, nous notons : S (M), le conoïde caractéristique à deux nappes, de sommet $M(x_1, y_1, t_1)$; $S^+(M)$ (ou $S^-(M)$), la portion de S (M) située dans le domaine $t > t_1$ (ou $t < t_1$); $\overline{S}^+(M)$ (ou $\overline{S}^-(M)$) la surface latérale de $S^+(M)$ (ou de $S^-(M)$); $\Delta^-(M, t_0)$, la portion de $S^-(M)$ sur laquelle on a : $t \in [t_0, t_1]$; $d(t_0)$ — (comme ci-dessus) — la section de D par le plan $\pi(t_0)$;

$d(M, t_0) = S^-(M) \cap d(t_0)$;

$L(M, t_0) = \overline{S}^-(M) \cap [d(t_0) + \overline{d}(t_0)]$;

$L_1^+(M) = \overline{S}^+(M) \cap \overline{D}$;

$L_1^-(M) = \overline{S}^-(M) \cap \overline{D}^+$.

Ces notations appellent les commentaires ci-après :

a) Si $(t_1 - t_0)$ est assez grand, $L(M, t_0)$ et $d(M, t_0)$ sont vides;

b) Si $(t_1 - t_0)$ est assez petit, $L_1^-(M)$ est vide et $\Delta^-(M, t_0)$ est alors la zone d'influence incidente de la multiplicité normale $m[d(M, t_0), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$;

c) Si aucun des ensembles $L(M, t_0)$ et $L_1^-(M)$ n'est vide, $\Delta^-(M, t_0)$ n'est pas la zone d'influence de m; la multiplicité précédente influe sur les valeurs de u, v, ζ en M, mais sans suffire à les déterminer univoquement.

d) $L(M, t_0)$, $d(M, t_0)$ et $\Delta^-(M, t_0)$ se réduisent au point M si $t_1 = t_0$; il en sera, en particulier, ainsi si M est confondu avec $P(x_0, y_0, t_0)$;

e) Lorsque $d(t_0)$ contient des îles, $S^-(M)$ et $S^+(M)$ sont des nappes de cône trouées par les cylindres à génératrices parallèles à Ot, dont les sections droites sont les frontières terrestres des îles.

Avant d'aller plus loin, observons que les notations et les définitions précédentes ainsi que les raisonnements qui suivent s'adaptent immédiatement au cas où on substitue au plan $\pi(t_0)$ une surface courbe régulière $\Sigma \subset D$, située dans le domaine $t < t_1$, partageant D en deux domaines et orientée dans l'espace; à cet effet, il suffit de remplacer dans les écritures ci-dessus t_0 et $d(t_0)$ par Σ. Cela étant, plaçons-nous dans le cas a) et soient :

$\Sigma_{11} = d(M, \Sigma) = S^-(M) \cap \Sigma$;

$\overline{\Sigma}_{11} = \overline{S}^-(M) \cap \Sigma$; $\Delta^-(M, \Sigma)$

la portion de $S(M)$ limitée par Σ. D'après cela $\Delta^-(M, \Sigma)$ est encore la zone d'influence incidente de la multiplicité $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ dont la donnée détermine, en particulier, univoquement la solution en M sur laquelle, comme on sait, n'exercent aucune influence les valeurs de u, v, ζ en les points de Σ extérieurs à $(\Sigma_{11} + \overline{\Sigma}_{11})$.

On voit ainsi que les valeurs de $u(P)$, $v(P)$ et $\zeta(P)$ peuvent être déterminées à partir d'une infinité de multiplicités m que portent les sections Σ du demi cône $S(P)$ par une surface arbitraire, orientée dans l'espace.

Notons à présent que les raisonnements précédents prouvent seulement que la donnée de m *suffit* pour définir univoquement les inconnues en P. Mais reste ouverte la question de savoir si la donnée de $u(M_0)$, $v(M_0)$, $\zeta(M_0)$ exerce effectivement $\forall M_0 \in \Sigma$, une influence sur $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$. Rappelons qu'à cet égard les propriétés des systèmes hyperboliques varient avec la forme des systèmes et en particulier, le nombre de variables indépendantes et, enfin, le nombre des inconnues. On le constate classiquement (cf. par exemple $[12]_{II}$ et $[17]_{II}$, pages 106-108) sur les systèmes hyperboliques linéaires à coefficients constants — auquel cas, on a : $C(P) \equiv S(P)$ — et spécialement sur ceux qui décrivent la propagation des ondes sonores à une ou à deux dimensions (cas des tuyaux sonores et cas des ondes planes respectivement) d'une part ou à trois dimensions, d'autre part. On a ainsi des exemples explicites des deux situations bien connues dans la théorie des ondes selon que celles-ci présentent ou non le phénomène de diffusion. On sait que dans le second cas les valeurs $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$ dépendent de l'ensemble des données de Cauchy en tous les points $M_0 \in \Sigma$ et dans le premier uniquement des valeurs prises par les inconnues en chaque point du contour $\overline{\Sigma} = \overline{S}(P) \cap \Sigma$. Pour que cette dernière condition soit réalisée, il faut et il suffit que la caractéristique $\Gamma(M, p_0, q_0)$ de $(2.11)_{II}$ puisse être uniquement déterminée, $\forall M_0 \in \overline{\Sigma}$, à partir des données $u(M_0)$, $v(M_0)$, $\zeta(M_0)$ seules. On conçoit qu'une telle situation ne peut exister que dans des cas tout à fait exceptionnels. Dans le cas général, les ondes diffusent en se propageant; on trouvera en $[17]_{II}$ (page 106) une description très suggestive de ce phénomène ainsi que l'interprétation physique du nom retenu pour le désigner.

Pour montrer que les ondes décrites par le système (E) diffusent, nous nous bornerons ici à présenter un raisonnement intuitif, fondé sur les calculs approchés de la solution du problème de Cauchy conduisant à la construction fondamentale [cf. $(2.4.2)_{III}$]. En reprenant les notations de l'alinéa précité, on y voit que les valeurs des inconnues $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$ s'explicitent en fonction des neuf données $u(P_i)$, $v(P_i)$, $\zeta(P_i)$, $i = 1, 2, 3$, les trois points P_i formant un triangle non dégénéré. On s'explique ainsi pourquoi, dans le cas du système (E), il est impossible de construire la surface $\overline{S}(P)$ à partir des seules données de Cauchy le long de $\overline{\Sigma}$. Signalons l'erreur de référence de la page 17_{III} : il faut lire pp. 71-76 et non pas paragraphes 71-76.

Observons que dans notre cas — où $S(M)$ n'est défini dans D que dans un domaine borné des variations de t — la notion de domaine extérieur ou intérieur à $S^+(M)$ (ou à $S^-(M)$) n'a de sens que dans le voisinage assez petit de M. Pour tourner cette restriction, nous adopterons la convention de langage ci-après qui, quoique non usitée, semble bien adaptée à la formulation des résultats qui suivent.

Définitions. Nous appelons : 1) domaine intérieur de $S^+(P)$ (ou de $S^-(P)$) — noté $S_i^+(P)$ (ou $S_i^-(P)$) la portion $\subset D^+$ (ou $\subset D^-$), limitée par $\overline{S}^+(P)$ (ou $\overline{S}^-(P)$) qui contient le point $t = +\infty$ (ou $t = -\infty$) 2) domaine extérieur de $S^+(P)$ (ou de $S^-(P)$) — noté $S_e^+(P)$ (ou $S_e^-(P)$) — le domaine complémentaire de $S_i^+(P)$ (ou de $S_i^-(P)$) par rapport à D^+ (ou D^-).

Alors on peut énoncer le

Théorème : On a les identités : $Q(P) \equiv S_e^+(P)$; $Q_1(P) \equiv S_i^-(P)$.

Pour simplifier l'exposé et pouvoir nous appuyer sur les énoncés de $2.3.6_{III}$ nous supposerons jusqu'à nouvel ordre que : a) il n'existe pas d'îles dans d; b) la frontière $\overline{d}$ est une courbe régulière $R^{(2)}$. Dans ces conditions les propriétés de régularité des solutions utilisées dans la suite demeurent valables. Mais au prix de quelques longueurs, on peut étendre aisément les conclusions ci-après au cas où $\overline{d}$ est un polygône curviligne, dont les côtés sont des arcs réguliers $R^{(2)}$ et qui possède un nombre fixé de points anguleux. Il résulte alors des raisonnements de $2.3.6_{III}$ et des commentaires des figures 10 ci-après que les courbes $L_i^+(P)$ et $L_i^-(P)$ sont fermées, simples, régulières $R^{(2)}$. Nous admettrons alors comme intuitivement évident qu'on peut jeter sur $L_i^+(P)$ (ou $L_i^-(P)$) une surface-cloison Σ^+ (ou Σ^-) $\subset (D + \overline{D})$, régulière $R^{(2)}$ et orientée dans l'espace.

Cela posé, il résulte des raisonnements de $2.3.6_{III}$ et des commentaires des figures 10 ci-après que $[S^-(P) + \overline{S}^-(P) + \Sigma^-]$ (ou $[S^+(P) + \overline{S}^+(P) + \Sigma^+]$) est la zone d'influence incidente (ou rétrograde) de la multiplicité $m(\Sigma^-, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ (ou $m(\Sigma^+, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$) d'une part et que, par conséquent les valeurs de $\underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}$ en les points $M \in [S_e^+(P) + S_e^-(P)]$ n'exercent aucune influence sur la solution en P. Cela montre que $S_e^+(P) \subset Q(P)$, une conclusion tout analogue valant pour $S_e^-(P)$; ainsi $Q(P)$ n'est pas vide, qu'il s'agisse de l'onde incidente ou rétrograde. Pour achever la démonstration, il suffit d'établir que $\forall M \in S_i^-(P)$ on a $M \in Q_1(P)$.

Pour aller plus loin, nous nous appuierons sur le résultat suivant, non encore justifié en toute rigueur — à notre connaissance, du moins — mais constamment évoqué à l'appui des méthodes numériques utilisées pour traiter les problèmes aux limites divers, posés relativement à (E).

La solution de (E), quand elle existe, est univoquement déterminée dans D par :

a) la donnée initiale : $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$, portée par une surface : Σ, orientée dans l'espace et partageant D en deux domaines, d'une part;

b) la donnée aux limites imposée à la solution sur $\overline{D}$ (par exemple, la donnée de $\zeta(M)$, $\forall M \in \overline{D}$), d'autre part.

Bien entendu, les données a priori, intervenant dans cet énoncé, sont toujours supposée « assez » régulières — implicitement du moins —; mais il ne semble pas qu'on ait réussi jusqu'ici à donner un sens précis au mot « assez » de manière à garantir la validité du théorème précédent. Toutefois, il convient de ne pas perdre de vue que, sauf cas exceptionnels (où sont réalisées des conditions de compatibilité, fort complexes, entre les données initiales et les données frontières sur $\overline{D}$), la solution du problème aux limites mixtes ci-dessus énoncé, posé relativement à (E) pour les données a priori et pour la frontière $\overline{D}$ régulières (voire même analytiques) est seulement continue sur D, alors que les gradients des inconnues présentent, en revanche, des discontinuités de première espèce sur certaines surfaces $\subset D$, qui sont porteuses des multiplicités bicaractéristiques, attachées à la solution considérée de (E); mais une telle solution est régulière dans chacun des domaines en lequels ces surfaces singulières partagent $\overline{D}$. Rappelons que de tels faits sont courants dans la théorie des problèmes mixtes, posés relativement aux équations hyperboliques; citons, à titre d'exemple, la formule de d'Alembert, résolvant le problème des cordes vibrantes, encastrées à leurs deux extrémités (cf. par ex. $[10]_{II}$ pp. 156-159, fascicule III). Comme dans ce cas élémentaire, les algorithmes résolutifs des problèmes, posés relativement à (E), sont fondés sur la possibilité établie a priori, de « régionner » D en domaines partiels, en chaque point desquels les inconnues sont régulières. Or, il convient de se rappeler que les résultats antérieurs que nous allons utiliser au cours des raisonnements qui suivent n'ont été établis que pour les fonctions (u, v, ζ) régulières dans tout D. Par souci de brièveté, nous admettrons sans démonstrations le fait qu'on peut étendre à la classe des solutions de (E) que nous venons de décrire toutes les propriétés des solutions régulières dont nous aurons besoin dans la suite : ces généralisations sont faciles à justifier mais exigent des développements fastidieux que nous omettons. En particulier, nous utiliserons le corollaire ci-après du théorème auxiliaire précédent, combiné avec celui qui affirme la nature diffusive des ondes de marées : la solution de (E) en M, $\forall M \in D$, dépend effectivement de la multiplicité $m(\Sigma, u, v, \zeta)$.

Cette conclusion devient intuitivement évidente si l'on observe que dans les énoncés des problèmes mixtes visés, la donnée a priori sur $\overline{D}$ n'impose qu'une seule condition aux inconnues de (E), ce qui ne suffit pas à déterminer celles-ci en un point quelconque de D. Mais on ne doit pas perdre de vue qu'étant donné $M \in D$, on ne peut affirmer a priori que, $\exists M_0 \in \Sigma$, les valeurs : $u = u(M_0)$; $v_0 = v(M_0)$, $\zeta_0 = \zeta(M_0)$, influent sur la solution en M; cela résulte de ce que l'ensemble $Q(M_0)$ n'est pas vide, comme nous l'avons établi ci-dessus. Montrons maintenant que $\forall M_0 \in \Sigma$, l'ensemble des points $M \in D$ en lesquels la solution dépend de u_0, v_0, ζ_0 n'est pas vide. Il est évident, en effet, qu'à tout $M_0 \in \Sigma$, on peut associer une infinité de points $M \in D$ tels qu'en posant : $d^-(M, \Sigma) = S^-(M) \cap \Sigma$ (ou $d^+(M, \Sigma) = S^+(M) \cap \Sigma$) on ait :

$$S^-(M) \cap \Sigma = \phi, \text{ ou } S^+(M) \cap \Sigma = \phi,$$

ϕ désignant l'ensemble vide : le sens des notations précédentes se déduit des notations antérieures en y remplaçant $d(t_0)$ ou $\pi(t_0)$ par Σ. Alors la première — par exemple — de ces relations

entraîne que $d^-(M, \Sigma)$ n'est pas vide, en sorte que les valeurs u_0, v_0, ζ_0 influent effectivement sur la solution en M dans le cas de l'onde progressive engendrée par $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$; il en est de même, évidemment, dans le cas de l'onde rétrograde, engendrée par la même donnée.

Soient à présent : $\Delta^+(\Sigma)$ (ou $\Delta^-(\Sigma)$), la zone d'influence incidente (ou rétrograde) de la multiplicité normale $m(\Sigma, \underline{u_0}, \underline{v_0}, \underline{\zeta_0})$; S_γ^+ (ou S_γ^-) sa frontière, autre que Σ : nous nous inspirons ici des notations utilisées en 2.3.6$_{III}$ (cf. fig. 5). On a vu que la solution en tout $M \in [\Delta^+(\Sigma) + \Delta^-(\Sigma) + S_\gamma^+ + S_\gamma^-)$ dépend effectivement de $\underline{u_0}, \underline{v_0}, \underline{\zeta_0}$, $\forall M_0 \in \Sigma$. L'algorithme résolutif du problème mixte — sur lequel nous reviendrons ultérieurement — permet alors de déterminer, par exemple, l'onde progressive (le raisonnement étant identique dans le cas de l'onde rétrograde) dans le domaine $\subset D$, en forme d'onglet, extérieur à $[\Delta^+(\Sigma) + S_\gamma^+]$ (ou à $[\Delta^-(\Sigma) + S_\gamma^-]$) limité par D, d'une part, et S_γ^+ (ou S_γ^-) d'autre part et, enfin, par une surface Σ_1, simple, régulière, partageant D en deux domaines, orientée dans l'espace et coupant S_γ^+ (ou S_γ^-). Les raisonnements étant, une fois encore pratiquement les mêmes pour les ondes incidentes et rétrogrades, nous porterons notre attention, jusqu'à nouvel ordre, sur l'onde incidente, engendrée par m. Posons : $\Sigma_{11} = \Sigma_1 \cap S^-(M)$ et notons : Σ_{12}, le domaine surfacique, complémentaire de Σ_{11} par rapport à Σ_1; M_1 (ou M_2) un point courant de Σ_{11} (ou de Σ_{12}); $\underline{u_1} = \underline{u}(M_1)$ etc. (ou $\underline{u_2} = \underline{u}(M_2)$ etc.). Il résulte de ce qui précède que :

a) $\underline{u_1}, \underline{v_1}, \underline{\zeta_1}$ sont univoquement déterminés par la donnée de m et dépendent de $\underline{u_0}, \underline{v_0}, \underline{\zeta_0}$, $\forall M_0 \in \Sigma_{11}$;

b) $\underline{u_2}, \underline{v_2}, \underline{\zeta_2}$ dépendent à la fois de $\underline{u_0}, \underline{v_0}, \underline{\zeta_0}$, d'une part, et des conditions aux limites sur $\overline{D}$, d'autre part;

c) en général, les gradients des inconnues éprouvent des discontinuités de 1ere espèce le long de S_γ^-. D'après cela, la multiplicité normale :

$$[m_1(\Sigma_{11}, \underline{u_1}, \underline{v_1}, \underline{\zeta_1}) + m_2(\Sigma_{12}, \underline{u_2}, \underline{v_2}, \underline{\zeta_2})]$$

n'est pas régulière. Il s'en suit que l'algorithme résolutif du problème correspondant de Cauchy, décrit en 2.4.2$_{III}$, cesse d'être valable. Nous admettrons alors — quitte à revenir sur ce point — que l'on peut étendre à la situation actuelle les résultats d'existence et d'unicité précités, et de les justifier même pour le problème mixte étudié. On voit ainsi qu'on peut prolonger la solution trouvée en dehors de la tranche de D comprise entre Σ et Σ_1; en procédant de même, de proche en proche, on conçoit qu'on peut définir la solution, douée de singularités du type ci-dessus précisé, dans toute la tranche comprise entre Σ et Σ^-, Σ désignant, rappelons-le, la surface-cloison jetée sur la courbe $L_1^-(P)$. On peut donc considérer comme déterminée la multiplicité normale (non régulière) $m(\Sigma^-, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ dont la zone d'influence incidente est, précisément, la portion de $S^-(P)$ comprise entre Σ^- et le plan $\pi(t_0)$; il s'en suit que la solution est déterminée en P. D'après ce qui précède, les valeurs de $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$ sont influencées par celles de u_0, v_0, ζ_0, $\forall M_0 \in \Sigma$. Comme Σ peut être choisie arbitrairement dans la portion de $S_i^-(P)$ limitée par Σ^- et contenant le point $t = -\infty$, on voit que la solution en tout point M de cette portion influe sur la solution en P. Il en est, évidemment, de même de tout M de la portion de $S^-(P)$ ci-dessus considérée. On conclut de là qu'on a bien : $S_i^-(P) \equiv Q_1(P)$, C.Q.F.D.

Remarques

1) Le résultat qui précède constitue une extension aux solutions des problèmes mixtes posés relativement à un système hyperbolique d'un résultat classique dans la théorie des ondes se propageant dans tout l'espace-temps.

2) Les raisonnements ci-dessus permettent de présenter le résultat obtenu sous une forme différente que voici : les effets d'une perturbation en P sont sensibles aux instants $t > t_0$ en chaque point du domaine $S_i^+(P)$. En effet, il suffit de montrer qu'il existe une Σ^+, jetée sur $L_1^+(P)$, telle que $u(M)$, $v(M)$, $\zeta(M)$ soient, $\forall M \in \Sigma^+$, sensibles aux valeurs prises par ces inconnues en P. Or il résulte de la définition des propriétés des zones d'influence, ainsi que des lois de diffraction des ondes de marées (cf. les références ci-dessus à 2.3.6$_{III}$ et aux commentaires à la figure 10 ci-après) qu'une condition suffisante pour que la solution en $M \in D^+$ dépende — ou ne dépende pas — des valeurs de u, v, ζ en P peut-être ainsi formulée : le point $P \in d(M, t_0) = S^-(M) \cap d(t_0)$ (ou $P \notin d(M, t_0)$ — cet énoncé étant valable si on suppose que $(t_1 - t_0)$ est assez petit pour que $d(M, t_0)$ ne soit pas vide — . Nous admettrons alors comme intuitivement évident qu'on puisse jeter sur $L_1^+(P)$ une cloison $\Sigma^+(P)$, régulière $R^{(2)}$ telle que $\exists d(M, t_0)$ non vide, $\forall M \in \Sigma^+$, d'une part et que l'on ait alors $P \in d(M, t_0)$, d'autre part, ceci étant vrai $\forall P \in d(t_0)$.

Esquissons les étapes principales d'une des variantes de la démonstration de cette propriété. On vérifiera successivement que :

a) $\forall M \in \overline{S}^+(P)$, $d(M, t_0)$ correspondant n'est pas vide et on a : $P \in L(M, t_0)$, frontière de $d(M, t_0)$; il en est particulièrement ainsi si $M \in L_1^+(P)$;

b) il existe un voisinage de $\overline{S}^+(P) \subset S_i^+(P)$ et contenant $L_1^+(P)$, tel que $\forall M$ appartenant à ce voisinage, $d(M, t_0)$ existe et on a : $P \in d(M, t_0)$;

c) ce qui précède entraîne l'existence d'une cloison $\Sigma^+(P)$ répondant à la question, voisine de $\overline{S}^+(P)$ mais régulière.

On notera la différence entre les notions de zone d'influence de $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ c'est-à-dire d'un domaine tridimensionnel où la solution en chaque point M est univoquement déterminée par la donnée de $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ d'une part et des domai-

nes Q (P) (ou Q_1 (P)), c'est-à-dire domaine en chaque point M duquel la solution est indépendante des valeurs de u, v, ζ en P (ou dépendante, sans être univoquement déterminée par celles-ci) d'autre part.

Observons que les remarques précédentes ne sont que les corollaires directs des propriétés des zones d'influence d'une donnée de Cauchy $m[d(L)\, u, v, \zeta]$ lorsque la zone se réduit à un conoïde d'une part et des résultats de $(2.3.6)_{III}$ d'autre part. On a cru, cependant, utile de revenir sur ce point avec quelques détails pour deux raisons.

Rappelons d'abord que les raisonnements ci-dessus permettent d'analyser d'une manière élémentaire les phénomènes observés à la surface d'une eau, tranquille pour $t < 0$, le repos étant perturbé à l'instant $t = 0$ par la chute d'une pierre de petite dimension, assimilée à un point matériel. Il importe, toutefois, de rappeler que les équations de l'Hydrodynamique des liquides (fluides incompressibles) parfaits ne sont pas totalement hyperboliques; elles admettent une seule famille de multiplicités bicaractéristiques (cf. $[14]_I$, pp. 61-65, par ex.). Pour cette raison, les raisonnements du texte doivent subir une retouche pour être applicables au cas mentionné. Dans le cas des marées littorales on pourra se reporter à $[17]_{III}$, p. 110-111 et à quelques lignes que Daubert et Graffe consacrent à ce sujet (cf. $[1]_I$). Mais il y a plus. Les propriétés, ci-dessus justifiées, permettent d'étendre aux marées littorales les discussions — bien connues dans la théorie générale des ondes — du principe de Huyghens d'une part (cf. par ex. $[12]_{II}$, pp. 71-79) et, avec plus de rigueur que ci-dessus, de l'existence de la diffusion d'autre part (cf. par ex. $[12]_{II}$, pp. 238-241 et $[17]_{III}$, pp. 107-111). Nous présenterons ailleurs l'étude de ces deux problèmes dans le cas du système (E).

3.2.3. Forme générale des frontières d'une zone d'influence

Cet alinéa est consacré à l'étude des singularités que présentent les frontières des zones d'influence d'une donnée de Cauchy $m(\Sigma, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ régulières orientée dans l'espace. En $2.3.6_{III}$ nous avons déjà établi qu'une telle frontière ne peut être constituée par une surface régulière. La question se pose alors de préciser a priori la nature de ses singularités, d'indiquer une méthode de construction des surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$, associée à une solution u, v, ζ, donnée et régulière $R^{(2)}$ de (E) (cf. 3.2.1), présentant un nombre arbitraire de points et de lignes singulières, déjà considérées en $2.3.6_{III}$. Pour simplifier, nous nous limiterons au cas où $d(L, t_0) \equiv \Sigma$ et nous admettrons encore que, $\forall M \in D$, la parallèle à Ot, issue de M, est intérieure au cône C (M). On a vu que, moyennant cette hypothèse, la zone d'influence de la donnée de Cauchy : $m[d(L, t_0)\, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$ — $d(L, t_0)$ étant un domaine du plan $t = t_0 \subset (D + \overline{D})$, de frontière L — est telle que chaque point $P(x, y, t)$ de cette zone possède la propriété suivante : le point $(x, y, t_0) \in d(L, t_0)$ — c'est-à-dire appartient au domaine marin de la mer littorale étudiée —. Si $d(L, t_0)$ contient des îles, L se compose, rappelons-le, de plusieurs courbes régulières $R^{(2)}$, conformément aux hypothèses de 3.2.1. Dans la suite des raisonnements qui suivent, nous nous appuierons constamment sur les résultats de $2.3.6_{III}$ sans faire référence explicite à cet alinéa.

Cela étant, on a vu que la zone d'influence de $m(d(L, t_0), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$ est limitée par les surfaces intégrales, solutions du problème de Cauchy posé relativement à $(2.11)_{II}$ et passant par chacune des courbes de la frontière L de $d(L, t_0)$. En nous inspirant des conventions d'écriture, utilisées en $2.3.6_{III}$, nous notons S_γ^+ (ou S_γ^-) la frontière de la zone d'influence de m située dans la portion $t > t_0$ (ou $t < t_0$) de $(D + \overline{D})$; d'après cela, S_γ^+ (ou S_γ^-) est constituée par des morceaux réguliers de surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$, passant par chacune des courbes de la frontière L et assemblées de telle sorte que chacune des surfaces S_γ^+ et S_γ^- ne soit coupée qu'en un seul point par une parallèle à Ot, menée par un point arbitraire de $d(L, t_0)$, la correspondance ainsi réalisée : $d(L, t_0) \Leftrightarrow S_\gamma^+$ (ou S_γ^-) étant bijective. Chacune de ces surfaces est engendrée par les arcs réguliers $R^{(2)} \subset \Gamma[P, p_0, q_0(p_0)]$, lorsque P décrit L. Il en résulte que $\Gamma[P, p_0, q_0(p_0)] \cap L$ se réduit au point P unique. Comme la zone d'influence incidente de $d(L, t_0)$ admet $S_\gamma^+ \cup d(L, t_0)$ pour frontière, ce qui précède montre que la seconde extrémité M_0 de l'arc régulier de $\Gamma[P, p_0, q_0(p_0)]$, $P \in L$, générateur de S_γ^+, est nécessairement soit situé sur $\overline{D}$, soit commun à l'arc considéré d'une part et à un arc $\widehat{M_0P_1}$, au moins, d'une caractéristique $\Gamma[P_1, p_0, q_0(p_0)]$ de $(2.11)_{II}$, $P_1 \in L$, $P_1 \neq P$. Les deux arcs $\widehat{M_0P}$ et $\widehat{M_0P_1}$ de ces deux courbes ne peuvent être tangents en M_0; sinon, en effet ils seraient confondus (cf. $2.3.4_{III}$). Il s'ensuit que les plans tangents communs en M_0 au cône $C(M_0)$ d'une part et à chacun des arcs $\widehat{M_0P}$ et à $\widehat{M_0P_1}$ sont distincts. Cela montre que S_γ^+ n'admet pas de plan tangent en M_0 univoquement défini. Cette conclusion complète donc les raisonnements de $2.3.6_{III}$ puisqu'elle montre que tout point singulier de S_γ^+ est, éventuellement, soit un point conique de cette surface, soit un point de l'arête de celle-ci, soit un point commun à plusieurs de ces lignes singulières tracées sur S_γ^+. Au précédent alinéa, nous avons établi l'existence des S correspondant à une solution régulière $R^{(2)}$ de (E) présentant un point conique isolé. Nous allons maintenant établir l'existence dans les mêmes conditions des S_γ^+, porteuses des multiplicités bicaractéristiques $m(S_\gamma^+, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$, associées à la solution u, v, ζ donnée de (E) telles que les S_γ^+ passant par la frontière L et présentant un nombre arbitraire de

points coniques et des arêtes — même si $d(L, t_0)$ est un domaine simplement connexe dont la frontière L est régulière $R^{(2)}$.

La méthode de démonstration utilisée à cet effet ressemble à celle du précédent alinéa. On indiquera d'abord un procédé de construction des surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$, douées de singularités qu'on vient de décrire; c'est le théorème d'existence. Ensuite, on établit que de telles surfaces résolvent le problème de Cauchy, posé relativement à une solution donnée régulière $R^{(2)}$ de (E) et à la frontière L (régulière $R^{(2)}$ d'un domaine $d(L, t_0)$), l'éventualité où celui-ci serait multiplement connexe n'étant pas exclue.

Reprenons d'abord la figure 5b ainsi que les notations et les hypothèses qui s'y rapportent [cf. $(2.3.6)_{III}$] — à cela près que, jusqu'à nouvel ordre, les quatre points M_i, $i = 1, 2, 3, 4$, ne sont pas situés dans le même plan, mais répartis d'une manière arbitraire sur chacune des caractéristiques $\widehat{\lambda M_1}$, $\widehat{\lambda M_4}$, $\widehat{\mu M_2}$, $\widehat{\mu M_3}$ —. Comme nous l'avons déjà indiqué, chacune des deux nappes de surface, régulières $R^{(2)}$, représentées par $\lambda\mu M_2M_1$ et $\lambda\mu M_3M_4$, est solution du problème de Cauchy, posé relativement à (E) et à l'arc $\widehat{\lambda\mu}$, régulier $R^{(2)}$, que nous considérons comme une donnée. L'ensemble de ces deux nappes constitue donc une surface intégrale de $(2.11)_{II}$ douée d'une ligne arête $\widehat{\lambda\mu}$, le long de laquelle le plan tangent à la surface éprouve une discontinuité. Comme les arcs $\widehat{\lambda M_1}$ et $\widehat{\lambda M_4}$ sont portés par deux caractéristiques distinctes de $(2.11)_{II}$ issues de λ, il s'ensuit que les arcs en cause sont aussi tracés sur le conoïde caractéristique $S(\lambda)$, issu du sommet λ. Complétons alors la surface $\lambda\mu M_2M_1$, ci-dessus introduite, par celle des deux portions de $S(\lambda)$ qui est comprise entre $\widehat{\lambda M_1}$ et $\widehat{\lambda M_4}$ et qui forme avec les nappes $\lambda\mu M_2M_1$ et $\lambda\mu M_3M_4$ une surface sur laquelle son plan tangent varie continûment avec le point de contact (car $S(\lambda)$ et $\lambda\mu M_2M_1$, par exemple, sont tangents le long de la génératrice λM_1 qui est commune à ces deux surfaces). En définissant de la même manière la nappe μM_2M_3 du conoïde $S(\mu)$, on obtient la surface $S_\gamma^+ = \lambda\mu M_2M_1 \cup \mu M_2M_3 \cup \lambda\mu M_3M_4 \cup \lambda M_4M_1$, porteuse d'une multiplicité bicaractéristique de (E).

Cela étant, coupons S_γ^+ par le plan $\pi(t_0)$, d'équation $t = t_0$ et désignons désormais par M_i, $i = 1, 2, 3, 4$ les points d'intersection de $\pi(t_0)$ avec les caractéristiques de $(2.11)_{II}$, issues de λ et μ et représentées sur la figure 5b. Posons ensuite $L = S_\gamma^+ \cap \pi(t_0)$. Pour abréger l'exposé, supposons que L soit une courbe fermée simple, limitant un domaine simplement connexe $d[L(t_0)] \subset \pi(t_0)$. Alors S_γ^+ appartient à la frontière de la zone d'influence de la donnée de Cauchy $m[d(L), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$.

Ce qui précède confirme donc les résultats énoncés en $(2.3.6)_{III}$ concernant l'existence des multiplicités bicaractéristiques $m(S_\gamma^+, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$, correspondant à toute solution u, v, ζ de (E), régulière $R^{(2)}$, possédant une arête $\widehat{\lambda\mu}$ dont les extrémités λ et μ soient des points coniques de S_γ^+. De plus, on indique un procédé de construction d'une telle surface qui appartient à la zone d'influence de la donnée de Cauchy $m[d(L), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$ lorsque la frontière L de $d(L)$ est une courbe fermée simple.

Comparons à présent les résultats relatifs aux surfaces intégrales S_γ de $(2.11)_{II}$ qu'on vient de présenter à ceux de $(2.3.6)_{III}$. Les seconds concernent une courbe simple L donnée, qu'on suppose a priori régulière $R^{(2)}$. On en a déduit que S_γ passant par L est régulière $R^{(2)}$ dans un voisinage assez petit de L, mais présente des singularités telles que les points coniques ou les arêtes dont il paraît difficile de préciser le nombre a priori [cf. $(2.3.6)_{III}$]. Les raisonnements qui précèdent ont, au contraire, pour point de départ la donnée de l'arc $\widehat{\lambda\mu}$ et aboutissent à la construction explicite des S_γ douées des singularités représentées sur la figure 5b. Mais cette fois, on ne peut plus garantir a priori la régularité $R^{(2)}$ de S_γ^+. En effet, il résulte seulement de la construction précédente que :

1) chacun des arcs $\widehat{M_1M_2}$, $\widehat{M_2M_3}$, $\widehat{M_3M_4}$, $\widehat{M_4M_1}$ est régulier $R^{(2)}$ jusqu'à y compris ses extrémités;

2) la courbe L est à tangente continue dans le voisinage de chacun des points M_i, $i = 1, 2, 3, 4$, de sorte que L est régulière $R^{(1)}$;

3) S_γ se compose de quatre nappes : λM_1M_4, μM_2M_3 — coniques, régulières $R^{(2)}$, sauf en λ et μ respectivement — d'une part, et $\lambda\mu M_3M_4$ et $\lambda\mu M_1M_2$ — régulières $R^{(2)}$ dans toute leur étendue — d'autre part, se raccordant deux à deux le long de $\widehat{\lambda M_1}$, $\widehat{\lambda M_4}$, $\widehat{\mu M_2}$, $\widehat{\mu M_3}$ (cf. fig. 5b), de manière à constituer une surface régulière $R^{(1)}$.

Mais on ne peut affirmer que L soit régulière $R^{(2)}$ dans le voisinage des M_i; il s'ensuit qu'on ne peut assurer la régularité $R^{(2)}$ de S_γ^+ dans le voisinage des caractéristiques de $(2.11)_{II}$ issues des M_i et génératrices de S_γ^+.

Voici comment il convient de modifier les données a priori pour construire des surfaces S_γ^+ du type représenté sur la figure 5b et régulières $R^{(2)}$ sauf dans le voisinage de $\lambda\mu$: donnons-nous a priori les nappes coniques λM_1M_4 et μM_2M_3 et traçons dans le plan $\pi(t_0)$ les arcs simples $\widehat{M_1M_2}$ et $\widehat{M_3M_4}$, réguliers $R^{(2)}$, constituant avec les arcs $\widehat{M_1M_4}$ et $\widehat{M_2M_3}$ une courbe fermée simple L, régulière $R^{(2)}$; autrement dit, on choisit $\widehat{M_1M_2}$ et $\widehat{M_3M_4}$ de manière que les éléments différentiels du second ordre de L soient continus en chaque point de ce contour, y compris en les points M_i. Il est évident qu'on peut construire une infinité de courbes L possédant la propriété précédente. Construisons alors les nappes de surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$ passant par $\widehat{M_1M_2}$ et $\widehat{M_3M_4}$ respectivement. Nous admettrons comme intuitivement évident qu'on peut choisir les données a priori ci-dessus de manière que l'intersection de ces

nappes se réduise à un arc $\widehat{\lambda\mu}$ unique, qui est alors régulier $R^{(2)}$. (La démonstration de cette propriété est aisée quoique longue; en voici l'esquisse : construisons d'abord une surface S_γ^+ du type représenté sur la figure 5b. On vient de voir qu'on peut le faire si on se contente de la régularité $R^{(1)}$ de la solution. Au moyen de petites modifications locales des arcs $\widehat{M_1M_2}$ et $\widehat{M_3M_4}$ dans le voisinage des extrémités de ces arcs, on arrive à transformer la courbe L en la courbe L_1 régulière $R^{(2)}$. Il est aisé de montrer, au moyen des raisonnements classiques et élémentaires que la surface $S_\gamma^+(L)$, passant par L_1, possède une seule ligne-arête $(\widehat{\lambda\mu})_1$ régulière $R^{(2)}$, voisine de $\widehat{\lambda\mu}$.

Cela étant, la surface S_γ^+ obtenue par la réunion des quatre nappes λM_1M_4, $\lambda\mu M_2M_1$, μM_2M_3, $\lambda\mu M_3M_4$ est une surface intégrale de $(2.11)_{II}$, régulière $R^{(2)}$ sauf dans le voisinage de $\widehat{\lambda\mu}$: car elle résout le problème de Cauchy pour l'équation précitée et la donnée L_1, régulière $R^{(2)}$. Notons d'ores et déjà que les précautions prises ci-dessus pour construire une surface S_γ^+ du type désiré sont indispensables. Car nous verrons qu'une surface intégrale de $(2.11)_{II}$ passant par une courbe L régulière $R^{(2)}$ peut présenter des lignes-arêtes à points doubles.

Dans l'exemple précédent, λ et μ sont les extrémités d'une arête de S_γ^+. Nous allons montrer à présent que S_γ^+ peut présenter dans les mêmes conditions deux points singuliers coniques isolés.

Soient : $\lambda(x_\lambda, y_\lambda, t_\lambda)$ et $\mu(x_\mu, y_\mu, t_\mu)$ deux points $\in$ D, tels que $(x_\lambda, y_\lambda) \neq (x_\mu, y_\mu)$; $S^1(\lambda)$ et $S^1(\mu)$, les demi-conoïdes de sommets λ et μ respectivement, portions des conoïdes caractéristiques $S(\lambda)$ et $S(\mu)$, situées respectivement dans les domaines $t \leqslant t_\lambda$ et $t \leqslant t_\mu$ de D. Supposons que $S^1(\lambda) \cap S^1(\mu)$ ne soit pas vide et admettons, pour simplifier, que cette intersection se réduit à une seule ligne K (cf. fig. 8a). Notons alors : $S^{11}(\lambda)$ (ou $S^{11}(\mu)$) la portion de la surface $S^1(\lambda)$ (ou $S^1(\mu)$) extérieure au demi-conoïde $S^1(\mu)$ (ou $S^1(\lambda)$); S_γ, la surface définie par $S_\gamma \equiv S^{11}(\lambda) \cup S^{11}(\mu)$. L'intersection de S_γ avec une parallèle à Ot — quand cette intersection existe — se réduit à un point unique — ce qui sera vérifié, une fois encore, ci-après. Par suite, on peut considérer S_γ comme

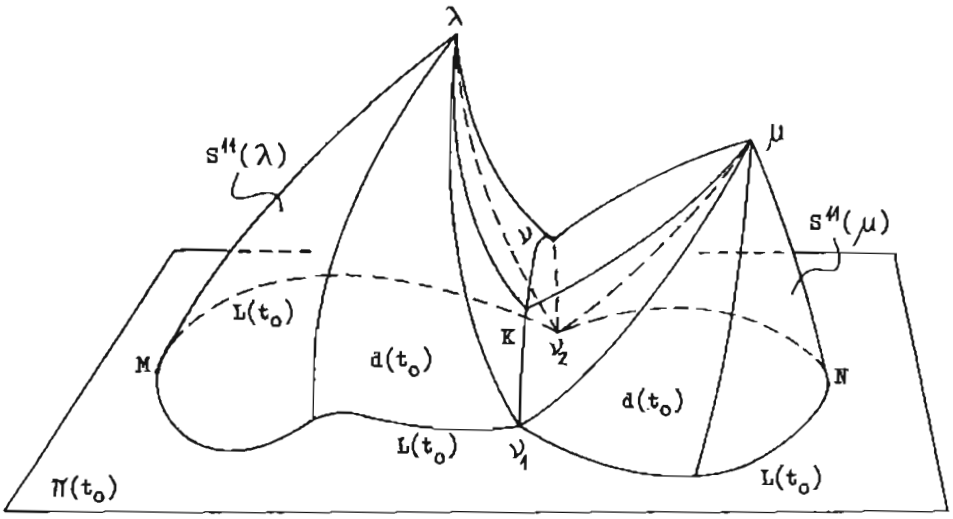


FIG. 8a

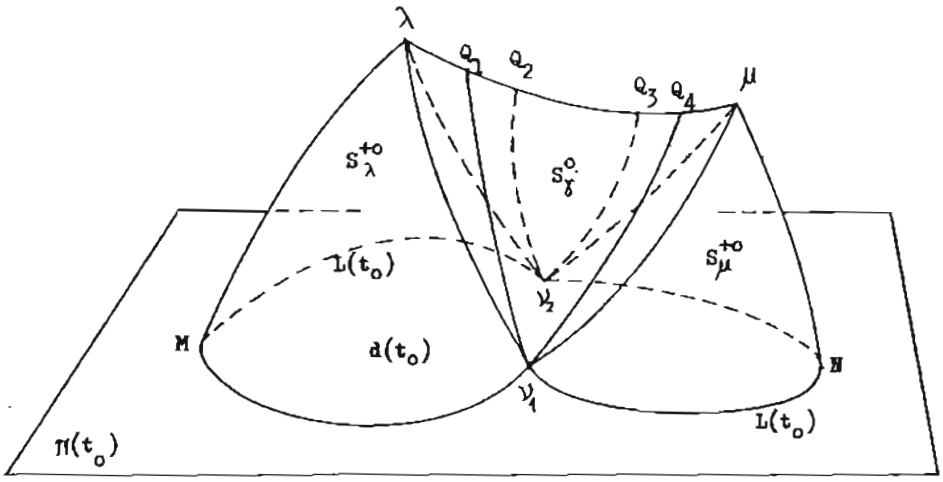


FIG. 8b

une surface intégrale de $(2.11)_{II}$ — donc porteuse d'une multiplicité bicaractéristique de (E), présentant deux points coniques isolés, λ et μ (cf. fig. 8); c'est l'exemple qu'on se proposait de construire. Mais, il convient de noter que S_γ possède, de plus, une ligne-arête K, le long de laquelle S_γ est dépourvue de points coniques.

Voici une conséquence de cette remarque évidente, sur laquelle il est utile d'attirer l'attention. Reprenant les écritures antérieures, notons : $\pi(t_0)$, le plan d'équations $t = t_0 =$ cte; $L(t_0) = \pi(t_0) \cap S_\gamma$ intersection que nous supposerons réduite à une courbe simple (l'extension au cas général est aisée), sans point commun avec $\overline{D}$; $d[L_0(t_0)]$, le domaine, simplement connexe, $\subset \pi(t_0)$, dont $L(t_0)$ est la frontière. Soit $\nu(x_\nu, y_\nu, t_\nu)$ le point $\in$ K où t atteint son maximum sur cette ligne (cf. fig. 8a); d'après ce qui précède, on doit avoir $t_\nu > t_0$. La section de $S^1(\lambda)$ et $S^1(\mu)$ par $\pi(t_0)$ ayant une partie commune, on voit que $K \cap \pi(t_0)$ contient au moins deux points distincts, $\in L(t_0)$, que nous notons ν_1 et ν_2. Comme K est une arête de S_γ, ν_1 et ν_2 sont les points anguleux de $L(t_0)$; dans le cas de la fig. 8a, il n'en existe pas d'autres.

Ceci posé, soit (u, v, ζ) une solution de (E), régulière $R^{(2)}$, supposée donnée dans D. D'après ce qui précède, il est loisible d'envisager S_γ comme une intégrale de $(2.11)_{II}$ passant par la courbe $L(t_0)$. Mais il importe d'observer que $L(t_0)$ n'étant pas régulière $R^{(2)}$, S_γ n'est pas l'unique solution du problème de Cauchy posé relativement à $(2.11)_{II}$ et à $L(t_0)$. En effet, la surface en cause est constituée par $S^{11}(\lambda)$ et $S^{11}(\mu)$, en sorte qu'elle contient les portions coniques $\lambda\nu_1\nu\nu_2 \subset S^{11}(\lambda)$ et $\mu\nu_1\nu\nu_2 \subset S^{11}(\mu)$, délimitées par les arcs $\widehat{\lambda\nu_1}$ et $\widehat{\lambda\nu_2}$ des caractéristiques de $(2.11)_{II}$, génératrices de $S(\lambda)$ et les arcs $\widehat{\mu\nu_1}$ et $\widehat{\mu\nu_2}$ jouant le même rôle vis-à-vis de $S(\mu)$. Soient alors $S(\nu_1)$ et $S(\nu_2)$, les conoïdes caractéristiques de (E), de sommets respectifs ν_1 et ν_2. Il s'ensuit que $\widehat{\lambda\nu_1}$ et $\widehat{\mu\nu_1}$ sont les génératrices caractéristiques de $S(\nu_1)$ alors que $\widehat{\lambda\nu_2}$ et $\widehat{\mu\nu_2}$ sont celles de $S(\nu_2)$, d'une part, et que $S(\nu_1)$ (ou $S(\nu_2)$) est tangent à $S(\lambda)$ et $S(\mu)$ le long de $\widehat{\lambda\nu_1}$ et $\widehat{\mu\nu_1}$ (ou $\widehat{\lambda\nu_2}$ et $\widehat{\mu\nu_2}$) respectivement. Considérons alors la surface S_γ^0 constituée par $S^{11}(\lambda)$, $S^{11}(\mu)$ et les portions $\lambda\mu\nu_1$ et $\lambda\mu\nu_2$ de $S(\nu_1)$ et $S(\nu_2)$ respectivement, l'arc $\lambda\mu$ étant une portion de $S(\nu_1) \cap S(\nu_2)$. Sur la figure 8b, on a représenté, en traits pleins, les caractéristiques $\widehat{\nu_1 Q_1}$ et $\widehat{\nu_1 Q_4}$ de $(2.11)_{II}$, génératrices de $S(\nu_1)$, les arcs $\widehat{\nu_2 Q_2}$ et $\widehat{\nu_2 Q_3}$ jouant le même rôle vis-à-vis de $S(\nu_2)$. De par sa construction même, S_γ^0 est une surface intégrale de $(2.11)_{II}$, passant par $L(t_0)$, présentant une arête $\widehat{\lambda\mu}$ dont les extrémités λ et μ sont des points coniques de S_γ^0, ainsi que ν_1 et ν_2. On voit ainsi que la situation décrite par la fig. 8b diffère de celle, définie par la fig. 5b, par la présence sur $L(t_0)$ de ces deux points singuliers : ν_1 et ν_2. On peut donc encore regarder S_γ^0 comme une solution du problème de Cauchy posé relativement à $(2.11)_{II}$ et au contour $L(t_0)$, mais qui est très différente, au point de vue géométrique, de la solution S_γ du même problème représentée sur la fig. 8a.

Observons qu'en combinant les raisonnements qui précèdent avec ceux de $2.3.6_{III}$, il est loisible de construire des exemples de surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$ présentant un nombre arbitraire de points coniques et de lignes arêtes qui résolvent le problème de Cauchy pour un contour $L(t_0)$ donné, possédant un nombre quelconque de points anguleux. Par exemple, on pourrait remplacer $S(\lambda)$ et $S(\mu)$ par une chaîne de surfaces représentées sur la fig. 5.b, se coupant deux à deux, etc. Le trait commun à toutes ces solutions consiste en ce que les surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$, ainsi construites, ne sont pas régulières dans le voisinage de $L(t_0)$ — contrairement aux exemples représentés sur la fig. 5 —. Dans la suite, nous illustrerons ce point par d'autres exemples, dont quelques-uns présentent un caractère concret.

Voici l'intérêt de ces remarques, valables dans le cas où $L(t_0)$ n'est pas régulière $R^{(2)}$. L'existence, dans cette éventualité, de plusieurs surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$, passant par $L(t_0)$ impose la nécessité de revoir la définition de la zone d'influence de la multiplicité $m\{d[L(t_0)], u, v, \zeta\}$, cette zone devant être univoquement fixée par la donnée de cette multiplicité — ceci pour des raisons physiques évidentes —. Nous bornant alors, pour simplifier, au cas de la fig. 8b et en faisant appel, pour abréger, à des raisonnements intuitifs, nous allons montrer que la surface S_γ^0, ci-dessus introduite, est la seule à répondre à la question, c'est-à-dire, à limiter la zone d'influence de la donnée m, lorsque $L(t_0)$ possède deux points anguleux ν_1 et ν_2. Cela résulte des propriétés de régularité de S_γ^0 que nous avons établies ci-dessus et que nous allons rappeler, en les précisant. Cette surface est du même type que celle représentée sur la fig. 5b à cela près que les arcs $\widehat{M_1M_2}$ et $\widehat{M_3M_4}$ de celle-ci sont, dans le cas de S_γ^0 réduits aux points anguleux de $L(t_0)$, ν_1 et ν_2 respectivement qui sont des singularités isolées de S_γ^0. Or, on a vu en $2.3.6_{III}$, que de telles surfaces sont orientables (cf. la remarque finale du sous-alinéa 3, intitulé : une propriété commune aux surfaces S_α et S_γ). Il s'ensuit que les raisonnements qui aboutissent à la définition des zones d'influence s'appliquent à S_γ^0. Reprenant alors les notations de $2.3.6_{III}$ et de 3.2.3 en les adaptant à la situation représentée sur la fig. 8b, nous affecterons de l'indice +, tous les éléments géométriques des figures introduites ci-dessus et situées dans le domaine $t > t_0$. Ainsi, S_γ^{+0} (ou S_γ^+) désigne la portion de S_γ^0 (ou S_γ), $\subset$ à ce domaine.

De même, on notera $\Delta^{+0}[L(t_0)]$ (ou $\Delta^+[L(t_0)]$), le domaine dont la frontière est définie par $\overline{\Delta}^{+0}[L(t_0)] = S_\gamma^{+0} \cup d[L(t_0)]$ (ou $\overline{\Delta}^+[L(t_0)] = S_\gamma^+ \cup d[L(t_0)]$). Il résulte alors des rappels qui précèdent que $\Delta^{+0}[L(t_0)]$ est bien la zone d'in-

fluence de l'onde incidente, engendrée par la donnée de Cauchy $m\{d[L(t_0)], u, v, \zeta\}$; bien entendu, la zone d'influence de l'onde rétrograde, engendrée par la multiplicité m sera définie d'une manière tout analogue.

Pour plus de clarté, explicitons à présent les raisons pour lesquelles $\Delta^+[L(t_0)]$ ne peut jouer le rôle de zone d'influence de la multiplicité m, ci-dessus introduite.

Nous plaçant dans la situation de la fig. 8a, cherchons à situer le demi-conoïde $S(\nu)$ par rapport à S_ν^+. Soit $\widehat{\nu P^+}$, la caractéristique de $(2.11)_{II}$ et génératrice de $S(\nu)$: on pose $P = \widehat{\nu P^+} \cap \pi(t_0)$ et on note que P est le point unique de l'intersection précédente, puisque t varie, rappelons-le d'une manière monotone le long de $\widehat{\nu P}$. Montrons que $P \in d[L(t_0)]$. Sinon, $\exists P_1 \in \widehat{\nu P}$, $P_1 \neq P$ et tel que $P_1 = \widehat{\nu P} \cap S(\mu)$ (ou $P_1 = \widehat{\nu P} \cap S(\lambda)$). Autrement dit, l'arc $\widehat{PP_1}$ couperait en deux points l'un des conoïdes $S(\lambda)$ ou $S(\mu)$, ce qui est impossible (cf. $2.3.6_{III}$). Il s'ensuit que la courbe $K_1 = S(\nu) \cap \pi(t_0) \subset d[L(t_0)]$ et, plus précisément $K_1 \cap L(t_0)$, est vide (cf. fig. 9a). Nous admettrons alors comme intuitivement évident, le résultat suivant : $\exists Q$, un point extérieur à $\{\Delta^+[L(t_0)] + \overline{\Delta}^+[L(t_0)]\}$ tel que $|\nu\overline{Q}|$ soit assez petit pour qu'à chaque génératrice de $S(\nu)$ on puisse associer une génératrice du conoïde caractéristique $S(Q)$ assez voisine, de façon que la courbe $K_2 = S^+(Q) \cap \pi(t_0)$ soit strictement intérieure à $d[L(t_0)]$. Il s'en suit que les valeurs de u, v, ζ en Q^+ dépendent des données de Cauchy en des points intérieurs à $d[L(t_0)]$ seules alors que, par construction, Q^+ est extérieur à $\{\Delta^+[L(t_0)] + \overline{\Delta}^+[L(t_0)]\}$.

Il s'ensuit que ce domaine ne peut constituer la zone d'influence incidente de $m\{d[L(t_0)], u, v, \zeta\}$. C'est la situation représentée sur la figure 9b; pour plus de clarté, on s'est borné à tracer sur cette figure les surfaces $S^+(Q)$ et $S^+(\nu)$ dans l'éventualité où $S^+(Q) \cap S^+(\nu)$ est vide. Il est facile d'ailleurs de montrer qu'on peut toujours se ramener au cas où cette condition serait remplie : alors K_1 est intérieur au domaine $\subset d(L(t_0)]$ dont K_2 est la frontière.

Notons que les raisonnements précédents sont en défaut dans le cas de la fig. 8b; pour abréger, on se contentera d'illustrer cette situation dans le

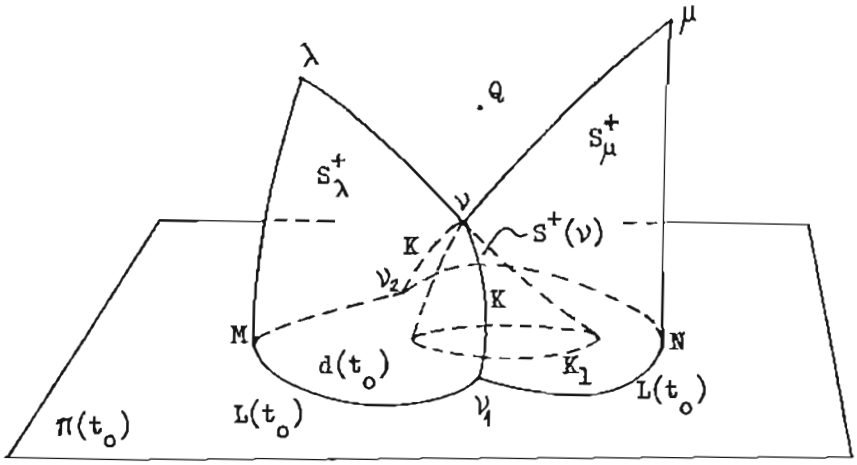


FIG. 9a

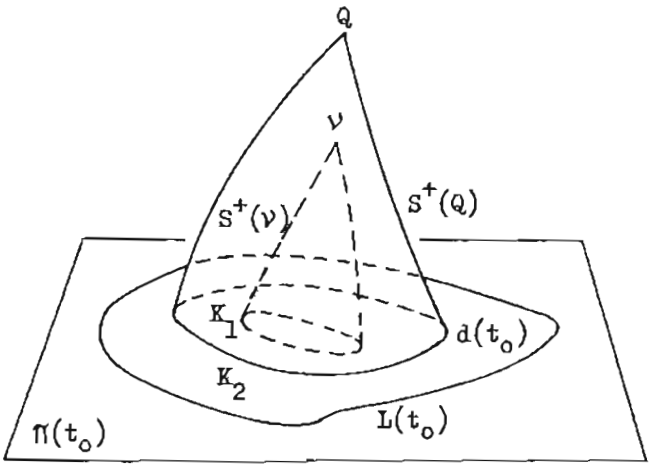


FIG. 9b

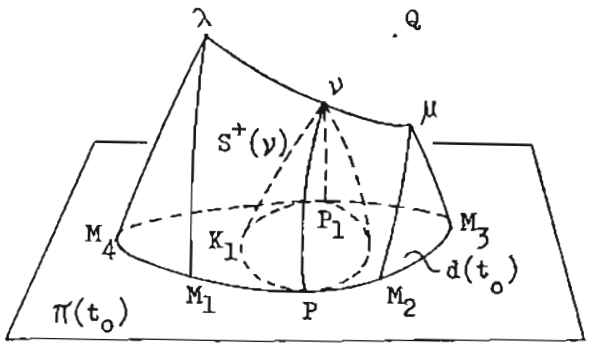


FIG. 9c

cas particulier de la fig. 5b (cf. Fig. 9c). Soit ν, un point quelconque de $\widehat{\lambda\mu}$ que, pour simplifier, nous supposerons différents de λ et μ. Alors $S(\nu)$ comporte deux génératrices $\widehat{\nu P}$ et $\widehat{\nu P_1}$ tracées respectivement sur les deux nappes de S_γ^{+0} se croisant le long de l'arête $\widehat{\lambda\mu}$ de cette surface. Il s'en suit que $S(\nu)$ et S_γ^{+0} sont tangentes le long de $\widehat{\nu P}$ et $\widehat{\nu P_1}$, de sorte que la courbe K_1 touche L en P et en P_1. Il est dès lors impossible de construire $S(Q^+)$ de manière que la courbe $K_1 = \pi(t_0) \cap S(Q^+)$ contienne K à son intérieur, ce qui établit notre proposition. On conçoit clairement ainsi la raison de la validité de notre définition de la zone d'influence.

Du point de vue qui nous occupe, la différence essentielle entre S_γ^{+0} et S_γ^+ consiste en ce que $\Delta_\gamma^+ \subset \Delta_\gamma^{+0}$. Pour justifier ce point, il suffit de montrer que toute génératrice $\widehat{\lambda P}$ de la nappe conique $\lambda\nu_1\nu\nu_2 \subset S(\lambda)$ distincte de $\widehat{\lambda\nu_1}$ et $\widehat{\lambda\nu_2}$ est intérieure à Δ_γ^{+0}, puisque $\lambda P \cap \overline{\Delta}_\gamma^{+0}$ se réduit à λ. Or, il résulte de la construction même de S_γ^{+0} que, dans le voisinage de λ, la nappe en cause est située entre les plans tangents à $S(\lambda)$ et à la génératrice $\widehat{\lambda\nu_1}$ de $S(\lambda)$ d'une part et à $S(\lambda)$ et à la génératrice $\widehat{\lambda\nu_2}$, d'autre part. Ce voisinage est donc intérieur à Δ_γ^{+0}. Ceci étant, raisonnons par l'absurde et admettons que $\exists P_1$, point $\in \widehat{\lambda P} \cap \overline{\Delta}_\gamma^{+0}$. Alors, montrons tout d'abord que P_1 ne peut appartenir à aucune des deux nappes coniques de $\overline{\Delta}_\gamma^{+0}$, à savoir $\nu_1\lambda\mu \subset S(\nu_1)$ ou $\nu_2\lambda\mu \subset S(\nu_2)$, régulière $R^{(2)}$, sauf en ν_1 et ν_2 respectivement. Sinon, en effet, l'arc $\widehat{\lambda P_1}$, caractéristique de $(2.11)_{\text{III}}$, couperait une de ces nappes en deux points : λ et P_1, ce qui est impossible [cf. $(2.3.6)_{\text{III}}$]. Ainsi, si P_1 existait, $\widehat{\lambda P}$ devrait atteindre le point $P_2 \in \widehat{\nu_1\nu\nu_2}$ tel que $P_2 \neq \nu_1$, $P_2 \neq \nu_2$. Cela étant, prouvons que l'arc $\widehat{\nu_1\nu\nu_2}$ ne peut avoir de point extérieur à $(\Delta_\gamma^{+0} + \overline{\Delta}_\gamma^{+0})$. Car s'il en était autrement, on pourrait prendre pour $\widehat{\lambda P}$ une caractéristique passant par P_2, P_2 étant extérieur à ce précédent domaine et $\in \widehat{\nu_1\nu\nu_2}$. Il en résulterait que $\widehat{\lambda P_2}$ doit recouper (au sens strict) Δ_γ^{+0} en un point $P_3 \neq P_2$.

Or, nous venons de voir que $P_3 \notin \lambda\mu\nu_1$, et $P_3 \notin \lambda\mu\nu_2$. De plus, de par sa construction même, la courbe $\widehat{\lambda P P_2 P_3}$ est tracée sur $S(\lambda)$. Donc P_3 doit être situé sur celle des deux portions de $S(\mu)$ comprises entre $\widehat{\mu\nu_1}$ et $\widehat{\mu\nu_2}$ qui appartient à $\overline{\Delta}_\gamma^{+0}$. Il en résulterait que la caractéristique $\widehat{\lambda P P_2 P_3}$ coupe (au sens strict) $S(\mu)$ en $P_2 \in \widehat{\nu_1\nu\nu_2} = S(\lambda) \cap S(\mu)$ d'une part et en $P_3 \neq P_2$, d'autre part, ce qui est impossible. Ainsi, on a bien : $\widehat{\nu_1\nu\nu_2} \subset (\Delta_\gamma^{+0} + \overline{\Delta}_\gamma^{+0})$. De ce qui précède il résulte donc : $\widehat{\lambda P_1} \subset (\Delta_\gamma^{+0} + \overline{\Delta}_\gamma^{+0})$; et puisque la caractéristique $\widehat{\lambda P_2}$ traverse $S(\mu)$ en P_2, on en conclut que le prolongement de cette courbe au-delà de P_2 appartient encore à l'intérieur de ce conoïde : cela établit notre proposition. De l'inclusion $\Delta_\gamma^+ \subset \Delta_\gamma^{+0}$, résulte, en particulier ce fait évident : la valeur de $u(P)$, $v(P)$, $\zeta(P)$ sont univoquement déterminées, $\forall P \in \Delta_\gamma^+$ par la seule donnée de $m\{d[L(t_0)], \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}\}$.

Nous allons maintenant présenter quelques conséquences immédiates des résultats de 3.2.2 et 3.2.3 concernant les propriétés des surfaces S_γ^{+0}; quoique quelques-uns des énoncés ci-après aient été établis dans les alinéas précités et même, déjà en $2.3.6_{\text{III}}$, il paraît intéressant de les retrouver au moyen des variantes des raisonnements antérieurs. On étendra ainsi nos conclusions au cas des frontières des zones incidentes d'influence quelconques, possédant un nombre arbitraire d'arêtes et de points coniques (cf. par ex. la fig. 8b). Reprenant les notations antérieures, nous notons : $m\{d[L(t_0)], \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}\}$, la donnée de Cauchy; S_γ^{+0}, la surface intégrale de $(2.11)_{\text{II}}$, passant par $L(t_0)$, située dans le domaine : $t \geqslant t_0$ et qui délimite la zone incidente d'influence Δ_γ^{+0} de m, dont $\overline{\Delta}_\gamma^{+0} = [S_\gamma^{+0} + d(t_0)]$ est la frontière.

Soient : $P(x, y, t)$, $t > t_0$, un point extérieur à $(\Delta_\gamma^{+0} + \overline{\Delta}_\gamma^{+0})$; $d(P)$, le domaine courbe — supposé existant — que le demi-cône caractéristique $\underline{S}(P)$ découpe sur le plan $t = t_0$, de frontière $\overline{d}(P)$. Alors, on ne peut avoir $d(P) \subset d(t_0)$ (cf. fig. 10a); en d'autres termes, $d(P)$ doit posséder des portions extérieures à $d(t_0)$.

Remarquons d'abord que cette propriété apparaît comme évidente a priori si l'on se réfère à la définition de la zone d'influence d'un domaine (cf. $2.3.6_{\text{III}}$). Il est clair d'abord que l'inclusion $d(P) \subset d(t_0)$ entraîne l'inclusion de la zone d'influence de $d(P)$ dans celle de $d(t_0)$. Or, le conoïde $S(P)$ est, par hypothèse, la zone incidente d'influence de $d(P)$; si donc la situation représentée sur la fig. 10a était réaliste, la relation $S(P) \subset \Delta_\gamma^{+0}$ ne serait pas vérifiée : cette contradiction justifie le résultat que nous avions en vue.

Cela étant, proposons-nous de retrouver directement cette conclusion, sans utiliser la définition et les propriétés d'une zone d'influence énoncées en $2.3.6_{\text{III}}$.

Raisonnons encore par l'absurde et admettons l'existence des situations telles que celle décrite sur la fig. 10a. Notons : $\sigma(P)$, le domaine découpé par $S(P)$ sur S_γ^{+0}, de frontière $\overline{\sigma}(P)$. Il résulte de la définition de $S(P)$, que toute section de ce conoïde par un plan ayant une orientation d'espace est un domaine simplement connexe. Il en est aussi de même de la section de $S(P)$ par toute surface orientée dans l'espace-même si celle-ci possède des arêtes et des points coniques. Cela étant, reprenons les définitions et les raisonnements de $2.3.6_{\text{III}}$. Nous orientons donc toutes les caractéristiques $\Gamma(M, p_0, q_0)$ de $(2.11)_{\text{II}}$ dans le sens des t croissants. On a vu à l'alinéa précité que pour orienter une surface $\subset D$ au moyen de ces courbes, il faut définir préalablement une congruence de celles-ci, de façon qu'il passe une et une seule de ces lignes par tout point $\in (D + \overline{D})$. Pour prélever une telle congruence sur l'ensemble des Γ (on se rappellera que Γ dépend des cinq paramètres : cf. par exemple, $2.3.4_{\text{III}}$, théorème I, formule $(2.43)_{\text{III}}$) on pourra, entre

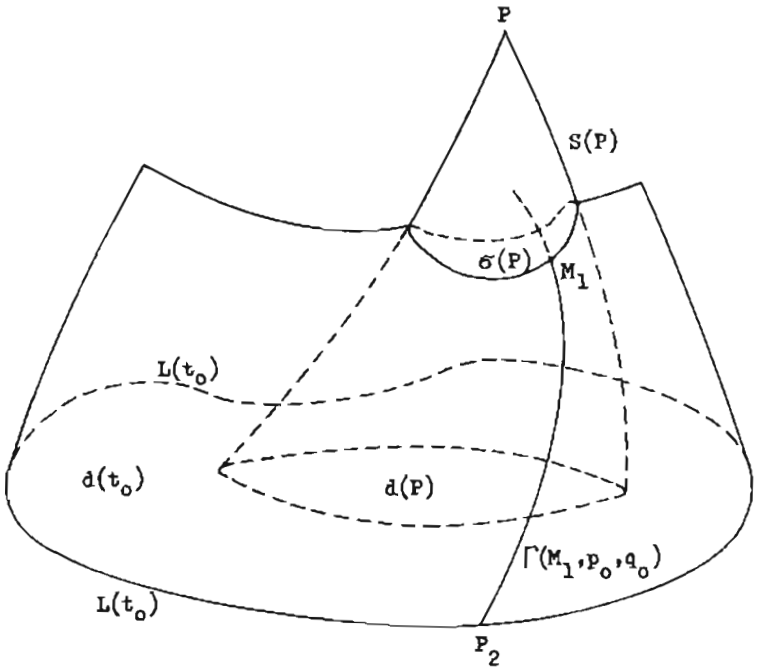


FIG. 10a

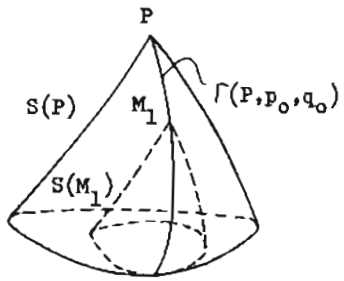


FIG. 10b

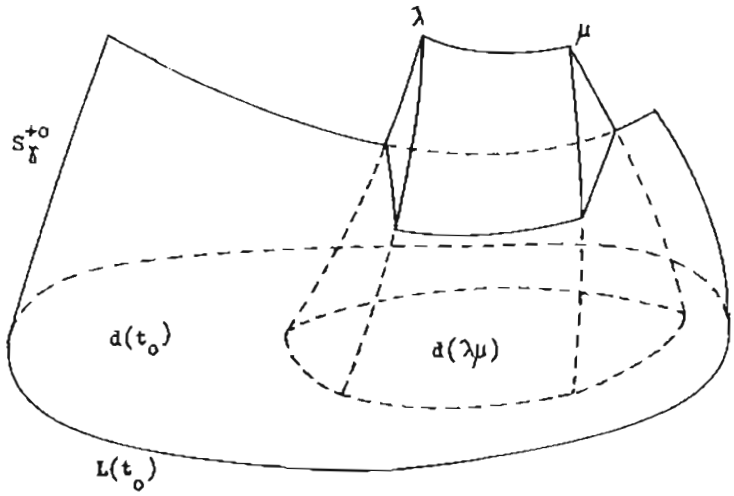


FIG. 10c

autres procédés, utiliser la construction dans $(D + \overline{D})$, réalisée à partir d'une triangulation appropriée de ce domaine, de la famille des surfaces coordonnées S_γ, à un paramètre (cf. $2.3.5_{III}$ et $2.3.6_{III}$). Comme chaque S_γ est engendrée par les $\Gamma(M, p_0, q_0)$, caractéristiques de $(2.11.)_{II}$ — de manière, rappelons-le, qu'il passe une Γ et une seule par tout point $M \in (D + \overline{D})$ — et dépendant d'un paramètre, on voit que l'ensemble de ces courbes constituent bien une congruence répondant à la question.

Mais nous allons faire voir qu'il est inutile de définir celle-ci pour orienter S (P); on étendra ci-après aisément cette conclusion aux surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$ assez régulières. En effet, soient : M, un point courant $\in$ S (P); $\Gamma(M, p_0, q_0)$, la génératrice de S (P), issue de P, passant par M et orientée, comme on l'a dit, dans le sens des t croissants. Il résulte alors de la définition même de S (P) et de S (M) que $\Gamma(M, p_0, q_0)$, caractéristique de $(2.11)_{II}$, est la génératrice commune de ces deux conoïdes; par suite S (P) et S (M) sont tangents le long de la courbe précitée. Montrons que ce contact est intérieur. Pour le vérifier, faisons tendre M vers P le long d'une génératrice fixe de S (P). Il est clair qu'au cours d'une telle opération la nature du contact en cause ne change pas et, qu'à la limite on a : $\lim_{M \to P} S(M) = S(P)$.

Or, cela est incompatible avec l'éventualité d'un contact intérieur entre S (P) et S (M).

Les raisonnements développés ci-dessus à propos des situations décrites sur la fig. 9 s'appliquent et prouvent que S (M) est intérieur à S (P). On le vérifie directement en observant que si une génératrice $\widehat{MM_1}$, de S (M) atteignait un point M_1 extérieur à S (P), elle devrait couper cette surface en un point $M_2 \in \widehat{MM_1}$. Il s'ensuivrait que $\widehat{MM_1} \cap S(P)$ comprendrait au moins deux points : M, M_2 ce qui est impossible. D'après cela, toute génératrice de S (M) — sauf celle qui passe par P et par M — coupe (strictement) S (P) en M. Notons M_1 le point courant de cette courbe et prolongeons-la au-delà de M, vers l'extérieur de S (P). On voit ainsi (cf. Fig. 10b) que t croît sur l'arc de celle-ci, tracé sur S (M), quand M_1 tend vers M et sur son prolongement quand M_1 s'éloigne de M. Il s'en suit que *toute* génératrice de S (M) oriente la surface de S (P) de l'intérieur vers l'extérieur de cette surface, ce qui justifie notre assertion.

Dans ces conditions il suffit, pour établir que la situation décrite sur la fig. 10a est impossible, de montrer que dans le cas contraire il existerait des caractéristiques $\Gamma(M, p_0, q_0)$ de $(2.11)_{II}$ qui orienteraient S (P) de l'extérieur de cette surface vers son intérieur.

Notant $\overline{d}(P)$ la frontière de $d(P)$, rappelons qu'on a, par hypothèse : $[d(P) + \overline{d}(P)] \subset \{d[L(t_0)] + L(t_0)\}$. En vue des applications à des problèmes concrets, nous allons, préalablement à la démonstration du résultat qui précède, discuter l'éventualité où $\overline{d}(P) \cap L(t_0)$ n'est pas vide. Mais il convient de noter que ces préliminaires ne sont pas indispensables pour justifier l'énoncé ci-dessus. Soit M_1, un point de cette intersection. Si M_1 est isolé sur celle-ci, $L(t_0)$ est tangent en ce point à $\overline{d}(P)$, lorsque M_1 est régulier sur $L(t_0)$. Car $\overline{d}(P)$ est la section plane de la surface S (P), régulière $R^{(2)}$ (sauf en P); par suite $\overline{d}(P)$ est régulier en M_1 et, par ailleurs, ne coupe pas $L(t_0)$ en ce point en vertu des hypothèses faites. Il en résulte que S (P) et S_γ^{+0} admettent la même génératrice commune $\Gamma(M_1, p_0, q_0)$, issue de P. Comme on a supposé (cf. Fig. 10a) P extérieur à Δ_γ^{+0}, on voit que l'arc de cette courbe, tracé sur S_γ^{+0}, aboutit nécessairement à un point singulier de cette surface.

Examinons maintenant l'éventualité où M_1 n'est pas un point isolé de $\overline{d}(P) \cap L(t_0)$. Alors cette intersection comprend au moins un arc régulier $R^{(2)}$. Le raisonnement précédent s'appliquant à tout point M_1 de cet arc, on voit que S_γ^{+0} et S (P) ont en commun une nappe qui admet pour élément de frontière un arc d'une arête de S_γ^{+0} — dont les extrémités peuvent être des points coniques de cette surface — et qui peut alors se réduire à un point conique si ces extrémités sont confondues.

Il reste, pour achever, à discuter le cas où M_1 est un point anguleux du contour $L(t_0)$; alors, il est nécessairement isolé puisque $\overline{d}(P)$ est régulier $R^{(2)}$. Dans la situation représentée sur la fig. 8b, M_1 est confondu avec l'un des points ν_i, $i = 1, 2$. Par suite, on a : $\Gamma(M_1, p_0, q_0) \equiv \Gamma(\nu_i, p_0, q_0)$; cette courbe est donc une génératrice du demi-conoïde $S(\nu_i)$, telle que ν_1Q_1 ou ν_2Q_2 (cf. Fig. 8b).

Le raisonnement précédent est concluant en raison du fait que — dans le cas de la fig. 8b — chacune des nappes coniques $\nu_i\lambda\mu$ de S_γ^{+0} est régulière $R^{(2)}$ — sauf en ν_i. Nous verrons ci-après qu'il n'en est pas toujours ainsi : il peut se faire, en effet, que les points ν_i ne soient pas des singularités isolées de S_γ^{+0}, mais soient les extrémités des lignes-arêtes de cette surface. Il en résultera que $\Gamma(M_1, p_0, q_0) \cap S_\gamma^{+0}$ — où $\Gamma(M_1, p_0, q_0)$ désigne toujours une génératrice de S (P) — se réduit au seul point ν_i.

Cela étant, passons à la phase finale de la démonstration de la non existence de la situation représentée sur la fig. 10a. L'inclusion $d(P) \subset d[L(t_0)]$ entraîne l'existence sur $\overline{\sigma}(P)$ des points $M_1(x_1, x_1, t_1)$ tels que $\Gamma(M_1, p_0, q_0) \cap S_\gamma^{+0}$ se réduit à l'unique point M_1, $\Gamma(M_1, p_0, q_0)$ désignant encore la génératrice de S (P). Observons qu'en M_1, cette courbe traverse S_γ^{+0} sans être tangente à cette surface : sinon, en effet, l'arc de $\Gamma(M_1, p_0, q_0)$ tel que $t \in [t_0, t_1]$ serait tracé sur S_γ^{+0}, contrairement à l'hypothèse. Il s'ensuit que qu'en M_1 les surfaces S_γ^{+0} et S (P) ne sont pas tangentes et se coupent au sens strict. Deux cas sont alors à considérer :

a) M_1 est un point ordinaire de S_γ^{+0};

b) M_1 est situé sur une arête de S_γ^{+0} ou est un point conique de cette surface.

Dans chacune de ces éventualités, il existe un arc régulier d'une génératrice $\Gamma(M_1, p_{01}, q_{01})$ de S_γ^{+0}, d'extrémité M_1, le long duquel $t \leqslant t_1$. Cette courbe peut être univoquement prolongée au-delà de M_1, c'est-à-dire pour $t \geqslant t_1$. Si M_1 est un point ordinaire de S_γ^{+0}, ce prolongement est tracé sur cette surface. Si M_1 est un point singulier de celle-ci, il n'en est plus ainsi. Mais dans tous les cas, $\Gamma(M_1, p_{01}, q_{01})$, ainsi définie coupe — au sens strict — S (P). Or, il est clair que l'arc $t \leqslant t_1$ de la courbe en cause est extérieur à S (P); il s'ensuit que $\Gamma(M_1, p_{01}, q_{01})$ — orientée, rappelons-le, dans le sens des t croissants — passerait, quand $(t-t_1)$ change de signe, de l'extérieur de S (P) à l'intérieur de cette surface, qui serait dès lors orientée dans le même sens. Or, nous avons vu ci-dessus qu'une telle éventualité est impossible, ce qui établit notre proposition.

L'extension au cas de la Fig. 10c est aisée, c'est pourquoi, nous ne l'expliciterons pas ici.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la démonstration précédente ne fait pas appel aux propriétés des surfaces S_γ, intégrales de $(2.11)_{II}$ qui constituent la frontière de la zone d'influence d'un domaine $d[L(t_0)]$.

Nous allons à présent caractériser brièvement la classe des S_γ telles que la situation de la Fig. 10a

(où on remplacerait S_γ^{+0} par une S_γ) serait impossible : en d'autres termes, il s'agit de définir la classe de surfaces S_γ sur lesquelles S (P) ne peut découper un domaine σ (P). Raisonnons encore par l'absurde et admettons l'existence d'une telle section du demi-conoïde. Il est évident d'abord que dans cette éventualité t doit être inférieur le long de σ (P) à la valeur t_0 du temps en P. Si σ (P) est une portion régulière de S_γ, la démonstration ci-dessus s'applique alors sans changement. Il reste donc à examiner l'éventualité où il existerait sur σ (P) des points singuliers de S_γ. Or, une des étapes essentielles du raisonnement qui précède consistait à montrer que toute caractéristique $\Gamma(M_1, p_{01}, q_{01})$ de $(2.11)_{II}$, issue d'un point $M_1 \in \sigma(P)$ et tracée sur S_γ traverserait — si la Fig. 10a était réaliste — S (P) en M_1, de manière à orienter ce demi-conoïde de l'extérieur vers l'intérieur. Il convient maintenant de faire observer que ceci résulterait de l'hypothèse suivante : t croît sur l'arc de $\Gamma(M_1, p_{01}, q_{01})$ pour atteindre $M_1 \in \overline{\sigma}(P)$; en d'autres termes, qu'on avait le long de l'arc en cause : $t \leqslant t_1$. Et c'est pourquoi notre conclusion est en défaut — comme nous l'avons déjà établi par une autre méthode — pour la surface S_γ, constituée, par exemple, par deux nappes coniques : $\lambda\nu_1\nu_2$ et $\mu\nu_1\nu_2$ de la Fig. 8a, qui présente une ligne-arête K. Pour le faire voir plus nettement, reprenons les situations représentées sur les Fig. 9a et 9b. On voit que le demi-conoïde $S(Q^+)$ découpe sur S_γ ainsi définie le domaine $\sigma(Q^+)$ tel que l'arc $t \leqslant t_1$ de toute caractéristique $\Gamma(M_1, p_{01}, q_{01}) \subset S_\gamma$, issue de $M_1 \in K$ et tel que, de plus : $M_1 \in \sigma(Q^+)$ soit intérieure à S_γ et traverse cette surface de l'intérieur vers l'extérieur, en un point de $\overline{\sigma}(Q^+)$: cela rend caduc les raisonnements antérieurs. On vérifie donc bien la conclusion annoncée : la Fig. 8a fournit un exemple des surfaces S_γ ne possédant pas la propriété étudiée du fait de l'existence d'un arc de $\Gamma(M_1, p_{01}, q_{01})$, tracée sur S_γ et le long duquel t atteint son minimum au point singulier M_1 de cette surface. C'est donc là que réside l'origine du fait qu'une surface du type représenté sur la Fig. 8a ne saurait constituer la frontière de la zone d'influence d'une donnée de Cauchy, alors que ce rôle peut-être joué par une surface du type représenté sur la Fig. 8b. Nous avons donc là un critère simple pour distinguer les deux classes de surfaces intégrales singulières de $(2.11)_{II}$ qu'on vient de caractériser.

Nous terminerons cette revue des singularités que peuvent présenter les surfaces S_γ, engendrées par les courbes $\Gamma(M_0, p_0, q_0)$, par deux exemples.

1) Soit $\widehat{\lambda\mu}$, un arc de courbe simple, régulier $R^{(2)}$, tel que $\lambda \in \pi(t_0)$, $\mu \in \pi(t_0)$ et dont tous les points, λ et μ exceptés, sont situés dans le domaine $t > t_0$ (strictement). Considérons la surface intégrale de $(2.11)_{II}$ qui admet $\widehat{\lambda\mu}$ pour ligne-arête et notons $d[L(t_0)]$, le domaine de frontière $L(t_0)$, que cette surface découpe sur $\pi(t_0)$. Admettons que les deux nappes de celle-ci, ainsi définies, soient régulières $R^{(2)}$ de telle sorte que $L(t_0)$ soit simple, se composant de deux arcs réguliers $R^{(2)}$: $L_1(t_0)$ et $L_2(t_0)$, d'extrémités λ et μ où ils forment un point anguleux de $L(t_0)$, dont l'angle intérieur à $d[L(t_0)]$ est alors aigu (cf. Fig. 11a) et $d[L(t_0)]$ simplement connexe. D'après ce qu'on vient de voir, une telle surface peut être notée S_γ^{+0} puisqu'elle est, avec $d[L(t_0)]$, la frontière de la zone d'influence incidente $\Delta^{+0}[L(t_0)]$ de la multiplicité $m\{d[L(t_0)], u, v, \zeta\}$. Remarquons en passant — une fois de plus — que S_γ^{+0} peut encore être interprétée comme une solution du problème de Cauchy posé relativement à une solution donnée et régulière $R^{(2)}$ de (E), d'une part et au contour $L(t_0)$, présentant deux points anguleux — d'angles d'ouverture aigus vers $d[L(t_0)]$ — d'autre part. Pour plus de clarté, on a marqué sur la Fig. 11a deux arcs de caractéristiques Γ de $(2.11)_{II}$, $\widehat{\nu\nu_1}$ et $\widehat{\nu\nu_2}$, issues de $\nu \in \widehat{\lambda\mu}$, tracées respectivement sur les nappes, régulières $R^{(2)}$, de S_γ^{+0} : $\nu\lambda\nu_1\mu$ et $\nu\lambda\nu_2\mu$, qui se croisent sur l'arête $\widehat{\lambda\mu}$ de cette surface.

La situation qu'on vient de décrire est à rapprocher de celle représentée sur la Fig. 8b. Observons que dans le cas de celle-ci, $L(t_0)$ est encore un contour régulier $R^{(2)}$, sauf en deux points anguleux ν_1 et ν_2 ; mais à la différence de la Fig. 11a, les deux angles d'ouverture de $L(t_0)$ vers $d[L(t_0)]$ sont obtus. Il en résulte une différence essentielle entre la géométrie des surfaces S_γ^{+0} correspondantes, mise en évidence sur la Fig. 8a et 11a.

L'intérêt des remarques ci-dessus résulte de la signification physique des résultats obtenus. En

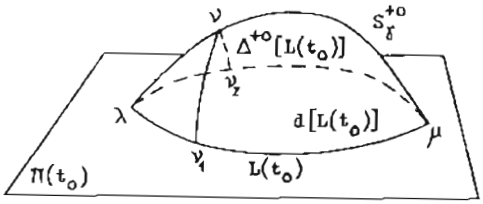


FIG. 11a

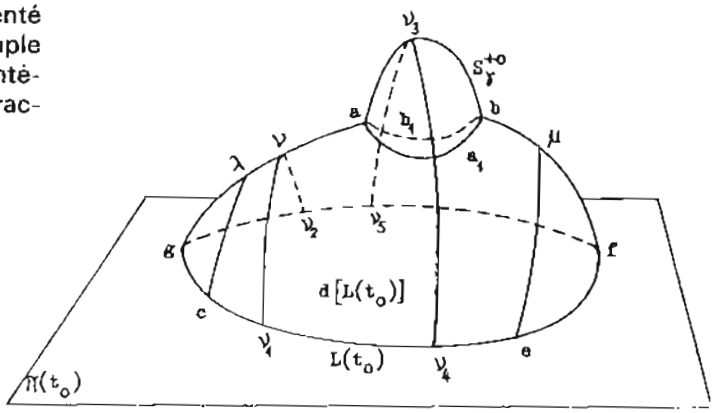


FIG. 11b

effet, nous montrerons ci-après le parti qu'on peut tirer de ceux-ci en vue de l'étude analytique de la marée littorale dans le voisinage d'un cap (situation de la Fig. 8a) ou au fond d'une baie, où la frontière continentale du bassin marin possède, par hypothèse, un point anguleux isolé (situation de la Fig. 11a). On voit que dans les deux cas on renonce à avoir recours à l'hypothèse simplificatrice, adoptée jusqu'ici et qui consiste à postuler que la frontière terrestre $\overline{d}_2$ de la mer littorale étudiée se compose d'arcs réguliers $R^{(2)}$. Remarquons, pour finir qu'il est aisé d'étendre l'analyse qualitative qui précède au cas où la donnée $L(t_0)$ serait une courbe présentant un nombre arbitraire de points anguleux, dont une partie modéliserait les caps et la partie complémentaire, les fonds des baies.

2) Le deuxième exemple que nous présentons correspond à la situation de la Fig. 11b. Donnons-nous dans le domaine $t > t_0$ (strictement) deux arcs de courbes : $\widehat{\lambda a a_1 b \mu}$ et $\widehat{\lambda a b_1 b \mu}$, réguliers $R^{(2)}$ et constitués par les arcs $\widehat{\lambda a}$ et $\widehat{\mu b}$, communs à ces deux lignes et par les arcs $\widehat{a_1}$ et $\widehat{b_1}$ dont chacun se raccorde en ses extrémités a et b avec $\widehat{\lambda a}$ et $\widehat{\mu b}$ respectivement, de manière à réaliser en ces points un contact d'au moins du second ordre entre les arcs qui y aboutissent. Cela étant, considérons la surface intégrale de $(2.11)_{II}$ constituée par deux nappes de surfaces régulières $R^{(2)}$ résolvant le problème de Cauchy posé relativement à $(2.11)_{II}$ et à $\widehat{\lambda a a_1 b \mu}$ et à $\widehat{\lambda a b_1 b \mu}$ respectivement qui se croisent le long de $\widehat{\lambda a}$ et $\widehat{\mu b}$ et le long de l'arc $\widehat{a \nu_3 b}$, le long duquel se croisent les portions des nappes précédentes qui résolvent le problème de Cauchy posé ci-dessus pour les arcs $\widehat{a a_1 b}$ et $\widehat{a b_1 b}$.

Pour plus de clarté, nous avons encore représenté sur la Fig. 11b les arcs des caractéristiques $\widehat{\nu \nu_1}$ et $\widehat{\nu \nu_2}$, d'une part, issus de $\nu \in \widehat{\lambda a}$ et $\widehat{\nu_3 \nu_4}$ et $\widehat{\nu_3 \nu_5}$, issus de ν_3 et situés respectivement sur des nappes différentes de la surface. Complétons à présent celle-ci par des nappes coniques de $S(\lambda)$ et $S(\mu)$, se raccordant avec elle le long des caractéristiques Γ de $(2.11)_{II}$: $\widehat{\lambda c}$, $\widehat{\lambda g}$, $\widehat{\mu e}$, $\widehat{\mu f}$, comme l'indique la Fig. 11b, de manière à constituer une surface intégrale de $(2.11)_{II}$, régulière $R^{(2)}$ — sauf le long de ces lignes de raccordement — et de $\widehat{\lambda a \nu_3 b \mu}$ — qui est, par construction, une ligne-arête — . Rappelons que, d'après $2.3.6_{III}$, la surface ainsi construite n'est, en général, que régulière $R^{(1)}$ le long de $\widehat{\lambda c}$, $\widehat{\lambda g}$, $\widehat{\mu e}$, $\widehat{\mu f}$. Mais nous avons indiqué en même temps le moyen de particulariser le choix de $\widehat{\lambda a a_1 b \mu}$ et $\widehat{\lambda a b_1 b \mu}$ de manière à obtenir par le procédé ci-dessus une surface S_γ régulière $R^{(2)}$; nous supposerons cette condition réalisée le long de ces lignes de raccordement.

Nous admettrons alors comme intuitivement évident la propriété suivante, déjà maintes fois énoncée sans démonstration (facile mais fastidieuse) dans des situations analogues : on peut choisir les données $\widehat{\lambda a a_1 b \mu}$ et $\widehat{\lambda a b_1 b \mu}$ de telle sorte que $S_\gamma \cap \pi(t_0)$ se réduise à une courbe $L(t_0)$ simple, qui sera, d'après ce qui précède, régulière $R^{(2)}$. La surface S_γ, ainsi construite, réalise une particularité dont l'existence a été annoncée antérieurement et qu'il est utile de signaler. En chacun des points a et b se croisent deux lignes doubles de S_γ, à savoir : $\widehat{\lambda a}$ et $\widehat{a \nu_3 b}$, d'une part, $\widehat{a \nu_3 b}$ et $\widehat{b \mu}$, d'autre part. Or, on peut envisager S_γ comme surface intégrale de $(2.11)_{II}$, passant par $L(t_0)$ et remplissant le critère ci-dessus indiqué pour constituer la frontière de la zone d'influence incidente Δ_γ^{+0} de la multiplicité $m\{d[L(t_0)], \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}\}$; on vérifie ainsi qu'en dépit du fait que $\overline{L(t_0)}$ est une courbe régulière $R^{(2)}$, S_γ peut être très irrégulière.

Bien entendu, il est aisé, à partir des résultats précédents, de construire des surfaces S_γ présentant un nombre quelconque de singularités de l'espèce qu'on vient de décrire. Et il est évident qu'on obtient des surfaces S_γ à structure géométrique encore plus complexe en combinant les constructions indiquées au cours du présent alinéa, dont peut résumer comme il suit la matière : la frontière S_γ de la zone d'influence de la multiplicité $m\{d[L(t_0)], \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}\}$ peut présenter une grande variété de singularités des types décrits au cours du présent alinéa, même si la frontière $L(t_0)$ de $d[L(t_0)]$ est une courbe simple, régulière $R^{(2)}$.

Et la géométrie de S_γ se complique encore plus si le domaine marin d comporte des îles et si on prend pour $L(t_0)$ un contour doué de points anguleux. Ensuite, il convient de rappeler ici que les méthodes utilisées au cours de cet alinéa ne sont valables que moyennant l'hypothèse de régularité $R^{(2)}$ de la solution étudiée du système (E). Or, comme on le verra ci-après, cette dernière condition n'est pas remplie lorsqu'on cherche à déterminer la frontière S_γ de la zone d'influence incidente de toute la mer littorale occupant le bassin d en prenant en compte les perturbations dues à la présence des caps et des baies le long des frontières terrestres $\overline{d}_2$ de d. En effet, nous montrerons ci-après qu'en les points singuliers de $\overline{d}_2$, la solution de (E) peut n'être pas régulière $R^{(2)}$.

Enfin, observons que toutes les conclusions du présent alinéa demeurent valables dans le cas où les données de Cauchy sont portées par une surface courbe, régulière $R^{(2)}$, orientée dans l'espace.

A maintes reprises, nous avons évoqué les points communs entre les matières traitées dans cet alinéa et $2.3.6_{III}$: quelques résultats de ce dernier viennent d'être repris mais justifiés d'une manière différente. Nous avons cru utile de procéder ainsi en raison du fait que chacune des deux méthodes de démonstration mises en œuvre est susceptible d'être exploitée dans l'étude des solutions de (E) dans le voisinage de leurs singularités.

3.2.4. Un exemple concret de frontières singulières des zones d'influence

Nous nous proposons à présent d'illustrer les généralités consacrées en 3.2.3 aux singularités que peuvent présenter les surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$ par un exemple courant dans le traitement numérique des problèmes aux limites concrets posés relativement au système (E) où interviennent les conditions initiales. Dans beaucoup de cas, les numériciens adoptent le repos pour l'état initial des masses liquides emplissant le bassin $d \subset Oxy$ de la mer littorale étudiée. Il se pose ainsi une question préliminaire : déterminer la frontière S de la zone d'influence de la multiplicité donnée $m(d, 0, 0, 0)$. Nous allons montrer, en nous appuyant sur un résultat élémentaire de la théorie des enveloppes dont on trouvera ci-après la démonstration, qu'on peut, dans le cas particulier des conditions initiales choisies et de la profondeur uniforme, définir S au moyen d'une construction géométrique très simple. Ensuite, on amorcera l'étude du voisinage d'un point singulier de $\overline{d}_2$.

Lemme. Soient : (u, v, ζ), une solution de (E) donnée et régulière $R^{(2)}$ dans le demi-cylindre $(D + \overline{D})$ où $t \geqslant 0$; $\Sigma \subset D$, une surface donnée, régulière $R^{(2)}$ et orientée dans l'espace (pour la solution considérée); K_λ, une famille de courbes régulières $R^{(2)}$, dépendant du paramètre $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ et tracée sur Σ ; K, l'enveloppe des K_λ, supposée existante et réduite à une courbe unique, régulière $R^{(2)}$; $M_{\mu(\lambda)}$, le point caractéristique de K_λ (au sens de la théorie des enveloppes, c'est-à-dire, le point de contact entre K_λ et K) où $\mu(\lambda)$ désigne le paramètre fixant sur K la position de $M_{\mu(\lambda)}$; $\Gamma[M_{\mu(\lambda)}]$ et $\Gamma\{M_{\mu(\lambda)}, p_0[\mu(\lambda)], q_0[\mu(\lambda)]\}$ les caractéristiques de $(2.10)_{II}$ et de $(2.11)_{II}$ issues de $M_{\mu(\lambda)}$ et génératrices des surfaces intégrales de ces deux équations respectivement, passant par K_λ. Alors, on a les résultats ci-après, valables que la famille K_λ soit formée de surfaces intégrales de $(2.10)_{II}$ ou de $(2.11)_{II}$:

a) La famille S_λ admet une surface enveloppe S, porteuse d'une multiplicité bicaractéristique de (E) de la même nature que les S_λ et qui est régulière $R^{(2)}$.

b) Les courbes caractéristiques des S_λ (au sens de la théorie des enveloppes, c'est-à-dire, les courbes le long desquelles S_λ et S se touchent) sont les génératrices des S_λ, c'est-à-dire, les Γ appartenant à l'une ou à l'autre classe des Γ ci-dessus définies.

Tout d'abord observons que, Σ étant orientée dans l'espace, le problème de Cauchy posé pour une ligne L, régulière $R^{(2)}$, tracée sur cette surface, d'une part et pour l'équation $(2.10)_{II}$, d'autre part, admet une solution et une seule alors que le même problème, posé pour L et $(2.11)_{II}$ en admet deux; parmi celles-ci nous en choisirons une sur laquelle nous porterons désormais notre attention.

Il convient, en second lieu, de noter que tous les raisonnements utilisés ci-après pour la démonstration du lemme sont automatiquement valables en vertu des hypothèses de régularité $R^{(2)}$ adoptées au sujet de tous les éléments géométriques que nous aurons à considérer (on se reportera pour ce point aux alinéas $2.3.3_{II}$ et $2.3.4_{III}$ ainsi qu'à l'exposé $[9]_{II}$).

Cela étant, rappelons la propriété classique suivante, commune aux surfaces intégrales de $(2.10)_{II}$ et $(2.11)_{II}$: si deux telles surfaces, solutions de la même équation, sont tangentes en un point M, elles admettent la même génératrice issue de ce point et sont tangentes le long de celle-ci. Soit alors S, la surface résolvant le problème de Cauchy relativement à K et à celle des deux équations $(2.10)_{II}$ et $(2.11)_{II}$ dont les S_λ sont les surfaces intégrales. Comme S_λ résoud le même problème relativement à K_λ, il s'ensuit que S et S_λ sont tangentes en $M_{\mu(\lambda)}$. Car, les plans tangents en $M_{\mu(\lambda)}$ à ces deux surfaces contiennent toujours en commun la tangente comme $\Delta[M_{\mu(\lambda)}]$ à K et K_λ. Ensuite, si S_λ est surface intégrale de $(2.10)_{II}$, chacun de ces plans passe aussi par la droite $\delta_{\mu(\lambda)}$, caractéristique de cette équation et distincte de $\Delta[M_{\mu(\lambda)}]$ — car Σ est orientée dans l'espace —. Si, au contraire, S_λ est solution de $(2.11)_{II}$, chacun des plans en cause est tangent à $C[M_{\mu(\lambda)}]$ et passe par $\Delta[M_{\mu(\lambda)}]$; ces deux plans existent toujours, en vertu de l'orientation de Σ. Par suite, les deux plans tangents à S et S_γ en $M_{\mu(\lambda)}$ sont confondus. Il résulte de là que S étant engendrée par les courbes Γ, est bien une surface porteuse d'une multiplicité bicaractéristique de (E). De plus, S est bien l'enveloppe des S_λ qu'elle touche le long d'une Γ. Le lemme est établi.

La réciproque est évidente. Si, en effet, une famille de surfaces intégrales de $(2.10)_{II}$ ou de $(2.11)_{II}$: S_λ, dépendant d'un paramètre λ, admet une enveloppe S qui touche S_λ le long d'une courbe $K_{1\lambda}$, on a les deux résultats ci-après :

Lemme a) S est une surface porteuse d'une multiplicité bicaractéristique de (E), de la même famille que les S_λ.

b) La courbe de contact $K_{1\lambda}$ entre S et S_λ est une caractéristique commune de S_λ et de S.

En effet, $\forall$ M, point $\in$ S, par hypothèse, $\exists$ S_λ qui touche S en M. Or, C (M) et S_λ sont tangents en M, de par la définition de S_γ. Par suite, $\forall$ M $\in$ S, S et C (M) sont tangents en ce point. Cela justifie la première partie du lemme. Pour établir la seconde, il suffit de rappeler que deux surfaces bicaractéristiques de (E) ne peuvent être tangentes le long d'une ligne $K_{1\lambda}$ que le long d'une caractéristique de la famille S_λ concernée.

Les conclusions précédentes confirment donc le résultat énoncé en 3_I, concernant l'existence des enveloppes S des familles S_λ des surfaces bicaractéristiques de (E), dépendant d'un paramètre λ,

régulières $R^{(2)}$, attachées à une solution régulière $R^{(2)}$ de (E) et définies dans D. Rappelons à ce propos que dans le cas des systèmes hyperboliques (E) à deux inconnues et à deux variables indépendantes, S appartient à $\overline{D}$ (cf. $[7]_{II}$, par exemple).

Cela étant, revenons à la question posée au début du présent alinéa en reprenant les notations introduites en 3.2.3. Soit $m(d, 0, 0, 0)$ la donnée normale de Cauchy; l'extension des résultats qui suivent au cas où m serait portée par une surface Σ courbe, régulière $R^{(2)}$ et orientée dans l'espace, est immédiate. Cette multiplicité étant régulière $R^{(2)}$, (E) possède dans son voisinage une solution régulière $R^{(2)}$ et une seule. Or, (E) admet la solution évidente : $u \equiv v \equiv \zeta \equiv 0$; il s'ensuit que dans la zone d'influence — incidente, $\Delta^{+0}(d)$, pour fixer les idées — de la donnée m, le repos est la seule solution de (E) répondant à la question posée. Nous nous proposons d'indiquer une propriété utile de la portion de frontière S_γ^{+0} de $\Delta^{+0}(d)$, en supposant, d'abord, pour simplifier, que la frontière $\overline{d}$ de la mer littorale se réduit à une courbe simple unique, régulière $R^{(2)}$. L'extension au cas où d est multiplement connexe est aisée.

On va montrer que la question revient à justifier, à partir des lemmes établis au début du présent alinéa, quelques propriétés de la nappe de la surface intégrale de $(2.11)_{II}$, passant par un arc ouvert de courbe $\widehat{ab} = K$, régulier $R^{(2)}$ jusqu'à ses extrémités a et b inclusivement et $\subset (d + \overline{d})$.

Observons tout d'abord que $\forall M(x, y) \in \Delta_\gamma^{+0}(d)$, le cône caractéristique C (M) est de révolution et admet pour équation dans le cas actuel (cf. $(2.22)_I$) :

$$(X - x)^2 + (Y - y)^2 = g\underline{h}(T - t)^2$$

où la profondeur $\underline{h} = \underline{h}(x, y)$ est une fonction donnée dans d, que nous supposons régulière $R^{(2)}$; nous reprenons ici les notations $\underline{f} = \underline{f}(x, y)$ et $\underline{\underline{f}} = \underline{\underline{f}}(x)$, introduites en $2.3.1_{II}$.

D'après cela, l'angle d'ouverture de C (M) reste constant quand M décrit une droite parallèle à Ot. Il en sera de même $\forall M \in \Delta^{+0}(d)$ si et si seulement la profondeur $\underline{h}$ du bassin marin d est uniforme. Dans cette dernière éventualité, on a évidemment : C (M) $\equiv$ S (M), S (M) étant le conoïde caractéristique en M. Alors, $\forall M_1 \in$ S (M), S (M_1) et S (M) sont tangents le long de leur génératrice rectiligne commune MM_1; il en résulte que les caractéristiques $\Gamma(M, p_0, q_0)$ de $(2.11)_{II}$, qui engendrent S (M), se confondent avec les génératrices rectilignes de C (M). Pour abréger les écritures, nous noterons, jusqu'à nouvel ordre, C (M) et S (M) le demi-cône et le demi-conoïde incidents.

Cela étant, admettons que $M(x, y, 0)$ décrive l'arc de courbe $K \subset (d + \overline{d})$ ci-dessus défini, d'équations paramétriques :

$$\underline{\underline{x}} = \underline{\underline{x}}(s), \qquad \underline{\underline{y}} = \underline{\underline{y}}(s), \qquad t = 0$$

où s est l'abscisse curviligne sur K. Posons alors :

$$\operatorname{tg} \underline{\underline{\theta}}(s) = \sqrt{g\underline{\underline{h}}}\,, \quad \underline{\underline{x}}' = \frac{d\underline{\underline{x}}}{ds} = \cos \underline{\underline{\psi}}(s),$$

$$\underline{\underline{y}}' = \frac{d\underline{\underline{y}}}{ds} = \sin \underline{\underline{\psi}}(s), \quad \underline{\underline{h}} = \underline{\underline{h}}(s) = \underline{h}[\underline{\underline{x}}(s), \underline{\underline{y}}(s)].$$

D'après cela, $\underline{\underline{\theta}}$ est le demi-angle d'ouverture de C [M (s)]; $\underline{\underline{\psi}}$ est l'angle avec Ox de la tangente $\tau(s)$ à K en M (s), orientée dans le sens des s croissants et on a, d'autre part :

$$\underline{\underline{h}}' = \frac{d\underline{\underline{h}}}{ds} = \frac{\partial \underline{h}}{\partial \underline{\underline{x}}}\underline{\underline{x}}' + \frac{\partial \underline{h}}{\partial \underline{\underline{y}}}\underline{\underline{y}}'.$$

Cherchons alors l'ensemble des courbes caractéristiques des C [M (s)] (au sens de la théorie des enveloppes); cet ensemble est inclus dans l'ensemble des intersections de chacune de ces surfaces avec le cylindre parabolique P [M (s)], d'équation :

$$(X - \underline{\underline{x}}) \cos \underline{\underline{\psi}} + (Y - \underline{\underline{y}}) \sin \underline{\underline{\psi}} + 1/2\, g\underline{\underline{h}}' T^2 = 0$$

(dont les génératrices rectilignes sont parallèles à la normale $n(s) \subset Oxy$ à K en M (s)). De plus, l'ensemble en cause doit contenir le lieu des points singuliers des C [M (s)], c'est-à-dire la courbe K; les équations ci-dessus de C [M (s)] et de P [M (s)] montrent qu'il en est bien ainsi (cf. par exemple la référence $[8]_{II}$ ou $[9]_{II}$). Posons :

$$c(s) = C[M(s)] \cap P[M(s)].$$

On voit, en éliminant T^2 entre les équations de ces deux surfaces, que cette courbe caractéristique du cône C [M (s)] est aussi tracée sur le cylindre de révolution C_1 [M (s)] d'équation :

$$\underline{\underline{h}}'[(X - \underline{\underline{x}})^2 + (Y - \underline{\underline{y}})^2] + 2\underline{\underline{h}}[(X - \underline{\underline{x}}) \cos \underline{\underline{\psi}} + (Y - \underline{\underline{y}}) \sin \underline{\underline{\psi}}] = 0$$

qui dégénère, lorsque la profondeur $\underline{h}$ du bassin d est constante, en le plan $\pi(s)$, passant par $n(s)$, d'équation :

$$(X - \underline{\underline{x}}) \cos \underline{\underline{\psi}} + (Y - \underline{\underline{y}}) \sin \underline{\underline{\psi}} = 0.$$

En combinant les équations des trois quadriques qu'on vient d'introduire, on obtient les équations paramétriques de $c(s)$, valables si $\underline{\underline{h}}' \neq 0$:

$$\underline{\underline{X}}(\varphi) = \underline{\underline{x}}(s) + \underline{\underline{R}}(s)[\cos \underline{\underline{\psi}} + \cos(2\varphi - \underline{\underline{\psi}})]$$

$$\underline{\underline{Y}}(\varphi) = \underline{\underline{y}}(s) + \underline{\underline{R}}(s)[\sin \underline{\underline{\psi}} + \sin(2\varphi - \underline{\underline{\psi}})]$$

$$\underline{\underline{T}}(\varphi) = 2\underline{\underline{R}}(s) \operatorname{cotg} \underline{\underline{\theta}} \cdot \cos(\varphi - \underline{\underline{\psi}})$$

où on a posé : $\underline{\underline{R}}(s) = -\underline{\underline{h}}/\underline{\underline{h}}'$, où il faut prendre s constant dans les seconds membres des relations précédentes et où $\varphi \in [\underline{\underline{\psi}} - \pi/2, \underline{\underline{\psi}} + \pi/2]$ est l'angle avec Ox du vecteur

$$[\underline{\underline{X}}(\varphi) - \underline{\underline{x}}(s), \underline{\underline{Y}}(\varphi) - \underline{\underline{y}}(s), 0].$$

De ce qui précède, il résulte que :

1) $c(s)$ est une courbe analytique régulière, admettant en chacun de ses points une tangente bien définie;

2) $c(s)$ passe par $M(s) \subset K$, paramétré par $\varphi = \pm \pi/2 + \underline{\psi}$;
3) en $M(s)$, la tangente en $M(s)$ à $c(s)$ se confond avec $n(s)$.

Si, maintenant en $M(s_0)$ on a $\underline{h}'(s_0) = 0$, la courbe $c(s)$ dégénère en deux génératrices rectilignes de $C[M(s_0)]$, suivant lesquelles cette surface est coupée par $\pi(s)$; mais dans ce cas encore, chacune de ces droites se projette sur Oxy suivant $n(s)$. Rappelons que la justification de la validité physique du système (E), en tant que modèle analytique des marées littorales, repose sur l'hypothèse de la petitesse de $\underline{h}'$; il s'ensuit que l'hypothèse : $\overrightarrow{\text{grad}}\ \underline{h} = \vec{0}$ dont on vient de décrire une conséquence, peut être adoptée à titre d'approximation pour tout le bassin d, à profondeur lentement variable et conduire à des solutions de (E) assez approchées des solutions exactes de ce système pour suffire aux besoins des utilisateurs. C'est cette remarque, quasi-évidente, qui confère un intérêt pratique à l'examen du cas où $\underline{h}$ se réduit sur d à une constante.

Cherchons maintenant à préciser dans tous les cas — c'est-à-dire que $\overrightarrow{\text{grad}}\ \underline{h}$ soit nul ou non — la position de la tangente en $M(s)$ à la caractéristique $\Gamma[M(s), \underline{p}_0(s), \underline{q}_0(s)]$ de $(2.11)_{\text{II}}$, génératrice de la nappe choisie de la surface intégrale de cette équation passant par K. En reprenant les notations de $2.3.4_{\text{III}}$ et eu égard aux relations $(2.37)_{\text{III}}$ et $(2.38)_{\text{III}}$, on voit que la projection sur Oxy de la tangente en cause admet $\underline{P}$ et $\underline{Q}$ comme paramètres directeurs le long de K. Or, on a actuellement, par hypothèse : $\underline{u} \equiv \underline{v} \equiv \underline{\zeta} \equiv 0$, en sorte qu'il vient : $\underline{P} = -2g\underline{h}\underline{p}_0$ et $\underline{Q} = -2g\underline{h}\underline{q}_0$. Par conséquent, l'équation de la droite cherchée dans Oxy s'écrit (cf. $(2.37)_{\text{III}}$) :

$$\underline{q}_0(X - \underline{x}) - \underline{p}_0(Y - \underline{y}) = 0$$

en chaque point $M(s) \in K$. Mais le plan tangent en ce point, commun à la surface cherchée, à $C[M(s)]$ et à $S[M(s)]$, contient, de par sa définition, $\tau(s)$, d'une part et son équation s'écrit, d'autre part :

$$T = \underline{p}_0(X - \underline{x}) + \underline{q}_0(Y - \underline{y})$$

Il en résulte que $\tau(s)$ est définie dans Oxy par :

$$\underline{p}_0(X - \underline{x}) + \underline{q}_0(Y - \underline{y}) = 0$$

en sorte que cette droite est perpendiculaire, d'après ce qui précède, à la projection cherchée sur Oxy de la tangente en $M(s)$ à Γ : celle-ci est donc confondue avec $n(s)$.

Les résultats que nous venons d'énoncer entrainent, entre autres, deux corollaires.

a) Forme de S_γ^{+0} dans le cas où l'état initial du liquide se réduit au repos, où la profondeur $\underline{h}(x, y) = h_0$ du bassin marin d est constante et où $\overline{d}$ est une courbe régulière $R^{(2)}$.

Rappelons d'abord les conséquences qu'entrainent, d'après ce qui précède, les hypothèses ci-dessus.

1) L'angle d'ouverture θ_0 du cône de révolution $C(M)$ est constant $\forall M \in \Delta_\gamma^{+0} \cup S_\gamma^{+0} \cup (d + \overline{d})$; il est défini par $\text{tg}\ \theta_0 = \sqrt{gh_0}$.
2) On a, $\forall M$: $C(M) \equiv S(P)$.
3) La génératrice $\Gamma[M(s), \underline{p}_0, \underline{q}_0]$ de la surface S_γ^{+0}, se réduit à la demi-génératrice rectiligne du cône $C[M(s)]$, $\forall M(s) \in \overline{d}$, située dans le domaine $t \geqslant 0$, inclinée sur Ot de l'angle θ_0 et qui se projette sur Oxy suivant la demi-normale $\underline{n}(s)$ à $\overline{d}$ en $M(s)$, orientée vers l'intérieur de $\overline{d}$. Rappelons que cette dernière propriété est la conséquence du fait suivant, établi en $2.3.6_{\text{III}}$: $\forall M \in \Delta^{+0} \cup S_\gamma^{+0}$ la projection sur Oxy de ce point $\in (d + \overline{d})$.

Ainsi, S_γ^{+0} est une surface réglée, régulière $R^{(2)}$ dans le voisinage de $\overline{d}$ — ceci en raison de la régularité
$R^{(2)}$ de $\overline{d}$ — mais présentant des lignes-arêtes ou des points coniques (ceci se produit dans le cas où $\overline{d}$ contient des arcs de cercles) dont la disposition dans $Oxyt$ dépend de la forme de $\overline{d}$. Dès lors, on conçoit aisément la complication et les irrégularités que peut présenter la surface réglée S_γ^{+0}, qui n'est astreinte qu'à une condition : l'intersection de toute droite, parallèle à Ot et issue d'un point arbitraire $\in d$, se réduit à un point unique.

On observera qu'une surface S_γ^{+0}, possédant des singularités aussi variées, est obtenue à partir d'hypothèses de départ simplifiées au maximum. Il est clair que, dans l'éventualité où l'on tiendrait compte des variations de $\underline{h}(x, y)$ dans d et de la présence des îles dans ce bassin, la géométrie de S_γ^{+0} deviendrait encore plus complexe.

b) Singularités des surfaces S_γ^{+0} dans le voisinage des caps et des fonds de baies dans le cas des bassins d à profondeur variable et des conditions initiales : $\underline{u} \equiv \underline{v} \equiv \underline{\zeta} \equiv 0$.

Supposons maintenant que la portion continentale $\overline{d}_2$ de $\overline{d}$ présente en $a \in \overline{d}_2$, un point anguleux isolé, où se croisent deux arcs $\widehat{ba} \subset \overline{d}_2$ et $\widehat{ac} \subset \overline{d}_2$, réguliers $R^{(2)}$ jusqu'en leurs extrémités a, b, c. Notons : $\varphi \in]0, 2\pi[$, l'angle, intérieur à d, que forment en a ces deux arcs; $n(s)$, la demi-normale en $M(s) \in \overline{d}$, orientée vers l'intérieur de d, ce qui la définit sans ambiguité en chaque point ordinaire de $\overline{d}$; n_b et n_c, les demi-normales en a à $\widehat{ba}$ et $\widehat{ca}$ respectivement, définies sans ambiguité en faisant tendre $M(s)$ vers a le long de $\widehat{ba}$ et $\widehat{ca}$ respectivement. Deux situations se présentent alors, selon que $\varphi \in]0, \pi]$ — cf. fig. 12a — ou $\varphi \in]\pi, 2\pi[$ — cf. fig. 12b —; la première figure correspond au cas où a est le fond d'une baie, la deuxième au cas où a est la pointe d'un cap. Il en résulte (cf. la fig. 12a) que les deux demi-droites n_b et n_c sont, dans le voisinage de a extérieures à d, cette situation étant inversée dans le cas de la fig. 12b.

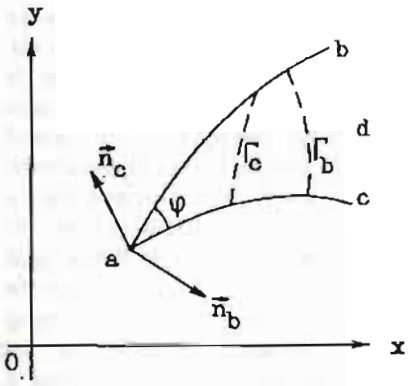


FIG. 12a

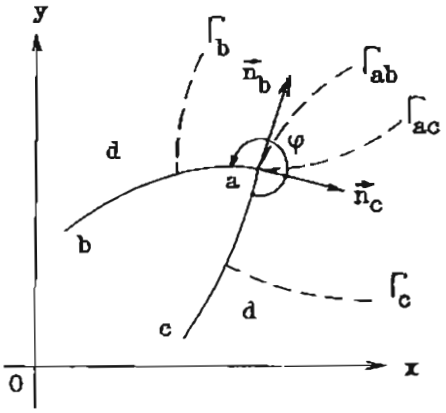


FIG. 12b

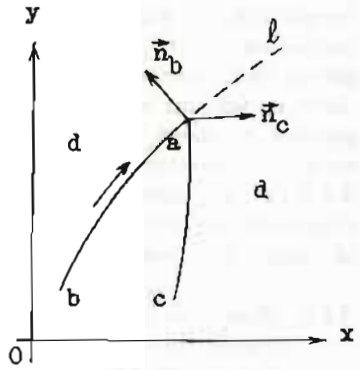


FIG. 12c

Cela étant, proposons-nous de décrire la singularité que présente S_γ^{+0} dans le voisinage du point a. A cet effet, nous allons étudier la disposition dans ce voisinage des courbes $\Gamma_b(M)$ (ou $\Gamma_c(M)$), projections sur d des génératrices $\Gamma[M(s), \underline{\underline{p}}_0(s), \underline{\underline{q}}_0(s)]$ de S_γ^{+0}, issues des points courants $M(s) \in \widehat{ba}$ (ou $M(s) \in \widehat{ac}$), en supposant $M(s) \neq a$. Rappelons que, d'après ce que nous avons vu au cours du présent alinéa, chacune des courbes Γ_b et Γ_c — qui sont régulières $R^{(2)}$ dans d en vertu de la régularité des courbes intégrales $\Gamma[M(s), \underline{\underline{p}}_0, \underline{\underline{q}}_0]$ du système différentiel $(2.37)_{III}$, $(2.38)_{III}$ — sont tangentes à $n(s)$ en $M(s)$.

1) *Cas où la ligne $\overline{d}_2$ présente en a le fond d'une baie*

Plaçons-nous d'abord dans le cas de la fig. 12a. Comme $\Gamma_b(M)$ diffère peu de sa tangente $n(s)$ en M dans le voisinage de ce point, d'une part et que la portion de $n(s)$, contenue dans d se réduit à un petit segment de droite MM_1, $M_1 \in \widehat{ac}$ lorsque M est voisin de a, on voit que $\Gamma_b(M)$ coupe $\widehat{ac}$ en un point voisin de M_1. Une conclusion analogue vaut, évidemment, pour Γ_c. Il s'ensuit que la nappe de la surface intégrale de $(2.11)_{II}$, passant par $\widehat{ba}$ (ou $\widehat{ac}$) et engendrée par $\Gamma[M(s), \underline{\underline{p}}_0, \underline{\underline{q}}_0]$, $M(s) \in \widehat{ba}$ (ou $M(s) \in \widehat{ac}$), se projette sur Oxy suivant un domaine qui contient a et un voisinage assez petit de ce point appartenant à d et limité par des arcs de $\widehat{ba}$ et $\widehat{ac}$. Sur la fig. 12a, on a représenté en traits interrompus le réseau des courbes Γ_b et Γ_c. D'après cela, les deux nappes considérées des surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$ se coupent le long d'une ligne ℓ passant par a, de telle sorte que les portions des nappes en cause, limitées respectivement par $\widehat{ba}$ et ℓ, d'une part, et $\widehat{ac}$ et ℓ, d'autre part, constituent une portion de surface S_γ^{+0}, admettant ℓ pour arête. On retrouve ainsi la situation de la fig. 11, où λ joue le rôle du point a et où $\widehat{\lambda\mu}$ joue le rôle de ℓ. Cette identification est de nature à mettre en évidence l'intérêt pratique des surfaces intégrales singulières de $(2.11)_{II}$ que nous allons illustrer encore par les exemples de la fig. 12b d'une part et ceux de l'alinéa 3.2.5, d'autre part.

2) *Cas où la ligne $\overline{d}_2$ présente en a la pointe d'un cap*

La situation correspondante est représentée sur la fig. 12b qui indique, en particulier, la disposition des courbes Γ_b et Γ_c, tracées encore en traits interrompus. On remarque que les intersections $\Gamma_b \cap \widehat{ac}$ et $\Gamma_c \cap \widehat{ba}$ sont vides dans le voisinage de a. Mais, de plus, on a introduit, dans le cas présent, la courbe Γ_{ab} (ou Γ_{ac}), projection de la caractéristique $\Gamma[a, \underline{\underline{p}}_{ab}, \underline{\underline{q}}_{ab}]$ (ou $\Gamma[a, \underline{\underline{p}}_{ac}, \underline{\underline{q}}_{ac}]$) génératrice de la nappe de S_γ^{+0} passant par $\widehat{ba}$ (ou $\widehat{ac}$), issue de a — comme Γ_{ac} —; dans le cas actuel — et contrairement à ce qui se passent dans le cas de la fig. 12a — Γ_{ab} et Γ_{ac} ne se réduisent pas au seul point a, mais pénètrent dans d, admettant pour tangentes en a les droites orientées, n_b et n_c respectivement. Il suit de là que les nappes de S_γ^{+0}, passant par $\widehat{ba}$ et $\widehat{ac}$ ne se coupent pas. Nous retrouvons ainsi, localement, la situation décrite sur la fig. 8b. En 3.2.3 on a, en effet, établi à ce propos que si le contour $L(t_0)$ possède en son point ν_1 un angle obtus (intérieur à d) la surface S_γ^{+0}, frontière de la zone d'influence du domaine d, limité par $L(t_0)$, présente nécessairement, dans le voisinage de ν_1, l'allure définie dans l'alinéa précité. Ce résultat s'applique donc directement au point a de la fig. 12b, en sorte que, pour achever la construction de S_γ^{+0} dans le voisinage de a, il suffit de raccorder les deux nappes de cette surface, passant par $\widehat{ba}$ et $\widehat{ac}$, par la portion du demi-cône caractéristique incident $C(a)$, comprise entre ses deux génératrices $\Gamma(a, \underline{\underline{p}}_{ab}, \underline{\underline{q}}_{ab})$ et $\Gamma(c, \underline{\underline{p}}_{ac}, \underline{\underline{q}}_{ac})$. C'est d'ailleurs, pour faire référence à la fig. 8b que nous avons conservé la notation S_γ^{+0}, utilisée dans les commentaires de celle-ci en 3.2.3. On se rappellera que, comme nous l'avons déjà mentionné à plusieurs reprises — et, en particulier, en 3.2.3 — que S_γ^{+0} ne sera, en général, que régulière $R^{(1)}$ le long des deux caractéristiques précitées.

Les deux cas qu'on vient d'analyser mettent bien en évidence la différence que présentent les singularités de S_γ^{+0} dans le voisinage d'un fond de baie, d'une part et d'un cap, d'autre part. Dans le

premier cas, la nature de la solution pouvant être pressentie grâce aux résultats de la discussion du problème relatif à l'éventualité d'un bassin à profondeur uniforme. Il n'en est pas de même dans le second cas. Le raisonnement précédent permet, en effet, d'aboutir à une conclusion nouvelle, que les commentaires de la fig. 8b de l'alinéa 3.2.3 ne laissaient pas prévoir; car il indique le moyen de déterminer à priori, connaissant n_b et n_c, la nappe du cône C (a) qui appartient à S_Y^{+0}.

3.2.5. Quelques propriétés générales des écoulements autour d'un cap ou dans le fond d'une baie, régis par le système (E)

Au cours de cet alinéa, nous nous proposons de faire connaître les premiers résultats concernant la nature des singularités que peuvent présenter dans le cas général les solutions de (E) dans le voisinage de la pointe d'un cap ou dans le fond d'une baie. On pourra ainsi se rendre compte de la complexité du problème ainsi posé dont l'étude complète exige d'assez longs développements qui ne sauraient trouver place dans le présent article.

Nous commençons par l'examen d'un type particulier des solutions de (E) valables tant dans le cas des caps que dans celui des baies; alors le tracé de $\overline{d_2}$ est encore donné par les fig. 12a et 12b; nous reprenons les notations de 3.2.4 concernant la géométrie de $\overline{d_2}$ et nous adoptons les mêmes hypothèses de régularité concernant $\widehat{ba}$ et $\widehat{ac}$. Nous envisageons ici la profondeur $\underline{h}(x, y)$ comme variable mais régulière $R^{(2)}$. Quant à la solution $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$, $\zeta(x, y, t)$ de (E), nous supposons que

1) (u, v, ζ) est régulière dans le voisinage de a sauf en ce point lui-même où elle est seulement continue;
2) en tout point $M(s) \in \widehat{bac}$, sauf au point a lui-même, le vecteur vitesse $\vec{V}$ du liquide admet une composante nulle suivant $n(s)$, de telle sorte que $\vec{V} \cdot \vec{n}(s) = 0$.

Il résulte de ces hypothèses (cf. $2.3.3_{II}$) que les portions de la frontière cylindrique $\overline{D}$ de D, admettant $\widehat{ba}$ et $\widehat{ac}$ pour sections droites, sont des nappes de surfaces porteuses des multiplicités bicaractéristiques de (E), attachées à la solution étudiée de ce système et possédant la propriété (π) (cf. 2.1_{II}). Par suite, l'intersection de ces deux nappes, qui se réduit, dans le cas présent à la droite δ_a, passant par a et parallèle à Ot, est une ligne caractéristique de $(2.10)_{II}$. Mais alors, δ_a doit admettre pour paramètres directeurs $u(a, t)$, $v(a, t)$, 1 — en notant ainsi les valeurs de u, v à l'instant t au point a — (cf. $2.3.3_I$ et, en particulier $(2.22)_I$). Ce qui précède entraîne donc :

$$u(a, t) \equiv v(a, t) \equiv 0 \quad , \quad \forall t \geqslant 0.$$

Cette conclusion est évidente a priori pour des raisons physiques dans le cas des baies. Mais il n'en est plus nécessairement ainsi dans le cas des caps. On sait, en effet, que dans le cas où $\varphi > \pi$ (cf. fig. 12c), il peut exister une ligne $\widehat{a\ell}$, dite de détachement, tracée au sein de la masse liquide, tangente en a à $\widehat{ba}$ et qui est un élément de la trajectoire d'une molécule fluide qui a parcouru l'arc $\widehat{ba}$ de $\overline{d_2}$, et qui se détache à un instant déterminé t_1 de la paroi solide $\widehat{ba}$, en poursuivant son mouvement pour $t > t_1$ à l'intérieur de la masse liquide. C'est ce qu'on appelle souvent le phénomène de décollement de la veine fluide, que l'on a représenté très schématiquement sur la fig. 12c. Sur celle-ci, le vecteur vitesse $\vec{V}$ le long de $\widehat{ba\ell}$ est dirigé dans le sens de la flèche. Le champ des $\vec{V}$ est régulier $R^{(2)}$ dans le domaine à frontière curviligne $\widehat{ba\ell} \subset d$. Mais en traversant $a\ell$ pour passer dans le domaine angulaire $ca\ell \subset d$, on observe, en général, une discontinuité des vitesses en a. Et c'est pourquoi cette éventualité est à exclure de l'analyse qui suit, puisque les solutions de (E) considérées sont, par hypothèse, continues au point a. Sinon, l'étude locale de la solution correspondante exige la mise en œuvre de méthodes spéciales.

Revenant maintenant aux hypothèses 1) et 2) faites ci-dessus — et postulant donc l'absence de décollement en a — nous allons en tirer quelques conséquences immédiates. Il en résulte tout d'abord que le courant fluide épouse le profil $\widehat{bac}$ en chaque point $M(s)$ de celui-ci; ainsi, nous admettons que le vecteur $\vec{V}$ est bien défini en $M(s)$ et est tangent à ce contour, $\forall t$ — sauf en a —. On peut, dès lors, imaginer à priori — en s'inspirant des exemples classiques de l'hydrodynamique des liquides parfaits (citons la théorie des sillages en écoulements plans) — plusieurs modèles qualitatifs, théoriquement possibles, pour représenter l'allure du champ des vitesses dans le voisinage de a, compatibles localement avec les conditions aux limites imposées par la présence des parois et l'hypothèse de frottement de fond. Nous nous bornerons ici à décrire sommairement quatre de ces schémas qui semblent assez réalistes (cf. fig. 12d, 12e, 12f, 12g) mais dont la validité physique n'a pas encore été testée par l'expérience. Ajoutons que l'étude théorique des différents modèles, fondée sur les méthodes décrites en 3.2.4, est en cours d'élaboration. Mais nous verrons que le recours aux propriétés des multiplicités bicaractéristiques de (E) permet déjà d'aborder le traitement numérique du problème posé.

Sur chacune des quatre figures précitées on a représenté par des flèches le champ des vitesses à un instant t donné : on indiquera ailleurs le schéma du phénomène d'inversion du courant, dû à la nature oscillatoire du mouvement des eaux océanes. Tous ces régimes présentent un trait commun : dans le voisinage de a, les trajectoires des particules fluides présentent de grandes courbures, alors que le module du vecteur vitesse $\vec{V}(N)$ au point N, voisin de a, reste petit et tend vers 0

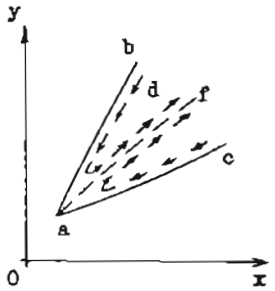


FIG. 12d

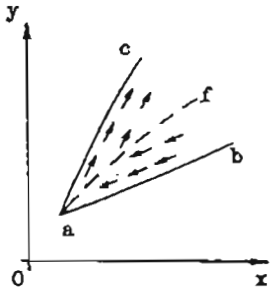


FIG. 12e

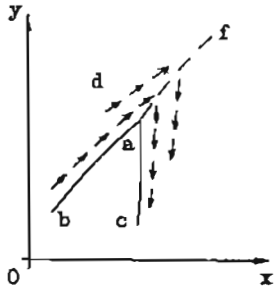


FIG. 12f

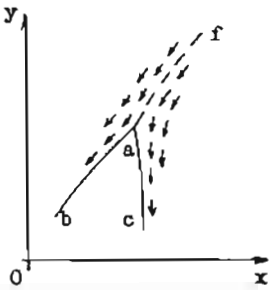


FIG. 12g

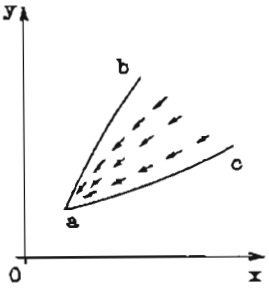


FIG. 12h

quand N $\rightarrow a$. Il s'ensuit que $\overrightarrow{\text{grad}}\, u$ et $\overrightarrow{\text{grad}}\, v$ sont grands dans ce voisinage et c'est pour cette raison que la solution considérée de (E) y est seulement continue. De plus, dans l'éventualité de l'existence des régimes représentés sur les fig. 12d, 12e, 12f, 12g, il existerait dans le voisinage de a des lignes telles que $\widehat{af}$, le long desquelles et dans leur voisinage la courbure des trajectoires serait élevée. Il semble à priori que la fig. 12d pourrait, éventuellement, correspondre au cas où la direction générale de la marée montante serait orientée parallèlement à la ligne moyenne $\widehat{af}$ de la baie $\widehat{bac}$, $\widehat{af}$ jouant ainsi dans le cas des fig. 12d et 12g un rôle analogue à celui de la ligne de courant, dite de bifurcation, introduite dans la théorie des sillages. Au contraire, la situation de la fig. 12e conviendrait pour représenter le cas où la direction générale du courant de la marée montante d'une part et la ligne moyenne de la baie $\widehat{bac}$ seraient à peu près orthogonales entre elles. Les éventualités schématisées par les fig. 12f et 12g ne semblent être réalistes que dans le cas des vitesses assez faibles pour éviter l'effet de décollement à la pointe du cap, c'est-à-dire en a. Mais ici l'allure présumée des champs des vitesses est inverse des situations représentées sur les fig. 12d et 12e. Dans le cas des fig. 12e et 12f, par exemple, le courant de marée épouse le profil $\widehat{bac}$. Mais dans le premier cas on pressent intuitivement que la direction générale du courant, à l'instant considéré est, en gros, parallèle à la ligne $\widehat{af}$ de la baie, alors que dans le second cas, ces lignes seraient plutôt perpendiculaires entre elles. La comparaison des régimes représentés sur les figures 12d et 12g donne lieu aux mêmes remarques, fondées sur l'intuition. Répétons que les recherches sont en cours pour utiliser les méthodes développées dans l'alinéa suivant pour analyser avec rigueur les écoulements ci-dessus mentionnés.

En attendant, montrons qu'on peut déjà établir analytiquement quelques propriétés générales à partir des hypothèses 1) et 2). Notons : x_a, y_a, t_a les coordonnées de a; $P(t)$ un point $\in \delta_a$, de cote t. Comme $u(a, t) \equiv u(x_a, y_a, o) \equiv v(x_a, y_a, o) \equiv v(a, t) \equiv 0$, $\forall\, t$, on voit (cf. $(2.22)_{\text{II}}$) que le cône $C[P(t)]$ est de révolution autour de δ_a. Mais ici l'angle d'ouverture $2\,\underline{\underline{\theta}}(t)$ de cette surface varie avec t, comme le montre la formule :

$$tg\,\underline{\underline{\theta}} = \sqrt{g.[h_a + \underline{\underline{\zeta}}(a, t)]}$$

où on a posé $h_a = \underline{h}(x_a, y_a)$; $\underline{\underline{\zeta}}(a, t) = \zeta(x_a, y_a, t)$. Ainsi, $\underline{\underline{\zeta}}$ est la seule inconnue de (E) en a et on a $C[P(0)] \equiv C(a)$. Sans restreindre la généralité, on peut supposer que $\underline{\underline{\zeta}}(a, t)$ atteint son minimum pour $t = 0$. Il résulte de la que $\underline{\underline{\theta}}(t)$ atteint aussi son minimum pour $t = 0$, en sorte que $C(a, 0)$ est, $\forall\, t$, strictement intérieur à $C(a, t)$ ou confondu avec cette surface. Ces remarques évidentes vont nous être utiles.

Cela étant, cherchons les surfaces intégrales S de $(2.10)_{\text{II}}$, passant par $P \in \delta_a$. On sait que S doit contenir la caractéristique $\Gamma(P)$ de l'équation précitée. Or, on a, d'après ce qui précède : $\delta_a \equiv \Gamma(P)$, $\forall\, P$. Ainsi, toute surface S, passant par $P \in \delta_a$, passe aussi par δ_a. On en déduit qu'il n'existe pas, dans le voisinage de δ_a, de représentation paramétrique $(1.1)_{\text{I}}$ en variables caractéristiques satisfaisant la condition d'équivalence $(1.2)_{\text{I}}$ entre (E) et son système associé(e) lorsque l'une, au moins, des deux familles de surfaces coordonnées possèderait la propriété (π). Mais il est

avantageux dans certains cas pratiques d'utiliser une famille de telles surfaces coordonnées, passant par δ_a, comme il est souvent avantageux d'avoir recours aux coordonnées polaires (r, θ) dans le plan Oxy, bien que la correspondance $(x, y) \Rightarrow (r, \theta)$ ne soit pas bijective à l'origine.

Le résultat précédent fournit un exemple, à la fois simple et concret, d'une famille S_α de surfaces bicaractéristiques de (E), paramétrées par α, possédant la propriété (π), qui admet une enveloppe dégénérée en une courbe (celle-ci se réduisant dans le cas qui nous occupe à la droite δ_a) le long de laquelle la condition d'équivalence $(1.2)_I$ n'est pas satisfaite. En 3.3 nous mettrons en évidence l'intérêt pratique de telles singularités que peuvent posséder les représentations paramétriques $(1.1)_I$ de (u, v, ζ) et dont l'étude systématique nous conduira à la notion des solutions régularisables du système (E).

Une des nombreuses applications de la théorie de ces solutions se rattache au problème abordé ici : on montre qu'on peut définir une classe de solutions régularisables de (E) décrivant un type de mouvements de la marée autour d'un point anguleux de $\overline{d}_2$ qui vérifient les hypothèses de régularité 1) et 2) énoncées au début du présent alinéa et telles que les surfaces correspondantes S_γ^{+0} possèdent dans le voisinage de a l'allure indiquée en 3.2.4. Soulignons, en passant, le fait que cette conclusion subsiste ici sans supposer que les fonctions (u, v, ζ) soient régulières $R^{(2)}$ en a. La démonstration du résultat précédent paraîtra ailleurs : nous nous bornons ici à en mentionner quelques conséquences concernant le problème actuel; à cet effet, nous nous appuierons aussi sur les propriétés des (u, v, ζ) qui seront exposées dans la suite du présent travail.

Donnons-nous la multiplicité de Cauchy $m(d, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ régulières $R^{(2)}$ et admettons qu'on ait construit la frontière S_γ^{+0} de sa zone d'influence $\Delta^{+0}(d)$ et déterminé (u, v, ζ) dans celle-ci. Ceci fait, il s'agit ensuite de prolonger cette solution dans la portion de D extérieure à $\Delta^{+0}(d)$. Nous nous bornerons ci-après à rappeler (cf. 3.2.2) et à compléter sommairement le processus résolutif de ce problème dans un domaine Δ limité par les portions de $\overline{D}$, S_γ^{+0} et des portions d'autres surfaces dont nous préciserons le choix : l'extension des résultats au-delà de $\Delta \cup \Delta^{+0}(d)$ se fera en utilisant la méthode dite de « régionnement » de D en domaines partiels et inspirée par la solution bien connue de l'équation des cordes vibrantes aux extrémités fixées et vérifiant des conditions initiales données.

Comme on l'a déjà indiqué en 3.2.2, le domaine Δ présente la forme d'un onglet, limité par $\overline{D}$ et S_γ^{+0} dont $\overline{d}$ est la ligne-arête. En vue de simplifier les calculs numériques dans le voisinage du point a, il y a donc intérêt à réduire le demi-angle d'ouverture $\underline{\theta}(a, 0)$ du cône $C(a, 0)$. Et c'est pourquoi il peut être avantageux, comme nous l'avons annoncé, de prendre pour $t = 0$ l'instant où $\zeta(a, t)$ atteint son minimum.

Cela posé, rappelons que la multiplicité $m(S_\gamma^{+0}, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$, bicaractéristique de (E), est supposée donnée. En revanche, nous ne connaissons à priori de la multiplicité bicaractéristique $m[D(\overline{d}_2), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$ que sa surface porteuse $\overline{D}(\overline{d}_2)$ — portion de $\overline{D}$ dont $\overline{d}_2$ est la section droite — et la condition frontière qu'elle vérifie : $\vec{V} \cdot \vec{n}(s) = 0$. Il est aisé de s'assurer que ces données ne suffisent pas à définir la solution cherchée dans le voisinage de $\overline{d}_2 \subset \Delta$. Dès lors, il convient d'introduire une nouvelle donnée frontière pour pouvoir formuler un problème aux limites correctement posé. L'énoncé qui suit semble réaliste puisque, d'une part, il est inspiré par les essais sur modèle réduit et l'interprétation des observations faites « in situ » et, d'autre part, par la construction d'un algorithme résolutif approché, analogue à la construction fondamentale, qui sera décrit ailleurs.

Nous nous limiterons, pour abréger, à l'examen du cas où $\widehat{bac}$ est une baie et à l'étude locale d'un voisinage $\subset \Delta$ de a, assez petit pour rendre valables les raisonnements qui suivent.

Nous venons de rappeler que S_γ^{+0} présente dans le voisinage de a une ligne-arête $\widehat{a\lambda}$. Par ailleurs, on sait qu'une solution de (E) est déterminée par la donnée de la multiplicité initiale $m(d, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ d'une part et de la composante normale à $\overline{d}$ de la vitesse $V_n(s, t)$ (nous négligeons ici les points singuliers de $\overline{d}_2$) — étant bien entendu que $V_n(s, t) \equiv 0$, $\forall t$ le long de la frontière terrestre $\overline{d}_2$ de d —. La marée est alors « induite » dans d par les conditions aux limites qui règnent le long de la frontière marine $\overline{d}_1$ du bassin (cf. sur ce point, par ex. la référence $[5]_I$). On en conclut qu'on peut, à partir de ces données, construire la nappe S_γ^b de la surface intégrale de $(2.11)_{II}$, représentée par $b\lambda\mu$ sur la fig. 13 et limitée par les arcs réguliers $\widehat{b\lambda} \subset S_\gamma^{+0}$ et $\widehat{b\mu} \subset \overline{D}(\widehat{ba})$ (portion de $\overline{D}$ dont $\widehat{ba}$ est la section droite) d'une part et déterminer sur S_γ^b les valeurs $\underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}$ des inconnues de manière que la multiplicité $m(S_\gamma^b, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ soit bicaractéristique de (E). On établit, enfin, l'existence d'une nappe de surface $a\lambda\mu$ telle que dans le domaine $\Delta_1 \subset \Delta$ limité par $a\lambda\mu$, $b\lambda\mu$, $ab\mu$ et $ab\lambda$ il existe une solution régulière de (E) et une seule, déterminée par les valeurs de u, v, ζ sur $ab\lambda$ et

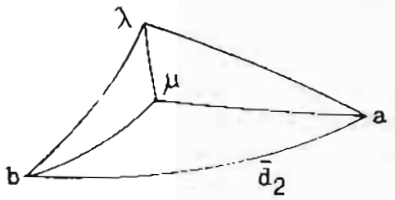


FIG. 13

$b\lambda\mu$ et cela de façon que la face $ab\mu \subset \overline{D}$ et que la multiplicité $m(ab\mu, u, v, \zeta)$ ainsi définie soit bicaractéristique de (E). Rappelons que le vecteur-vitesse $\overline{V}$, obtenu au cours de l'étape antérieure du calcul sur la nappe $b\lambda\mu$, est, par construction, tangent à $\overline{D}$ le long de $\widehat{b\mu}$ et $\widehat{ba}$; cette dernière propriété est, d'ailleurs, la conséquence des conditions initiales (cf. fig. 13). Notons, en passant, que le problème aux limites mixte ainsi posé semble nouveau en ce qu'il s'agit de déterminer la solution de (E) dans le domaine tétraédral curviligne $ab\lambda\mu$, dont les deux faces courbes $ab\lambda$ et $b\lambda\mu$, surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$, sont porteuses de multiplicités bicaractéristiques déterminées à partir des données à priori, alors que la troisième face $b\mu a$, appartenant à $\overline{D}$ (qui est une donnée à priori) est astreinte, rappelons-le, à posséder la propriété (π).

Le même raisonnement s'applique aussi au voisinage de $\widehat{ca}$ de l'onglet Δ. On montre enfin, que les solutions (u, v, ζ) ainsi obtenues dans les deux portions considérées de Δ se raccordent en a. L'algorithme résolutif destiné à traiter numériquement le problème mixte ainsi posé, d'une part, ainsi que le problème de prolongement de la solution dans tout $\Delta^{+0}(d) \cup \Delta$, est fondé sur la construction fondamentale (cf. $2.4.2_{III}$) convenablement adaptée au cas présent. On notera que le choix de la face $b\lambda\mu$ et du côté $\widehat{a\mu}$ de celle-ci restent assez arbitraires : il suffit de choisir b assez près du point anguleux a pour que l'arc $\widehat{ba} \subset \overline{d}_2$ soit régulier $R^{(2)}$ et qu'il en soit de même de l'arc $\widehat{a\lambda}$ de la ligne-arête $\subset S_\gamma^{+0}$ (cf. fig. 13). Un exposé complet de ces questions sera présenté ultérieurement.

Remarques finales

1) L'analyse précédente s'adapte sans peine au cas du cap.

2) Sur la fig. 12 nous avons schématisé les champs de vitesses des marées à l'instant t, présentant une ligne singulière $\widehat{af}$. On a vu que dans cette éventualité la solution considérée (u, v, ζ) de (E) n'est pas régulière $R^{(2)}$ dans le voisinage de a. Mais il arrive qu'une telle ligne n'existe pas. Alors, les eaux venant du large s'accumulent dans le bassin d pendant la phase de la marée montante (cf. fig. 12h) : le champ des vitesses converge vers le fond de la baie. Dans ce cas, l'analyse théorique du mouvement se simplifie beaucoup.

3) Comme nous l'avons déjà mentionné, le contour $\overline{d}$ présente, en général, des points anguleux non seulement en les pointes des caps et au fond des baies mais aussi en $\overline{d}_1 \cap \overline{d}_2$. Les raisonnements du présent alinéa peuvent être adaptés à l'étude de la singularité de (u, v, ζ) en de tels points et permettent, en particulier, de décrire l'allure de S_γ^{+0} dans leurs voisinages — à condition de connaître les conditions aux limites qu'on se donne le long de $\overline{d}_2$. Mais nous laissons ici de côté cet aspect du problème.

3.3. Définition et premières propriétés des solutions régularisables de (E)

3.3.1. Introduction

Commençons par l'examen d'un exemple, à la fois élémentaire et classique. Considérons la cubique unicursale, définie dans le repère orthonormé Oxy par son équation : $y = x^{2/3}$; elle présente à l'origine une singularité, à savoir un point de rebroussement de première espèce où $dy/dx = \infty$. C'est pourquoi il est commode d'utiliser pour l'étude du voisinage de l'origine de cette courbe la représentation paramétrique : $x = t^3$, $y = t^2$ au moyen de fonctions régulières : nous avons là un exemple banal de la régularisation. Ce qui suit n'est que le développement de cette remarque évidente, qui a déjà servi de point de départ à plusieurs recherches dans le domaine des équations aux dérivées partielles du type hyperbolique.

3.3.2. Définition d'une solution régularisable de (E)

Dans le cas des systèmes hyperboliques (E) à deux variables indépendantes et, pour fixer les idées, à deux inconnues, on a reconnu depuis longtemps l'existence des solutions régulières du système associé (e) qui ne vérifiaient pas la condition d'équivalence avec les solutions régulières de (E). On a constaté que de telles solutions de (e) permettaient, d'une part, de décrire avec précision une classe étendues de singularités des solutions de (E) et, d'autre part, résoudre de nombreux problèmes concrets aux limites de la physique mathématique. Il est bien connu, en effet, que les conditions que les données pratiques aux limites imposent souvent aux solutions cherchées de (E), ne peuvent être satisfaites au moyen des inconnues régulières le long des portions concernées de la frontière de leur domaine d'existence. La nature analytique de telles singularités n'est pas toujours aisée à reconnaître à priori sur le système (E) lui-même. Et c'est pourquoi le recours au système associé (e) s'avère si souvent fécond et efficace. Dans cet ordre d'idées, citons, la théorie de l'équilibre limite plan en plasticité coulombienne (cf. par exemple $[7]_I$ où on trouvera décrits plusieurs types de singularités aussi régularisées).

Ce qui suit est une extension de telles méthodes au système (E) qui met en jeu trois variables indépendantes et trois inconnues. Mais il est clair que le procédé ci-dessous décrit peut-être adapté à d'autres systèmes hyperboliques.

Au cours de cet alinéa, nous notons : $\mathcal{D}$, un domaine quelconque $\subset O\alpha\beta\gamma$, espace des varia-

bles caractéristiques attachées à (E); $\overline{\mathscr{D}}$ sa frontière : $x(\alpha, \beta, \gamma)$, $y(\alpha, \beta, \gamma)$, ..., $\zeta(\alpha, \beta, \gamma)$, six fonctions, régulières $R^{(2)}$, définies sur $(\mathscr{D} + \overline{\mathscr{D}})$ solutions du système associé (e) de (E); $(D + \overline{D})$, l'image dans $Oxyt$ de $(\mathscr{D} + \overline{\mathscr{D}})$ dans l'application $(\alpha, \beta, \gamma) \Rightarrow (x, y, t)$ (cf. $(1.1)_{\mathrm{I}}$). Cela étant, nous introduisons la :

Définition. Nous appelons régularisable toute solution de (e) — dont on vient de définir le domaine d'existence et le mode de régularité — qui vérifie sur un ensemble $q \subset (\mathscr{D} + \overline{\mathscr{D}})$ la condition (cf. $(1.2)_{\mathrm{I}}$) :

$$\Delta = \frac{\partial(x, y, t)}{\partial(\alpha, \beta, \gamma)} = 0, \forall (\alpha, \beta, \gamma) \in q.$$

Cette définition appelle plusieurs commentaires, fondés sur les résultats classiques de la théorie des fonctions implicites. Notons Q, l'image de q dans $Oxyt$. Les trois fonctions u, v, ζ de x, y, t, définies à partir de $(1.1)_{\mathrm{I}}$, ne constituent une solution régulière $E^{(2)}$ de (E) que sur l'ensemble complémentaire de Q par rapport à D; sur q, l'application $(\alpha, \beta, \gamma) \Rightarrow (x, y, t)$ cesse d'être bijective et il n'y a pas équivalence entre (E) et (e) sur cet ensemble. Rappelons alors — très sommairement et sans viser la généralité excessive — quelques résultats élémentaires. Si q est un domaine tridimensionnel, on aura au moins une relation de la forme : $f(x, y, t) = 0$ sur Q. En nous bornant à l'essentiel et renonçant à l'examen de quelques cas exceptionnels, on en conclut qu'en général Q se réduit à une surface; en sorte que la solution considérée de (e) est dépourvue de signification physique; c'est pourquoi, nous laissons ce cas de côté.

Supposons maintenant que q soit une surface σ, régulière $R^{(2)}$, $\subset O\alpha\beta\gamma$. Pour abréger, nous interpréterons cette éventualité en termes de la théorie des enveloppes (cf. $[8]_{\mathrm{II}}$) — qui s'applique ici en raison des hypothèses de régularité consenties —. Admettons que l'équation de σ puisse être mise sous la forme : $\underline{\alpha} = \underline{\alpha}(\beta, \gamma)$. S'il en est ainsi, les trois premières équations de $(1.1)_{\mathrm{I}}$ — où l'on substitue $\underline{\alpha}$ à α — définissent, en général, dans $Oxyt$ une surface Σ qui est soit l'enveloppe de la famille S_α des surfaces bicaractéristiques de (E), paramétrées par α, soit le lieu des points singuliers des S_α. Ecartons la deuxième éventualité et plaçons-nous dans la première. Coupons D et le système de surfaces S_α, S_β, S_γ par le plan : $t = t_0 =$ const et notons respectivement $d(t_0)$, K_α, K_β, K_γ, le domaine et les courbes sections de D et des surfaces précitées par ce plan. De ce qui précède il résulte alors que les trois familles K ne réalisent pas une triangulation de $d(t_0)$ en raison de l'existence d'une enveloppe de la famille K_α — tout au moins dans le voisinage de celle-ci, qui est la section de Σ par le plan $t = t_0$ —.

Mais il peut se faire — et c'est le cas particulièrement intéressant du point de vue qui nous occupe — que q se réduise à une courbe que, dans la suite, nous désignerons par k; alors Q sera aussi, en général, une courbe que nous noterons K. Admettons, pour fixer les idées, que les équations de k puissent se mettre sous la forme : $\underline{\underline{\beta}} = \underline{\underline{\beta}}(\alpha)$; $\underline{\underline{\gamma}} = \underline{\underline{\gamma}}(\alpha)$. On déduit alors de $(1.1)_{\mathrm{I}}$ que K peut être définie au moyen de la représentation paramétrique :

$$\underline{\underline{x}} = x[\alpha, \underline{\underline{\beta}}(\alpha), \underline{\underline{\gamma}}(\alpha)], \quad \underline{\underline{y}} = y[\alpha, \underline{\underline{\beta}}(\alpha), \underline{\underline{\gamma}}(\alpha)],$$
$$\underline{\underline{t}} = t[\alpha, \underline{\underline{\beta}}(\alpha), \underline{\underline{\gamma}}(\alpha)],$$

où $\underline{\underline{\beta}}$ et $\underline{\underline{\gamma}}$ sont déterminées (quand ces fonctions existent) de manière que chaque surface S_α, $\forall\alpha$, contienne K; K apparaît ainsi comme une enveloppe dégénérée de la famille S_α.

Cela posé, supposons que les S_α soient surfaces intégrales de $(2.10)_{\mathrm{II}}$, c'est-à-dire qu'elles possèdent la propriété (π). Alors, on retrouve, à titre de cas particulier, la situation décrite en (3.2.5); la solution de (e) correspondante fournit donc une représentation paramétrique des fonctions de x, y, t : (u, v, ζ) continues dans le voisinage de la courbe K, qui se réduit alors à la droite δ_a. Rappelons, en passant, qu'on peut réaliser une telle situation même dans le cas d'une solution de (E), régulière $R^{(2)}$. Soit, en effet, K_α une famille de courbes $\subset d(t_0)$, paramétrées par α, telle que chaque K_α passe par un point $M_0 \in d(t_0)$. Alors, chacune des surfaces S_α, intégrale de $(2.10)_{\mathrm{II}}$, contient la caractéristique $\Gamma(M_0)$ de cette équation. Mais les figures 12 laissent présumer l'existence de solutions irrégulières de (E) dans le voisinage de $\Gamma(M_0)$.

Supposons maintenant que les S_α soient des surfaces intégrales de $(2.11)_{\mathrm{II}}$; montrons que la courbe K, qui leur est commune, est, en général, une ligne de discontinuité de (u, v, ζ). Soit, en effet, M, un point $\in$ K. Une surface S_α déterminée qui y passe doit être tangente au cône caractéristique de sommet M correspondant, que nous notons $C(M, \alpha)$.

Si S_α varie avec α, il en sera donc de même de $C(M, \alpha)$. Or, cette surface est, d'après $(1.22)_{\mathrm{I}}$, définie par u, v, ζ; ces valeurs doivent donc dépendre en général de α — c'est-à-dire de t [cf. $(1.1)_{\mathrm{I}}$] —, ce qui justifie notre proposition.

Alors, la famille S_α est constituée par un faisceau de surfaces intégrales de $(2.11)_{\mathrm{II}}$, passant par K et telles que deux surfaces arbitraires de cet ensemble se coupent sans pouvoir être tangentes entre elles. Mais il n'en est pas toujours ainsi. Soient, en effet : (u, v, ζ), une solution de (E), régulière $R^{(2)}$ dans D; $\Gamma(M_0, p_0, q_0)$, une caractéristique de $(2.11)_{\mathrm{II}}$, $\subset$ D; S_α une famille de surfaces, paramétrées par α, porteuses de multiplicités M $(S_\alpha, \underline{u_\alpha}, \underline{v_\alpha}, \underline{\zeta_\alpha})$ bicaractéristiques de (E) correspondant à (u, v, ζ) telles que $\Gamma \subset S_\alpha$, $\forall\alpha$. D'après cela, $\Gamma(M_0, p_0, q_0)$, est l'enveloppe dégénérée des S_α, qui se touchent le long de cette courbe, qui n'est pas une ligne de discontinuité de la solution considérée.

En pratique, K est confondu avec la portion marine $\overline{d}_1$ de $\overline{d}$. La nature de la discontinuité dépend alors des conditions imposées le long de cet élément de frontière de d. Supposons que l'on cherche à construire dans D une solution de (E), connaissant les conditions initiales $m(d, \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta})$ — que, pratiquement, on suppose toujours être le repos — d'une part, et, d'autre part, soit la composante normale à $\overline{d}_1$ de la vitesse $V_n(M, t)$ en $M \in \overline{d}_1$, $\forall M \in \overline{d}_1$, $\forall t$, et soit enfin $\zeta(M, 0)$. Lorsque ces fonctions de M ne sont pas nulles, il y a discontinuité de la solution le long de $\overline{d}_1$ pour $t = 0$. On peut alors trouver la solution de (E) qui satisfait l'ensemble des conditions précédentes aux limites sous forme de solutions régularisables. Mais il convient de souligner que celles-ci ne constituent peut-être pas le seul moyen de traiter le problème posé.

Pour exploiter numériquement la notion de solution régularisable de (E), il nous reste à construire un algorithme résolutif pour trouver les expressions approchées des inconnues dans le voisinage de K. C'est le problème traité dans les paragraphes qui suivront lorsque les S_α sont des surfaces intégrales de $(2.11)_{II}$. L'étude de l'éventualité où les S_α possèdent la propriété (π) est en cours, ainsi que l'examen du cas où K se réduit à un point.

Observons aussi que, $\overline{d}_1$ étant tracée sur la surface $t = 0$ — qui a une orientation d'espace et, dès lors, ne peut pas être porteuse d'une multiplicité bicaractéristique de (E) —, cette frontière marine ne peut être une caractéristique de $(2.11)_{II}$, en sorte que si toutes les surfaces S_α de l'espèce considérée passent par $\overline{d}_1$, cette courbe est nécessairement une ligne de discontinuité de la solution (u, v, ζ).

Remarque

Les résultats qui précèdent admettent la réciproque suivante dont on trouvera en 3.4. la démonstration. Soient une courbe régulière $R^{(2)}$: $K \subset (D + \overline{D})$ et une courbe régulière $R^{(2)}$: $L(M_0) \subset (D + \overline{D})$ d'extrémité $M_0 \in K$ et dont on note M_0 le point courant; $u(M)$, $v(M)$, $\zeta(M)$ une solution de (E) définie et régulière $R^{(2)}$ dans $(D + \overline{D})$ sauf sur K, mais astreinte à vérifier la condition suivante : il existe trois nombres $u(\theta, M_0)$, $v(\theta, M_0)$, $\zeta(\theta, M_0)$ tels que l'on ait :

$$\lim_{M \to M_0} u(M) = u(\theta, M_0),$$

$$\lim_{M \to M_0} v(M) = v(\theta, M_0),$$

$$\lim_{M \to M_0} \zeta(M) = \zeta(\theta, M_0).$$

D'après ces notations, les seconds membres sont des fonctions de M_0 et, pour M_0 fixé, d'un angle θ, qui dépend de L et dont le sens géométrique sera défini en 3.4 : on montrera que la donnée de θ suffit pour caractériser la surface intégrale S_α de $(2.11)_{II}$ passant par K, en sorte qu'on peut prendre $\theta = \alpha$.

De plus, on précisera les propriétés de régularité qu'il faut imposer aux fonctions de θ et de M_0 en cause pour justifier le résultat suivant : la solution est régulière d'une part et, d'autre part, K est une enveloppe dégénérée des surfaces bicaractéristiques de (E), intégrales de $(2.11)_{II}$, le long de laquelle on a nécessairement $\Delta = 0$. Mais cette condition n'est pas suffisante pour que toutes ces surfaces passent par K. Car, comme nous l'avons vu, Δ s'annule aussi sur K lorsque cette courbe est l'enveloppe des surfaces bicaractéristiques de (E) possédant la propriété (π).

Ce résultat précise la portée des solutions régularisables; il couvre, d'après les avis de quelques numériciens, tous leurs besoins courants en matière d'analyse des singularités des solutions de (E) qu'on rencontrerait dans la pratique.

ADDITIF À LA PARTIE II (B)

Dans la 2e partie (B) du présent travail (inséré dans ce périodique, cf. tome 13, 1985, fasc. 760, pp. 7-26) nous avons énoncé (cf. loc. cit. p. 17, au bas de la deuxième colonne) le résultat suivant, que nous formulons ici d'une manière complète, en rappelant les conventions d'écriture spéciales à ce texte pour éviter la nécessité de renvoi à celui-ci.

Soient : $D \subset Oxyt$, le demi-cylindre $t \geqslant 0$; (u, v, ζ), une solution de (E) définie et régulière $R^{(2)}$ dans $(D + \overline{D})$; $\Delta(L)$, un domaine $\subset (d + \overline{d}) \subset Oxy$, dont l'ordre de connexion est arbitraire et dont L est la frontière; D (L), le demi-cylindre de base $L \subset D$; $\Delta^+(L) \subset D$, la zone d'influence de la multiplicité incidente $m[\Delta(L), \underline{u}, \underline{v}, \underline{\zeta}]$; on suppose que dans D on a :

$$H^2 = g(\zeta + h) > u^2 + v^2 = V^2$$

(cf. $2.3.3_I$). Alors il en résulte que :

$$\Delta^+(L) \subset D(L)$$

La démonstration de ce résultat — utile en raison de ses applications à l'analyse des cas pratiques et en dépit de sa simplicité —, donnée dans le texte précité, consiste à affirmer que la conclusion est la conséquence des raisonnements qui précèdent. Or l'enchaînement de ceux-ci a paru difficile à suivre à un lecteur. Cette observation nous a semblé valable; et c'est pourquoi nous donnons ci-après une démonstration simple et directe de la propriété énoncée. On notera que le raisonnement ci-dessous permet de simplifier quelques discussions du $2.3.6_{III}$.

Nous nous appuierons sur le lemme suivant, presque évident a priori et aisément prévisible grâce à l'analogie avec les écoulements des gaz. Soient : $\overline{S}_\gamma^-(P_1)$, la portion, située dans le domaine $t \leqslant t_1$, du demi-conoïde caractéristique de sommet $P_1(x_1, y_1, t_1) \in D$; P_1T_1, la demi-droite issue de P_1, parallèle à Ot, le long de laquelle $t \leqslant t_1$. Alors on a le résultat suivant :

$$P_1T_1 \cap \overline{S_\gamma^-}(P_1) = \{P_1\}$$

autrement dit, P_1 est le seul point commun à P_1T_1 et à $\overline{S_\gamma^-}(P_1)$.

En effet, il résulte de l'inégalité $H > V$ (cf. 2.3.3) que P_1T_1 est intérieure à $\overline{S_\gamma^-}(P_1)$ dans le voisinage de P_1. Car P_1T_1 est strictement intérieur au cône $C(P_1)$ dont toutes les génératrices sont tangentes à $S(P_1)$ en P_1. Raisonnons alors par l'absurde et supposons que $\exists\, P_2(x_2, y_2, t_2)$, $t_2 < t_1$, tel que $\{P_2\} = P_1T_1 \cap \overline{S_\gamma^-}(P_1)$.

Si on coupe $\overline{S_\gamma^-}(P_1)$ par un plan quelconque passant par P_1T_1 (cf. fig. 16a), notons $\widehat{P_1QP_2}$, l'arc plan d'intersection ainsi défini :

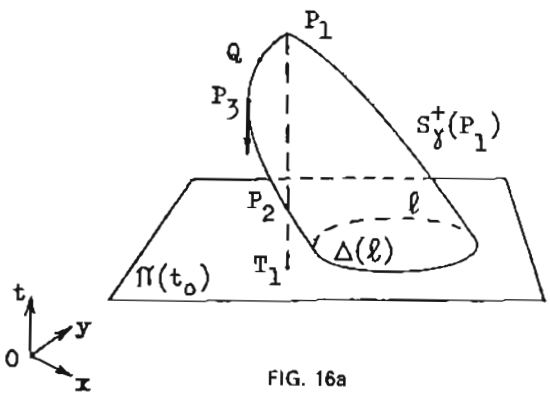


FIG. 16a

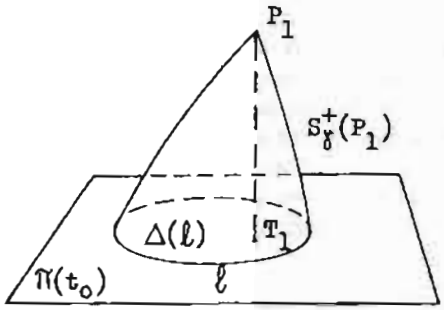


FIG. 16b

On en déduirait que $\exists P_3 \in \widehat{P_1QP_2}$ tel que la tangente P_3T_3 en P_3 à $\widehat{P_1QP_2}$ serait parallèle à Ot ; cela entrainerait que le plan tangent en P_1 à $\overline{S_\gamma^-}(P_1)$ serait aussi parallèle à Ot, ce qui est impossible.

Notons alors $\pi(t_0)$, un plan $t = t_0$, $0 < t_0 < t_1$; $T_1 \in \pi(t_0)$; ℓ, la courbe : $\pi(t_0) \cap \overline{S_\gamma^-}(P_1)$; $\Delta(\ell)$, le domaine $\subset \pi(t_0)$ dont ℓ est la frontière. D'après le lemme ci-dessus, la situation représentée sur la fig. 16a est impossible; seule la situation de la fig. 16b est réelle. On en déduit l'énoncé suivant :

Si $P_1 \in [\Delta^+(L) + \overline{S_\gamma^-}(L)]$, alors on a

$$T_1 \in \Delta(\ell) \subset \Delta(L)$$

qui couvre, en le précisant, le résultat que nous avions en vue. On discuterait d'une manière analogue le cas où $H < V$ et on établirait que, dans cette éventualité T_1 est extérieur à $\Delta(\ell)$.

LOCALISATION D'UN AVION AU COURS DE MISSIONS PHOTOAÉRIENNES

par

MM. J.M. CHIMOT et M. LE GOUIC
Ingénieurs Principaux de l'Armement (Hydrographe)
Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

RÉSUMÉ

L'utilisation de la télédétection aéroportée en hydrographie côtière permet d'alléger considérablement les travaux sur le terrain. Quelque soit le capteur embarqué (chambre de prise de vue, radiomètre, radar, laser...) il est nécessaire de localiser l'avion d'une part pour le guider dans son survol d'étendues maritimes sans points de repère et ainsi optimiser le déroulement de la mission, d'autre part pour mettre en place les données recueillies, lors de leur exploitation.

Ce rapport analyse la précision de la localisation obtenue à l'aide du système Trident III A de la société Thomson/CSF lors d'une mission photographique aérienne effectuée par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine en 1983 : les positions fournies par le Trident ont été comparées aux coordonnées des sommets des gerbes perspectives des couples stéréoscopiques mis en place par aérotriangulation.

ABSTRACT

Airborn remote sensing can much reduce the volume of hydrographic work in coastal areas. Whatever sensor may be used (camera, scanner, radar, laser...) the aircraft has to be precisely located, both for guiding it in a flight over water without ground marks and for a later processing of the acquired data.

This paper analyses the accuracy obtained by the french Hydrographic Office during a photographic survey in 1983, with the radiopositionning system Trident III A built by Company Thomson/CSF. The radiopositionning results were compared with the coordinates of the perspective centers computed in an analytical aerotriangulation.

Les levés hydrographiques côtiers sont des travaux longs et coûteux, que l'exploitation de photographies aériennes permet de préparer et d'alléger considérablement. Généralement, les clichés utilisés sont ceux que prennent les cartographes terrestres pour leurs propres travaux; ils ne sont donc pas toujours adaptés aux situations maritimes (reflets du soleil, hauteur de la marée, transparence de l'eau...).

Depuis 1980, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) effectue des missions originales de prises de vues [1,2] qui tiennent compte de la spécificité du milieu observé. Une des particularités de ces levés photoaériens, réside dans la nécessité de localiser l'avion : cette localisation servira en effet à guider le pilote sur des axes sans points de repère au sol, à optimiser les périodes de vol en fonction des contraintes de l'environnement, à préparer l'équipement stéréographique de couples presqu'exclusivement maritimes.

Le positionnement d'un avion survolant une étendue d'eau est nécessaire à tout type de levé marin [3] (mesures radiométriques, bathymétrie par laser aéroporté...); dans le cas de la photogrammétrie, on peut déterminer, a posteriori lors de la mise en place « classique » des couples, et avec précision, la position des sommets de prise de vue. On dispose donc de deux jeux de valeurs obtenus avec des moyens indépendants.

Ce rapport présente les résultats de la localisation d'un avion de prise de vue lors d'une mission photographique effectuée en 1983 au-dessus de la Baie de Lannion en Bretagne.

1. DESCRIPTION DE LA MISSION DE PRISES DE VUE « BAIE DE LANNION 1983 »

1.1. Conditions de prise de vue

La plupart des levés hydrographiques côtiers décrivant la côte Nord de la Bretagne sont an-

ciens. Comme le littoral est extrêmement découpé et l'amplitude de la marée très forte, leur actualisation par un levé classique nécessiterait un effort considérable.

La mission de prise de vue réalisée sur la Baie de Lannion (annexe 1) avait donc pour objectif de fournir un levé palliatif : elle devait ainsi permettre de représenter outre la topographie du littoral (laisse de pleine mer, infrastructures portuaires, aménagements côtiers, inventaire des points remarquables, balisage...) ou de l'estran (morphologie, nature, occupation...), la plupart des zones faiblement immergées (roches, laisse de basse mer, premières isobathes...).

Pour assurer une bonne visibilité des éléments du fond sur ces clichés aériens, plusieurs conditions devaient être réunies et il fallait :

— effectuer les prises de vue par basse mer de vive eau; la durée du vol est alors limitée aux deux heures encadrant l'instant de plus basse mer,
— s'assurer que l'éclairement du fond est suffisant : la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon doit être supérieure à 30°,
— éviter la réflexion spéculaire en choisissant une orientation correcte des axes du vol et des horaires où le soleil n'est pas trop élevé au-dessus de l'horizon,
— ne pas utiliser de filtres limitant l'énergie renvoyée par le fond : cette condition impose en particulier de ne pas travailler en présence de brume,
— disposer d'un temps calme non seulement pour garantir la stabilité du vol mais aussi pour limiter les effets de la houle,
— attendre une période sans aucun nuage car même les nuages les plus élevés sont gênants; ils limitent en effet l'éclairement du soleil (et donc empêchent une pénétration suffisante de la lumière dans l'eau).

Les contraintes relatives à l'environnement étaient donc très fortes (d'autant plus que l'amplitude de la marée est importante) et peu de périodes étaient favorables au cours de l'année. Les vols au-dessus de la Baie de Lannion ont eu lieu le 7 septembre 1983 entre 10 h 30 UT et 12 h 30 UT (la cote au-dessus du zéro hydrographique du plan d'eau à l'instant de la basse mer (11 h 26 UT) était de 0,8 m et correspondait à un coefficient de 105). 8 axes ont été effectués à l'altitude nominale de 3 100 m : 298 clichés ont été pris (annexe 1).

1.2. Mesures complémentaires

— La connaissance de la cote du plan d'eau aux instants de prise de vue est très importante dans une restitution photobathymétrique :

- pour le basculement des verticales : la surface de la mer est une équipotentielle qui peut servir de référence d'horizontalité,
- pour le calage des modèles en altitude par mesure aux points situés à l'intersection du plan d'eau et de la terre : les deux vues d'une même portion d'eau ne sont pas simultanées et la surface de la mer n'est donc pas observable stéréoscopiquement,
- pour définir les conditions de réfraction des rayons lumineux au passage air-eau : le restituteur utilisé au SHOM est un restituteur analytique Traster 77 de Matra, qui permet de prendre en compte une grille de déformations dues à la réfraction [4,5].

La cote du plan d'eau aux instants de prise de vue a été déterminée par un modèle de propagation de la marée s'appuyant sur les mesures faites pendant 45 jours en 5 points (annexe 1).

— La localisation était fournie par un système Trident de la société Thomson/CSF interrogeant 4 balises installées sur des points remarquables de la côte, choisis pour assurer un bon recoupement des lieux de position (annexe 1).

Les recouvrements entre photos étaient de 80 % dans le sens longitudinal, et de 20 % dans le sens transversal. Ces conditions sont en fait les standards utilisés pour les vols pilotés à vue. Si pour un vol terrestre localisé on peut descendre jusqu'à 60 et 10 % de recouvrement, pour un vol effectué au-dessus d'un plan d'eau, on assure une certaine redondance des prises de vue à cause de la réflexion spéculaire : la restitution n'utilisera en principe qu'un couple sur deux, sauf dans les zones fortement perturbées par les reflets où on intercale des couples supplémentaires.

2. CONFIGURATION DE MATÉRIEL EMBARQUÉ SUR L'AVION DE PRISE DE VUE (annexe 2)

2.1. L'équipement utilisé lors de la mission photographique aérienne était embarqué à bord d'un petit avion (Cessna 206 de la société France Aéro Topo). Il comprenait :

— Un interrogateur Trident III A utilisant la fréquence 1219 MHz
— Un calculateur Hewlett Packard HP 9825 alimenté par un onduleur Sodilec
— Une horloge externe HP 98035
— Un indicateur de navigation
— Une caméra Wild RC 10 déclenchée par le calculateur (via le Trident).

2.2. Le guidage de l'avion et l'archivage des données de la localisation ont été assurés par un logiciel conçu par la société Thomson/CSF *.

* Le SHOM disposait alors de son propre logiciel écrit sur un calculateur Hewlett Packard 9816, mais était encore équipé exclusivement du système Trident III fonctionnant à la fréquence 230 MHz et donc nécessitant l'emport d'une antenne d'émission/réception trop grande pour les possibilités de l'avion utilisé.

Le point est calculé à partir de 2, 3 ou 4 balises (l'altitude étant fixée par l'opérateur). Les distances mesurées ne sont retenues pour le calcul que si le nombre de réceptions validées par le récepteur est supérieur à 50 % du nombre des interrogations, et si l'angle sous lequel l'avion voit un couple de balises est supérieur à 18°.

Sur l'indicateur de navigation sont indiquées la distance à parcourir sur un axe de vol préprogrammé, et l'écart transversal entre la position de l'avion et l'axe de vol théorique. Les informations de guidage sont rafraîchies toutes les 1,2 s et ne sont pas enregistrées.

Au voisinage immédiat d'une prise de vue (position programmée), le guidage est stoppé et le calculateur procède à l'enregistrement à haute cadence (9 Hz) de 32 données de localisation. Chaque mesure est datée dans l'échelle de temps de l'horloge de l'interrogateur. A l'instant où l'ordre de déclenchement est envoyé par le calculateur cette horloge est remise à zéro.

Il suffit donc de connaître le décalage entre l'instant où l'ordre d'ouverture est donné et celui où le diaphragme s'ouvre effectivement, pour connaître les données Trident de la localisation du centre de prise de vue (interpolation entre deux acquisitions à haute cadence).

L'ensemble de la séquence de prise de vue est acquis et enregistré en 5 s, pendant lesquelles l'avion n'est plus guidé (environ 300 m).

3. FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME DE LOCALISATION

3.1. Une des 4 balises Trident est tombée en panne au début du vol. Le défaut détecté sur l'antenne était de type parasitaire et n'affectait en rien le fonctionnement de la balise concernée (il a suffi d'effectuer une remise à zéro pour réparer « la panne »). Cependant, 5 des 8 axes de vol avaient été réalisés avec 3 balises. La qualité du guidage n'en a pas été affectée et ce n'est qu'au traitement des données enregistrées que l'absence d'une 4e balise a été préjudiciable.

3.2. lorsque l'avion est resté proche des balises, les conditions de réception ont été excellentes. A partir de 90 km, la réception devenait aléatoire, au-delà de 100 km, mauvaise. Cette limitation de la portée était imputable à un mauvais cablage d'une des cartes de l'interrogateur Trident (ce défaut n'a été établi qu'un an après la mission !).

3.3. Le pilote a maintenu une altitude de vol constante d'après les informations fournies par un altimètre barométrique. La précision de ce type d'instrument permet une bonne mesure différentielle (± 20 mètres) mais une évaluation de l'altitude très imprécise (c'est en fait une altitude conventionnelle établie à partir d'une pression de référence au sol QNH mesurée à l'aéroport de contrôle). Même avec des précautions particulières (mesure du QNH local par radiosonde, enregistrement des températures) la précision aurait été insuffisante pour que l'altitude barométrique fournisse une équation supplémentaire.

3.4. La connaissance de la position de l'avion à l'instant des prises des vues permet de préparer la restitution photogrammétrique en donnant les coordonnées des sommets des gerbes perspectives. La localisation de l'antenne doit donc être déterminée à l'instant exact de déclenchement de la caméra.

La calibration correspondante a été réalisée en déterminant sur un oscilloscope le décalage ΔT entre le signal retour donné par la caméra à un ordre de déclenchement (ce signal remet l'horloge du Trident à zéro) et l'instant d'ouverture du diaphragme (détecté par une cellule photoélectrique reliée à l'oscilloscope).

Avec la caméra Wild RC 10 utilisée, l'ouverture du diaphragme est réalisée à l'aide de disques en rotation : le retard moyen ΔT varie donc avec la vitesse d'obturation. De plus, la position relative des disques après chaque déclenchement n'est pas contrôlée, ce qui crée une dispersion autour de la valeur moyenne. Le tableau 1 présente les résultats obtenus lors de la calibration effectuée après le vol.

TABLEAU 1

Vitesse d'obturation	Ecart moyen ΔT	Ecart maximum par rapport à ΔT
1/400 s	225 ms	150 ms (12 mesures)
1/300 s	280 ms	60 ms (2 mesures)
1/200 s	340 ms	80 ms (3 mesures)
1/125 s	400 ms	200 ms (12 mesures)

A la vitesse de 300 km/h, l'imprécision de 150 ms (à 1/400 s) correspond à une incertitude de 12,5 mètres qui s'ajoute aux erreurs de localisation. Une telle erreur rend impossible l'introduction au cours de la restitution des coordonnées des sommets de prises de vues comme éléments du calcul de triangulation. Pour remédier à ce défaut rédhibitoire, il faut donc utiliser une caméra dont l'instant de déclenchement est parfaitement connu (diaphragme asservi électroniquement, détection interne...).

4. DÉTERMINATION DE L'ALTITUDE DES AXES DE VOL

4.1. Remarques préliminaires

Les mesures Trident sont relatives à la distance oblique balise-avion et on peut tirer parti de cette remarque; ainsi :

— si l'on est proche de la verticale d'une balise, la mesure correspondante offre un recoupement avec les autres lieux de position sous un angle suffisamment important pour fournir une détermination de l'altitude (au détriment de la précision planimétrique),
— au contraire, lorsqu'au moins trois des balises sont très éloignées de l'avion, les lieux de position qu'elles fournissent se coupent en sifflet dans le plan vertical et sont donc inutilisables pour déterminer l'altitude. On peut aussi exprimer différemment cette conclusion, en disant qu'une incertitude sur l'altitude, dans ce cas de figure, influe peu sur le calcul des coordonnées planimétriques.

4.2. Le programme de traitement en temps différé devait permettre la détermination complète de la position de l'avion. Un soin particulier a été apporté à l'évaluation de l'altitude qui n'était accessible ni par la mesure (§ 3.3) ni directement par le calcul (§ 4.1). On a donc adopté la méthode suivante :
i) Le calcul de la position tient compte outre des équations de distances réellement mesurées, d'une équation traduisant le fait que le vol a été effectué, pour chacun des profils, à une altitude approximativement constante, voisine de la valeur nominale (§ 3.3). Après linéarisation on applique une méthode itérative par moindres carrés en attribuant le même poids aux mesures réelles ou fictives.
ii) Pour différentes valeurs de l'altitude (± 100 mètres, par pas de 5 mètres, autour de l'altitude barométrique observée), une statistique des résidus entre les distances mesurées et l'altitude introduite, d'une part, et les valeurs correspondantes déduites des positions calculées d'autre part, a été établie, profil par profil. La valeur qui minimise ces résidus est alors adoptée.

4.3. La méthode du § 4.2 a été appliquée successivement aux 3 axes pour lesquels on disposait de 4 lieux, puis à l'ensemble des profils en ne considérant que les 3 balises reçues en permanence. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

4.4. Par ailleurs, le calcul des positions complètes (planimétrique et altimétrique), sur les 25 points distants de moins de 5 000 m d'au moins une balise (seules les balises implantées à Roscoff et Perros Guirec sont donc concernées) a donné une valeur moyenne de l'altitude de 3 115 m, à rapprocher des résultats du tableau 2.

5. ÉTALONNAGE DU SYSTÈME TRIDENT

5.1. Avant d'effectuer la mission de prise de vue, le système Trident utilisé avait été étalonné sur une base géodésique terrestre. Les résidus observés sur les distances aux balises lors du calcul de l'altitude des axes de vol sont biaisés et supérieurs au mètre, ce qui laisse supposer que cet étalonnage n'était pas optimal. On a donc procédé à une autocalibration du système de localisation.

5.2. Pour cela on considère inconnues les positions de l'avion, l'étalonnage et l'altitude*, et on utilise pour leur détermination les équations fournies par les mesures de distance et l'équation

* La faible variation des altitudes calculées pour chaque axe au § 4 justifie la mise en œuvre de traitements indépendants de la notion de profils mais tenant compte de la contribution des mesures de distance à la détermination des inconnues en distinguant l'altitude des coordonnées planes.

TABLEAU 2

N° de profil	Traitement de la localisation avec 4 balises					Traitement de la localisation avec 3 balises			
	Altitude calculée en m	Ecart type sur les résidus (en m)				Altitude calculée en m	Ecart type sur les résidus (en m)		
		Balise 1	Balise 2	Balise 3	Balise 4		Balise 1	Balise 2	Balise 3
1						3110	0,6	0,9	0,9
2						3115	1,2	1,0	1,5
3						3115	1,3	1,2	1,8
4						3120	1,1	1,2	1,6
5						3120	1,6	1,2	1,8
6	3120	1,6	1,7	1,2	1,6	3125	1,7	1,4	1,5
7	3125	0,9	1,4	0,9	1,4	3125	0,9	1,2	1,3
8	3130	1,4	1,0	1,2	1,3	3130	1,3	1,3	0,7

On remarque :
— que les altitudes calculées pour 3 et 4 balises sont assez peu différentes,
— que l'altitude nominale de 3 100 m fournie par l'altimètre barométrique était erronée de 20 à 30 m,
— que la dispersion des altitudes des différents profils est faible (3 120 ± 10 m).

TABLEAU 3

Numéro de balise	Etalonnage effectué avant le vol (m) (§ 5.1)	Etalonnage sur 4 balises (m) (§ 5.2)	Etalonnage complet (m) (§ 5.3)	Ecart type des résidus lors de l'étalonnage complet
1	48	40	42	1,4
2	48	47	47	2,0
3	51	49	46	1,1
4	46	44	45	1,4
Numéro de l'axe	Altitude (m)	Altitude (m)	Altitude (m)	
1	3110	–	3103	0,3
2	3115	–	3109	1,1
3	3115	–	3104	0,6
4	3120	–	3102	0,5
5	3120	–	3101	0,4
6	3125	3107	3108	1,3
7	3125	3107	3103	0,7
8	3130	3107	3110	0,7

exprimant que l'altitude est constante. Dans une première étape, seules les 77 stations pour lesquelles on disposait de mesures sur les 4 balises ont été retenues pour calculer les corrections d'étalonnage. Les résultats sont présentés dans le tableau 3 où l'on constate un écart un peu fort pour la balise 1 entre l'étalonnage résultant de l'autocalibration et celui déterminé sur base géodésique. Cependant, les résidus observés sur les distances aux balises, mesurées aux autres stations, sont toujours biaisés.

5.3. Dans une deuxième étape, on a donc repris le traitement en faisant intervenir toutes les stations et en individualisant chaque axe de vol pour la détermination de l'altitude. Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Le calcul des altitudes est cette fois sans biais sur les mesures Trident. L'accord entre l'étalonnage du § 5.2 et l'étalonnage complet est satisfaisant.

6. ÉVALUATION DES RÉSULTATS DU TRAITEMENT DES DONNÉES DE LOCALISATION

Les coordonnées des sommets de prises de vues ont été déterminées :

— par triangulation dans les plans d'altitude donnée dans le tableau 3 à partir des mesures Trident enregistrées lors du vol

— à l'issue d'une restitution photogrammétrique s'appuyant sur des détails topographiques terrestres remarquables. L'aérotriangulation effectuée a permis de calculer les coordonnées des centres de prises de vues (sommets des gerbes perspectives) avec une précision estimée à 2 mètres.

Les deux séries de coordonnées sont comparées dans ce paragraphe où les valeurs « photogrammétriques » servent de référence.

6.1. Précision planimétrique

6.1.1. Les écarts (projection de Lambert) entre le point calculé à partir des mesures Trident corrigées des valeurs de l'autoétalonnage et le point calculé par aérotriangulation sont alignés suivant une direction dont le gisement est 54° (figure 1). L'écart maximum dans la direction perpendiculaire à cette droite de régression est de 7 mètres, ce qui correspond à une dispersion quadratique moyenne de 2,3 m compatible avec les résultats du § 5 (les erreurs liées au traitement des mesures Trident et à la détermination photogrammétrique sont bien sûr indépendantes).

Le vol était orienté suivant le gisement 60° (ou 240°) : compte tenu de la précision des mesures et de la stabilité des paramètres du vol, on peut considérer que les décalages observés sont statistiquement alignés le long de l'axe du vol et donc dus au désynchronisme aléatoire de la caméra. L'écart maximum est de 15 mètres par rapport à la position moyenne du nuage : à la vitesse de l'avion cet écart correspond à un décalage de l'instant d'ouverture du diaphragme de 170 ms.

6.1.2. Une analyse de la dispersion analogue à celle du § 6.1.1 a été effectuée à partir des mesures Trident corrigées de l'étalonnage effectué avant la mission. Le nuage de points obtenu est plus grand transversalement à la droite figurant l'axe du vol (écart maximum de 17 m). La configuration relative des axes et des balises de localisation 1 et 3 est à l'origine de ce décalage.

6.1.3. L'étalonnage du système Trident est donc un point critique dans le bilan des erreurs de localisation et il est impératif de « fermer » une mission photoaérienne radiolocalisée par un étalonnage de contrôle effectué à l'issue de la mission, et, si possible, sur zone.

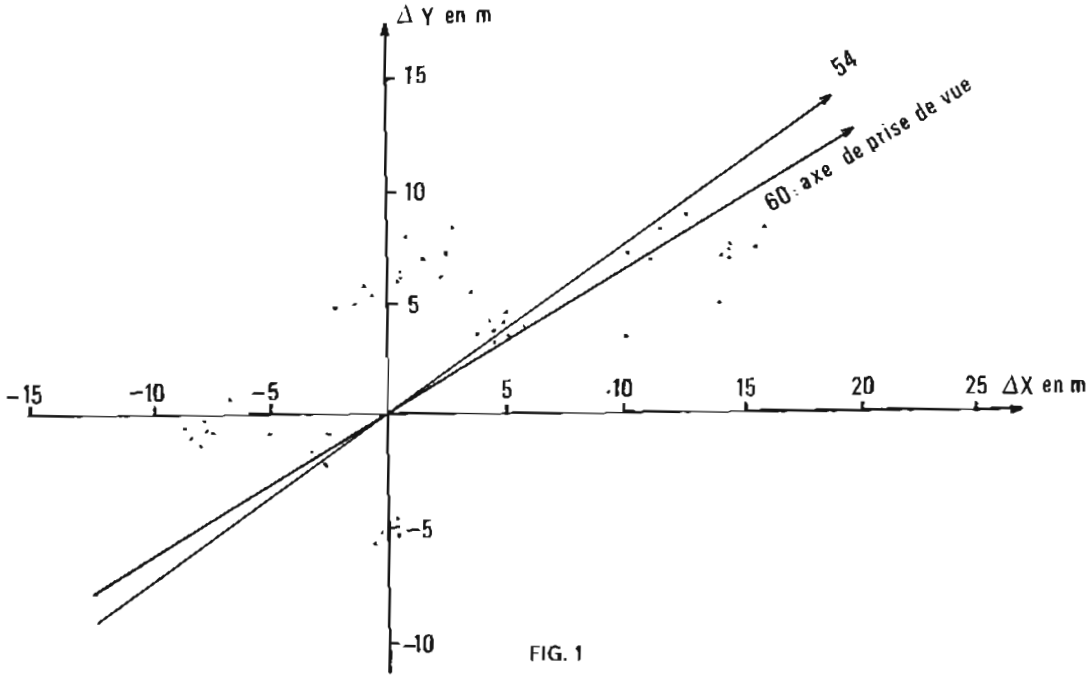


FIG. 1

6.2. Précision altimétrique

L'écart moyen entre les séries de points calculés d'après les observations Trident et d'après les résultats de l'aérotriangulation est de – 5 mètres; l'écart quadratique moyen est de 7 mètres. Les résultats, prévisibles après les remarques du § 4, sont insuffisants pour être utilisés directement pour la mise en place des modèles photogrammétriques.

7. CONCLUSIONS

7.1. Sur la localisation Trident

Compte tenu des conditions générales dans lesquelles s'est déroulée la mission de la Baie de Lannion (défaillance d'une balise, désynchronisme de la caméra, étalonnage des balises...) on peut estimer à 2 mètres (1 eqm) sur chaque coordonnée la précision planimétrique du Trident pour la localisation d'un aéronef.

Une estimation de l'altitude peut être fournie avec une précision de 7 mètres (1 eqm); l'influence de l'erreur altimétrique sur les coordonnées planimétriques est faible.

7.2. Sur l'utilisation de la localisation Trident en photogrammétrie

Le Trident est un moyen efficace pour planifier et guider les missions de prises de vues aériennes : dans de bonnes conditions, la portée des balises est voisine de 200 km (réf. 2) et la zone accessible à partir d'une installation à 5 balises est vaste.

Si de plus, le positionnement doit être utilisé pour la restitution photogrammétrique (en considérant les sommets des gerbes perspectives connus) il faut éliminer les deux causes principales des erreurs :

— l'incertitude sur l'instant du déclenchement de la caméra

— la mauvaise connaissance de l'altitude du vol.

7.3. L'étude présentée dans cet article devra être affinée par des essais complémentaires où l'équipement utilisé devra comprendre une station de mesure précise de l'altitude (altimètre laser, statoscope) et une caméra dont le déclenchement est soigneusement contrôlé.

RÉFÉRENCES

[1] BONNOT. — Contribution des aéronefs et de la photogrammétrie à la solution des problèmes courants en hydrographie et cartographie marine. *Géomètre*, n° 8-9, 1983.

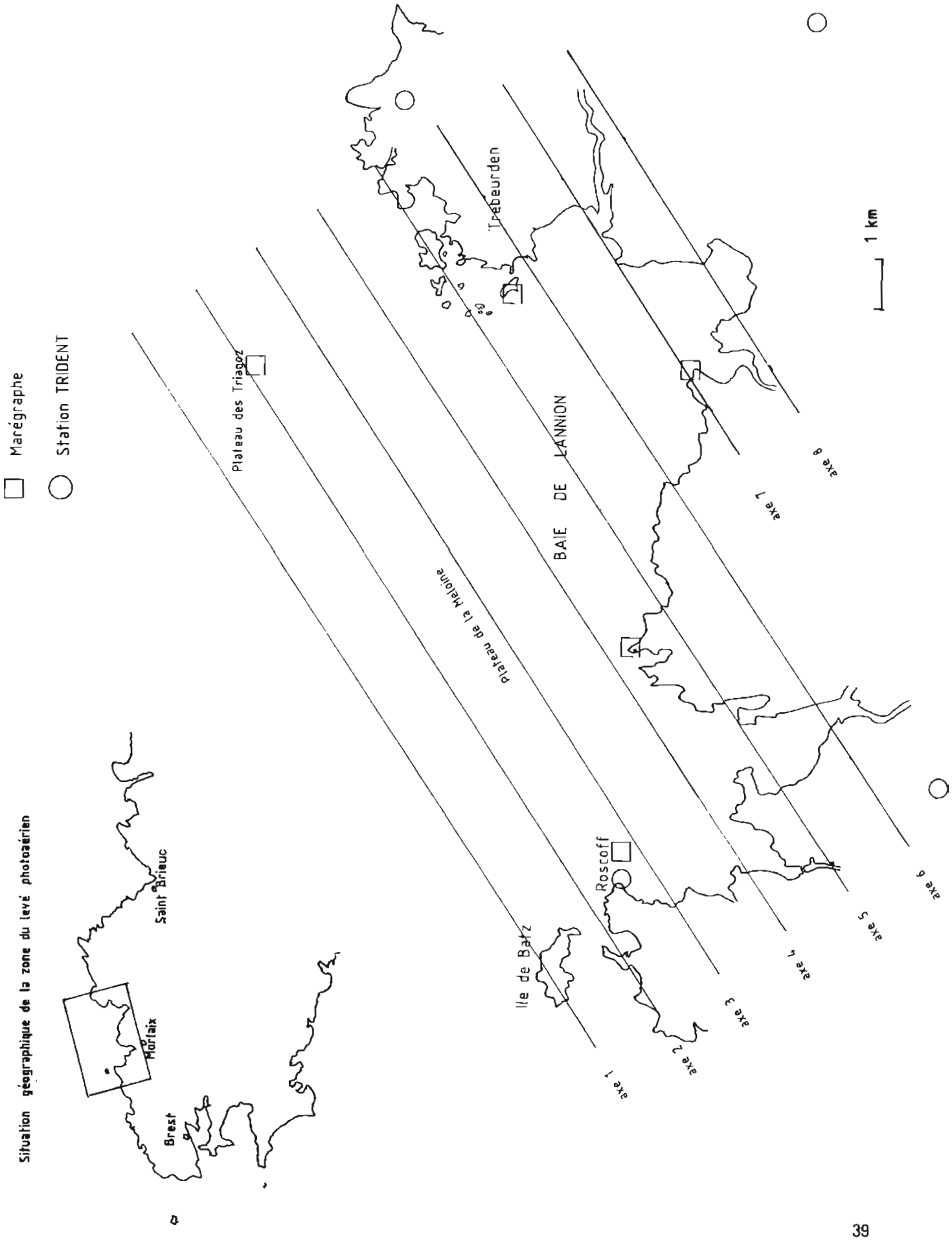
[2] SOUQUIÈRE. — L'exploitation hydrographique de photographies aériennes prises à partir d'un aéronef localisé par procédé radioélectrique. *Géomètre*, n° 8-9, 1983.

[3] LE GOUIC. — Utilisation du Trident au cours des mission aériennes. Rapport d'étude du SHOM, 1984.

[4] EGELS, KIRSNER. — Le logiciel Traster de l'Institut Géographique National. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 84, 1981.

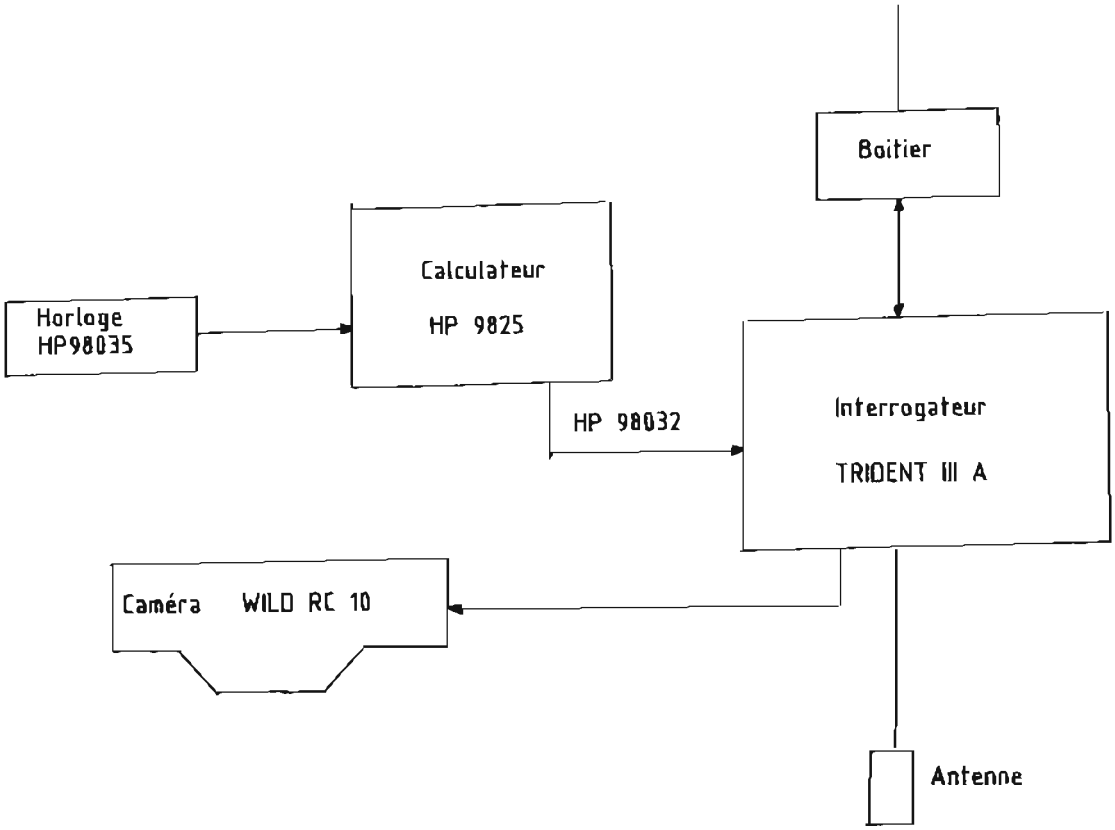
[5] EGELS. — Amélioration des logiciels Traster : restitution d'images à géométrie non conique. *Bulletin de l'Institut Géographique National*, n° 2, 1983.

ANNEXE 1



Situation géographique de la zone du levé photoaérien

ANNEXE 2


Boitier
Calculateur
HP 9825
Horloge
HP98035
HP 98032
Interrogateur
TRIDENT III A
Caméra WILD RC 10
Antenne

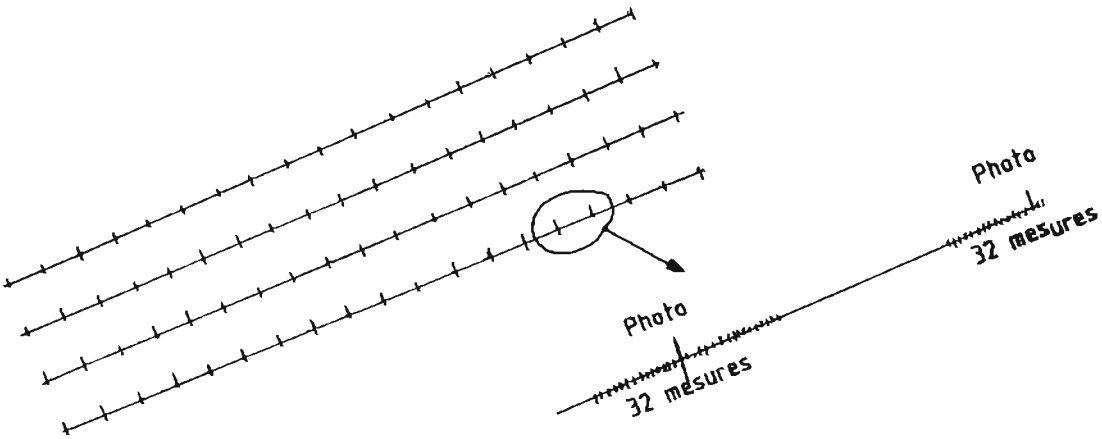


Photo
32 mesures
Photo
32 mesures

PARTIE 1

CHOIX D'UN MODÈLE D'ÉVOLUTION À COURT TERME DE LA COUCHE DE MÉLANGE OCÉANIQUE

par

M. J. SAUVEL
Ingénieur de l'Armement (Hydrographe)
Bureau d'Etudes Météorologie Nationale — Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
2, avenue Rapp — 75340 Paris Cedex 07

RÉSUMÉ

Des tests avec des cas typiques de forçages atmosphériques sont effectués pour comparer les résultats à court terme (4 jours) de modèles de complexités différentes (modèle intégral : Niiler-Kraus, modèle K [1] : Mellor-Durbin, modèle KE [2] : Therry-Lacarrère). La dispersion entre les résultats de ces modèles est faible comparée à l'évolution moyenne prédite. Ceci sert de « laboratoire numérique » pour une utilisation du modèle schématique de Niiler-Kraus. La simplicité de ce modèle permet des gains importants en temps calcul, de l'ordre d'un facteur 10, par rapport aux performances de Mellor-Durbin et Therry-Lacarrère.

ABSTRACT

Tests with typical atmospheric forcings are performed in order to compare short-term predictions obtained by three mixed layer models (bulk model : Niiler-Kraus, K model : Mellor-Durbin, KE model : Therry-Lacarrère). The scattering between their results is weak compared to their averaged prediction. These « numerical laboratory » experiments are useful for an allowance of the Niiler-Kraus model as an effective tool for mixed-layer simulation. The simplicity of this model makes it ten times faster in computer time than the ones of Mellor-Durbin and Therry-Lacarrère.

1. POSITION DU PROBLÈME

Introduction

En l'espace de quelques jours, l'action de l'atmosphère (flux thermiques et mécaniques) peut modifier la couche superficielle océanique de façon importante. Elsberry et Garwood (1978) en décrivent un exemple au point P (50 °N, 145 °W). Un cas similaire est illustré par la figure 1 qui représente la température de surface au point R (47 °N, 17 °W) entre le 1/7 et le 1/11/1983 : durant la tempête du 31/8-03/9, une chute de plusieurs degrés a lieu en moins de trois jours (nous reviendrons plus loin sur cette situation). D'autres situations intéressantes ont été décrites dans la littérature scientifique notamment par Le Saos et Mariette (1981) pour des expériences dans les golfes de Gascogne et du Lion.

Intérêt de la modélisation

Modéliser cette évolution à court terme peut être utile :

— pour une meilleure connaissance des mécanismes physiques
— pour des besoins militaires (cf. Clancy et Pollak 1983)
— pour des besoins de la pêche
— pour des études climatologiques.

Ce dernier point nécessite d'être précisé. L'érosion automnale de la thermocline est constituée d'une succession d'approfondissements rapides

(1) modèle local sans résolution de l'équation différentielle de l'énergie cinétique turbulente.
(2) modèle local avec résolution de l'équation différentielle de l'énergie cinétique turbulente.

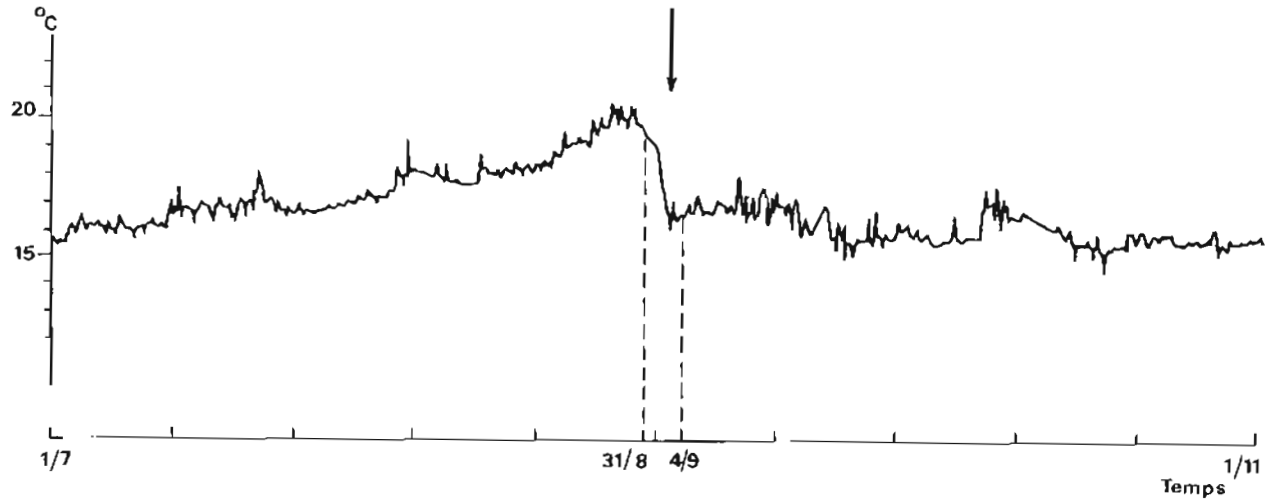


FIG. 1. — Température de surface de la mer au point R entre le 1/7 et le 1/11/83. La flèche verticale indique la baisse de température lors du fort coup de vent du 30/8-2/9 (la période utilisée dans le cas type n° 4 se situe entre les traits en pointillés).

(i.e. quelques jours) de la couche de mélange sous l'action de tempêtes. De plus, le cycle diurne solaire peut provoquer des variations diurnes de l'ordre de 1 °C pour la température de surface océanique. Une simulation correcte du cycle annuel de la thermocline nécessite une prise en compte adaptée de ces phénomènes à court terme, en particulier pour corriger les erreurs dues à l'utilisation de grands pas de temps dans les modèles climatologiques.

Moyens de la modélisation

De nombreux modèles unidimensionnels ont été proposés depuis celui de Munk et Anderson (1948) : se référer par exemple aux articles de revue de Garwood (1979), Zilinkevitch et al. (1979) et Lacombe (1972). Le but de cet article n'est pas de proposer un nouveau modèle mais de comparer les résultats de ceux qui existent déjà puis de **choisir un modèle simple** dont les résultats sont en accord avec ceux de modèles plus exacts physiquement mais plus compliqués numériquement. Aussi nous avons utilisé trois modèles de complexités différentes :

— Modèle local de Therry et Lacarrère (noté TL)
Quatre équations différentielles locales (température, courant horizontal, énergie cinétique turbulente) sont résolues. Pour une description de ce modèle, se référer à Therry et Lacarrère (1983) et André et Lacarrère (1985) où des comparaisons par rapport à un modèle du troisième ordre ont été effectuées. Ce modèle nous a été gracieusement fourni par P. Lacarrère.

— Modèle local de Mellor et Durbin (noté MD)
Trois équations différentielles locales (température, courant horizontal) sont résolues. Ce modèle correspond à celui de niveau 2 de Mellor et Yamada (1974) qui le comparèrent à des modèles d'ordre plus élevés. Pour une description de ce modèle, se référer à Mellor et Durbin (1975). Ce modèle nous a gracieusement été fourni par P. Klein.

— Modèle intégral simplifié de Niiler et Kraus (noté NK)
La couche de mélange est supposée complètement mélangée. Deux équations différentielles sont alors résolues pour toute la couche de mélange : elles déterminent la profondeur de la couche de mélange et sa température. Ce modèle nous a été gracieusement fourni par P. Gaspar, avec l'aide de A. Ratier.

Ce dernier modèle a été décrit par Niiler et Kraus (1977). Lors de l'expérience MILE, Davis, de Szoeke et Niiler (1981) (noté DSN dans le reste de cet article) utilisèrent le modèle complet de Niiler et Kraus pour simuler l'évolution de la couche superficielle océanique près du point P entre le 19 août et le 6 septembre 1977. Ce modèle nécessite l'ajustement de trois constantes pour la fermeture de l'équation de l'énergie potentielle : une constante m_0 pour la turbulence générée par le vent, une constante m_c pour la turbulence générée par une perte thermique en surface pour l'océan, une constante m_s pour la turbulence générée par le cisaillement du courant au bas de la couche de mélange. Le terme m_c est pris égal à 0,83 d'après les résultats de Deardoff et al. (1969). Le meilleur ajustement entre observations et simulations par DSN fut trouvé pour les valeurs $m_s = 0{,}48$ et $m_0 = 0{,}39$. Cependant le choix $m_s = 0$ et $m_0 = 0{,}69$ a donné aussi de bons résultats (figure 5b de DSN). Ce dernier choix de constantes présente un grand avantage : les équations en température et courant deviennent découplées. L'évolution de la température peut être

alors modélisée en ne résolvant que les seules équations différentielles pour la température et la profondeur de la couche de mélange. Nous adoptons ce procédé et l'appelons modèle simplifié de Niiler — Kraus. Ses équations s'écrivent :

(Bilan de l'énergie potentielle)

$$H(\delta_t h)\,\delta_t h\,(\rho_h - \rho_m)\,g\,\frac{h}{2} = m_0 \rho\, U_*^3 - \frac{\alpha}{C}\,g$$

$$\left[\frac{h}{2}(Q_0 - R_h) + \frac{h}{4}\,m_C(Q_0 - |Q_0|) - \int_{-h}^{0} R_z \delta_z\right]$$

(Evolution de la température)
pour : $0 > z > -h$

$$h\,\delta_t T_m + (T_m - T_h)\,\delta_t h = \frac{1}{\rho C}(Q_0 - R_h)$$

$$T_z = T_m$$

pour : $z < -h$

$$\delta_t T = \frac{1}{\rho C}\,\delta_z R_z$$

(La liste des symboles est donnée en Annexe)

Les données en entrée sont :

— les valeurs du rayonnement solaire et du bilan thermique en surface ainsi que le module de la tension du vent (et non pas une de ses composantes horizontales comme pour les modèles TL et MD)

— le profil initial de température et le profil de la pénétration du rayonnement solaire

Les variations de la masse volumique de l'eau sont considérées n'être dues qu'aux variations de températures, la salinité étant prise comme constante.

Notre démarche imite celle d'autres auteurs : Thompson (1976), Gaspard (1985) et Martin (1985) ont faits des comparaisons entre différents modèles mais principalement pour des simulations à long terme.

Choix des tests

Nous allons comparer les réponses de ces modèles dans quatre cas typiques de forçage atmosphérique :

— vent fort et flux thermiques nuls (forçage mécanique)

— vent fort accompagné d'un flux thermique négatif pour l'océan (forçages mécanique et thermique)

— rayonnement solaire et vent faible (forçages radiatif et mécanique)

— cas de la situation du 31/8-04/9 1983 au point R (cas composite)

Le cas d'un forçage par de forts flux thermiques négatifs avec un vent faible n'a pas été considéré car ceci est une situation peu vraisemblable pour la couche de mélange océanique (Klein 1980 et Klein et Coantic 1981). Par contre, ce cas de forçages thermiques seuls ou prépondérants est commun pour l'évolution de la couche de mélange atmosphérique, ce qui constitue une différence majeure entre la météorologie et l'océanographie pour tester ce type de modèles.

Pour les deux premiers cas considérés, nous avons pris pour le profil initial de température et pour les flux en surface, des valeurs utilisées par Klein (1980).

La force de Coriolis est prise égale à celle à 47 °N c'est-à-dire à une latitude proche de celle de l'expérience MILE.

2. TESTS

CAS n° 1 : forçage mécanique seul.

Les conditions de flux à la surface sont :

$$[\overline{u'w'}] = 2\,10^{-4}\ \mathrm{m^2/s^2},\quad [\overline{v'w'}] = 0\ \mathrm{m^2/s^2},\quad c\,[\overline{T'w'}] = 0\ \mathrm{W/m^2}$$

Ce forçage mécanique correspond approximativement à un vent de 11 m/s.

La figure 2 représente le profil vertical de température aux échéances 24, 48, 72, 96 heures (le profil initial est représenté en tireté sur la figure 2a). Les différences entre les résultats des trois modèles sont faibles : au bout de 96 heures, la température de surface et la profondeur de la couche de mélange ont varié de 1 °C et de 30 mètres avec des écarts inférieurs à 0,2 °C et 5 mètres suivant le modèle utilisé. Ces écarts représentent aux maximum 20 % de l'évolution totale moyenne.

Le modèle TL approfondit plus que celui de MD : une cause possible est l'absence de prise en compte par le modèle MD du gradient vertical de transport turbulent d'énergie cinétique turbulente. Ce problème a déjà été évoqué par plusieurs auteurs (Deardoff 1980, et la réponse de Kundu (1980)).

CAS n° 2 : forçages mécanique et thermique.

Les conditions de flux à la surface sont :

$$[\overline{u'w'}] = 2\,10^{-4}\ \mathrm{m^2/s^2},\quad [\overline{v'w'}] = 0\ \mathrm{m^2/s^2},\quad c\,[\overline{T'w'}] = -250\ \mathrm{W/m^2}$$

Les résultats des trois modèles (figure 3) sont de nouveau assez proches entre eux : au bout de 96 heures, la température de surface et la profondeur de la couche de mélange ont varié de 1,5 °C et 40 m avec des écarts de 0,2 °C et 8 m suivant le modèle utilisé. Ces écarts représentent 20 % de l'évolution totale moyenne.

De nouveau, TL approfondit plus que MD. L'imposition d'un flux thermique négatif de 250 W/m² en surface conduit à un approfondisse-

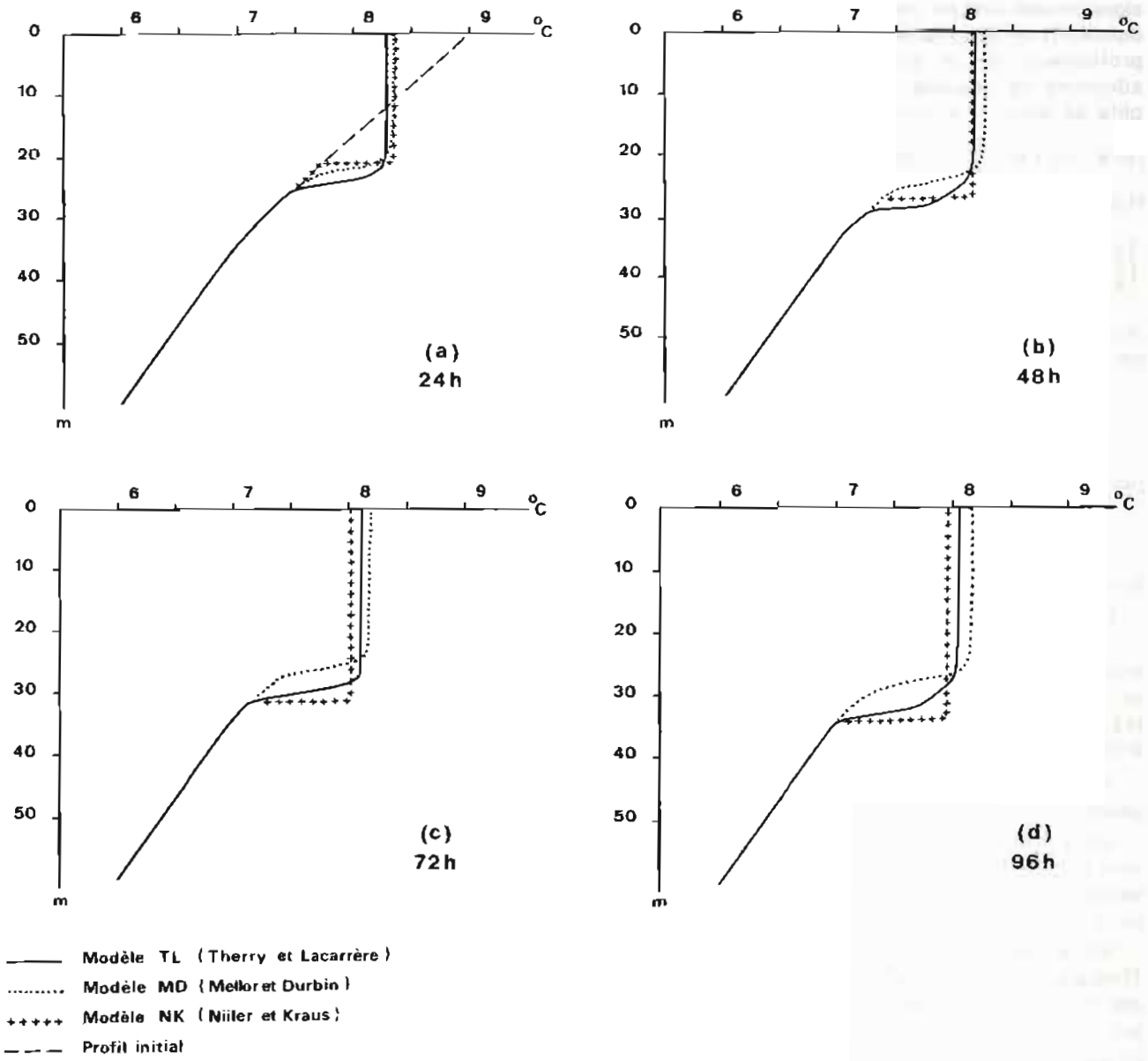


FIG. 2. — Cas type n° 1.
2 a) profil vertical de température au bout de 24 heures de simulation en utilisant les modèles TL, MD et NK.
2 b) c) d) idem pour les échéances 48, 72, 96 heures.

ment plus profond de l'ordre de 10 m au bout de 96 h.

CAS n° 3 : forçages radiatif et mécanique.

Un rayonnement de 300 W/m² en surface est considéré avec les conditions

$$[\overline{u'w'}] = 0{,}25\ 10^{-4}\ \mathrm{m^2/s^2},\quad [\overline{v'w'}] = 0\ \mathrm{m^2/s^2}.$$

Les trois modèles donnent alors des résultats très proches (± 0,1 °C au bout d'un cycle diurne). Au bout de 12 heures, les écarts obtenus entre modèles sont de l'ordre de 5 % de l'évolution globale moyenne.

CAS n° 4 : cas composite.

Au point R, entre le 31/8 et le 4/9/83, nous disposions d'observations météorologiques horaires. A partir de formules semi-empiriques (Large et Pond 1981, Laevestu 1960), nous avons estimé les flux en surface (figures 4 a,b).

Cette série correspond à un fort coup de vent suivi par une période relativement calme où le rayonnement solaire est le terme prépondérant du bilan thermique. Le profil initial choisi correspond à celui mesuré le 31/8 à 22 heures, par la Frégate météorologique *France II*.

Les résultats des simulations des trois modèles

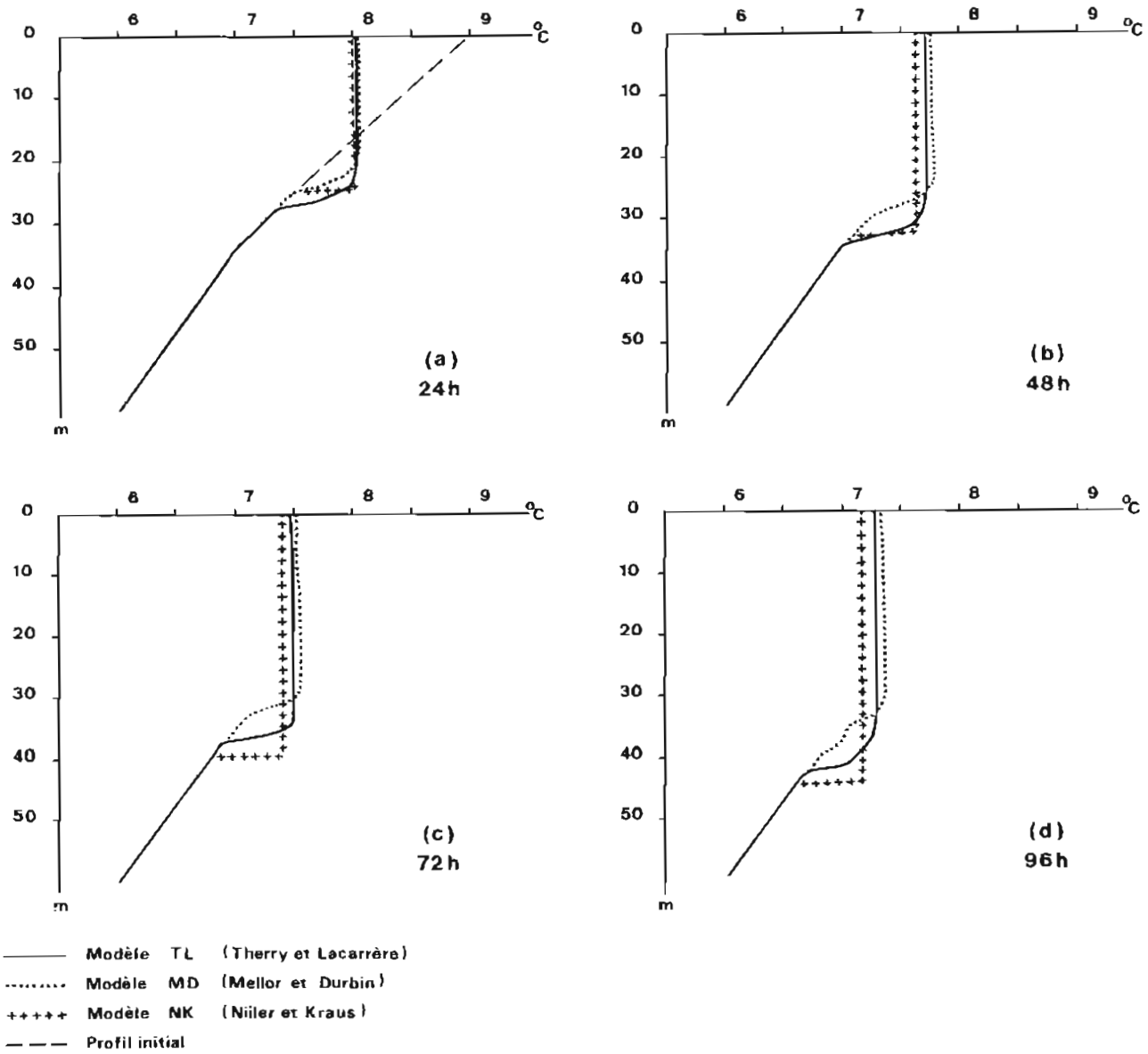


FIG. 3. — Semblable à la figure 2 mais avec le cas type n° 2. Le profil initial est le même que celui du cas type n° 1.

sont de nouveau assez proches (figure 5). La période de vent calme durant le 4/9 conduit à la création en surface d'une faible thermocline d'amplitude 0,2 °C et de profondeur 7 m.

Par rapport à la situation initiale, la température de surface et la profondeur de la couche de mélange ont varié de 2 °C et 20 m avec des écarts inférieurs à 0.5 °C et 7 m suivant les modèles. Ces écarts sont inférieurs à 25 % et 30 % de l'évolution moyenne globale.

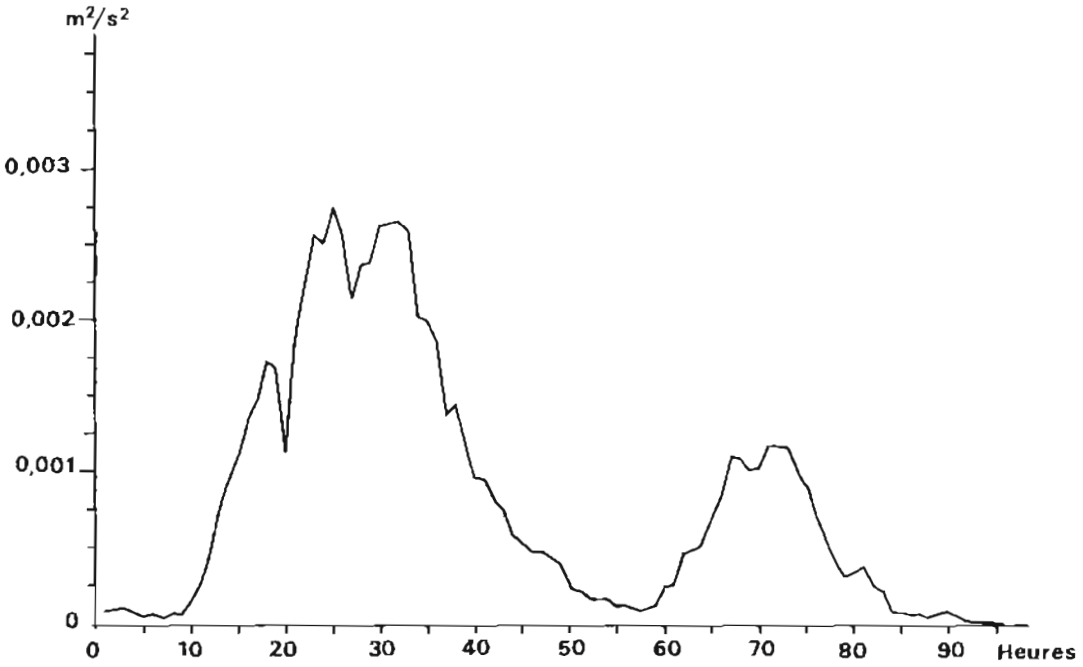
Performances numériques

Ces simulations ont été faites avec un pas vertical de 1 mètre et un pas de temps de 1 heure. La profondeur maximale considérée a été de 120 mètres et la durée simulée a été de 4 jours.

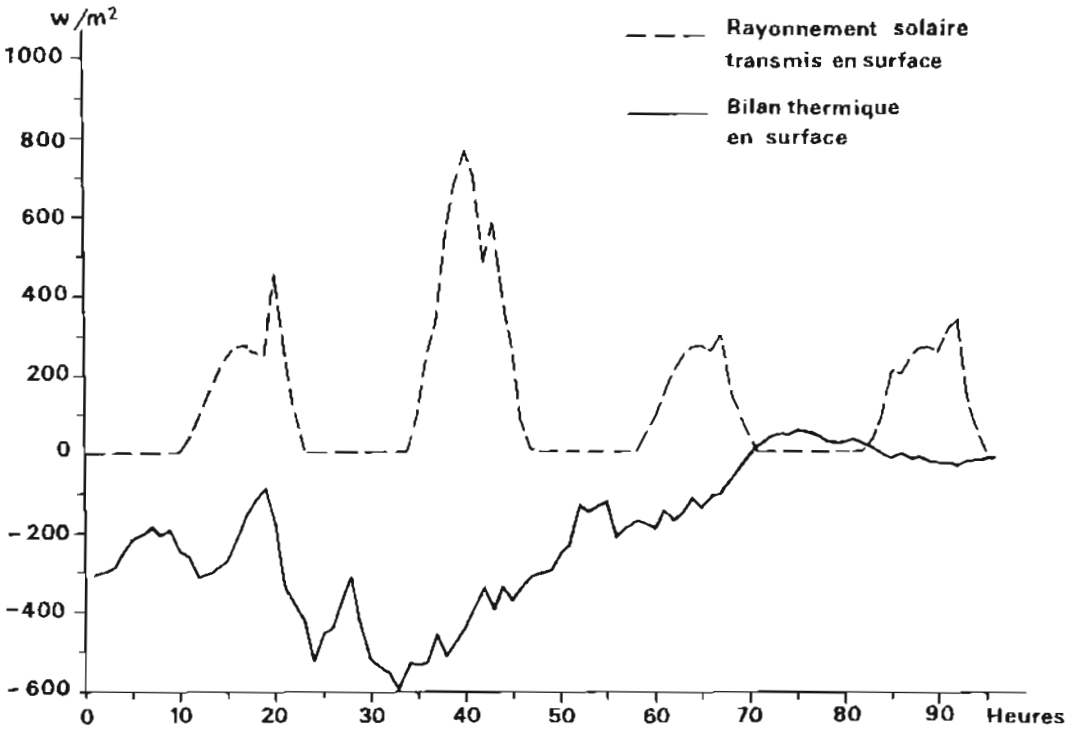
Sur le Cyber 175 de la Météorologie Nationale, pour les trois premiers cas étudiés, les performances des trois modèles considérés sont les suivantes :

modèle	TL	MD	NK
temps calcul (en secondes)	20 s	15 s	1,5 s
taille mémoire (en kilo-octets)	200 k.o.	100 k.o.	90 k.o.

(le temps calcul varie de ± 10 % suivant le cas type considéré)



(a)



(b)

FIG. 4. — Séries temporelles entre le 31/8 à 22 h (notée heure 1) et le 4/9 à 21 h pour les variables suivantes :
a) module du flux turbulent de quantité de mouvement en surface.
b) partie du rayonnement solaire pénétrant en surface et bilan d'échanges thermiques en surface (chaleur latente + chaleur sensible + rayonnement infrarouge émis et reçu).

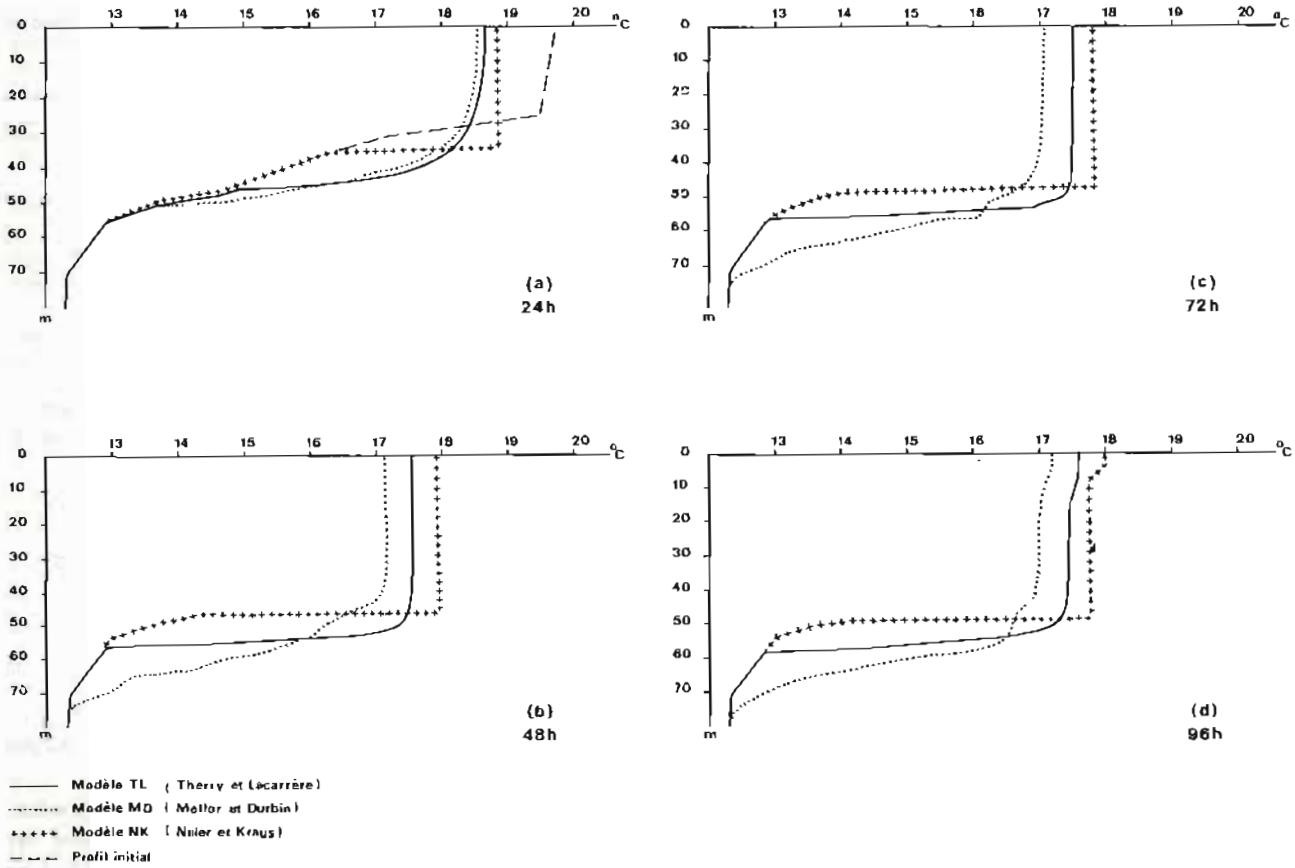


FIG. 5. — Semblable à la figure 2 mais avec le cas type n° 4.

3. CONCLUSION

Utilisation du modèle simplifié de Niiler Kraus

Les tests utilisés ont permis de comparer les résultats à court terme de modèles de complexités différentes. Ceci a servi de « validation numérique » partielle pour le modèle simple NK. La dispersion entre les résultats de TL, MD et NK est faible. Donc, pour les cas étudiés, par rapport à la physique décrite par les modèles compliqués, NK a des résultats corrects à une latitude moyenne.

La simplicité de ce modèle permet des gains importants en temps calcul de l'ordre d'un facteur 10 par rapport à des modèles avec traitement local de la turbulence comme MD ou TL.

BIBLIOGRAPHIE

ANDRÉ J.C. et P LACARRERE, 1985. — On the mean and turbulent structures of the oceanic surface layer as determined from a one-dimensional, third-order simulations. To be published in *J. Phys. Oceanogr.*

CLANCY R.M. et K. POLLAK, 1983. — A real-time synoptic ocean thermal analysis/forecast system. *Prog. Oceanogr.*, 12, 383-414.

DAVIS R.E., R. de SZOEKE et P.P. NIILER, 1981. — Variability in the upper ocean during MILE. Part II : Modelling the mixed layer response. *Deep-Sea Res.*, 28A, 1453-1475.

DEARDOFF J., G. WILLIS et D. LILLY, 1969. — Laboratory investigation of non-steady penetrative convection. *J. Fluid Mech.*, 35, 7-31.

DEARDOFF J., 1980. — Comments on "A numerical investigation of mixed layer dynamics". *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 1695-1696.

ELSBERRY R.L. et R.W. GARWOOD, 1978. — Sea surface temperature response to variations in atmospheric wind forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 8, 881-887.

GASPAR P.A., 1985. — An oceanic mixed layer model suitable for climatological studies: calibration and results over several years of simulations. A paraitre dans les Proceedings of the symposium on wave breaking, turbulent mixing and radio probing of the ocean surface. Sendai, Juillet 1984. D. Reidel. Publ. Co.

GARWOOD R.W., 1979. — Air-sea interaction and dynamics of the surface mixed layer. *R. Geo. Space Phys.*, 17, 1507-1524.

KLEIN J.P., 1980. — Modélisation des mécanismes turbulents dans les couches marines superficielles. Thèse Doctorat d'Etat. Université Aix Marseille II.

KLEIN P. et M. COANTIC, 1981. — A numerical study of turbulent processes in the marine upper layers. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 849-863.

KUNDU P.K., 1980. — Reply to J.W. Deardoff's comment. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 1697.

LACOMBE H., 1972. — Sur un modèle simple de thermocline saisonnière et sur sa prévision. Ser. D. (Scé. du 13.11.1972), 11-22.

LAEVASTU T., 1960. — Factors affecting the temperature of the surface layer of the sea. *Societas Scientarum Fennica*, Commentatismes Physo-Mathematical, Helsinki 25, n° 1.

LARGE W. et S. POND, 1981. — Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 324-336.

LE SAOS J.P. et V. MARIETTE, 1981. — Observation et simulation de l'évolution de la couche superficielle de l'océan. *Oceanol. Acta*, 4, 117-128.

MARTIN P.J., 1985. — Simulation of the mixed layer at OWS November and Papa with several models. Soumis au *J. Mar. Res.*

MELLOR G.L. et P.A. DURBIN, 1975. — The structures and dynamics of the ocean surface mixed layer. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 718-728.

MELLOR G.L. et T. YAMADA, 1974. — A hierarchy of turbulent closure model for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1806.

NIILER P. et E.B. KRAUS, 1977. — One dimensional models of the upper ocean. dans Modelling and Prediction of the upper layers of the ocean. Pergamon Press, Oxford, 143-172.

MUNK W. et E. ANDERSON, 1948. — Notes on the theory of thermocline. *J. Mar. Res.*, 17, 276-295.

THERRY G. et P. LACARRERE, 1983. — Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description. *Bound. Lay. Meteor.*, 25, 63-88.

THOMPSON R.O.R.Y., 1976. — Climatological numerical models of the surface mixed layer of the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 7, 470-471.

ZILINKEVITCH S., D. CHALIKOV et Y. RESNYANSKY, 1979. — Modelling the oceanic upper layer. *Oceanol. Acta*, 2, 219-240.

ANNEXE
SYMBOLES UTILISÉS

α coefficient d'expansion thermique

δ_x dérivée partielle par rapport à la variable x

ρ masse volumique de l'eau de référence

ρ_z masse volumique de l'eau à la profondeur z

C chaleur spécifique de l'eau à pression constante

P paramètre de Coriolis

g valeur absolue de l'accélération de la pesanteur

h profondeur de la couche de mélange

H fonction d'Heaviside (le produit H $(\delta_t h)$ $\delta_t h$ correspond à la vitesse d'entrainement au bas la couche de mélange)

X_m valeur de la variable X dans la couche mélangée

Q_0 somme des termes de rayonnement infrarouge, de rayonnement solaire, chaleur latente, chaleur sensible à la surface de l'océan

R_z rayonnement solaire arrivant à la profondeur z

t temps

T_z température à la profondeur z

U_* vitesse de frottement dans l'eau (i.e. la racine carrée du module de la tension du vent en surface divisé par la masse volumique de l'eau)

z coordonnée verticale ascendante

PARTIE 2

TEST SUR UNE UTILISATION OPÉRATIONNELLE SIMPLE D'UN MODÈLE D'ÉVOLUTION À COURT TERME DE LA COUCHE DE MÉLANGE OCÉANIQUE

par

M. J. SAUVEL
Ingénieur de l'Armement (Hydrographe)
Bureau d'Etudes Météorologie Nationale — Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
2, avenue Rapp — 75340 Paris Cédex 07

RÉSUMÉ

Deux ans de données au point P sont utilisées pour tester une utilisation opérationnelle d'une version simplifiée du modèle de Niiler-Kraus (1977).

L'écart entre évolutions prédites et observées est important comparé aux variations réelles enregistrées, pour les échéances trois et sept jours. Diverses possibilités de minimiser cet écart sont envisagées et discutées.

ABSTRACT

With two years of data at O.W.S. P, we test an operational use of a simplified version of the model of Niiler-Kraus (1977).

The difference between predicted and observed temperatures has a large size compared to real variations, for the three and seven days forecasts. Attempts to minimize this difference are considered and discussed.

1. POSITION DU PROBLÈME

Modèle disponible

Un modèle simple de couche de mélange a été décrit par Niiler et Kraus (1977) et utilisé de façon réussie par Davis, Niiler et de Szoeke (1981) lors de l'expérience MILE (Mixed Layer Experiment). Dans l'article (Partie 1) précédent, ce modèle (noté NK) a été comparé à d'autres modèles plus complets dans la description de la turbulence (Therry et Lacarrère 1983, Mellor Durbin 1975), mais aussi plus coûteux en temps de calcul.

Démarche suivie

Comment utiliser opérationnellement ce modèle ? La réponse la plus simple est d'adopter la démarche suivante :

A) Obtention d'un profil vertical de température mesuré à l'instant t_0

B) Obtention des flux à la surface de la mer entre les instants t_0 et t_1

C) Utilisation du modèle NK pour déterminer l'évolution du profil initial (A) sous l'effet des flux (B). Le profil de température à l'instant t_1 est alors calculé.

Dans cet article, nous étudierons cette démarche simple en nous plaçant dans des conditions favorables. Ceci nécessite :

(1) des données de bonnes qualités

(2) une quasi homogénéité horizontale de l'océan dans un rayon d'une centaine de kilomètres autour du point considéré, pour pouvoir appliquer un modèle uni-dimensionnel.

Pour ceci, nous avons pris les données de la station météorologique canadienne O.W.S. P (50 °N, 145 °W) en 1970 et 1971 (figure 1). Les profils verticaux de température océanique ont été mesurés en principe toutes les 3 heures. Les conditions météorologiques ont été observées toutes les 3 heures. De nombreux auteurs ont utilisé des données de cette station et elles sont

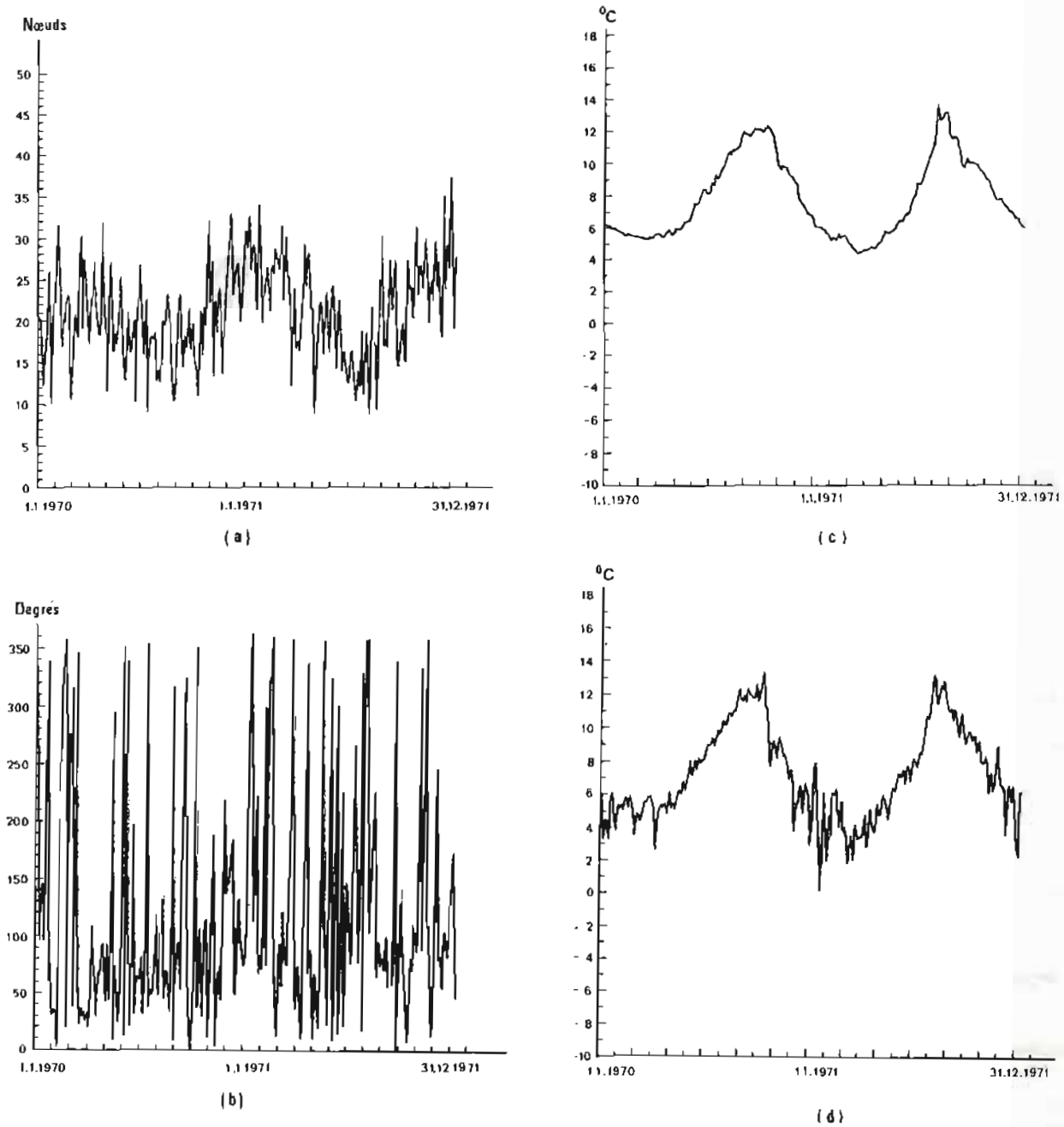


FIG. 1. — Série temporelle entre le 1er janvier 1970 et le 31 décembre 1971 pour les variables :
(a) Force du vent (en nœuds)
(b) Direction du vent (0° est le Nord Géographique)
(c) Température de l'eau à la surface de la mer (en °C)
(d) Température de l'air à la surface de la mer (en °C)
(Les valeurs représentées sont des moyennes sur 3 jours)

considérées comme étant de bonne qualité, ceci répond à l'exigence (1).

La zone autour du point P a une advection faible (elle est loin du plateau continental et est située sur le côté Est d'un océan). Cette advection faible a permis les études à long terme de Gaspar (1985) et Martin (1985) et à court terme de Davis, Niiler et de Szoeke (1981), entre autres. Ceci répond à l'exigence (2).

Comme échéance de cette utilisation à court terme, nous prenons les durées 3 jours (cf. Clancy et Pollak, 1983) et 7 jours.

Données d'entrée du modèle

— *Profils thermiques*

Nous avons considéré l'ensemble des couples de profils thermiques océaniques séparés de

7 jours, parmi ces données du point P. La figure 2 représente le nombre mensuel de couples obtenus. Ceci donne un total de 1980 couples. Nous avons aussi considéré les couples de profils thermiques séparés de 3 jours et dont le profil initial appartient au premier ensemble.

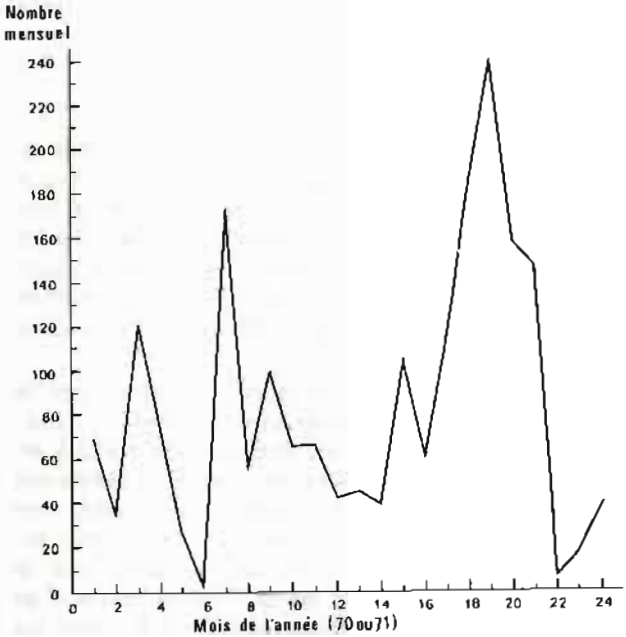


FIG. 2. — Nombre mensuel de couples de mesures bathythermiques espacées de 7 jours.

— *Flux à la surface de la mer*

Les observations météorologiques du point P se composent de données de vent (force et direction), de température de l'air sec, de température de l'air humide, de température de surface de l'océan, et de la nébulosité (mesurée en octas). A partir de ceci, les flux turbulents mécaniques et thermiques ont été calculés en utilisant des formules semi-empiriques (Large et Pond 1981, et Laevestu 1966).

2. TESTS CHOISIS

Equation de base

Nous disposons de couples de profils thermiques observés : le profil initial de chaque couple servira de profil de départ pour l'utilisation du modèle NK. Le profil final calculé sera alors comparé au profil final observé. L'équation de base de cette comparaison est :

évolution réelle		évolution calculée		évolution non prise en compte
$T_n^{obs}(z)$	$- T_0^{obs}(z)$	$= T_n^{pred}(z)$	$- T_0^{obs}(z)$	$+ T_n^{obs}(z) - T_n^{pred}(z)$
symboles : $R(z)$		$P(z)$		$E(z)$
erreur par rapport à la persistance				erreur par rapport à la prévision du modèle

avec les notations suivantes :

- T température
- z profondeur
- pred calculée
- obs observée
- 0 à l'instant initial
- n à l'échéance n jours (n = 3 ou 7)

Les trois termes de cette équation correspondent aux notions suivantes :

$R(z)$ est ce que nous voulons obtenir
$P(z)$ est ce que nous connaissons grâce à l'utilisation du modèle NK
$E(z)$ est ce que nous devons minimiser.

Déroulement des comparaisons

L'intérêt direct pour l'utilisateur opérationnel peut être jugé sur la valeur du rapport :

$$\frac{\| E(z) \|}{\| R(z) \|}$$

($\| \ \|$ désigne une norme quelconque)

Si ce rapport est égal à 0, la prévision par le modèle est parfaite. Si ce rapport est supérieur ou égal à 1, la persistance est meilleure que la prévision par le modèle.

De plus, il est intéressant d'étudier les caractéristiques du terme $E(z)$, que nous cherchons à minimiser. Pour celà, il est utile de regarder sa décomposition en moyenne et écart type (de manière à corriger un biais systématique éventuel). Ensuite, le calcul des corrélations entre les termes $R(z)$, $P(z)$ et $E(z)$ pourra permettre d'améliorer la prédiction par l'introduction d'un facteur multiplicatif devant le terme $E(z)$.

La connaissance de la température de surface pourrait aussi aider à prévoir les évolutions en profondeur. Aussi, nous calculerons les corrélations entre variations en surface et en profondeur.

3. RÉSULTATS

Ecarts quadratiques

L'écart quadratique moyen pour la variable X correspond à $(\sum X^2/N)^{1/2}$ avec $\sum$ somme portant

sur les N observations disponibles. Comme variable X, nous prendrons les termes R(z), P(z), E(z) avec z égal successivement aux profondeurs entre 0 et 90 mètres, avec un espace de dix mètres. Comme observations, nous prendrons les valeurs obtenues en 1970 et 1971, avec les 1980 couples de profils de températures précédemment décrits pour les échéances 3 jours et 7 jours. Les résultats pour ces écarts quadratiques sont représentés sur la figure 3.

Cette étude commence par l'analyse de l'écart quadratique moyen et non pas de l'écart type (centré) habituel car cet écart quadratique moyen représente, pour l'observateur, l'amplitude « moyenne » de l'erreur brute.

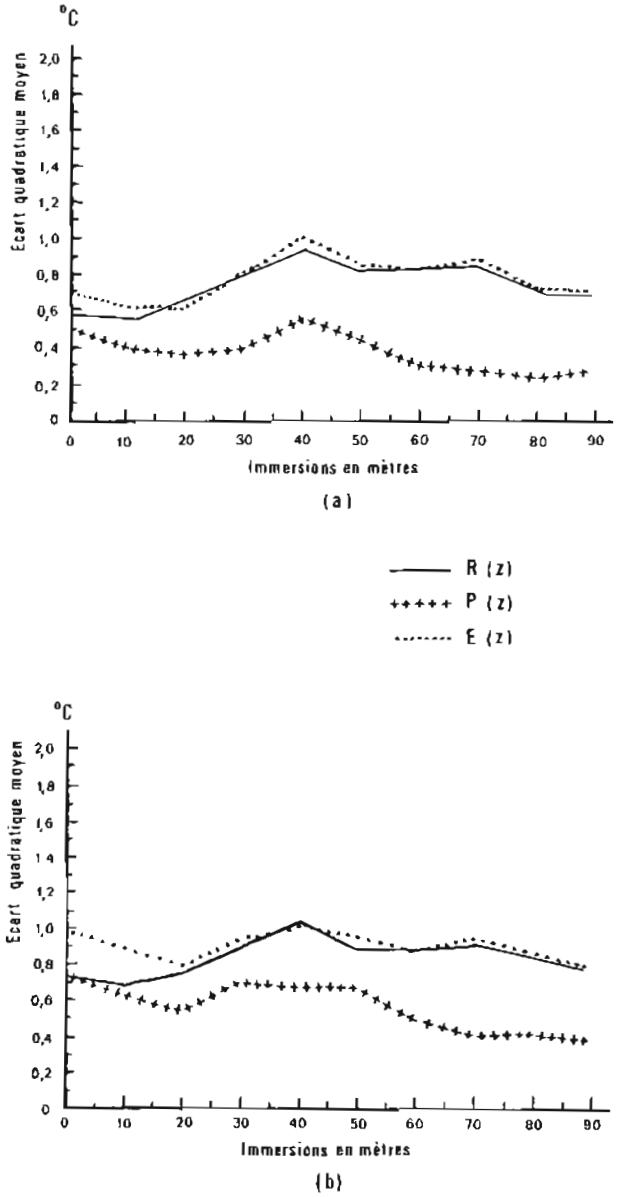


FIG. 3. — Ecart quadratique moyen pour les termes R(z), P(z), E(z) avec z variant de 0 à 90 mètres pour la période 1970-1971.
(a) à l'échéance 3 jours
(b) à l'échéance 7 jours

Terme P :

L'ordre de grandeur de ce terme est plus grand à 7 jours qu'à 3 jours. Ceci est lié à l'augmentation de l'intégrale temporelle des flux en fonction de la durée de l'échéance (à l'échéance 0 jour, cette intégrale est nulle). Les variations entre 0 et 45 mètres sont plus grandes que celles de profondeurs plus importantes. A la profondeur 90 mètres par exemple, la couche de mélange n'intervient qu'en hiver.

Termes R et E :

Ces termes sont de même ordre de grandeur, avec un maximum de variabilité à 40 mètres, ce qui correspond à une profondeur souvent atteinte lors de forts coups de vent. Les amplitudes de $\| R(z) \|$ et $\| E(z) \|$ varient peu entre 3 jours et 7 jours (courbes identiques entre 40 et 90 mètres). Le bruit représenté par le terme E est de même taille à ces deux échéances.

L'erreur E par rapport à la prédiction par le modèle est toujours supérieure à l'évolution prédite par le modèle. Ainsi P/E varie entre 0,7 en surface et 0,5 en profondeur pour l'échéance 7 jours. Ceci n'est guère satisfaisant mais une autre considération est plus gênante : cette erreur E est du même ordre de grandeur que le signal R à prévoir. Près de la surface (entre 0 et 20 mètres) E est même supérieure à R (dans un rapport 1,2 à 3 jours et 1,4 à 7 jours pour les variations en surface).

Dans ces conditions, la prévision par le modèle ne fait guère mieux que la persistance, voire pire pour presque toutes les profondeurs considérées. Cette taille importante du terme E nécessite de lui consacrer une étude plus approfondie.

Etude du terme E

La figure 4 représente la moyenne et l'écart type du terme E. Pour un nombre important d'observations, la moyenne m, l'écart type s.d. et l'écart quadratique r.m.s. sont reliés par la relation :

$$\text{s.d}^2 = \text{r.m.s.}^2 - m^2$$

$$\left(\text{avec s.d.}^2 = \sum_{1}^{N} (X - m)^2/(N - 1)\right)$$

— Moyenne :

Une moyenne non nulle correspond à un biais systématique dans l'approche du terme R par le terme P.

Cette moyenne est nulle au delà de 40 mètres. En surface, elle a des valeurs importantes; par contre, la moyenne de R est faible :

$$T_3^{pred}(0) - T_3^{obs}(0) = -0{,}40\,°C$$
$$T_7^{pred}(0) - T_7^{obs}(0) = -0{,}65\,°C$$
$$T_3^{obs}(0) - T_0^{obs}(0) = 0{,}04\,°C$$
$$T_7^{obs}(0) - T_0^{obs}(0) = 0{,}14\,°C$$

(en moyenne sur les données de 1970 et 1971)

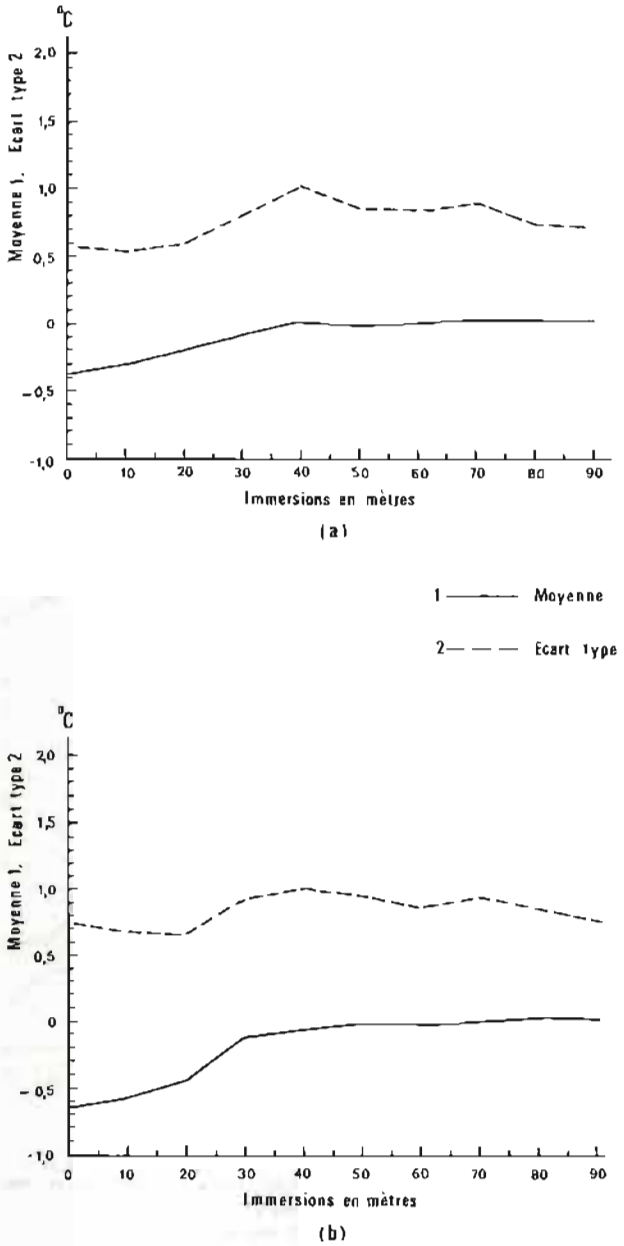


FIG. 4 — Moyenne et écart type pour le terme E(z) pour la période 1970-1971.
(a) à l'échéance 3 jours
(b) à l'échéance 7 jours

La même étude faite mois par mois montre que ce biais est faible en hiver et important en été : ainsi en juillet 1971, il y a un biais de 1 °C pour l'échéance 3 jours.

Cette erreur moyenne importante principalement en été près de la surface peut être liée à une mauvaise prise en compte du rayonnement solaire. Nous l'avons estimé à partir de données de nébulosité qui est un paramètre approximatif et qui peut varier localement.

Cette erreur moyenne peut être corrigée mois par mois ou de façon globale sur les deux années. Cependant, ceci n'est guère satisfaisant car cette correction a lieu après que les données aient été étudiées (« hindcast »). Une telle méthode peut être trompeuse (cf. Davis, 1977).

Même si il était possible de pré-corriger cet effet de biais, la taille de l'erreur E resterait importante car elle serait alors égale à l'écart type.

— Ecart type :

L'écart type est du même ordre de grandeur que l'écart quadratique. Ainsi en surface (le cas le plus défavorable) à 3 jours, nous avons :

s.d. = 0,55; $m = -0{,}4$; r.m.s. = 0,7 (en °C)

Un phénomène curieux a lieu en surface : l'écart type de E et l'écart quadratique de R sont deux courbes confondues (à 0,25 °C près), ce qui corrige le dépassement du r.m.s. de $\| R(z) \|$ par celui de $\| E(z) \|$ pour z variant entre 0 et 15 mètres (cf. figure 3).

— Conclusion partielle : même si le biais est réduit, E et R sont du même ordre de grandeur. Le terme E doit donc être encore étudié. Par contre, un point favorable consiste en la réduction de la zone où la persistance faisait mieux que la prédiction.

Corrélations

La figure 5 représente les corrélations entre les séries (R et E), (R et P), et (E et P). Une forte corrélation est trouvée entre R et E. Par contre, P n'est pas significativement correlé avec les séries R ou E. Aussi, il n'est guère possible d'améliorer la prédiction par le modèle en la corrigeant par un facteur multiplicatif.

Variations mois par mois

Ces études faites de façon globale sur deux années peuvent être refaites mois par mois. Pour augmenter le degré de significativité, nous avons groupé ensemble les données des mois de même nom en 1970 et 1971.

La figure 6 représente les écarts quadratiques moyens aux profondeurs 0, 30 et 60 mètres, pour une échéance de trois jours. Des conclusions semblables à celles de l'étude globale annuelle sont obtenues : l'évolution réelle, R(z), et l'erreur associée à la prévision, E(z), ont une taille supérieure à l'évolution prédite par le modèle, P(z). L'étude des corrélations montre également que R(z) et E(z) sont peu correlés à P(z).

L'étude des variations inter-annuelles montre des différences importantes en ce qui concerne les dates d'approfondissements de la thermocline en automne. Ceci est lié au régime des vents sur la zone considérée.

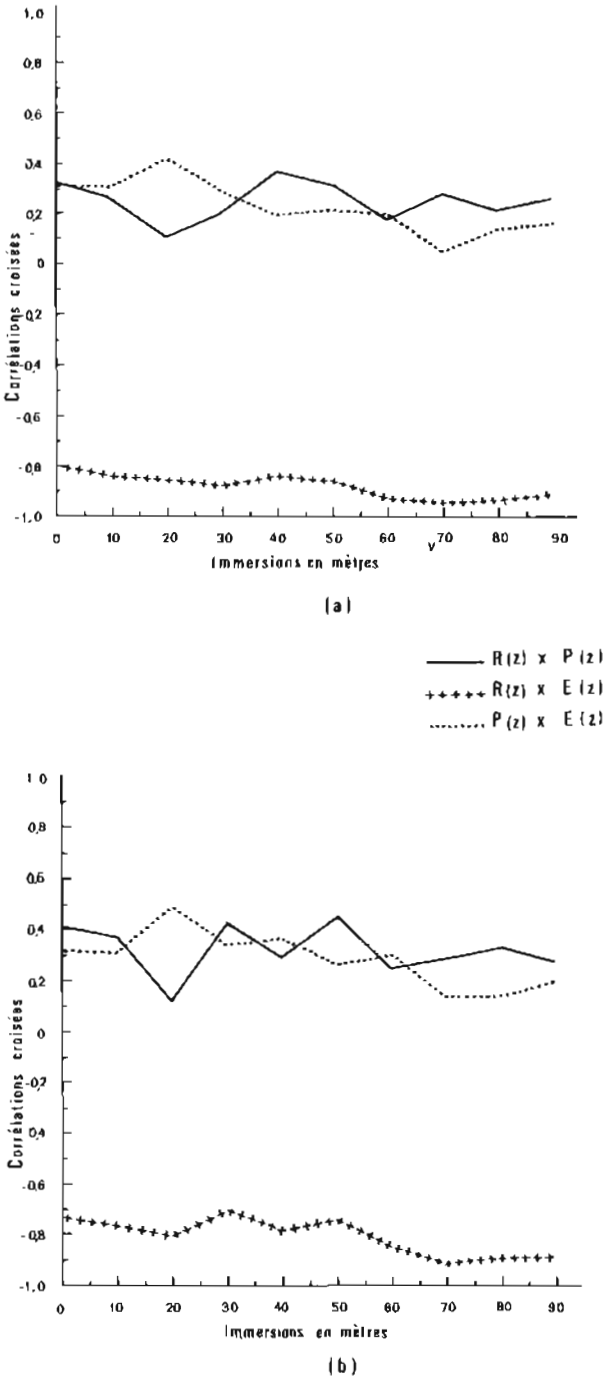


FIG. 5. — Corrélations entre R(z) et E(z), R(z) et P(z), E(z) et P(z) pour la période 1970-1971.
(a) à l'échéance 3 jours
(b) à l'échéance 7 jours

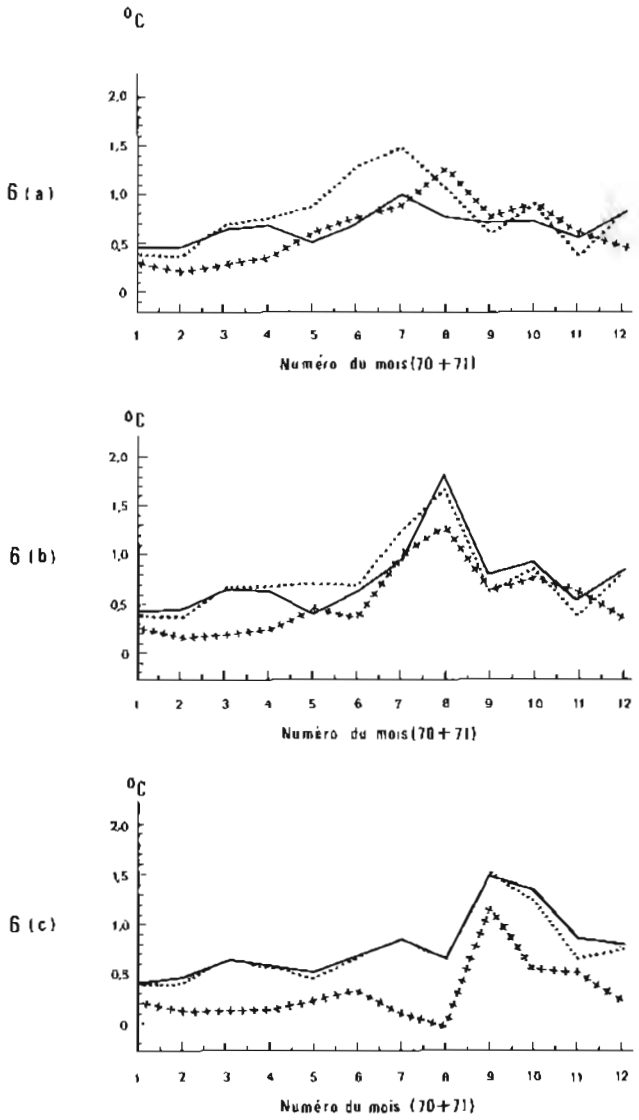


FIG. 6. — Ecart quadratique moyen, mois par mois, pour les termes R(z), P(z) et E(z) :
(a) à la profondeur 0 mètre
(b) à la profondeur 30 mètres
(c) à la profondeur 60 mètres
(Les mois de même nom ont été groupés. Ainsi, le mois de janvier représente les mois de janvier 1970 et janvier 1971).

Profondeur de la couche de mélange

Au lieu de s'intéresser aux variations de température, il est possible d'examiner les changements de la profondeur de la couche de mélange. Comme localisation de celle-ci, nous adoptons la profondeur où il y a un écart de température de 0,1 °C par rapport à la surface. Cette définition est la même que celle utilisée par Davis, de Szoeke et Niiler (1981).

Lors d'un réchauffement diurne, une thermocline de surface de moins de 10 mètres peut être créée pendant le jour et être détruite pendant la nuit : le changement de température de surface peut atteindre 1 °C (Halpern et Reed 1976, Price, Weller et Pinkel 1985), et provoquer des variations diurnes de plus de 30 mètres pour la localisation de la profondeur associée à un écart de 0,1 °C avec la surface. Ces brusques variations illustrent la difficulté de définir la notion de profondeur de couche de mélange.

4. DISCUSSION

D'après les résultats de la partie 3), l'équation (1) comprend deux termes R et E, très proches en intensité et fortement correlés, et un terme P qui est plus faible et peu lié aux deux premiers.

L'erreur E peut être due (cf. démarche initiale) à trois causes :

A) modèle de couche de mélange mal choisi ou inadapté
B) flux en surface erronés
C) non-représentativité des profils thermiques mesurés

Etude de l'erreur A

Au vue de modèles unidimensionnels plus complexes, le modèle NK a donné des résultats corrects (cf. Partie 1 précédente), avec des écarts faibles par rapport à une « vérité numérique ».

La non-prise en compte de l'advection peut également jouer un rôle important. Ceci est illustré par les variations de température à 90 mètres en dehors de la période où celle-ci est atteinte par la couche de mélange. Cependant la prévision de l'advection nécessite non seulement un modèle plus complexe, mais surtout la connaissance de données correctement espacées géographiquement (avec un pas d'espace de moins de 100 kilomètres), de manière à calculer les gradients de température dus à la circulation méso-échelle, par exemple.

Etude de l'erreur B

Le calcul des flux par des méthodes semi-empiriques est peu fiable notamment pour le calcul de l'échange par chaleur latente. Les difficultés de tels calculs ou de l'utilisation de sorties de modèles météorologiques sont illustrées par von Storch, 1985. Cependant, même si ces flux sont incorrects, cette erreur n'implique pas de façon directe une faible corrélation entre les termes R et P.

Etude de l'erreur C

Cette erreur porte à la fois sur le profil initial servant d'initialisation du modèle et sur le profil final utilisé comme observation à comparer avec le profil calculé.

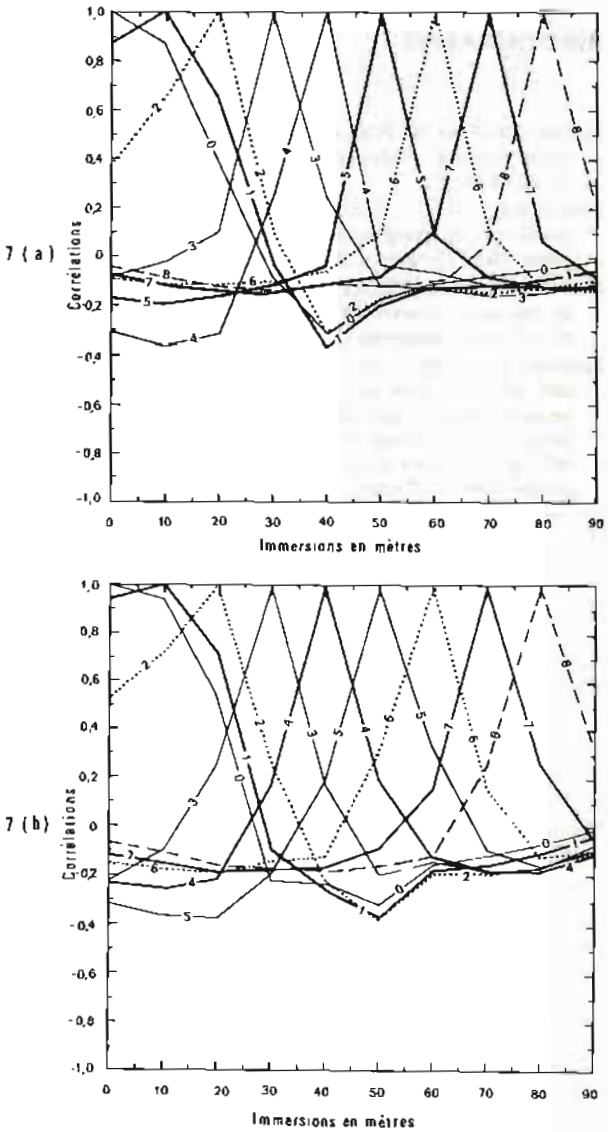
Plusieurs causes d'erreurs sont possibles :

— erreur de mesure (si celle-ci est systématique, elle n'intervient que peu)
— erreur d'aliasing. Les ondes internes peuvent jouer un rôle important. Pour les filtrer, il faudrait disposer d'un échantillonnage important dans le temps ou l'espace.

La prévision bathythermique opérationnelle du Fleet Numerical Oceanographic Center de l'U.S. Navy (Clancy et Pollak, 1983) rencontre des problèmes équivalents. Leur figure 7, page 413, illustre ces difficultés.

5. CORRECTIONS EN UTILISANT DES TEMPÉRATURES DE SURFACE

Pour pallier au manque de données bathythermiques dans l'espace, il est tentant d'utiliser des corrections à partir de données de température de



Légende : La courbe -n- correspond à la profondeur de référence : n x 10 mètres (0 ≤ n ≤ 8)

FIG. 7 — Corrélations entre les séries à différentes profondeurs pour les variables :
(a) R(z)
(b) P(z)
(pour la période 1970-1971)

surface. En effet celles-ci sont nombreuses, notamment à cause des observations par radiomètres embarqués à bord de satellites.

Aussi nous avons correlé les séries R (0) avec les séries R(z) avec z variant entre 10 et 90 mètres (cf. figure 7a). A 15 mètres, la corrélation tombe à 0,5 et devient peu significative. Aussi il n'est pas possible d'induire des variations de températures en profondeur à partir de données en surface en utilisant une correction linéaire.

Par contre, la figure 7b montre que le modèle NK reproduit correctement les structures de la figure 7a, et les échelles d'espace associées.

BIBLIOGRAPHIE

CLANCY R.M. et K. POLLAK, 1983. — A real-time synoptic ocean thermal analysis/forecast system. *Prog. Oceanogr.*, 12, 383-414.

DAVIS R.E., 1977. — Techniques for statistical analysis and prediction of geophysical fluid systems. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, 8, 245-277.

DAVIS R.E., R. de SZOEKE et P.P. NIILER, 1981. — Variability in the upper ocean during MILE. PART II : Modelling the mixed layer response. *Deep-Sea Res.*, 28A, 1453-1475.

GASPAR P.A., 1985. — An oceanic mixed layer model suitable fort climatological studies : calibration and results over several years of simulations. A paraitre dans les Proceedings of the symposium on wave breaking, turbulent mixing and radio probing of the ocean surface. Sendai, Juillet 1984. D. Reidel. Publ. Co.

HALPERN D. et R.K. REED, 1976. — Heat budget of the upper ocean under light winds. *J. Phys. Ocean.*, 6, 972-975.

KLEIN J.P., 1980. — Modélisation des mécanismes turbulents dans les couches marines superficielles. Thèse Doctorat d'Etat. Université Aix Marseille II.

LAEVASTU T., 1960. — Factors affecting the temperature of the surface layer of the sea. *Societas Scientarum Fennica*, Commentatismes Physo-Mathematical, Helsinki 25, n° 1.

LARGE W. et S. POND, 1981. — Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 324-336.

MARTIN P.J., 1985. — Simulation of the mixed layer at OWS November and Papa with several models. Soumis au *J. Mar. Res.*

MELLOR G.L. et P.A. DURBIN, 1975. — The structures and dynamics of the ocean surface mixed layer. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 718-728.

NIILER P. et E.B. KRAUS, 1977. — One dimensional models of the upper ocean. Dans Modelling and Prediction of the upper layers of the ocean. Pergamon Press, Oxford, 143-172.

PRICE J.F., WELLER R.A. et R. PINKEL, 1985. — Diurnal cycling : observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling and wind mixing. Soumis au *J. Phys Ocean.*

SAUVEL J., 1985. — Choix d'un modèle d'évolution à court terme de la couche de mélange océanique. Rapport SHOM-METEO n° 2.

SAUVEL J., 1985. — Echelles temporelles et verticales pour la température océanique au point P en 1970 et 1971. Rapport SHOM-METEO n° 4.

VON STORCH H., 1985. — A comparative study of observed and GCM-simulated turbulent surface fluxes at the position of the Atlantic Weatherships. Soumis à *Dynam. Atmos. Oceans.*

THERRY G. et P. LACARRERE, 1983. — Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description. *Bound. Lay. Meteor.*, 25, 63-88.

PARTIE 3

ECHELLES TEMPORELLES ET VERTICALES POUR LA TEMPÉRATURE ET POUR SES VARIATIONS À COURT TERME AU POINT P (50° N, 145° W)

par

M. J. SAUVEL
Ingénieur de l'Armement (Hydrographe)
Bureau d'Etudes Météorologie Nationale — Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
2, avenue Rapp — 75340 Paris Cédex 07

RÉSUMÉ

Pour deux années (1970-1971) de données bathythermiques au point P, les fonctions d'auto-corrélation temporelles sont calculées pour la température et ses variations à trois et sept jours. Les échelles associées en surface sont un mois pour la température et 3 jours pour ses variations. Le niveau de bruit augmente avec la profondeur et est élevé comparé aux valeurs des variations à court terme.

Les résultats obtenus en croisant les séries à différentes profondeurs montrent que la température est fortement correlée verticalement, mais que les variations à sept jours ne le sont pas.

ABSTRACT

With two years (1970-1971) of data of vertical temperature profiles at Ocean Station P, the auto-correlation functions are computed for temperature and its three-days and seven-days variations. The associated scales at the sea surface, are 1 month for temperature and 3 days for its variations. The noise level increases with depth and is high compared to the values of short-term variations.

Results obtained with mixing series at different depths show that temperatures are well vertically correlated, but the seven-days variations are not.

1. POSITION DU PROBLÈME

Les fonctions de corrélations temporelles et spatiales sont un outil simple pour caractériser le comportement d'un phénomène physique pseudo-aléatoire (cf. Bendat et Piersol 1971 ou Chatfield 1980). L'étude de la température en un point de l'océan est un exemple d'utilisation et la connaissance de cette fonction intervient dans les applications suivantes :

— Taille des phénomènes prépondérants

La température océanique en un point fixe (latitude, longitude et profondeur) varie sous l'influence de plusieurs phénomènes : ondes internes, réponse thermodynamique locale aux flux atmosphériques, circulation méso-échelle... Chacun de ces phénomènes a des échelles de temps et d'espace horizontal allant de quelques heures et quelques kilomètres, au mois et au millier de kilomètres. Le temps de décorrélation caractérise l'échelle de temps associée au phénomène prépondérant (nous prenons comme temps de décorrélation l'échéance la plus courte pour laquelle la fonction de décorrélation est égale à 0,6). Cette recherche de prépondérance peut aussi être étudiée au moyen de l'analyse spectrale.

Saunders (1972), Richman, Wunsch et Hogg (1977) et le Groupe Tourbillon (1983), entre autres, se sont intéressés à ces problèmes d'échelles.

— Réseau d'appareils de mesure et assimilation de données

Suivre l'évolution d'un champ de températures océaniques nécessite un échantillonnage temporel suffisant pour en détecter les variations principales. La répétitivité des mesures doit donc avoir une période inférieure aux temps de décorrélation dans la zone considérée. En outre, cet échantillon-

nage doit porter sur des données préalablement filtrées, ou du moins, dont les niveaux d'énergie à « haute » fréquence sont significativement plus faibles que ceux des fréquences auxquelles on s'intéresse. De même, le poids associé à une donnée obtenue à l'instant t_0 dans un schéma d'assimilation à l'instant t sera une fonction décroissante du rapport $(t - t_0)/T$ (avec T temps de décorrélation). Le même raisonnement peut s'appliquer au choix des emplacements d'un réseau de mesures. Bretherton, Davis et Fandry (1976) ont étudié ceci en détail avec un exemple déduit de l'expérience MODE-73.

— *Nombre de degrés de liberté dans une étude statistique*

La confiance accordée à une loi statistique est déterminée en fonction du nombre d'évènements indépendants avec lesquels cette loi a été obtenue. Davis (1976) par exemple, a étudié ceci en détail aussi bien pour des prédictions que pour des postdictions (« hindcast »), en vue de la connaissance de téléconnections entre pressions et températures de surface dans le Pacifique Nord.

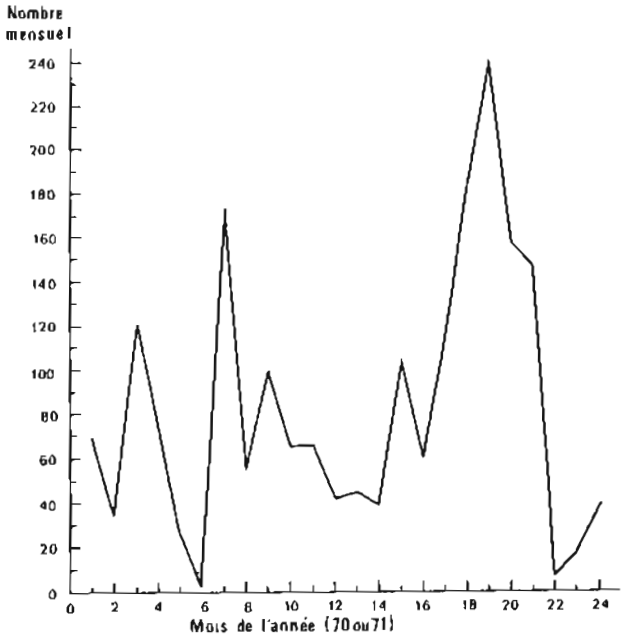


FIG. 1. — Nombre mensuel de couples de mesures bathythermiques espacées de 7 jours.

2. CORRÉLATIONS TEMPORELLES AU POINT P

Données

Les données bathythermiques de la station P (50° N, 145° W) ont souvent servi de bases pour des études de mécanismes océaniques (voir, entre autres, les travaux de Denman et Miyake 1973, et Gaspar 1985).

Aussi, nous avons pris deux ans, 1970 et 1971, de données au point P. Les profils verticaux de température océanique ont été mesurés en principe toutes les 3 heures. A partir de ces mesures, nous avons considéré l'ensemble des couples de profils thermiques observés distants de 7 jours. La figure 1 représente la répartition, mois par mois de ces couples. Plus de détails sur ces données sont fournis dans la thèse de Gaspar (1985) et dans l'article précédent (Partie 2).

Température

La figure 2 représente la fonction d'autocorrélation pour les températures aux profondeurs 0, 10, 30 et 90 mètres. La corrélation est faite jusqu'à 1 500 heures, c'est-à-dire environ 2 mois. Le calcul a porté sur les données des deux années 1970 et 1971. Du fait de la répartition inégale des données en fonction du temps, les résultats portant globalement sur l'ensemble de ces mesures ne traduisent pas forcèment des valeurs annuelles. Ils traduisent des calculs faits sur un ensemble de représentations d'une variable pseudo-aléatoire dont nous voulons connaître les caractéristiques. (Nous reviendrons sur cet aspect plus loin dans le texte)

La première échéance représentée sur la figure 2 est 3 heures. La valeur de la fonction d'autocorrélation est différente de 1 : 0,98 à 0 et 10 mètres, 0,93 à 30 mètres, 0,72 à 90 mètres. Ces écarts par rapport à l'unité correspondent au niveau du bruit d'échelles de temps inférieures à 6 heures. Il peut être lié (i) à des phénomènes physiques de courte période, des ondes internes de haute-fréquence par exemple, (ii) à un échantillonnage imparfait, mauvais calibrage des appareils de mesure par exemple. Bretherton, Davis et Fandry (1976) et Clancy (1983) ont décrit des méthodes pour minimiser ces erreurs. Le niveau de bruit le plus élevé est observé à 90 mètres ce qui suggère une détérioration de la mesure avec la profondeur. Pour calculer le temps de décorrélation en s'affranchissant de ce bruit initial, il est possible de faire une affinité en ramenant à 1 la valeur de la corrélation à 3 heures. Par cette affinité, une valeur nulle pour cette fonction d'auto-corrélation reste bien sûr nulle.

La valeur du temps de décorrélation varie de un mois en surface à 15 jours à 90 mètres. Ceci correspond à l'échelle de temps associée à la circulation méso-échelle et d'autres auteurs ont trouvé des ordres de grandeur comparables comme par exemple lors de la campagne Tourbillon qui a été effectuée sur la partie Est d'un bassin océanique. Une telle situation géographique est aussi le cas pour le point P.

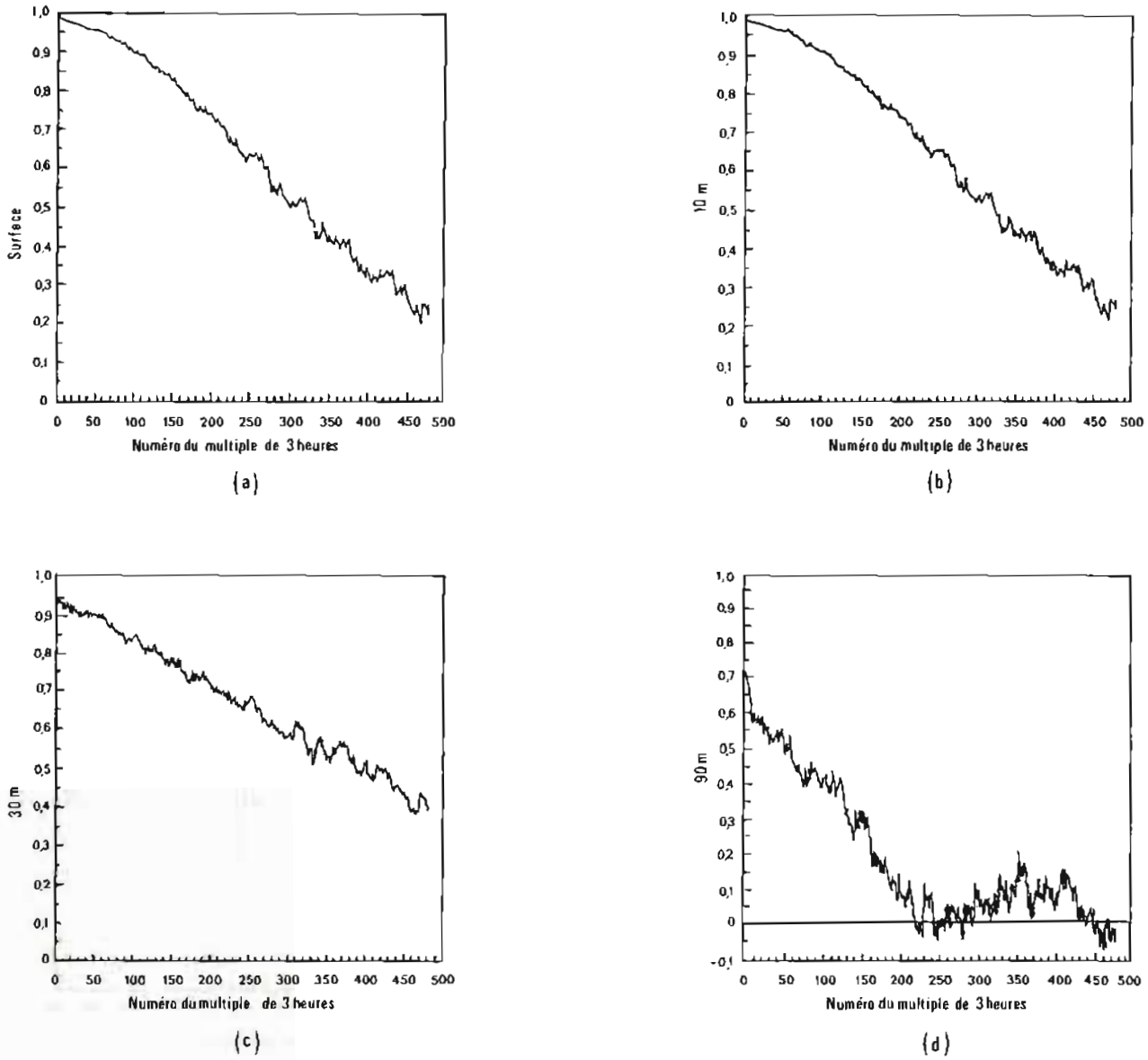


FIG. 2. — Auto-corrélations pour les séries de température en 1970 et 1971
(a) à la profondeur 0 mètre
(b) à la profondeur 10 mètres
(c) à la profondeur 30 mètres
(d) à la profondeur 90 mètres
(La graduation temporelle est en multiples de 3 heures).

Variations de températures à 7 jours

A partir des 1 980 couples de mesures bathythermiques espacées de 7 jours, nous avons calculé les variations de température associées. La figure 3 représente les fonctions d'auto-corrélations pour les profondeurs 0, 10, 30, 90 mètres.

Le niveau de bruit initial est élevé : à l'échéance 3 heures, les corrélations sont 0,72 à 0 mètre, 0,64 à 10 mètres, 0,50 à 30 mètres, 0,30 à 90 mètres. Aussi, le rapport signal/bruit est plus défavorable que pour le cas de l'étude de la température : le bruit restant est du même ordre de grandeur, par contre le signal est beaucoup plus faible. Ainsi, typiquement, les variations de la température à 7 jours sont de l'ordre de 0,7 °C en surface (cf. article précédent, Partie 2) alors que les écarts entre la température et sa moyenne sur 1970-1971 sont de l'ordre de 3 °C.

Il est possible de corriger, par affinité, les courbes de la figure 3. Cependant, à partir de 30 mètres ceci devient très hasardeux car le rapport Signal/(Bruit Initial) est très bas. Aussi, nous n'avons effectué cette correction que pour les profondeurs 0 et 10 mètres. Le temps de décorrélation associé est de l'ordre de 3 jours.

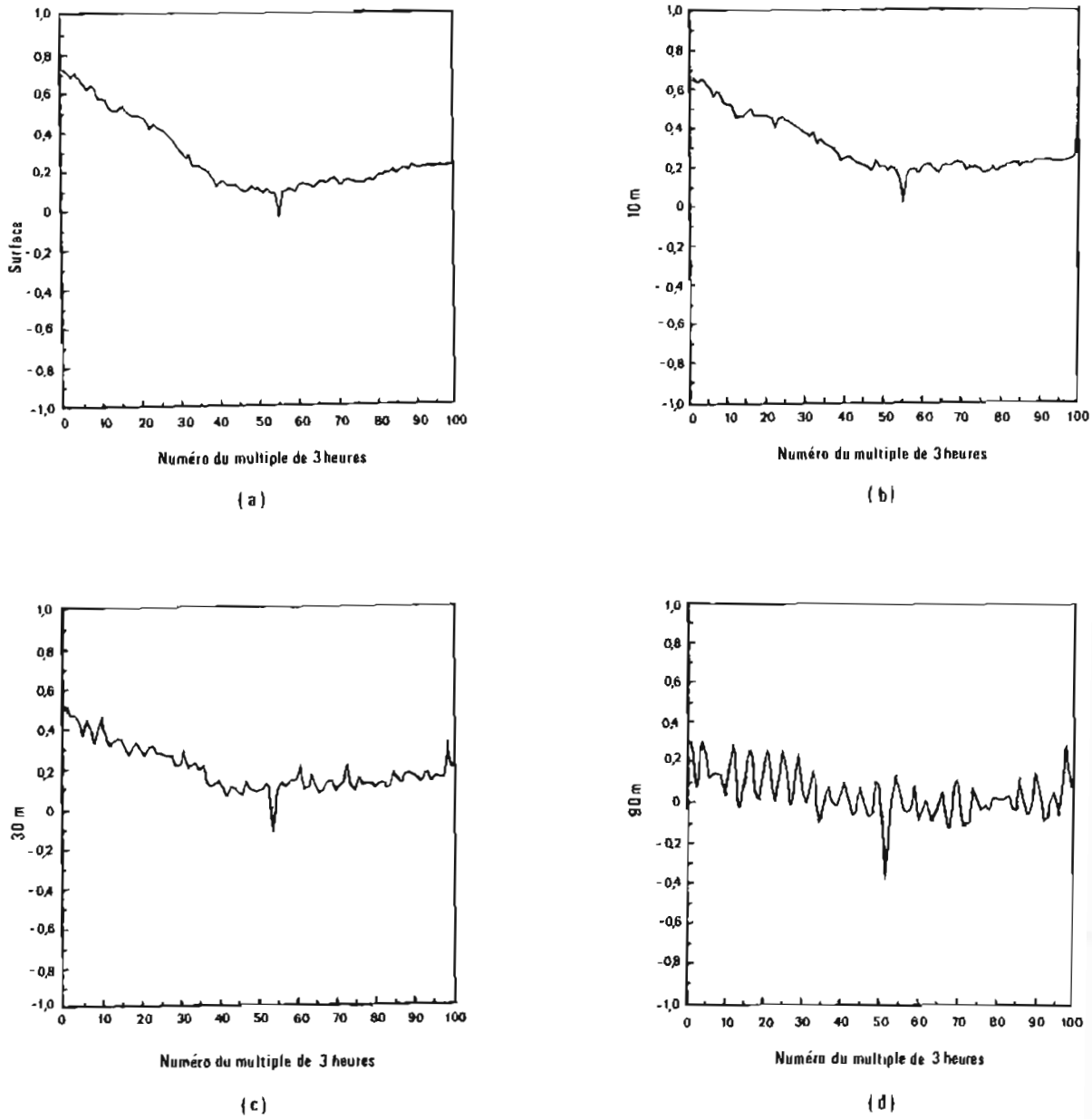


FIG. 3. — Semblable à la figure 2 mais pour les séries de variations de température à 7 jours. (Le pic vers le bas correspond à 7 jours).

Ceci est beaucoup plus court (rapport 1/10) que ceux trouvés pour l'étude de la température. La prévision de ces écarts par une méthode de régression est donc moins facile.

Nous avons utilisé 1 980 couples de mesures de températures. Avec N données, le seuil pour le niveau de confiance à 95 % est $-(1/N) \pm 2/(N^{0,5})$, c'est-à-dire $\pm 2/(N^{0,5})$ pour N grand. Dans notre cas, ce seuil correspond à 0,045. Sur la figure 3, beaucoup de valeurs de coefficients de corrélation sont supérieurs à ce seuil d'incohérence à 95 %. Cependant, leur interprétation est délicate en raison du niveau de bruit initial.

Nous avons aussi calculé les fonctions d'autocorrélations pour les variations de température à l'échéance 3 jours. Le niveau de bruit initial (ou plutôt pour 3 heures de décalage) est plus élevé qu'à 7 jours : 0,58 en surface, 0,47 à 10 mètres, 0,33 à 30 mètres et 0,19 à 90 mètres. La plus faible taille du signal à 7 jours qu'à 3 jours est une explication possible.

Etude saisonnière

Les calculs menés globalement sur deux ans, ont été refaits saison par saison ou plus exactement en janvier-février-mars, avril-mai-juin, juillet-août-septembre, octobre-novembre-décembre (cf. figure 4). Le niveau de confiance associé est

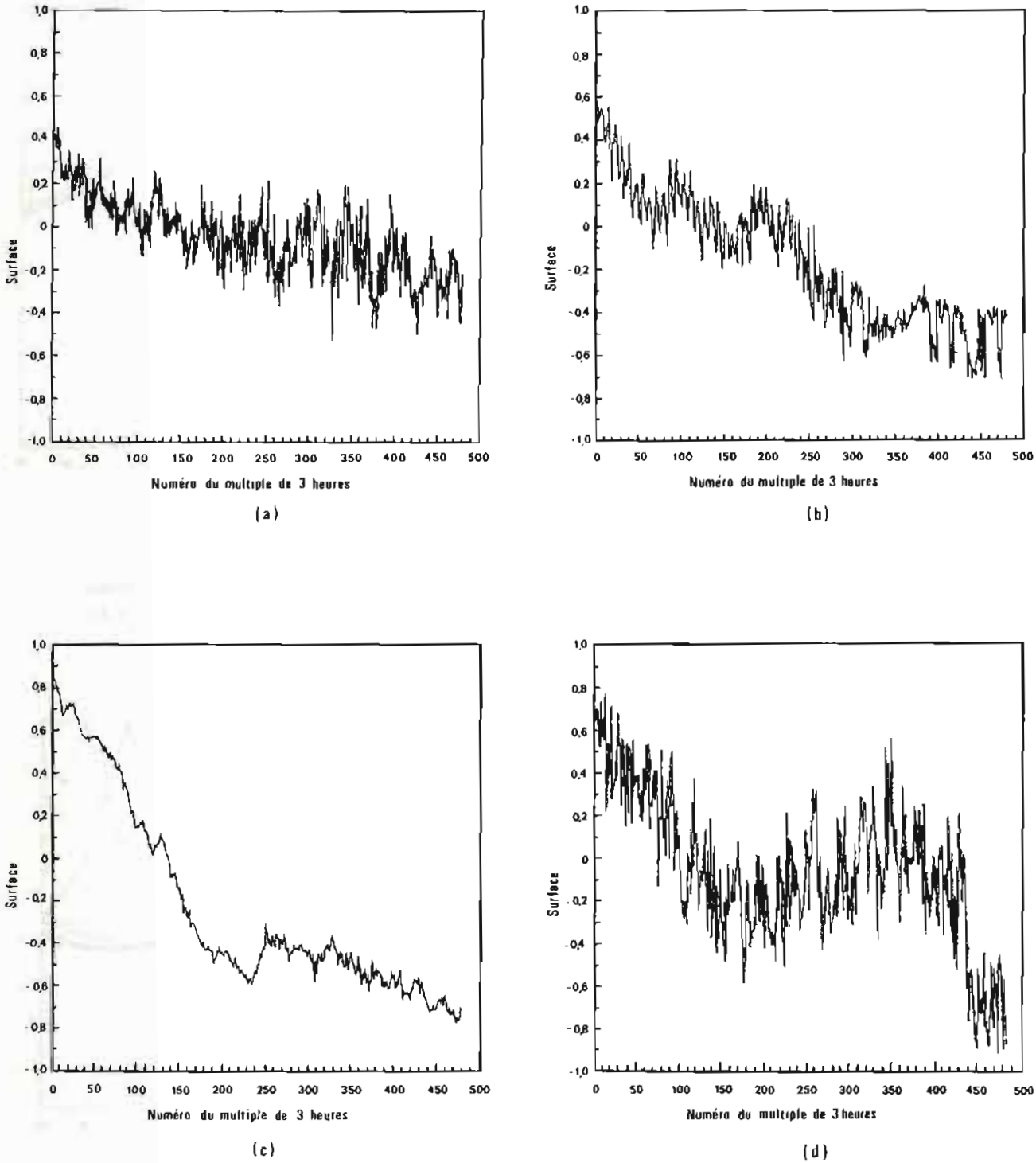


FIG. 4. — Auto-corrélations pour la température de surface pour les périodes :
(a) janvier-février-mars (413 données)
(b) avril-mai-juin (468 données)
(c) juillet-août-septembre (862 données)
(d) octobre-novembre-décembre (237 données)

plus faible car chaque échantillon comporte moins de données et, pour la température, le temps de décorrélation est long comparé à 3 mois. Nous disposons de plus de données en été que pendant les autres saisons : janvier-février-mars 413 couples, avril-mai-juin 468 couples, juillet-août-septembre 862 couples, septembre-octobre-novembre 237 couples.

Contrairement aux valeurs sur deux années, la tendance dans ces échantillons saisonniers n'est

pas nulle et est éliminée avant le calcul des coefficients de corrélation. Aussi la comparaison entre courbes saisonnières et globales est difficile. De plus, de fortes fluctuations de cohérences ± 0,2 pour des échéances écartées de quelques dizaines d'heures sont observées, sauf durant l'été, plus exactement durant l'été 1971. Ceci semble lié au nombre de données.

Nous avons refait les mêmes calculs saison par saison en séparant chaque année. La taille relative du bruit augmente et les niveaux de confiance pour les résultats sont faibles.

3. CORRÉLATIONS VERTICALES AU POINT P

Nous avons correlé entre elles les séries de températures (ou de variations de températures) à différentes profondeurs. Les résultats sur deux ans sont présentés sur la figure 5.

Température

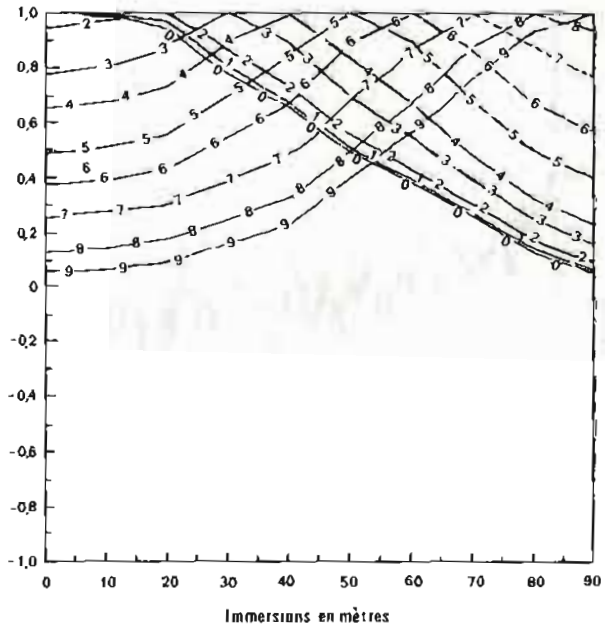
— *Situation sur deux ans :*

Les températures jusqu'à 30 mètres sont fortement correlées (> 0,97) entre elles (figure 5a). Le niveau 0,6 n'est atteint qu'à la profondeur 50 mètres. Ceci traduit l'extension moyenne de la thermocline principale : presque toujours au moins à 30 mètres et souvent à 50 mètres. Une thermocline diurne peut bien sûr être créée dans les premiers mètres près de la surface mais son signal (de l'ordre de 0,2 °C) est faible par rapport à la différence entre la température de la couche de mélange et sa moyenne annuelle, (de l'ordre de 3 °C).

La température à la profondeur 90 mètres est peu correlée avec celles moins profondes. En effet, la couche de mélange n'atteint au moins 90 mètres qu'en hiver. Ce processus hivernal est une des origines de la création de la thermocline permanente.

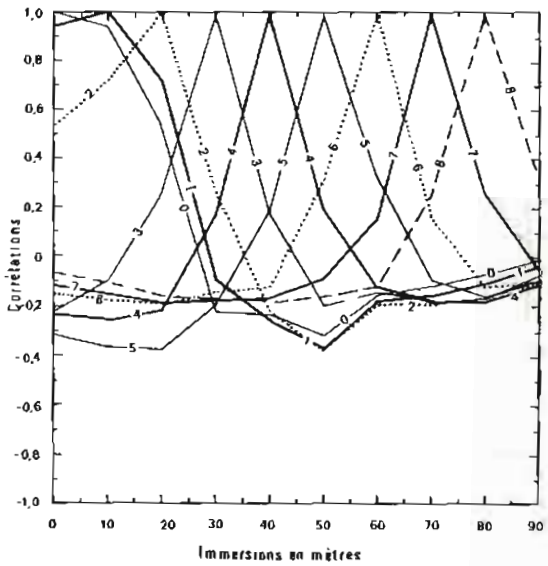
— *Situation saisonnière :*

Les résultats par saisons sont présentés sur la figure 6. En hiver, la température est homogène dans les premiers 90 mètres, d'où la forte corrélation observée (> 0,95). Au printemps, la couche de mélange varie en moyenne de 60 à 30 mètres. L'été est la période où les effets de la thermocline diurne sont les plus importants et où la thermocline saisonnière est la moins profonde, c'est-à-dire entre 15 et 30 mètres. En automne, la profondeur de la couche de mélange varie en moyenne entre 30 et 50 mètres. Le fort niveau de corrélation (> 0,95) dans les quarante premiers mètres peut indiquer que la couche limite océanique est bien mélangée.



(a)

Légende. La courbe-n-correspond à la profondeur de référence : n x 10m (0 ≤ n ≤ 8)



(b)

FIG. 5. — Corrélations en 1970-1971 entre les séries à différentes profondeurs pour les variables :
(a) Températures
(b) Variations de températures à 7 jours.

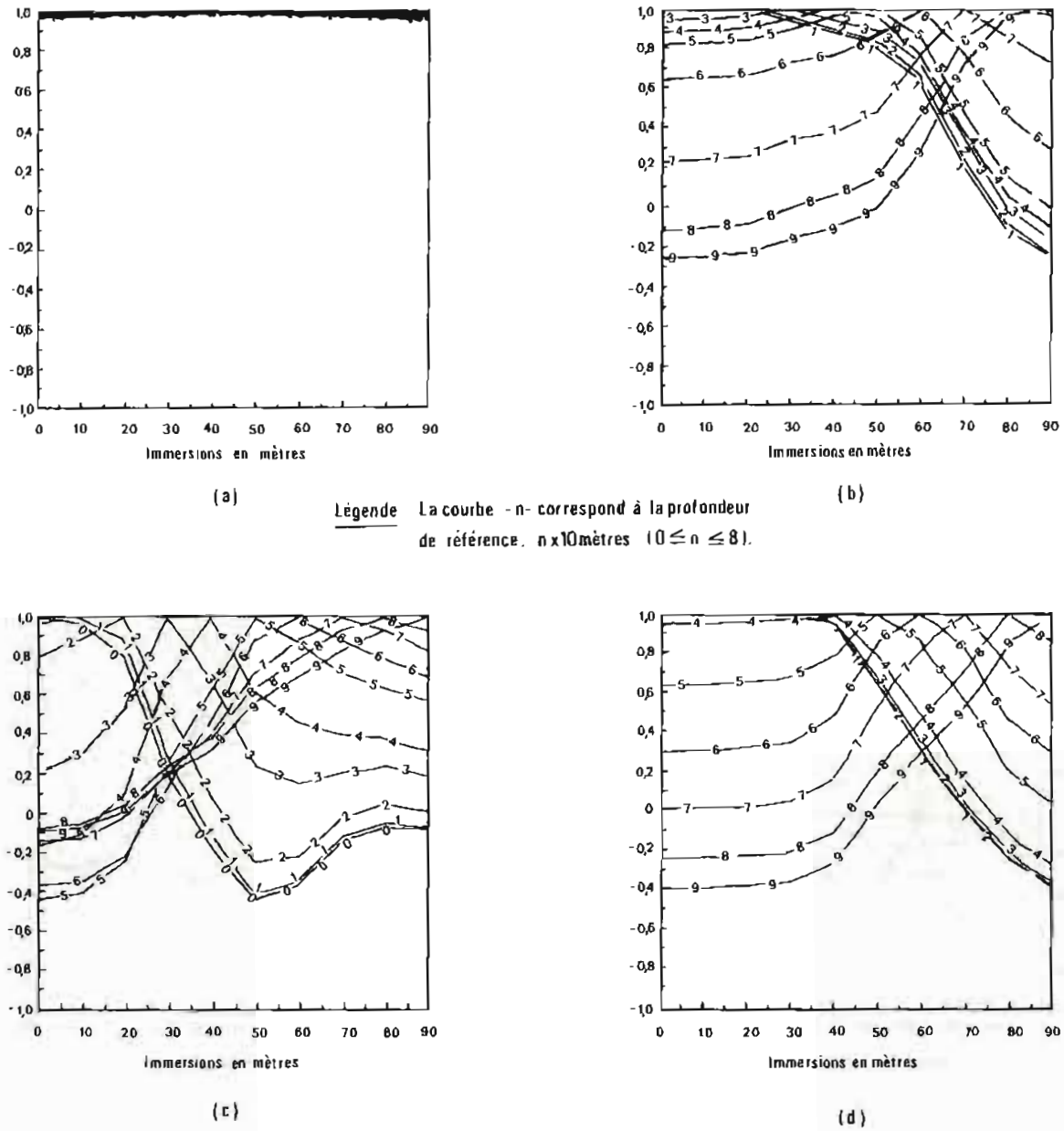


FIG. 6. — Corrélations entre les séries de température à différentes profondeurs pour les périodes :
(a) janvier-février-mars (413 données)
(b) avril-mai-juin (468 données)
(c) juillet-août-septembre (862 données)
(d) octobre-novembre-décembre (237 données)

Variations de température à 7 jours

— *Situation sur deux ans*

Les écarts de température à 7 jours sont décorrelés rapidement en fonction de la profondeur (figure 5b). Ainsi la courbe liée à l'immersion 0 mètre a une valeur de 0,6 à une distance proche de la profondeur 15 mètres. Les effets de la thermocline diurne sont importants pour ces différences de température à 7 jours, et l'échelle verticale associée à ce phénomène dépend de l'opacité des eaux (voir par exemple Jerlov 1976). Elle est au point P voisine de 10 mètres. Cependant, sa prévision opérationnelle et plus généralement la prévision à court terme de la couche de mélange sont peu fiables avec des données de routine en entrée (cf. article précédent, Partie 2).

— *Situation saisonnière*

La figure 7 représente les résultats saison par saison. Les plus faibles corrélations entre séries à

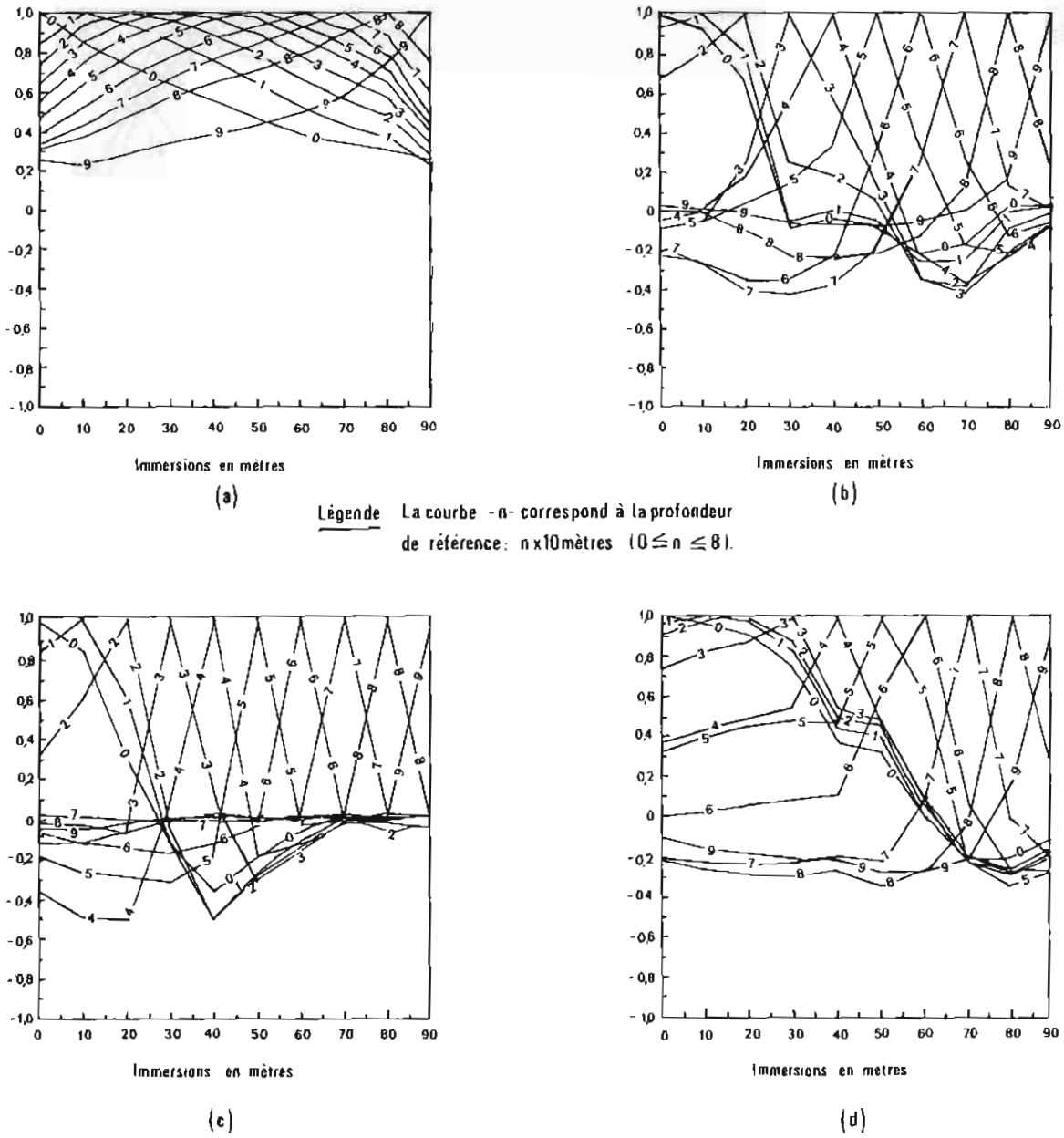


FIG. 7. — Semblable à la figure 6, mais pour les séries de variations de température à 7 jours.

différentes profondeurs sont en été, période où la couche de mélange est peu profonde. Les plus fortes corrélations sont en hiver, période où la température est souvent homogène dans les 90 premiers mètres.

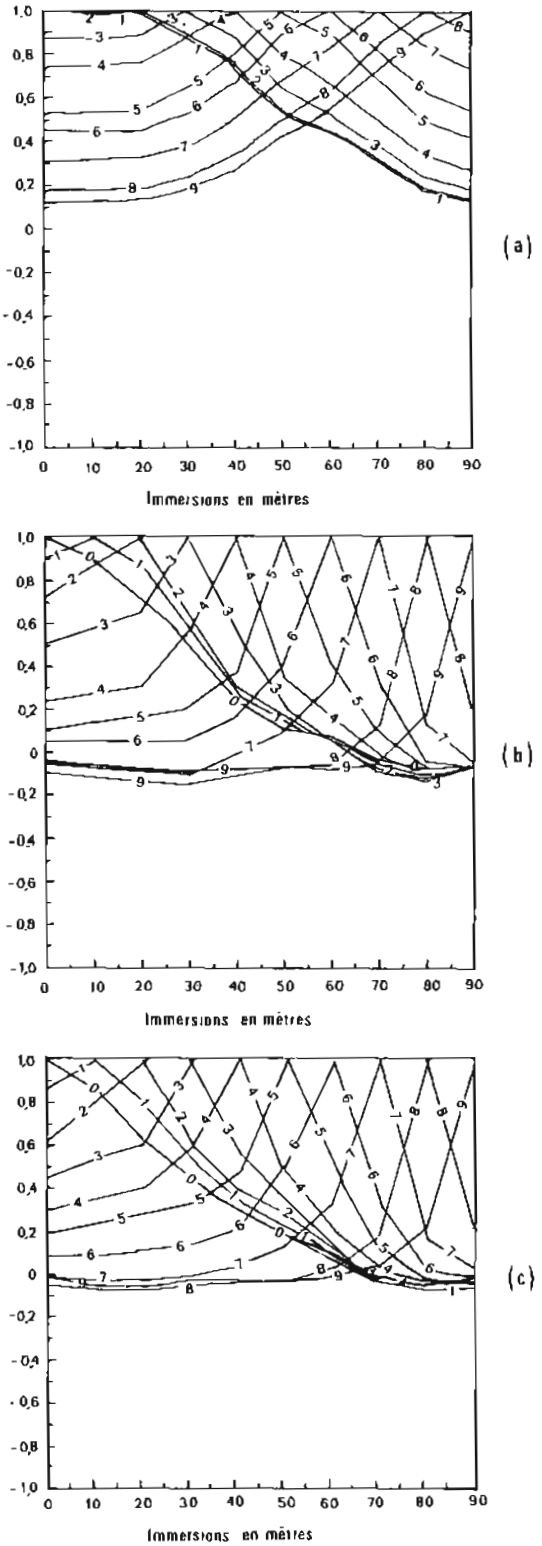
Sous la profondeur de la couche de mélange moyenne, les séries à différentes immersions sont peu correlées.

Estimations annuelles

Les données utilisées sont inégalement réparties dans le temps. Aussi pour obtenir une estimation d'un résultat annuel, nous avons sommé les résultats saisonniers en accordant le même poids (c'est-à-dire 0,25) à chaque saison. Les « structures de décorrélation » associées sont présentées aux figures 8a et b.

Nous avons ensuite découpé nos données par tranche de 2 mois, en groupant ensemble les mois de même nom en 1970 et 1971. Puis, nous avons sommé ces résultats bimestriels, de la même manière que les résultats saisonniers (figure 8c, pour les variations de température par exemple). Les estimations annuelles obtenues par tranches de deux mois sont semblables à celles pour trois mois.

Les comparaisons entre figures 5a et 8a, et entre 5b et 8b, sont favorables et ces estimations



Légende La courbe -n- correspond à la profondeur de référence : n x 10 mètres ($0 \leq n \leq 8$).

annuelles sont proches des résultats obtenus en traitant les données de façon globale.

BIBLIOGRAPHIE

BENDAT J.S. et A.G. PIERSOL, 1971. — Random data: analysis and measurements procedures, published by Wiley-Interscience. 407 p.

BRETHERTON F.P., R.E. DAVIS et C.B. FANDRY, 1976. — A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73 *Deep-Sea Res.*, 23, 559-582.

CHATFIELD C., 1980. — The analysis of time series: an introduction, published by Chapman and Hall. New York, 268 p.

CLANCY R.M., 1983. — The effect of observational error correlations on objective analysis of ocean thermal structure. *Deep-Sea Res.*, 30, 985-1002.

DAVIS R.E., 1976. — Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. *J. Phys. Ocean.*, 8, 233-246.

DENMAN K.L. et M. MIYAKE, 1973. — Upper layer modification at Ocean Station P: observations and simulations. *J. Phys. Ocean.*, 3, 185-196.

GASPAR P., 1985. — Modèles de la couche active de l'océan pour des simulations climatiques. Dissertation doctorale. Université Catholique de Louvain.

JERLOV N.G., 1976. — Marine Optics, published by Elsevier Oceanography Series. 14, 231 p.

RICHMAN J.G., C. WUNSCH et N.G. HOOG, 1977. — Space and time scales of mesoscale motion in the Western North Atlantic. *R. Geophys. Space Phys.*, 15, 385-420.

SAUNDERS P.M., 1972. — Space and time variability of temperature in the upper ocean. *Deep-Sea Res.*, 19, 467-480.

SAUVEL J., 1985. — Test sur une utilisation opérationnelle simple d'un modèle d'évolution à court terme de la couche de mélange océanique. Rapport SHOM-METEO n° 3.

TOURBILLON (groupe), 1983. — The tourbillon experiment, a study of a mesoscale eddy in the Eastern North Atlantic. *Deep-Sea Res.*, 30, 475-511.

FIG. 8. — Estimation annuelle des corrélations verticales en découpant en tranches de 3 mois les séries pour les variables :
(a) température
(b) variations de température à 7 jours
La figure 8c est semblable à la figure 8b mais en utilisant des tranches de 2 mois.

DEUXIÈME PARTIE

MISSION OCÉANOGRAPHIQUE DU PACIFIQUE

(1er octobre 1982 — 30 avril 1984)

par

M. J.-P. THOUIN
Ingénieur en Chef de l'Armement (Hydrographe)

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Chapitre 1. — DESCRIPTION DE LA M.O.P.
- 1.1. Généralités
- 1.2. Organisation
- 1.3. Personnel
- 1.4. Moyens flottants
- 1.5. Véhicules
- 1.6. Locaux
- 1.7. Matériel

Chapitre 2. — MÉTHODES ET TECHNIQUES DE TRAVAIL
- 2.1. Généralités
- 2.2. Géodésie
- 2.3. Positionnement des bâtiments et embarcations
- 2.4. Bathymétrie
- 2.5. Recherches d'obstructions et de hauts-fonds isolés
- 2.6. Topographie
- 2.7. Marée
- 2.8. Courants
- 2.9. Natures de fonds

Chapitre 3. — LEVÉS D'HYDROGRAPHIE GÉNÉRALE EN NOUVELLE-CALÉDONIE ET DÉPENDANCES
- 3.1. Achèvement du levé de la côte Est de Nouvelle-Calédonie du Cap Tonnedu au Canal de la Havannah
- 3.2. Vérifications hydrographiques des voies recommandées dans la région de Nouméa
- 3.3. Levé de la côte Est de Nouvelle-Calédonie dans les limites de la carte N du plan de cartographie

Chapitre 4. — LEVÉS HYDROGRAPHIQUES DE DÉTAIL DESTINÉS À PERMETTRE LE PLAGEAGE D'UN BATIMENT DE TRANSPORT LÉGER (BATRAL)
- 4.1. Plageage de Wadrilla à Ouvéa
- 4.2. Plageage de Chépénéhé à Lifou
- 4.3. Baie de Thogone à Maré
- 4.4. Baie de Tadine à Maré
- 4.5. Plageage de Poindimié sur la côte Est de Nouvelle-Calédonie

Chapitre 5. — TRAVAUX POUR DES ORGANISMES PUBLICS OU PRIVÉS
- 5.1. Travaux pour le Port Autonome de Nouméa
- 5.2. Levé de détail pour un appontement à Thio
- 5.3. Sondage de 2 profils entre Tahiti et Moorea

Chapitre 6. — TRAVAUX DIVERS
- 6.1. Travaux de géodésie à Maupiti
- 6.2. Localisation de 6 atolls sur la route Papeete-Mururoa
- 6.3. Localisation d'un haut-fond à l'Est des Tonga

Chapitre 7. — LEVÉS BATHYMÉTRIQUES PENDANT LES TRAVERSÉES ET LEVÉS OCÉANIQUES À PETITE ÉCHELLE
- 7.1. Levés bathymétriques pendant les traversées
- 7.2. Levé autour de Hunter et Matthew

Chapitre 8. — CONCOURS APPORTÉS PAR LA MOP
- 8.1. Opération MARARAI à Tahiti
- 8.2. Simulation SPOT en Nouvelle-Calédonie

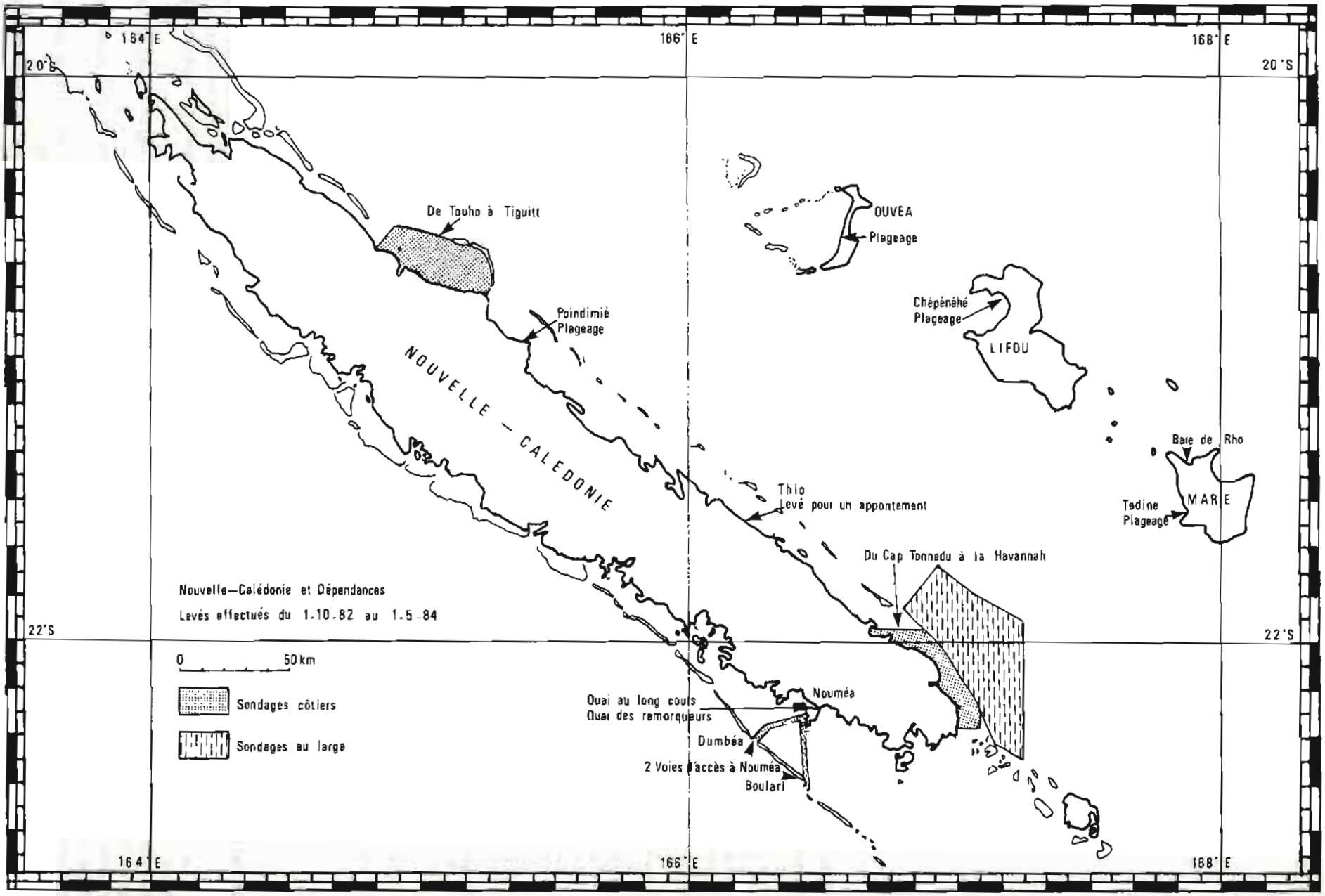
INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le présent rapport décrit l'ensemble des travaux hydrographiques qui ont été réalisés par la Mission Océanographique du Pacifique (M.O.P.) sous la direction de l'Ingénieur en Chef de l'Armement Thouin du 1er octobre 1982 au 30 avril 1984. Cet ingénieur succédait à l'ICA Souquière. Il est remplacé par l'ICA Habert.

Au cours de cette période, l'activité a porté essentiellement sur des opérations hydrographiques, quelques opérations géodésiques et des concours pour le positionnement de bâtiments ou d'aéronefs. En Nouvelle-Calédonie ces opérations ont consisté en :

- la continuation du levé du lagon et du talus continental sur la côte Est
- le contrôle hydrographique des voies d'accès au port de Nouméa
- le levé de zones de plageage pour Batral sur la Grande-Terre et les Îles Loyauté.

En Polynésie, elles ont consisté essentiellement



PL. 1. — Index des levés effectués en Nouvelle-Calédonie et Dépendances.

en travaux pour le Centre d'Expérimentation du Pacifique (C.E.P.).

La planche 1 situe les différents levés ou travaux effectués en Nouvelle-Calédonie et Dépendances, et pour le C.E.P.

Le chapitre 1 est consacré à la description des moyens de la Mission et de leur évolution depuis 1978.

Les faits les plus marquants de cette évolution ont été :

- le remplacement des anciennes vedettes en bois par les vedettes en plastique VH8 et VH9
- la mise en place sur les bâtiments de sondeurs grands fonds Raytheon en 1980 et 1982
- l'utilisation du système de radiolocalisation Trident et de récepteurs de satellites en 1980
- l'aménagement en 1982 d'une nouvelle salle dessin, plus vaste
- l'arrivée dès fin 83 du matériel informatique de traitement
- le réaménagement du PC hydrographique de *L'Estafette*
- le développement de l'atelier d'électronique.

Le chapitre 2 décrit les méthodes utilisées dans les travaux d'hydrographie. Les progrès réalisés par rapport aux méthodes décrites dans le rapport de l'ICA Bonnot consistent en :

- l'utilisation du Trident et du JMR 4 pour la localisation
- la photographie en couleur par hélicoptère
- l'introduction des systèmes informatiques de traitement

Les chapitres 3 à 7 décrivent les travaux effectués par la MOP du 1er octobre 1982 au 30 avril 1984 pour les programmes d'hydrographie générale, pour les besoins d'organismes publics ou privés, ou pour les besoins spécifiques de la Marine.

Le chapitre 8 énumère les concours apportés par la MOP à divers organismes.

Rapport complémentaire

Les travaux effectués pour le compte du CEP font l'objet d'un rapport complémentaire à diffusion restreinte.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DE LA M.O.P.

1.1. GÉNÉRALITÉS

Créée en septembre 1974 par fusion de la Mission Hydrographique de Nouvelle-Calédonie (MHNC) et de la Mission Hydrographique du Pacifique (MHPF), la M.O.P. fonctionne depuis cette date avec 3 bâtiments : le BH1 *L'Estafette,* et les BH2 *Boussole* et *Corail.*

Sur le plan local elle est subordonnée au Capitaine de Vaisseau Commandant la Marine en Nouvelle-Calédonie et Dépendances.

Outre les bâtiments et leurs équipages, la M.O.P. dispose :

- d'un plan d'armement propre en personnel
- de locaux dans l'enceinte de l'Unité Marine
- de matériels spécifiques
- de véhicules et embarcations légères.

Elle reçoit le concours permanent de l'Unité Marine, en particulier pour :

- l'entretien des bâtiments et des véhicules,
- l'hébergement et la gestion du personnel,

et le concours occasionnel de l'Aéronavale, pour des couvertures photos aériennes, et des autres armées en particulier de l'Armée de l'Air pour des missions de transport ou de photos aériennes, et de la Gendarmerie pour les déplacements en véhicule dans les îles.

1.2. ORGANISATION

Les textes définissant l'organisation actuelle interne de la M.O.P. ont été rédigés en 1979 par l'ICA Cailliau, Directeur à l'époque. Cette organisation comprend :

1.2.1. A bord des bâtiments :

Des équipes permanentes, formées de 4 à 5 officiers mariniers hydrographes et de 2 à 3 matelots ou quartiers-maîtres, sous les ordres d'un chef d'équipe premier-maître ou maître principal hydrographe. Ces équipes sont intégrées à la vie de bord et participent au service général du bord dans des limites qui laissent la priorité aux travaux hydrographiques.

1.2.2. A terre

- *Une salle de dessin,* dirigée par un major ou maître principal hydrographe du 4e niveau, et dans laquelle travaille une partie des hydrographes lorsque les bâtiments sont à quai. Cette salle de dessin centralise la rédaction des travaux quand plusieurs bâtiments travaillent sur un même chantier. Si les documents ont été rédigés sur un bâtiment, le chef de salle de dessin en effectue un contrôle avant leur présentation au Directeur. Il est chargé de l'approvisionnement des fournitures de dessin et de bureau et de l'expédition des documents.
- *Un service matériel,* regroupant les ateliers manœuvre, machine-électricité, électronique et le magasin à matériel scientifique. Ce service est dirigé en principe par l'IETA électronicien figurant au plan d'armement, qui est en même temps chef de l'atelier d'électronique. En fait, depuis février 82, le poste d'IETA étant tenu par un technicien civil, ce dernier n'est que chef de l'atelier d'électronique, et le rôle de chef de service est assuré pour les autres ateliers par le maître principal hydrographe chargé de la gestion du matériel spécifique.

Le personnel des ateliers participe aux travaux sur le terrain en assurant la maintenance des stations de radiolocalisation et en armant des stations optiques.

- *Un secrétariat.*

1.3. PERSONNEL

1.3.1. État-Major :

Le plan d'armement de la M.O.P. comprend * :

- un Directeur IPA ou ICA
- 2 ingénieurs adjoints : IA ou IETA
- 1 IETA électronicien
- 1 EV1 (S)

* IA, IPA, ICA :	Ingénieur, Ingénieur Principal, Ingénieur en Chef de l'Armement
IETA :	Ingénieur des Etudes et Techniques d'Armement
EV1 (S) :	Enseigne de Vaisseau de 1ère classe Spécialisé

Le nombre et la qualité des adjoints permettent au Directeur d'être bien secondé dans tous les domaines d'activité de la mission.

La présence de 2 ingénieurs hydrographes adjoints est très utile étant donné la dispersion des travaux en Nouvelle-Calédonie et en Polynésie. Un seul adjoint obligerait le Directeur à se porter souvent en première ligne aux dépends de sa tâche de direction.

Le poste de premier adjoint a été tenu jusqu'au 15 juillet 1983 par l'IA (puis IPA) Guevel, et depuis le 1er juillet par l'IA Champagne. Celui de deuxième adjoint par l'IA Fourgassié jusqu'au 15 avril 1983, et par l'IA Le Glas à partir du 1er juin 1983. Sortant de l'ENSTA, l'IA Le Glas a été considéré comme stagiaire jusqu'au 1er décembre 1983.

Un Aspirant, ingénieur de l'ENSTA, effectuant son service national a été affecté à la M.O.P. en supplément au plan d'armement à partir du 5.10.83. Bien que pouvant rendre quelques services, il doit être considéré comme stagiaire pendant la durée de son affectation.

La présence d'un électronicien, de niveau ingénieur ou technicien supérieur, est indispensable à Nouméa pour l'entretien du matériel électronique, en particulier du matériel Trident, et depuis fin 1983 du matériel informatique. Depuis février 1982, le poste est assuré par M. Quelen, Technicien Chef de Travaux, dont la haute compétence a permis une grande disponibilité du matériel électronique, ce qui a été un élément capital dans l'accomplissement des missions.

L'Officier Spécialisé est chargé des tâches suivantes :

- Gestion et formation militaire du personnel — discipline
- Capitaine de Compagnie
- Organisation logistique des équipes à terre
- Chef du Secrétariat
- Officier de Sûreté

Il est en fait l'officier en second de la mission pour toutes les tâches qui ne relèvent pas du domaine technique, et sa présence est d'une grande utilité. Le poste a été occupé par le Lieutenant de Vaisseau Antoni jusqu'au 23 mars 1983, et par l'EV1 (puis LV) Cecchini depuis le 18 mai. En fait, le LV Antoni étant hospitalisé depuis plusieurs mois avant son départ, l'intérim a été assuré par le maître principal s'occupant du matériel.

1.3.2. Les officiers mariniers hydrographes (OMH)

Le plan d'armement de 15 OMH, bien équilibré entre les grades a toujours été honoré. L'effectif est suffisant, dans la mesure où les travaux sont positionnés par radiolocalisation, et où les stations optiques résiduelles sont armées par du personnel non hydrographe. L'octroi de permissions sur le territoire depuis 1983 correspond à une diminution d'environ 10 % de l'effectif, qui devrait être compensée par une augmentation de la productivité dans la rédaction due à l'introduction du matériel informatique de traitement.

1.3.3. Personnel du service général

Le plan d'armement est de 25 personnes, dont 8 OM, 2 QMM et 15 CTG ** il y a au moins un OM dans les spécialités de manœuvrier, timonier, mécanicien, électricien et radio. Ce plan d'armement est dans l'ensemble suffisant et bien équilibré, pour armer les ateliers, les bâtiments, et les stations à terre. Cependant, comme pour les hydrographes, l'octroi de permissions pendant la campagne a diminué l'effectif présent.

1.4. MOYENS FLOTTANTS

Ces moyens flottants comprennent :

- des bâtiments
- des vedettes de sonde
- des embarcations légères

1.4.1. Bâtiments

Les bâtiments de la M.O.P. sont au nombre de 3 :

- *L'Estafette,* bâtiment hydrographique de 1ère classe (BH1) de 1 200 t, ex chalutier polonais transformé.
- La *Boussole,* bâtiment hydrographique de 2e classe (BH2), de 400 t.
- Le *Corail,* bâtiment hydrographique de 2e classe de 70 t.

1.4.1.1. Emploi des bâtiments

Je partage entièrement les opinions émises par l'ICA Bonnot dans son rapport de mission sur l'adaptation de ces bâtiments à leur mission et leurs possibilités d'emploi. *L'Estafette,* excellent bâtiment de haute mer, n'est pas un vrai BH1 pour ses capacités de logement, son autonomie en eau et sa salle de dessin. La *Boussole* est bien adaptée aux travaux côtiers mais manque un peu de capacité de logement.

** OM : Officier marinier
QMM : Quartiers maîtres et matelots engagés
CTG : Matelots du contingent

1.4.1.2. Etat des bâtiments

Contrairement à ce qui est indiqué dans le rapport de l'ICA Bonnot au sujet de l'état des bâtiments, l'état de *L'Estafette* ne s'est pas détérioré. La *Boussole* par contre commence à vieillir et a connu de nombreuses avaries de moteur et de groupes électrogènes. Le *Corail* est en bon état, mais pour ce bâtiment se pose un difficile problème d'approvisionnement de pièces de rechange.

1.4.1.3. Transformations réalisées

L'Estafette

Entre le 10 mai 1978, fin de la période sur laquelle porte le rapport de l'ICA Bonnot et l'IPER (1) 82, un sondeur grand fonds Raytheon a été installé au PC hydrographie, et un treuil à contacteur tournant Klein sur la plage arrière.

Au cours de l'IPER 82, les transformations suivantes ont été apportées :

- achèvement de l'infrastructure de la climatisation
- débarquement du treuil hydraulique arrière
- débarquement de la loupe du sondeur de grand fond ELAC

Et au cours de l'IPER 84 :

- réalisation de l'infrastructure pour l'HYTRAI (2) en salle de dessin
- réaménagement du PC hydrographie
- réalisation de l'infrastructure HYDRAC (3) II
- installation d'un sondeur NUBS 15 A (DESO 20) en remplacement du sondeur NUBS 12 A (DESO 10)
- installation d'un sondeur NUBS 15 B (DESO 20 dopé) en remplacement du sondeur NUBS 13 A (ELAC)
- mise en place d'un poste de repos pour sonar latéral Edgerton sur la plage arrière.
- installation d'un compensateur de houle Anschütz
- remplacement des 2 groupes convertisseurs de 15 kVA par des 30 kVA.

Boussole

Aucune installation nouvelle concernant l'hydrographie n'a été faite lors de l'IPER 83. Le réaménagement du PC hydrographie et l'installation du Raytheon ont été réalisés pendant l'IPER du premier trimestre 82.

Corail

Depuis sa mise en service en 1974, diverses améliorations ont été apportées, concernant la sécurité, l'autonomie et le confort de l'équipage. La plus importante est l'adjonction de 2 caisses à eau de 1 t chacune dans la cale en 82, ce qui porte les réserves d'eau à 5,5 t. Le moteur principal a été entièrement révisé lors de l'IPER de 81. Le remplacement du groupe électrogène de 10 kVA par un groupe de 12 kVA est prévu pour l'IPER 84 ainsi que la climatisation des locaux vie. Un 2e congélateur a été embarqué pour augmenter l'autonomie en vivres.

(1) Indisponibilité périodique pour entretien-réparation
(2) Système de traitement des données hydrographiques
(3) Système d'acquisition des données hydrographiques.

1.4.2. Drôme de sonde

Les nouvelles vedettes à coque en matière plastique type VH8 (de 8,7 m) et VH9 (de 9,3 m) ont remplacé respectivement en février et septembre 80 les anciennes vedettes à coque en bois de 8,30 m de la *Boussole* et de *L'Estafette*. La pinasse de 10,5 m en mauvais état, avait été déclassée à la suite de leur arrivée.

La drôme de sonde à sondeurs à poste fixe comprend donc depuis septembre 1980 :

- 2 VH8 sur la *Boussole*
- 2 VH9 sur *L'Estafette*.

Les avantages essentiels de ces nouvelles vedettes par rapport aux anciennes sont :

- d'être plus puissantes et donc plus rapides
- de disposer de beaucoup plus de place à l'abri pour les équipements
- de permettre la circulation debout dans l'habitacle
- pour les VH8, de ne pas avoir le barreur séparé du reste de l'équipe.

Leus défauts sont relatés dans des rapports de fin de commandement de *L'Estafette* ainsi que dans le rapport n° 198 MOP du 16 août 1980 de l'IPA Souquière. Le principal concerne les deux types de vedettes : c'est un défaut de conception consistant à fixer l'alternateur sur une poutre du bâti moteur alors que le moteur est fixé sur plots élastiques, ce qui entraîne des ruptures de courroies de l'alternateur. En attendant les décisions concernant les demandes de modification, une solution provisoire a été réalisée par le Service Technique de l'Unité Marine pour les VH8.

1.4.3. Drôme de servitude

Les embarcations de servitude comprennent des zodiacs et des embarcations légères en aluminium appelées corallines, propulsées par des moteurs hors bord. Chaque bâtiment a sa coralline et la M.O.P. dispose de 3 corallines en réserve, et d'un lot de propulseurs. Les corallines s'avèrent très adaptées au débarquement de personnel et de matériel sur les platiers coralliens; elles peuvent être utilisées comme embarcations de sonde, avec un sondeur à base hors bord, dans les endroits resserrés et dans les ports.

1.5. VÉHICULES

La MOP a disposé de :

- 2 camionnettes Peugeot 404 bachées à moteur diesel
- 2 Land-Rover à châssis court à moteur diesel
- 1 camion Renault Tout Terrain (TT) de 2,5 t à moteur à essence.

De plus une voiture légère est mise à la disposition du Directeur.

Une Land-Rover a dû être déclassée à la suite d'un accident survenu en juillet 1983 et, à part la 2e Land-Rover, les autres véhicules sont pratiquement hors d'usage, et demandent à être remplacés dans les plus brefs délais.

1.6. LOCAUX

Les locaux occupés par la M.O.P. sont répartis en 6 bâtiments différents à l'intérieur de l'enceinte de l'Unité Marine Nouméa :

1) 3 bureaux pour le Directeur, les ingénieurs adjoints et le secrétariat dans le bâtiment de commandement
2) Une baraque « Filliod » abrite la salle de dessin principale, installée en août 82, l'atelier d'électronique, le magasin de matériel spécifique, et le bureau du chef du service matériel.
3) Un petit bâtiment en dur, situé à côté de cette baraque et contenant la salle de dessin annexe, où a été installé le matériel de traitement informatique HYTRAI.
4) Les magasins-ateliers « Machine-Electricité » et « Manœuvre » côte à côte dans 2 compartiments d'un hangar situé en face du garage de la base.
5) Un local pour les batteries
6) Un hangar fermé pour le matériel encombrant.

Ces locaux sont très convenables et leur superficie est globalement suffisante pour les besoins de la Mission. Un seul bureau est cependant un peu juste pour les 2 ingénieurs adjoints et insuffisant en cas de présence d'un adjoint stagiaire supplémentaire. La dispersion n'entraîne aucune gêne importante, mais une gêne légère du fait que la salle de dessin est à 100 m des bureaux.

Un projet d'immeuble rassemblant tous les locaux de la M.O.P. avait été établi en 1979. Des crédits pour sa construction sont prévus en 1986 sur le chapitre infrastructure de la Marine en Nouvelle-Calédonie.

1.7. MATÉRIEL

1.7.1. Matériel de radiolocalisation

1.7.1.1. Système hyperbolique Toran

La M.O.P. est équipée d'une chaîne Toran P 10 à 3 réseaux et 5 récepteurs. Cette chaîne, maintenue en état de fonctionnement, n'a plus servi depuis le début de 1982, où le Toran a été remplacé avantageusement par le Trident pour la localisation des moyens flottants.

1.7.1.2. Système circulaire Trident

Au 1er octobre 1982 la mission était équipée d'un ensemble Trident III de 3 interrogateurs et de 6 balises. Une balise supplémentaire lui a été envoyée en novembre 1983 à l'occasion de l'opération SPOT, ce qui porte le nombre de balises à 7.

Le matériel Trident est entièrement entretenu à Nouméa grâce à la constitution d'un atelier d'électronique doté des appareils de mesure adéquats depuis le 1er trimestre 82.

1.7.1.3. Récepteurs de satellites

La M.O.P. est équipée de 2 récepteurs Transit JMR4, qui servent à la géodésie et au positionnement précis des bâtiments hors de vue des côtes. Ces appareils tombent souvent en avarie, et, ne pouvant être réparés sur place, leur maintenance nécessite de coûteux envois vers la Métropole.

1.7.2. Sondeurs

1.7.2.1. Sondeurs de petits fonds

En 1982, tous les bâtiments à vedettes de sonde étaient équipés de sondeur Atlas DESO 10 (NUBS 12 A) portant jusqu'à 280 m. Celui de *L'Estafette* est de plus muni d'un affichage numérique du fond. Il a été remplacé par un DESO 20 (NUBS 13 A) pendant l'IPER 84.

La M.O.P. dispose en outre de 6 sondeurs DESO 10 en réserve et de 3 bases hors bord.

1.7.2.2. Sondeurs de grands fonds

A l'origine, la *Boussole* était équipée d'un sondeur Kelvin Hughes MS 26 H. La *Boussole* en 1968, et *L'Estafette* dès sa mise en service, ont été équipées du sondeur Elac Deneb avec enregistreur principal et loupe de précision. Leur mécanique étant usée, et les pièces de rechange n'existant plus, les loupes ont été débarquées pendant les IPER effectuées en 1982.

Un sondeur Raytheon bi-fréquence a été mis en place sur *L'Estafette* au cours de l'IPER 80 et sur

la *Boussole* au cours de l'IPER 82. L'enregistreur de ces sondeurs permet d'obtenir une grande précision et une grande variété d'échelles.

Au cours de l'IPER 84, l'Elac a été remplacé sur *L'Estafette* par un Atlas DESO 20 dopé (NUBS 13 B).

1.7.2.3. Sondeurs latéraux

La M.O.P. possède 4 sondeurs latéraux Edgerton à 2 voies, fonctionnant sur 105 kHz et de portée affichable allant de 50 à 500 m, et pour la mise en œuvre de ces sondeurs :

- d'un treuil à contacteur tournant Klein sur la plage arrière de *L'Estafette*, sur lequel est enroulé un câble conducteur-tracteur de 600 m en acier
- d'un treuil à commande manuelle
- de 3 câbles souples de 50 m pour remorquage du poisson par les vedettes ou le *Corail*, et de 4 câbles en acier dont 1 de 600 m et 3 de 150 m.

Les sondeurs latéraux sont utilisés pour la recherche des hauts-fonds isolés, des aiguilles de corail et des épaves.

1.7.3. Matériel radio

La M.O.P. possède un lot suffisant d'émetteurs-récepteurs phonie VHF TRPP 13 et TRPP 11 et de 3 ensembles HF BLU TRMM 3A. Le problème d'incompatibilité entre le Trident et le TRPP 13 sur les vedettes a été résolu en éloignant suffisamment l'une de l'autre les antennes des 2 appareils.

1.7.4. Matériel spécifique

La M.O.P. est bien équipée en matériel spécifique de bonne qualité.

Pour la mesure des distances, aux 3 ensembles telluromètres MR A3 sont venus s'ajouter un ensemble telluromètre MR A5 et un distancemètre AGA 14 en 1980. Ce dernier est plus pratique qu'un telluromètre pour les rattachements et les cheminements à courte et moyenne distance. Un deuxième AGA 14 serait utile si le besoin s'en fait sentir simultanément en Nouvelle-Calédonie et en Polynésie.

1.7.5. Matériel informatique

1.7.5.1. Matériel de traitement

La M.O.P. a été dotée en fin 83 et début 84 de :

- 3 ensembles Tektronix et 2 ensembles Epson Hewlett-Packard comprenant :
  - un calculateur avec écran de visualisation
  - une platine disquette
  - une imprimante
- 2 machines à dessiner grand format Benson
- 2 machines à dessiner format 21 × 29,7 Hewlett-Packard.

En attendant le matériel d'acquisition, ce matériel permet d'effectuer :

- la construction des positions avec saisie manuelle
- le dessin de mappes de préparation et l'habillage et le titre des différentes minutes.

1.7.5.2. Matériel d'acquisition

L'infrastructure pour l'HYDRAC a été réalisée sur *L'Estafette* et ses vedettes au cours de l'IPER 84, et le sera pour les vedettes de la *Boussole* en juin-juillet 84 au cours de son IPER à Papeete.

Le matériel HYDRAC doit être reçu à Nouméa en 1984. Le suivi de profil pourra se faire sur les bâtiments avec les ensembles Hewlett-Packard dès réception des interfaces hydroboucles.

CHAPITRE 2

MÉTHODES ET TECHNIQUES DE TRAVAIL

2.1. GÉNÉRALITÉS

L'essentiel des travaux demandés à la M.O.P. a consisté en :

- sondages du lagon avec recherches des hauts-fonds isolés et obstructions
- topographie des récifs
- sondages de dégrossissage du talus continental
- sondages de précision par grands fonds
- mesures de courant et de marée
- mesures géodésiques
- natures de fonds.

2.2. GÉODÉSIE

En Nouvelle-Calédonie et aux Îles Loyauté il existe des réseaux géodésiques mis en place par le Service Topographique. Des mesures de rattachement à ces réseaux ont été faites à l'aide d'un théodolite Wild T2 et d'un distancemètre (géodimètre AGA 14 ou telluromètre MRA 5) pour placer les stations de radiolocalisation ou de visée optique servant au positionnement des bâtiments et embarcations de sonde.

Des points par satellites ont été faits systématiquement depuis 1980 sur toutes les îles ou terres émergées non rattachées à la Grande-Terre, à l'aide d'un récepteur de satellite JRM 4 mis à terre ou sur le bâtiment à quai ou au mouillage. Les positions sont données dans le système WGS 72.

2.3. POSITIONNEMENT DES BÂTIMENTS ET EMBARCATIONS

Le positionnement des embarcations de sonde dans le lagon, et des bâtiments sur le talus continental a été assuré essentiellement par le système de radiolocalisation circulaire Trident, des visées optiques au théodolite Wild T16 pouvant servir d'appoint.

Le système Trident, régulièrement contrôlé et étalonné est d'une précision suffisante pour des échelles inférieures au 1/2 500.

Dans les ports, les endroits resserrés et les embouchures des fleuves, les embarcations de sonde ont été positionnées au moyen de 3 théodolites.

Pour les sondages effectués au cours des traversées les bâtiments ont été positionnés par satellites au moyen de récepteurs JMR 4.

2.4. BATHYMÉTRIE

Le lagon a été sondé par les vedettes de sonde de *L'Estafette* et de la *Boussole* ou par le *Corail*, au moyen de sondeurs Atlas DESO 10 à 2 bases (30 et 210 kHz), suivant des profils circulaires ou rectilignes espacés d'au maximum 100 m, l'écartement entre profils étant diminué quand cela s'avérait nécessaire.

Dans les endroits resserrés ou peu profonds, une coralline munie d'un sondeur Atlas DESO 10 à base hors-bord a été utilisée.

Le sondage des passes permettant l'accès aux atolls en Polynésie a été effectué au moyen d'une baleinière légère munie d'un sondeur Atlas hors-bord, suivant des profils rectilignes radioguidés avec un espacement permettant une couverture complète du fond (espacement égal à la moitié de la profondeur).

Les sondages au large sur le talus continental ont été effectués suivant des profils espacés de 1 000 ou 2 000 m, à l'aide d'un sondeur grands-fonds Raytheon réglé sur la plus basse fréquence (12 kHz), qui correspond à une largeur de faisceau d'environ 30° à 3 dB.

Les sondages précis de grands-fonds autour de Mururoa ou Fangataufa ont été faits à l'aide du Raytheon réglé sur la fréquence 34 kHz (largeur du faisceau : 10° à 3 dB).

A partir de la fin 83, les minutes de construction ont été rédigées avec des moyens informatiques sur tables à dessiner Benson, la saisie se faisant manuellement sur des calculateurs Tektronix à écran cathodique permettant la validation du point par l'opérateur.

2.5. RECHERCHES D'OBSTRUCTIONS ET DE HAUTS-FONDS ISOLÉS

2 méthodes ont été employées pour la recherche des hauts-fonds isolés et des obstructions, séparément ou conjointement.

a) l'exploration au sondeur latéral (Sonal)
b) la photographie aérienne en couleur.

a) L'exploration au sondeur latéral

L'engin utilisé est un poisson remorqué Edgerton de 1,40 m de long portant sur ses flancs 2 bases émettrices réceptrices allongées, fonctionnant sur 105 kHz. Les faisceaux d'émissions orientés perpendiculairement à l'axe du poisson ont 20° d'ouverture dans le plan vertical, et 1° dans le plan horizontal. A l'enregistrement on obtient un renforcement de l'écho sur la face de l'obstacle touchée par les rayons sonores, et un blanc dans la zone de l'ombre portée. La longueur de l'ombre portée permet de déterminer approximativement la hauteur de l'obstacle au-dessus du fond.

L'exploration au sonal permet de détecter les épaves, obstructions ou roches isolées entre 2 profils de sonde.

Dans le lagon de la côte Est, cette exploration s'est faite sur les profils espacés de 200 m, avec une portée maximale de 250 m, par des fonds en général supérieurs à 20 m. Il en a été de même dans le lagon de Fangataufa.

Sur les voies d'accès à Nouméa pour des fonds allant de 10 à 25 m l'espacement des profils et la portée utilisée ont été respectivement de 100 m et 125 m.

b) La photographie aérienne en couleur

La photographie aérienne en couleur est le procédé le plus adéquat, en eau claire et milieu corallien, pour repérer toutes les têtes coralliennes jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 10 m.

Les photos utilisées ont été prises par l'IGN, ou à partir d'un hélicoptère Puma de l'Armée de l'Air, avec le concours d'un photographe civil. Ce dernier utilisait un appareil Hasselblad de 120 mm de focale, donnant des négatifs carrés de 56 mm de côté.

L'hélicoptère effectuait ses prises de vue à 90 nœuds soit environ 50 m/s. Ces prises de vue se faisant généralement au 1/500 de seconde, les images restent très nettes jusqu'à l'échelle du 1/1 000. D'autre part, la qualité des négatifs permet des agrandissements très importants.

La photo en couleur par hélicoptère, utilisée pour des plageages dans les Loyauté et sur le récif au large de Hienghène a été très utile, et a donné pleine satisfaction. Le seul problème rencontré a été celui du positionnement de l'appareil. Un suivi de profil semble indispensable en cas de passes à grande échelle pour éviter les trous ou les trop grands recouvrements entre les passes.

2.6. TOPOGRAPHIE

La topographie a consisté essentiellement à :

- déterminer le trait de côte
- délimiter les récifs de corail couvrant et découvrant
- délimiter les récifs de corail toujours immergés à faible profondeur et coter ces récifs.

Ces différents contours ont été dessinés par restitution de photographies aériennes prises à la verticale, en noir ou en couleur, au moyen d'une chambre claire américaine ou Bausch et Lomb permettant des agrandissements importants.

Les photos en noir et blanc existantes proviennent de l'IGN, de l'Aéronavale ou des américains.

Une mission de l'IGN a effectué une couverture de la Nouvelle-Calédonie en 1976, fournissant des photos au 1/20 000 d'une remarquable qualité.

La mission IGN de 1982-83 a effectué une couverture photo en couleurs de Mururoa et Fangataufa, et des sites de plageage à Lifou et Ouvéa dans les Îles Loyauté, et des couvertures en noir et blanc au 1/8 000 de certaines zones de la côte Est.

Le P2V7 de l'Aéronavale a effectué une couverture en noir et blanc au 1/15 000 du récif au large de Touho, avec positionnement par Trident.

Un hélicoptère Puma de l'Armée de l'Air a pris des photos en couleur des plageages de Maré et du récif au large de Hienghène.

Un hélicoptère Alouette III de l'Armée de l'Air a été utilisé pour le piquage des photos au large de Touho et de Hienghène.

2.7. MARÉE

Pour enregistrer les mesures de marée, on a utilisé des marégraphes enregistreurs analogiques OTT à tambour vertical effectuant une rotation complète en 24 h, avec une réduction de 1/10 de l'échelle des hauteurs d'eau.

2 marégraphes et parfois 3 étaient en fonction simultanément dans les zones de levé sur la côte Est. Des observatoires permanents fonctionnent en Nouvelle-Calédonie à Nouméa sur la côte Ouest et à Thio sur la côte Est. Les concordances des observations de la côte Est et des Îles Loyauté sont faites avec les enregistrements de Thio, et sur la côte Ouest avec ceux de Nouméa.

Pour des levés de courte durée, de simples échelles de marée ont été mises en place.

Des observatoires de marée ont été, chaque fois que cela a été possible, rattachés au Nivellement Géodésique de la Calédonie (NGC).

2.8. COURANTS

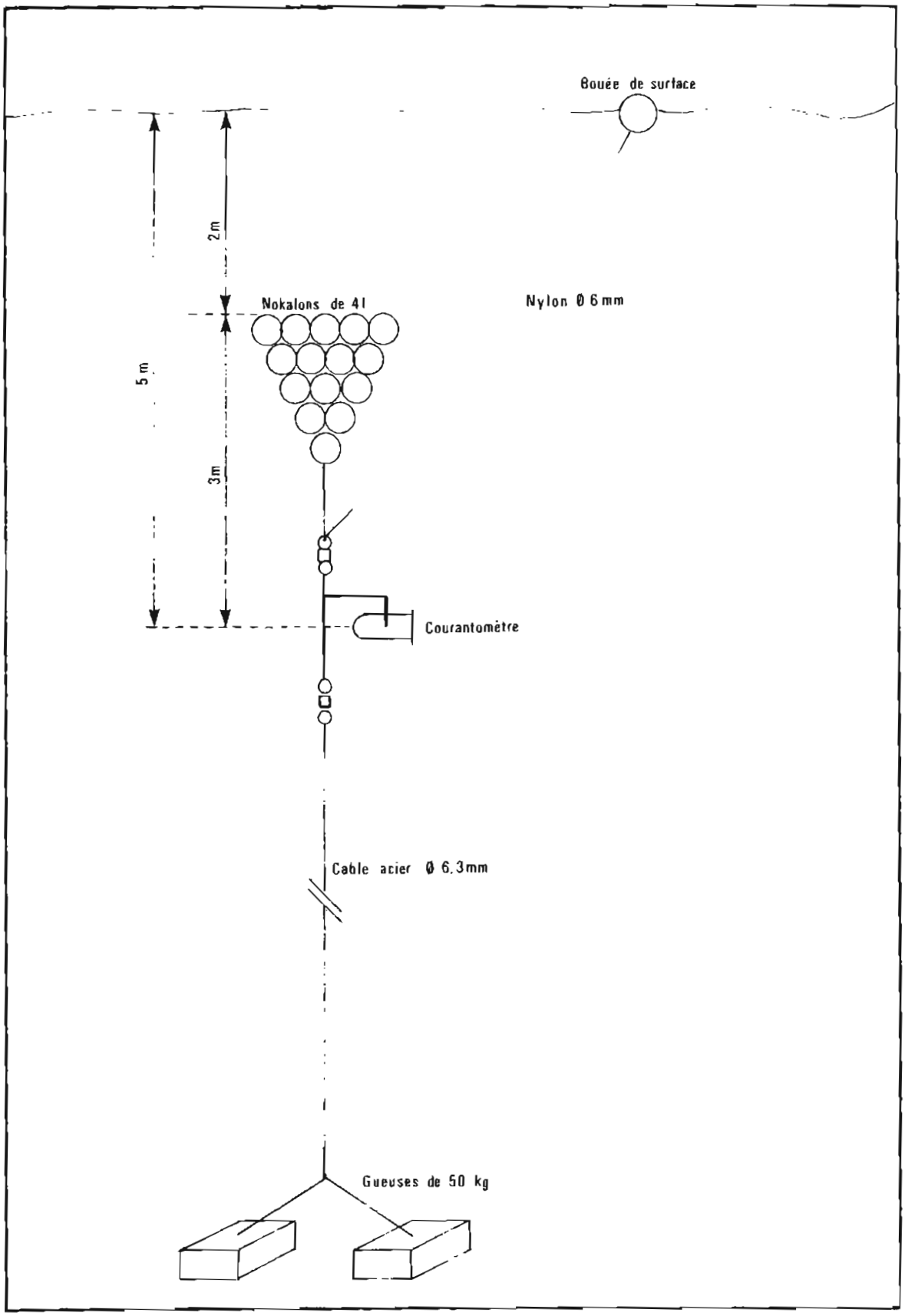
Des mesures de courant ont été faites par petits fonds dans les lagons et les passes au moyen de courantographes Mécabolier à enregistrement photographique à la cadence d'une photo toutes les 6 minutes.

Le schéma de mouillage type figure sur la planche 2.

Les films sont dépouillés manuellement, au moyen d'une visionneuse, sur des imprimés mécanographiques, et les courbes indiquant la force et la direction du courant en fonction du temps sont tracées par le Centre de Calcul de l'EPSHOM.

2.9. NATURES DE FONDS

Les prélèvements de fonds ont été faits à l'aide d'une benne preneuse à griffes, à partir de l'un des bâtiments de la Mission, généralement le *Corail.*



PL. 2. — Schéma type d'un mouillage de courantomètre.

CHAPITRE 3

LEVÉS D'HYDROGRAPHIE GÉNÉRALE EN NOUVELLE-CALÉDONIE ET DÉPENDANCES

3.1. ACHÈVEMENT DU LEVÉ DE LA CÔTE EST DE NOUVELLE-CALÉDONIE DU CAP TONNEDU AU CANAL DE LA HAVANNAH

3.1.1. Préambule

La zone levée à partir du 1er octobre 1982 correspond à la coupure S du plan de cartographie de la Nouvelle-Calédonie, et à la partie de la coupure QR située au Sud du parallèle 21°58'S. Elle est limitée au Sud par le levé effectué en 1974-75 dans le canal de la Havannah et au Sud-Est par le levé du banc de Coëtlogon effectué en 1963. Elle comprend un lagon, dont les profondeurs dépassent par endroits 50 m, bordé par un récif corallien parallèle à la côte, entièrement immergé dans cette zone, et coupé de quelques passes profondes situées en général face à l'embouchure des rivières. Le basculement de la chaîne calédonienne entraînant l'enfoncement de la côte Est à une époque géologique récente, explique l'immersion du récif et l'ennoiement de l'embouchure des rivières, en particulier de celle de Yaté.

Au-delà de la barrière immergée, la zone levée comprend aussi la pente continentale jusqu'à la plaine abyssale qui sépare la Nouvelle-Calédonie des Îles Loyauté.

Le levé régulier de la partie du lagon incluse dans la coupure QR a presqu'entièrement été exécuté avant le 1er octobre 1982 sous la direction de l'ICA Souquière, ainsi qu'une partie des recherches de hauts fonds et de l'exploration au sonar latéral.

Ce levé et la rédaction des minutes correspondantes ont été achevés au dernier trimestre 1982 sous la direction de l'ICA Thouin succédant à l'ICA Souquière comme Directeur Technique à partir du 1er octobre 1982.

Le levé de la zone correspondant à la coupure S a été exécuté pendant le 1er semestre de l'année 1983, mais quelques travaux de complément ont porté l'achèvement de ce levé à janvier 1984.

3.1.2. Géodésie

Dans le Nord de la zone, l'infrastructure géodésique mise en place au début de 1982 par l'ICA Souquière a été utilisée. Elle comprenait les points principaux :

Mt Ouinne, Tonnedu, Mt Mamié, jetée d'Ounia, Natore et Ouenou; à ce dernier point a été rattaché par gisement distance le phare de Pouaréti qui a servi de station optique et Trident pour les sondages.

Du cap Pouaréti au cap Coronation, le canevas géodésique s'appuie sur 2 points du Service Topographique : l'ancien phare de Yaté (n° 35-204) et le Mt Gouemba (n° 35-33) à partir duquel furent placées les stations ayant servi au levé de la baie de Yaté. Un cheminement au théodolite T2 et au géodimètre Aga 14 a été effectué entre le phare de Yaté et le cap Coronation, permettant de positionner plusieurs points régulièrement espacés le long de la côte qui furent utilisés pour le levé topographique. Une visée de Coronation sur le mont Gouemba et une mesure de distance Pouaréti-Kuebini ont permis de fermer le cheminement.

Au Sud du cap Coronation fut utilisée l'infrastructure géodésique mise en place par la MHNC en 1970 pour le levé du port de Goro et reprise en 1974-75 pour le levé du Canal de la Havannah. Cette infrastructure comprend les points suivants : Îlot Neae, cap Reine Charlotte, phare de Goro, Îlot Kié.

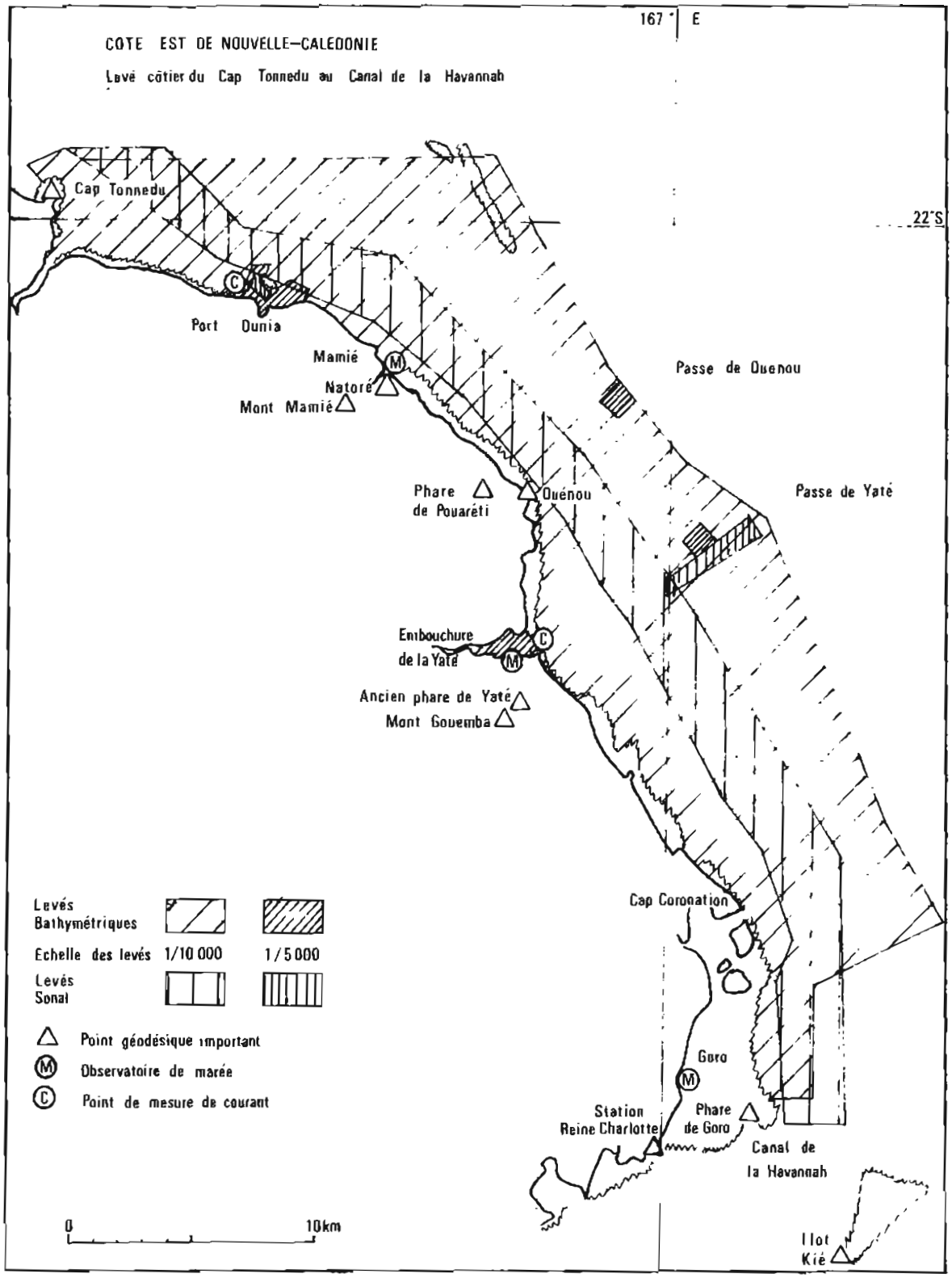
Pour le guidage des profils effectués à l'extérieur du lagon, 2 stations Trident ont été utilisées : au Nord sur le point de « Petit Borindi » à Port Combui, placé par la MOP en 1981, et au Sud au sommet du Pic Nga dans l'île des Pins, sur un point placé par la MOP en 1978.

La liste des coordonnées des points utilisés est donnée en annexe. Les principaux points figurent sur la planche n° 3, le canevas géodésique pour la rivière de Yaté sur la planche n° 4, et le cheminement entre le phare de Yaté et le cap Coronation sur la planche n° 5.

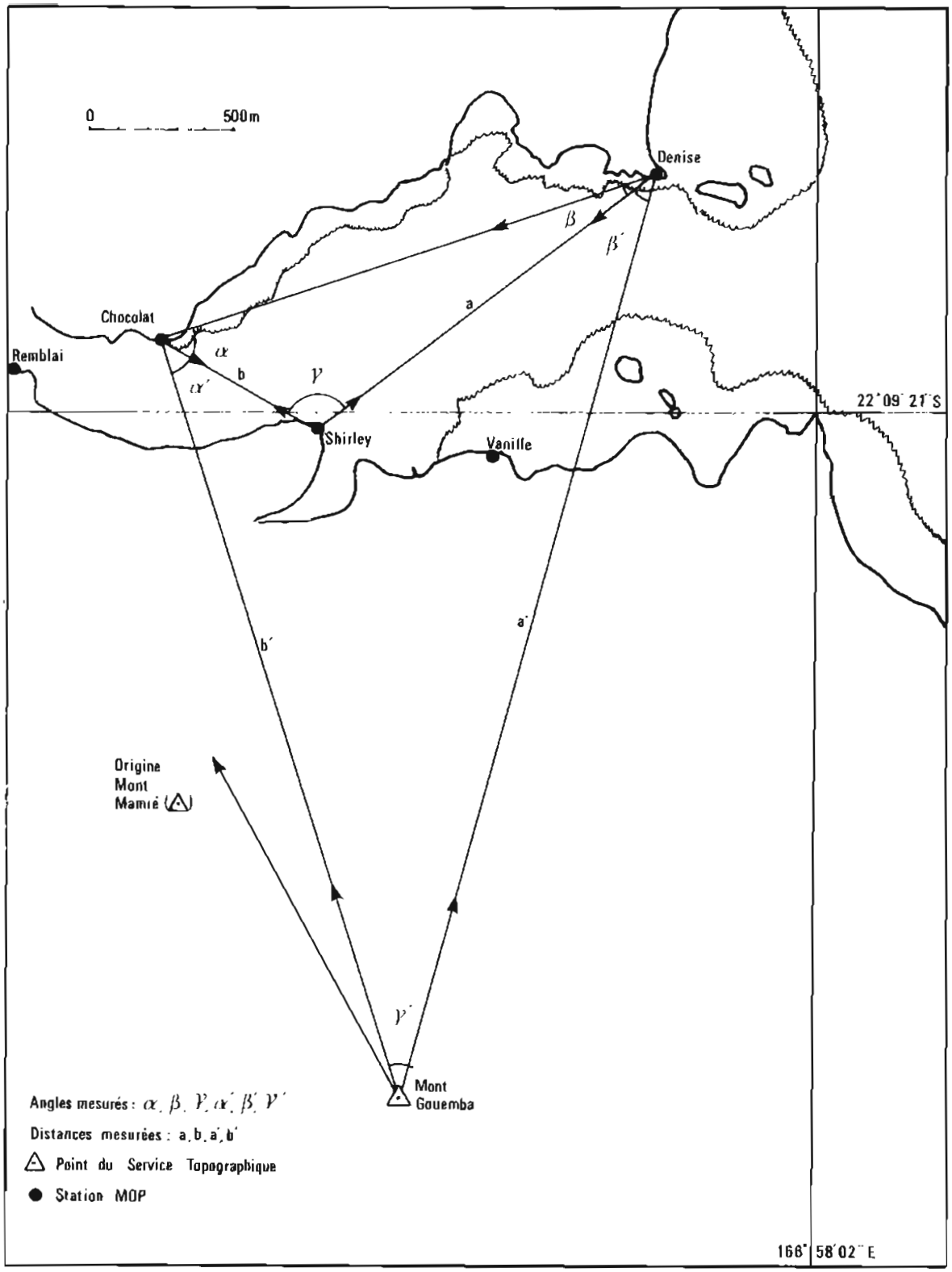
3.1.3. Bathymétrie

3.1.3.1. Lagon

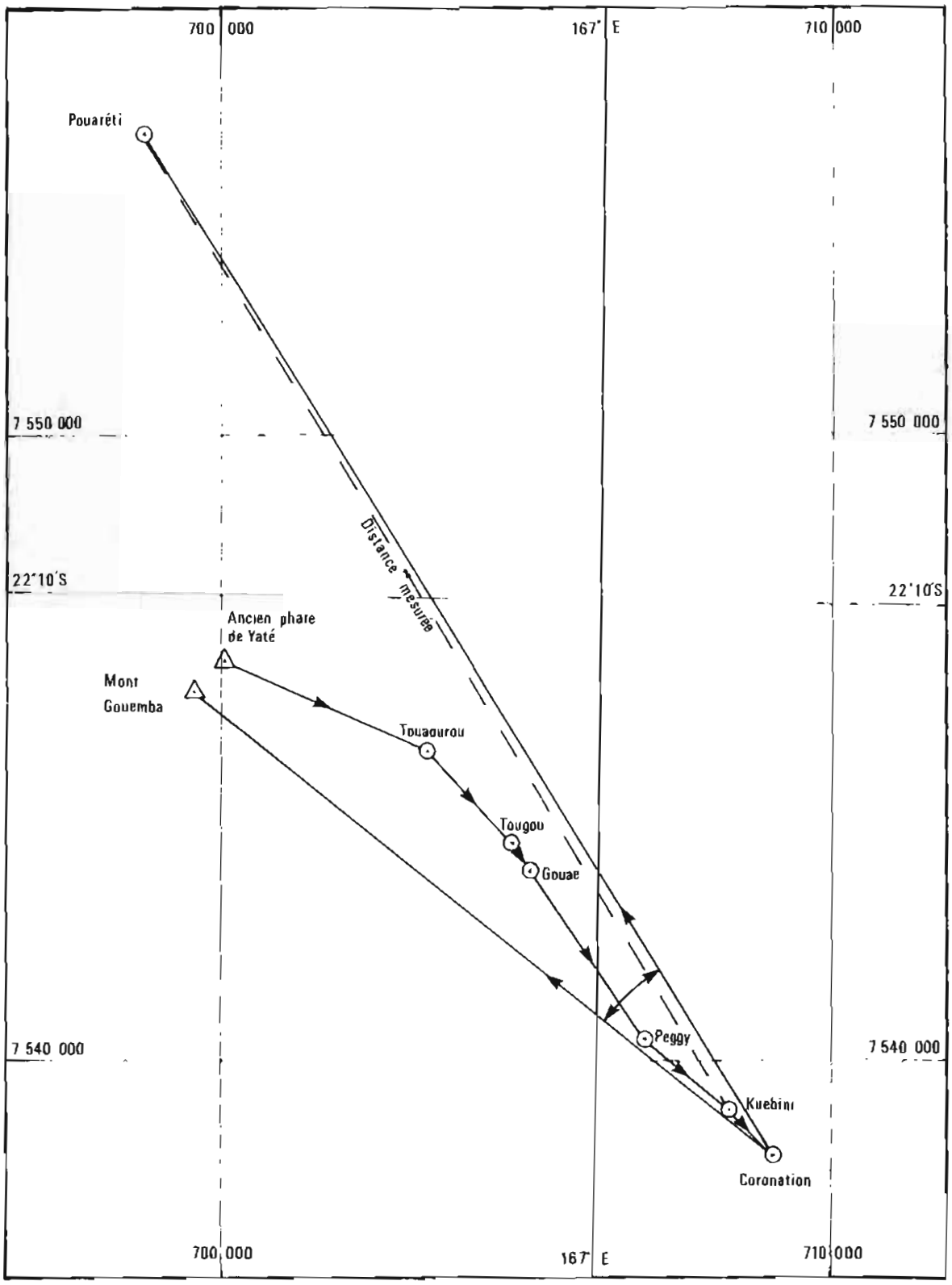
Le levé régulier du lagon et du récif extérieur a été fait suivant des profils circulaires espacés de 100 m, centrés sur des balises Trident installées à Tonnedu, Natore, Pouaréti, Yaté, Goro et Kié, et



PL. 3. — Levé côtier du Cap Tonnedu au canal de la Havannah.



PL. 4. — Embouchure de la rivière Yaté. Réseau géodésique.



PL. 5. — Cheminement du phare de Yaté au cap Coronation.

dans la partie Nord, sur des profils rectilignes radioguidés de Tonnedu ou Natore et espacés de moins de 100 m. Les minutes ont été rédigées au 1/10 000.

3.1.3.2. Port Ounia

Le levé de Port Ounia s'est fait suivant des profils circulaires centrés sur la balise Trident de Tonnedu et espacés de 50 m. Une minute au 1/5 000 a été rédigée.

3.1.3.3. Rivière de Yaté

Le levé de l'embouchure de la rivière Yaté a été effectué à l'aide d'une coralline équipée d'un sondeur à base hors-bord, suivant des profils radioguidés de différentes stations, l'embarcation étant toujours positionnée par 3 théodolites. La partie profonde de la rivière a été sondée suivant 2 directions différentes, et le levé rédigé au 1/5 000.

3.1.3.4. Talus continental

Au-delà du récif extérieur, le talus continental a été sondé avec un sondeur Raytheon sur 12 kHz, suivant des profils circulaires à grand rayon, centrés sur une balise Trident de Port Combui au Nord et sur une balise installée au sommet du pic Nga dans l'île des Pins au Sud.

Les zones sondées figurent sur la planche n° 6. La zone A a été sondée en octobre 1982 et la zone B de juin à août 1983.

Les profils étaient espacés de 1 000 m jusqu'à la profondeur de 1 000 m et de 2 000 m au-delà. Cependant, pour préciser la forme du relief, l'espacement de 1 000 m a été souvent conservé au-delà de la profondeur de 1 000 m.

Les profils les plus longs ont été poursuivis jusqu'à la rupture de pente avec la plaine abyssale qui sépare la Nouvelle-Calédonie des Loyauté, et qui se situe vers la profondeur 2 250 m.

La pente moyenne du talus est d'environ 15 %, mais irrégulière. Elle commence dès le récif au Nord du parallèle 22° S. Au Sud de ce parallèle, un plateau à pente douce s'étend jusqu'aux profondeurs de 400 à 500 m.

A l'extrémité Sud de la zone, en face de la passe de la Sarcelle, le tracé de l'isobathe 500 m fait apparaître l'amorce d'un canyon.

Les isobathes ont été tracées tous les 100 m avec un renforcement du trait tous les 500 m.

3.1.4. Recherches d'obstructions

Un chenal d'environ 2 000 m de large en moyenne, parallèle à la côte et situé dans la partie du lagon où les eaux sont des plus profondes, a été exploré au sondeur latéral sur l'échelle 250 m, suivant des profils rectilignes ou circulaires espacés au maximum de 200 m. Dans le dernier tronçon Sud, orienté Nord-Sud et débouchant sur l'entrée de la Havannah, la zone explorée empiète sur le banc de Coëtlogon levé en 1963.

La crête du récif immergé bordant le lagon n'a pas fait l'objet d'un sondage à une échelle supérieure au 1/10 000, ni de recherches systématiques. En fait, le sommet du récif est un plateau corallien qui s'est formé à fleur d'eau et qui a été immergé à une époque géologique récente. Les profondeurs sur ce plateau ne varient que lentement d'un point à un autre, ce que confirme le sondage au 1/10 000.

La plupart des têtes coralliennes isolées se rencontrent dans le lagon à proximité du récif. De nombreuses recherches ont été faites dans cette zone mais elles ne peuvent prétendre être exhaustives. Aussi a-t-on délimité une zone « incomplètement hydrographiée » parsemée de hauts fonds coralliens, comprenant le récif lui-même et les approches du récif à l'intérieur comme à l'extérieur du lagon.

La passe de Yaté a été explorée au sonal, sur des profils radioguidés du phare de Yaté. Le chenal exploré, large d'environ 1 000 m rejoint le chenal principal des voies recommandées dans le lagon.

La passe de Ouénou, étroite mais profonde, a fait l'objet d'un sondage complémentaire au 1/5 000 suivant des profils radioguidés du phare de Pouaréti. Si la passe elle-même est saine, un haut-fond de 10,2 m a été trouvé à l'orée de cette passe, à l'intérieur du lagon. La passe a une largeur de 400 m entre les fonds de 10 m, et dans sa partie Sud la profondeur atteint 45 m. Le récif immergé culmine à 6 m sous la surface à moins de 200 m du Nord de la passe.

Un chenal partant des voies recommandées, et permettant l'accès par l'Ouest jusqu'au mouillage de Port Ounia a été exploré au sonar latéral.

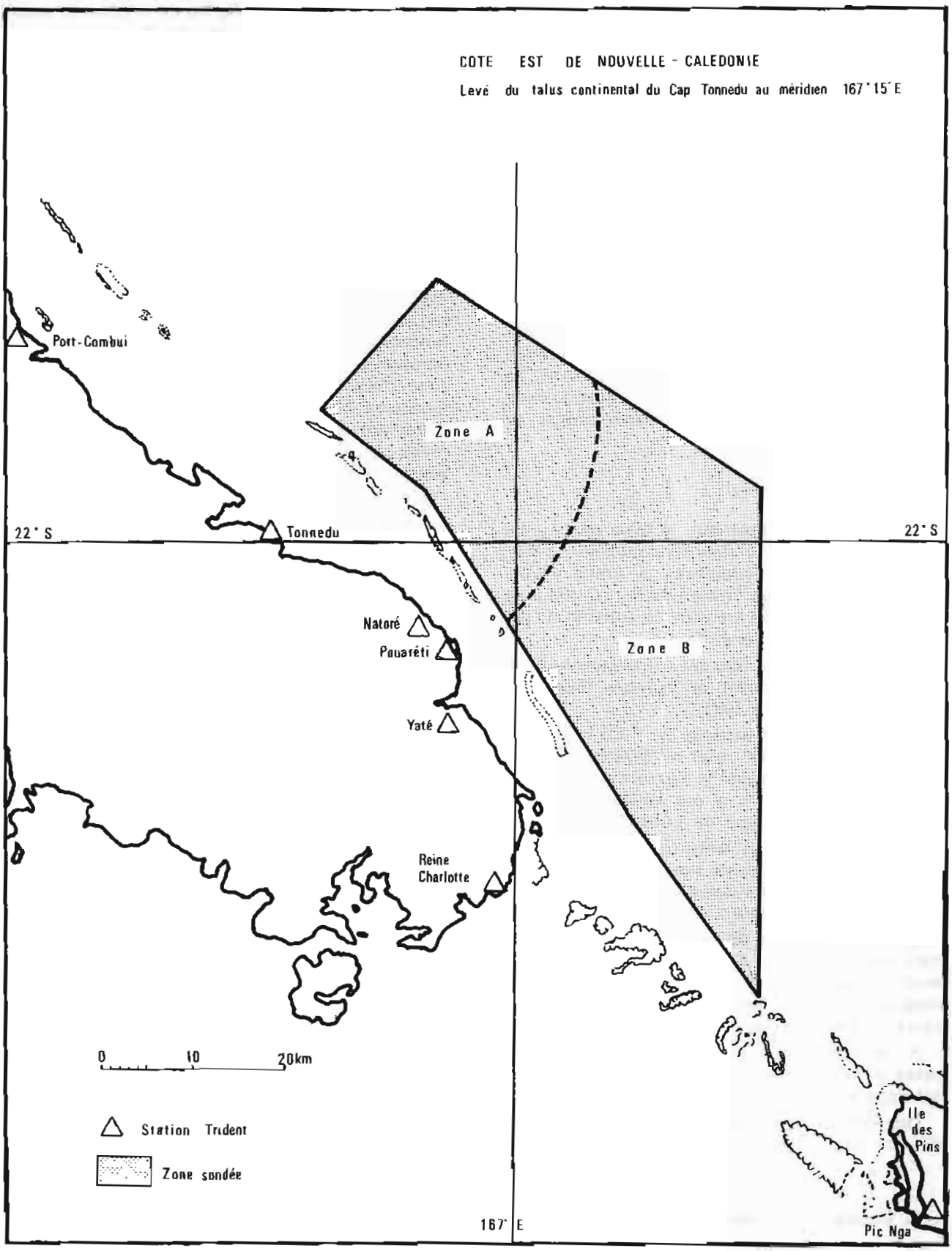
Les limites des zones explorées au sonal ont été tracées sur les minutes de bathymétrie et de recherche, et sont indiquées sur la planche 3.

3.1.5. Topographie

Le trait de côte et les limites du récif frangeant ont été restitués à la chambre claire à partir des photos aériennes de l'Institut Géographique National (IGN) au 1/20 000 pour la côte et 1/8 000 pour la rivière de Yaté.

Pour les récifs couvrants et découvrants de la barrière et du lagon, au Nord du parallèle 22°02'S, on a utilisé conjointement les photos de l'IGN et celles de l'Aéronavale.

Des cotes ont été prises sur le platier et quelques gros cailloux émergeants à marée haute



PL. 6. — Levé du large, du Cap Tonnedu au méridien 167°15'E.

disséminés sur le récif. Les échancrures dans le récif frangeant menant parfois jusqu'à la côte ou à un wharf, comme à Mamié, ont été sondées au plomb de sonde à partir d'une embarcation légère.

La topographie a été rédigée au 1/20 000 au Nord du parallèle 22°02'S, c'est-à-dire pour la zone incluse dans la carte QR, en conformité avec les minutes des levés précédents plus au Nord. Pour la carte S, la topographie a été rédigée à la même échelle que la bathymétrie, c'est-à-dire 1/10 000 pour la côte et 1/5 000 pour la rivière de Yaté. Les coupures des minutes de topographie sont les mêmes que celles des minutes de bathymétrie, et on y a fait figurer les recherches, les limites des zones explorées au sonal ainsi que les limites des zones incomplètement hydrographiées.

3.1.6. Géologie

Des échantillons de fond ont été prélevés à la benne preneuse dans le lagon, aux nœuds d'un réseau à mailles carrées de 1 mille de côté.

Les natures de fond ont été portées sur la minute de topographie au 1/20 000 : TN 20-4 au Nord du parallèle 22°02'S (carte QR). Une minute de natures de fond a été rédigée au 1/50 000 pour l'ensemble des prélèvements faits dans la zone de la carte S.

3.1.7. Courants

Une mesure de courant a été faite à Port Ounia du 23 au 30 septembre 1982 dans le 348 du rocher SE à 720 m, avec un courantomètre Mécabolier suspendu à l'immersion de 5 m, et une autre dans les mêmes conditions, devant l'embouchure de la rivière Yaté, du 26 mai au 14 juin 1983. Les emplacements des mesures de courant sont indiqués sur la planche n° 3. Le courant mesuré est très faible.

3.1.8. Marée

Des observatoires de marée avec marégraphe enregistreur OTT, ont été installés à l'extrémité du wharf de Mamié, dans l'embouchure de la rivière Yaté et dans le port de Goro sur un pilier de l'ancien poste de chargement de nickel. Les fiches ont été établies pour les nouveaux observatoires de Mamié et Yaté. Des croquis de situation et de nivellement figurent sur les planches n° 7 et 8.

A l'Ouest du Cap Tonnedu, la marée utilisée a été celle de l'observatoire de Ouinne pour lequel une fiche avait été rédigée en 1981.

A Goro, une concordance faite avec Nouméa confirme le zéro de réduction des sondes existant, mais une concordance faite avec Thio le situerait environ 14 cm plus haut.

4 zones de marée se rapportant à chacun de ces observatoires, ont été définies. Les emplacements des observatoires sont indiqués sur la planche n° 3.

3.1.9. Documents rédigés

Les documents suivants ont été rédigés à l'issue des levés côtier et du large :

- 1 minute de bathymétrie au 1/100 000
- 12 minutes de bathymétrie au 1/10 000
- 6 minutes de recherche au 1/10 000
- 5 minutes de topographie et recherche au 1/10 000
- 2 minutes de topographie et nature de fond au 1/20 000
- 1 minute de nature de fond au 1/50 000
- 2 minutes de bathymétrie au 1/5 000
- 1 minute de recherche au 1/5 000
- 1 minute de recherche et topographie au 1/5 000
- 2 cartouches de la carte marine 5507 renseignés pour les mouillages de Port Ounia et Yaté
- 1 planche de vues de côte
- 26 fiches géodésiques
- 2 fiches d'observatoire et marée

3.2 VÉRIFICATIONS HYDROGRAPHIQUES DES VOIES RECOMMANDÉES DANS LA RÉGION DE NOUMÉA

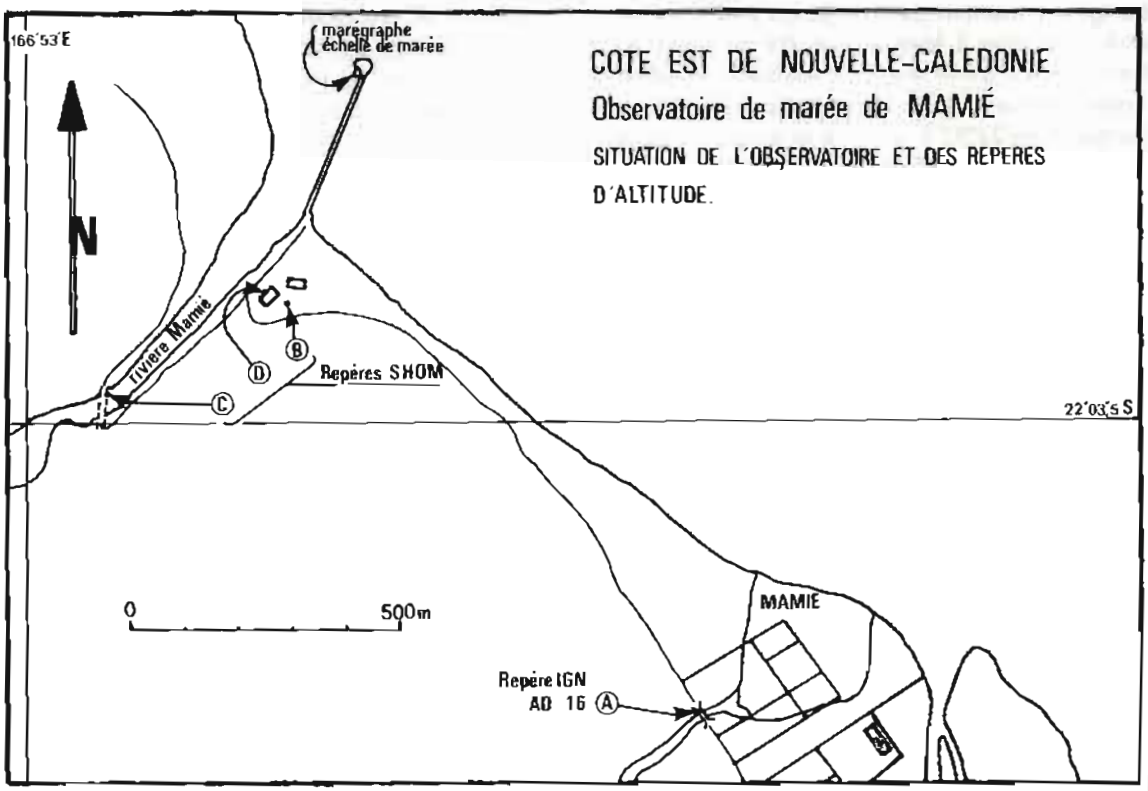
3.2.1. Préambule

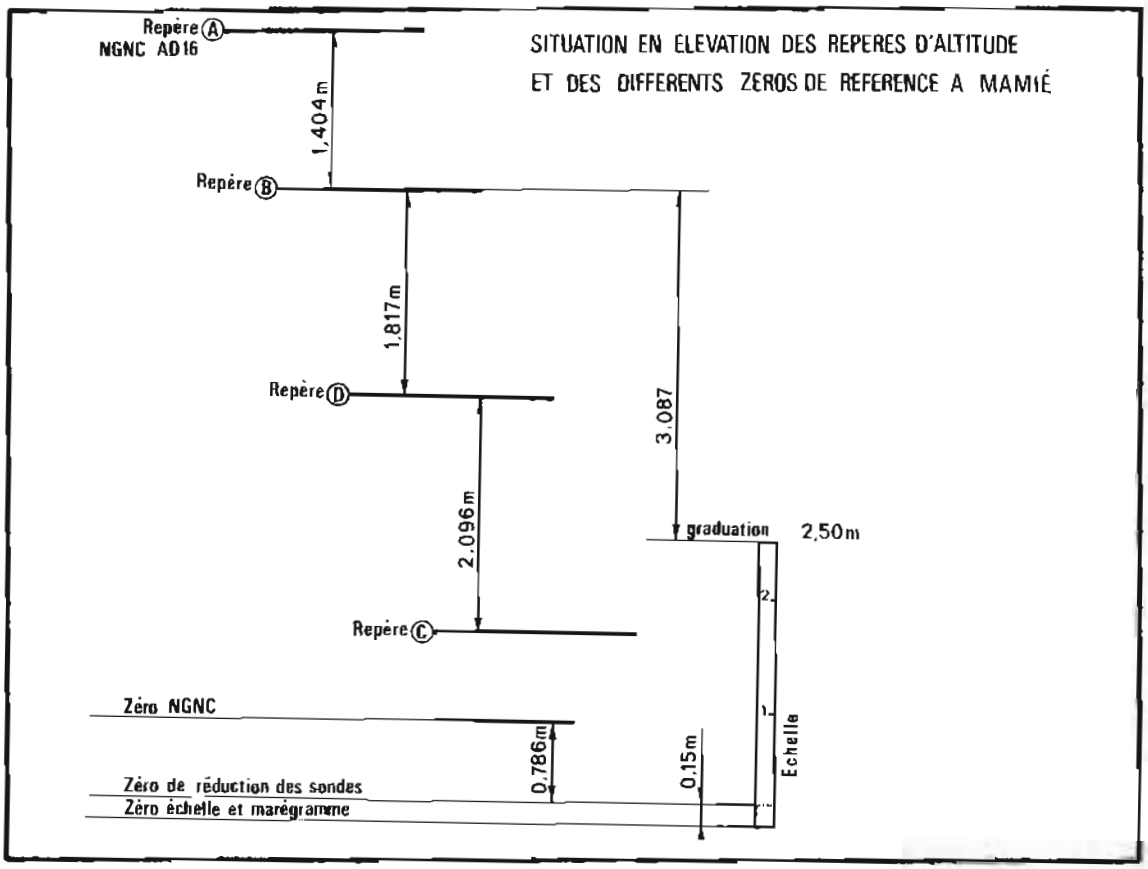
L'accès au port de Nouméa en venant de l'Ouest se fait en chenalant dans le lagon à partir des 3 passes de Uitoé, Dumbéa et Boulari. Sur le schéma de la planche n° 9 figurent les axes de ces chenaux avec en pointillés ceux qui avaient été vérifiés par l'ICA Souqière.

3.2.2. Chenal d'accès à la partie Sud du port de Nouméa à partir de la passe de la Dumbéa

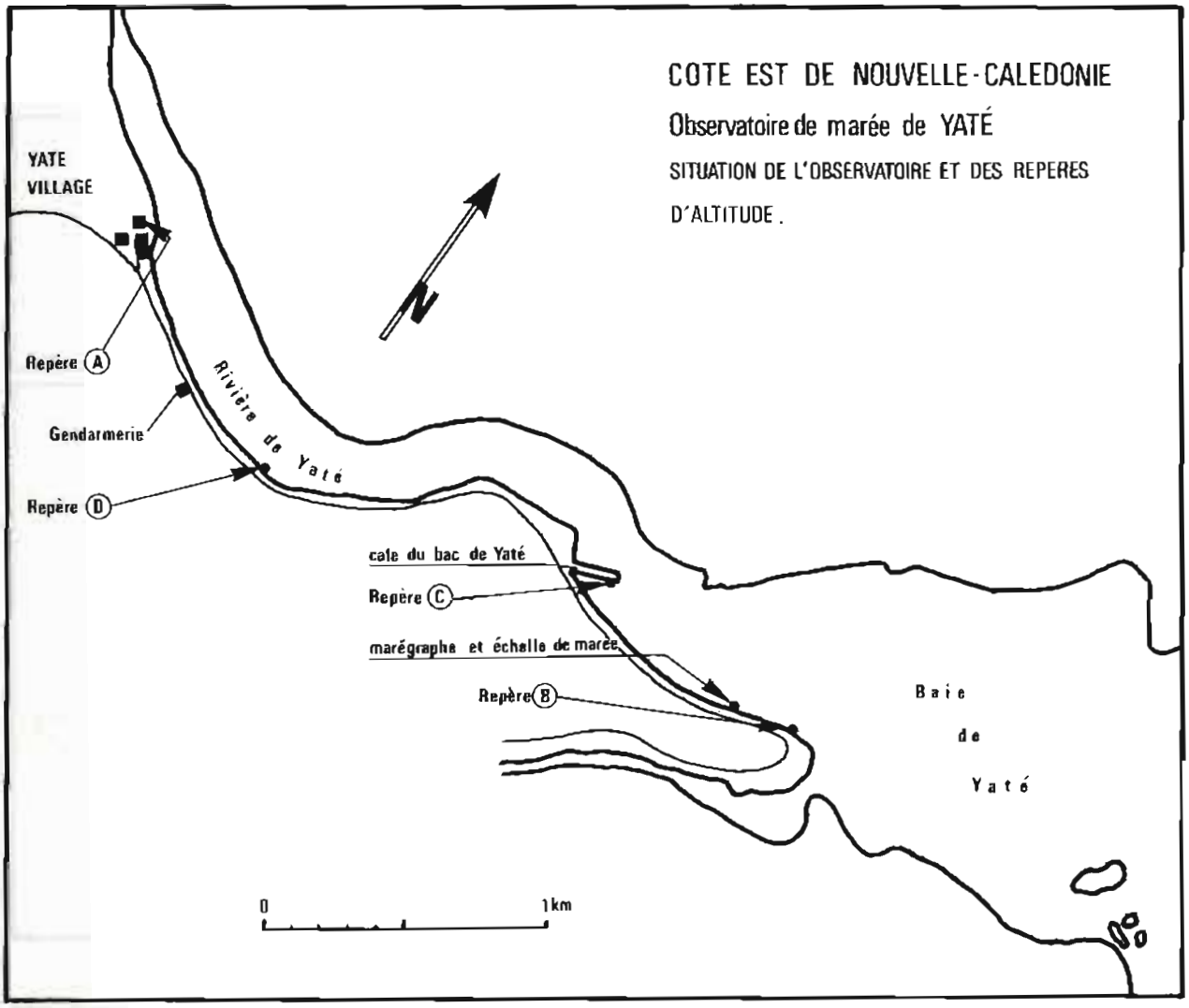
3.2.2.1. Délimitation du chenal et localisation

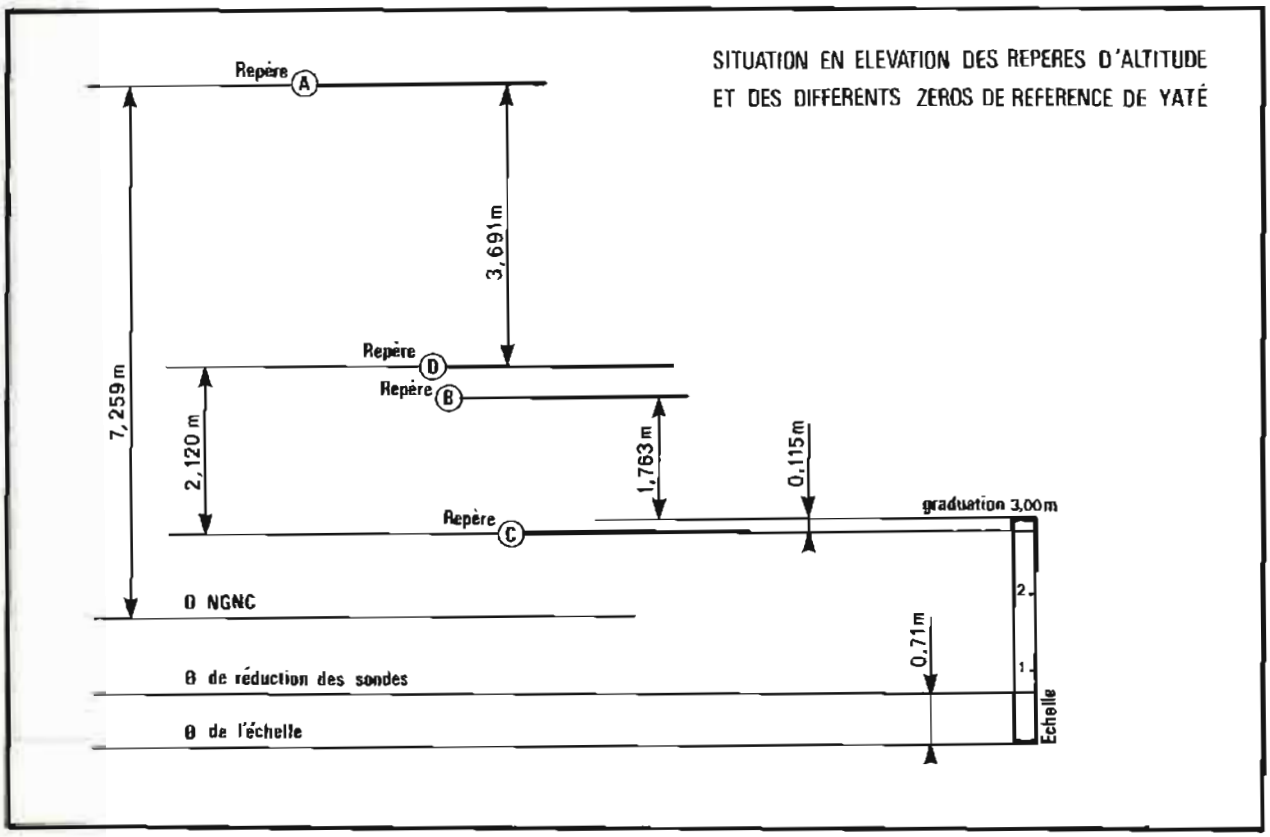
Le chenal exploré est la voie d'accès la plus directe à la partie Sud du port de Nouméa à partir de la passe de la Dumbéa, passant entre les îlots Nge et Te Ndu. De 1 500 m de large environ, il comprend un tronçon dont l'axe est orienté au 044°, et qui se rattache à ses deux extrémités aux zones explorées en 1980, et un tronçon dont l'axe



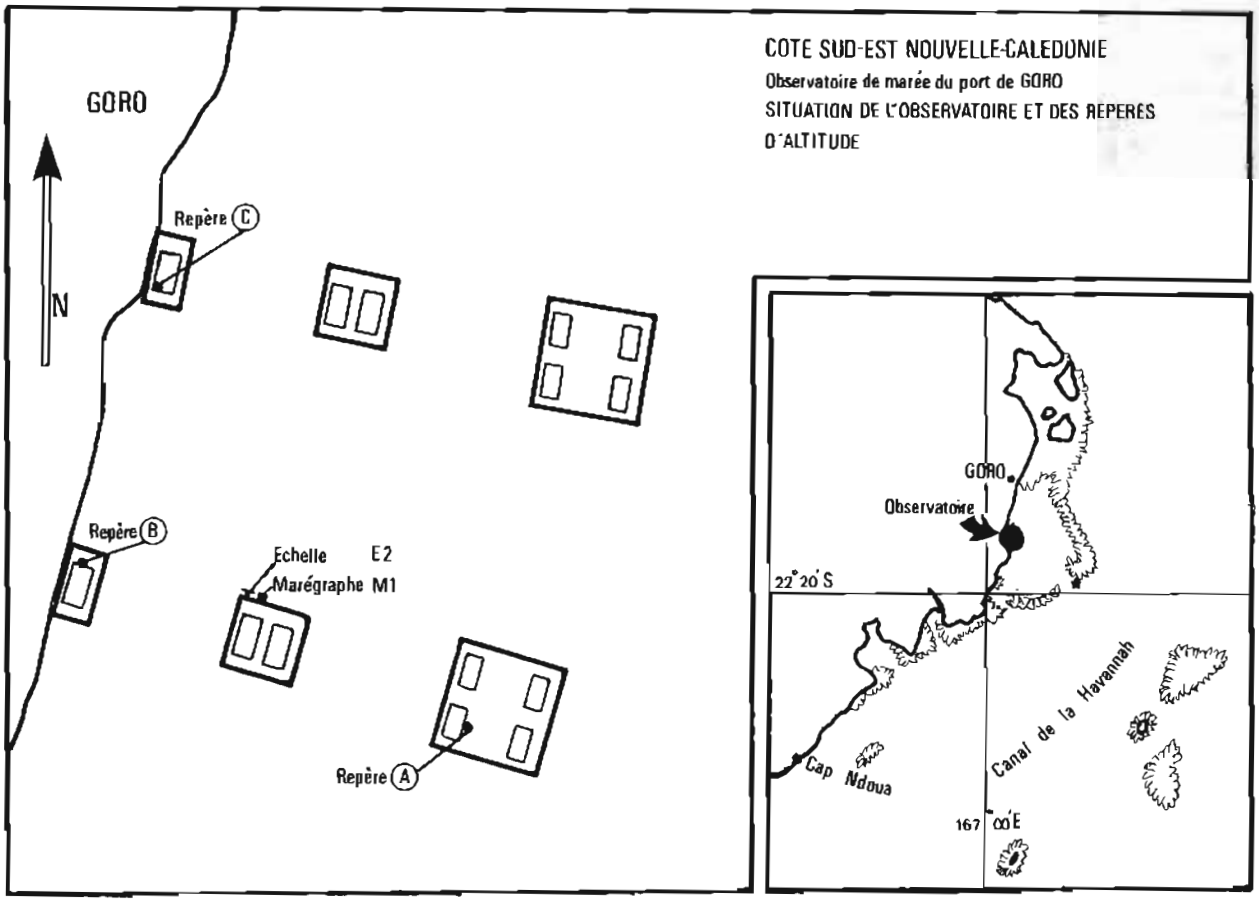


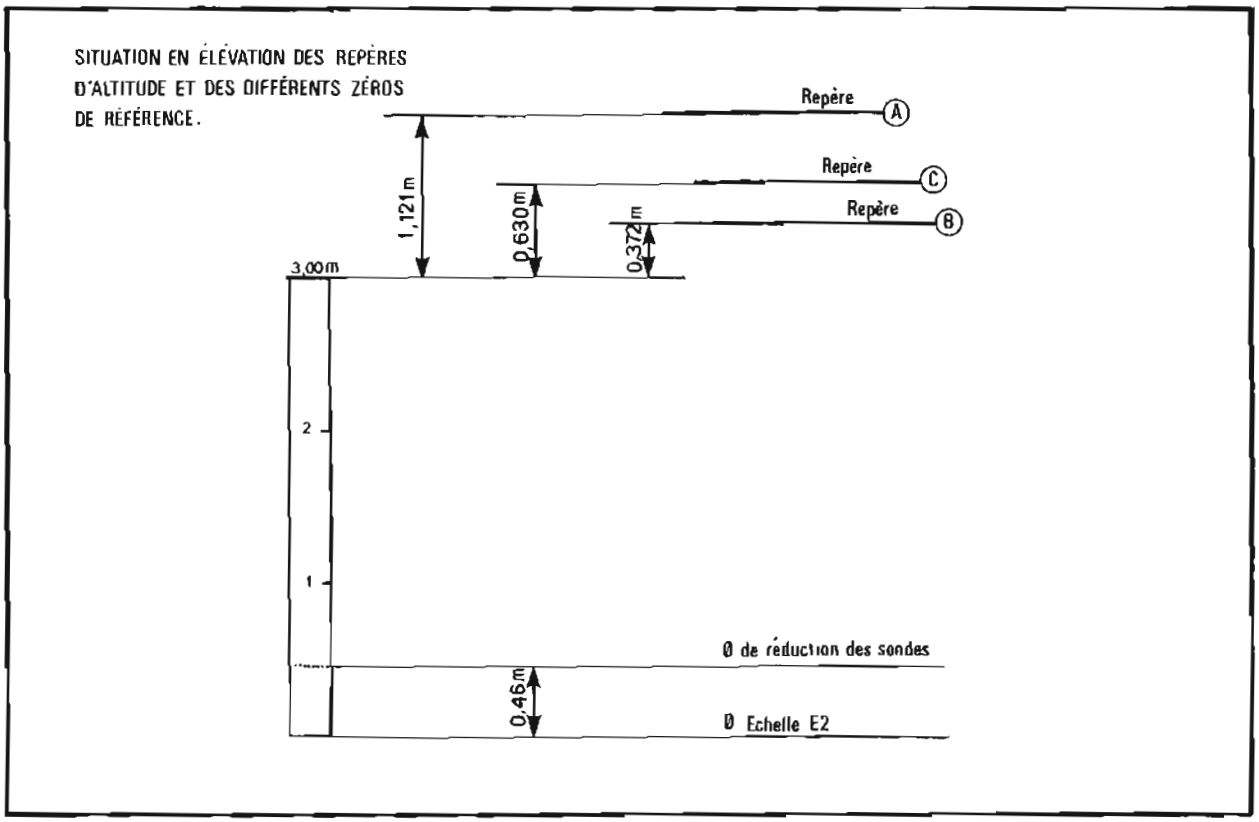
PL. 7. — Observatoire de marée de Mamié.



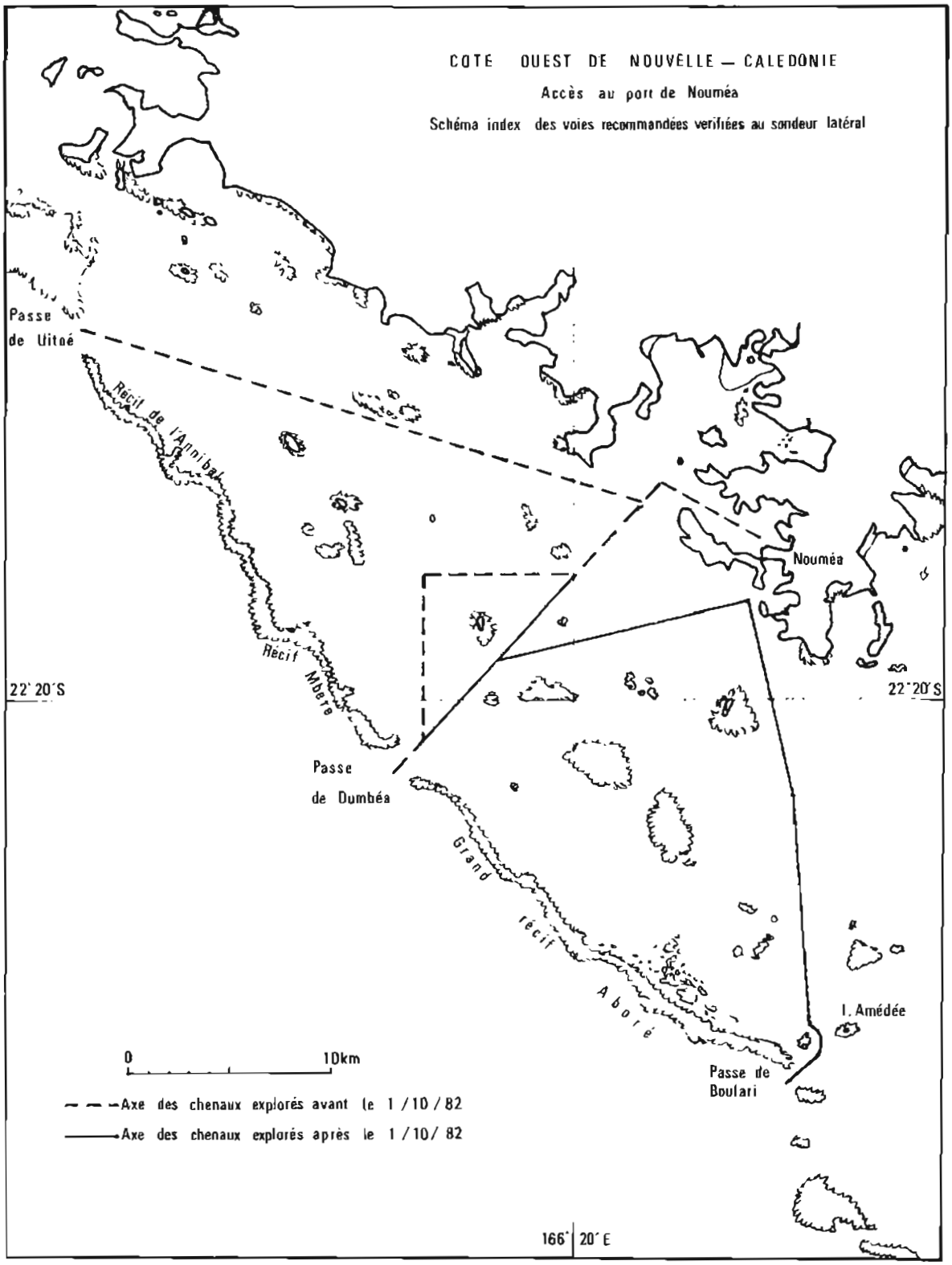


PL. 8. — Observatoire de marée de Yaté.





PL. 8bis. — Observatoire de marée du port de Goro.



PL. 9. — Schéma index des voies recommandées d'accès à Nouméa.

est orienté au 076°, et aboutissant à l'Est à la passe d'entrée du port de Nouméa entre l'îlot Brun et l'île Nou.

Sur le tronçon Ouest orienté au 044°, les profils étaient radioguidés à partir d'une station optique installée au sommet de l'îlot Freycinet. Deux lieux traversiers étaient assurés par des balises Trident installées sur le mont Tereka et l'îlot Brun.

Sur le tronçon Est, orienté au 076°, les profils étaient radioguidés à partir d'une station optique installée sur le sommet de la pointe de l'Artillerie. Deux lieux traversiers étaient fournis par un théodolite installé sur le sommet du mont Ouen-Toro et par une balise Trident à l'îlot Brun.

Pour les recherches, trois lieux de position ont été fournis par deux stations optiques sur les îlots Brun et Freycinet et une balise Trident sur l'îlot Brun.

Les coordonnées des différentes stations sont données en annexe. La zone explorée au sonal et les emplacements des stations ayant servi à la localisation figurent sur la planche n° 10.

3.2.2.2. Vérification des profondeurs

La vérification des profondeurs a été faite en décembre 1982 à l'aide d'un sondeur latéral Edgerton Mark 1 B remorqué par le BH 2 *Boussole* sur des profils radioguidés à partir d'une station optique, espacés de 100 m au maximum et suivis à une vitesse de 6 nœuds. La portée maximale sélectionnée sur l'enregistreur était de 125 m.

Les échos significatifs obtenus au sondeur latéral ont été reportés sur des minutes de construction sonal, avec leur cote approximative lorsque les caractéristiques de l'écho permettaient de déterminer cette cote.

Un levé bathymétrique classique au sondeur vertical a été effectué en même temps que l'exploration au sondeur latéral. Les sondes ont été réduites de la marée enregistrée à l'observatoire permanent de Nouméa. La zone explorée avait déjà fait l'objet d'un levé bathymétrique régulier au 1/10 000 entre 1966 et 1969. Les sondes figurant sur les minutes anciennes et qui étaient inférieures aux sondes trouvées en 1983 ont été reportées entre crochets sur les minutes de bathymétrie établies. Ces sondes sont à conserver. Les isobathes sont cohérentes avec celles des minutes antérieures.

3.2.2.3. Recherches de hauts-fonds

17 recherches de roche ont été effectuées au sondeur vertical dont 16 à partir d'échos enregistrés au sonal. Presque toutes se trouvent dans la partie Ouest du chenal. Un petit écho obtenu au sonal, et investigué par plongeurs, a permis de détecter une roche corallienne de 10,6 m de brassiage et de 1,7 m de hauteur au-dessus du fond de sable, à la position X = 633 500; Y = 7 531 600 en plein centre du chenal recommandé. A cette position se trouvait une sonde 11,8 sur les cartes 6656 et 6687.

L'autre sonde est un 11,4 m situé à la jonction des 2 tronçons, à la position X = 634 630; Y = 7 532 200, la sonde la plus proche sur les cartes est un 11,7 m.

Les légères différences observées parfois avec les anciennes minutes de bathymétrie n'ont pas donné lieu à des recherches, ces différences se produisant généralement par des fonds d'environ 25 m.

Aucune recherche n'a été faite d'après la carte.

3.2.2.4. Documents établis

Les documents suivants ont été rédigés à la suite de ce levé :

- 2 minutes de bathymétrie au 1/10 000
- 1 minute de recherche de hauts-fonds au 1/10 000
- 2 cartes renseignées 6687 et 6633.

3.2.3. Chenal d'accès à la partie Sud du port de Nouméa à partir de la passe de Boulari

3.2.3.1. Délimitation du chenal

Le chenal retenu pour accéder à la partie Sud du port de Nouméa fait environ 1 000 m de large et se divise en trois tronçons. Le tracé de ce chenal figure sur la planche n° 11.

Un premier tronçon court, dont l'axe est orienté au 050° vers le phare Amédée, permet de franchir la passe de Boulari entre les récifs Abore et To, en laissant sur sa gauche la tourelle Tabu.

Un deuxième tronçon de 6 milles de long, axé au 356° à partir de la tourelle Tabu, pour la partie Sud du chenal.

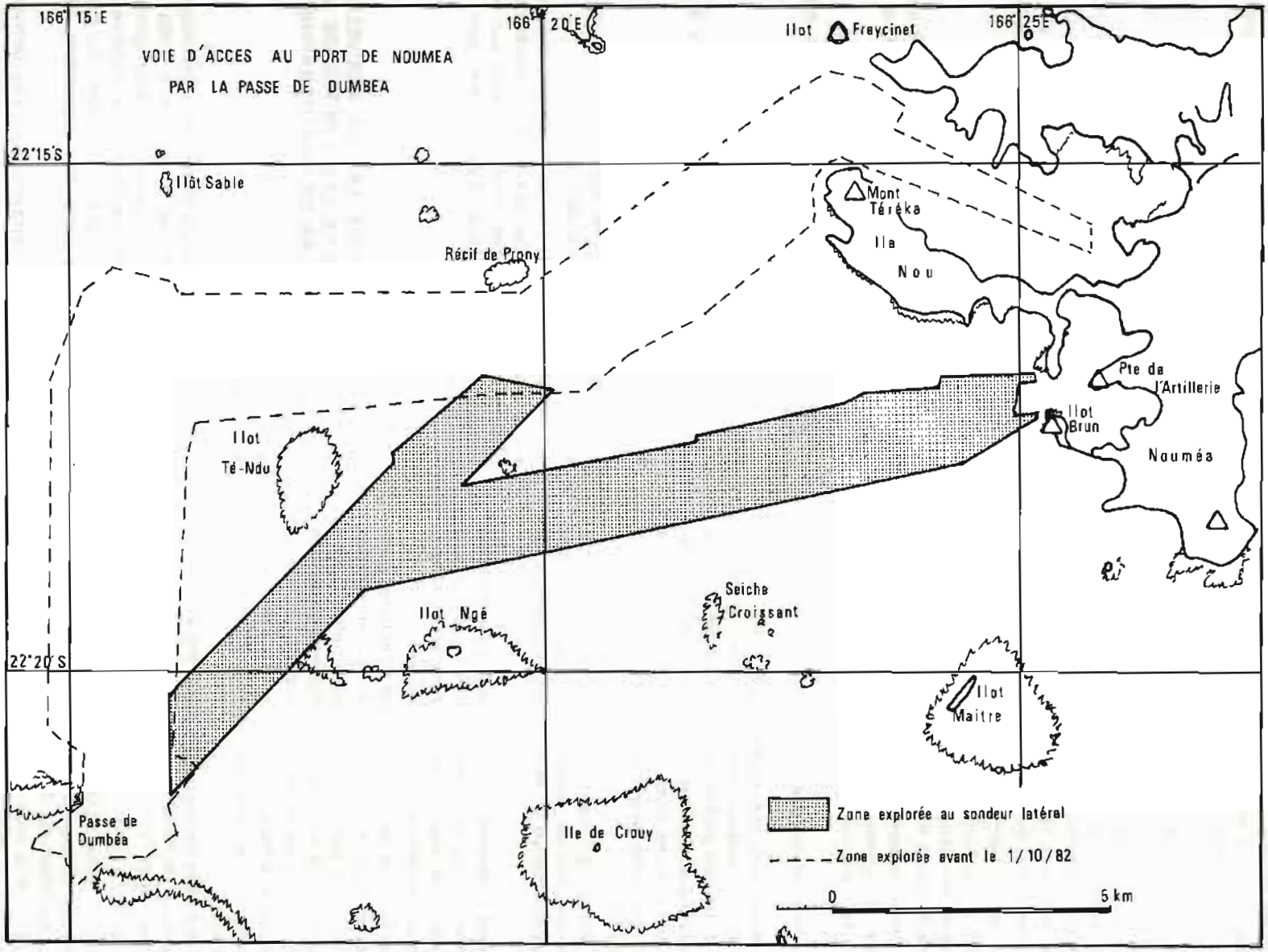
Un troisième tronçon de 5 milles de long, dont l'axe est orienté au 347°, infléchit vers l'Ouest la direction du chenal dans sa partie Nord pour déboucher sur la passe d'entrée Sud du port de Nouméa, en laissant assez près sur sa gauche le banc et la tourelle de l'îlot Maître.

A la demande des autorités maritimes locales, la vérification d'une zone de mouillage interdit sur les cartes en service, au nord du phare Amédée, a été effectuée au cours de la même opération.

3.2.3.2. Localisation

Sur le tronçon de franchissement de la passe, orienté au 050°, les profils étaient radioguidés depuis le phare Amédée. Deux traversiers étaient fournis par des balises Trident installées sur le phare Amédée et l'îlot Brun.

Sur le tronçon orienté au 356°, les profils étaient radioguidés depuis l'îlot Brun. Deux traversiers



PL. 10. — Voie d'accès au port de Nouméa à partir de la passe de Dumbéa.

étaient fournis par des balises Trident installées sur l'îlot Porc-Epic et l'îlot Brun.

Sur le tronçon orienté au 347°, les profils étaient radioguidés depuis le phare Amédée. Trois lieux traversiers étaient assurés par un théodolite installé sur le bâtiment de l'ORSTOM au sommet du Mont Ouen Toro, et par deux balises Trident installées sur le bâtiment de l'ORSTOM et sur le phare Amédée.

Dans la zone de mouillage interdit, les profils étaient suivis sur des cercles centrés sur la balise Trident de l'îlot Brun. Deux autres lieux étaient fournis par une station optique et une balise Trident installées sur le phare Amédée.

Pour les recherches de roche, trois lieux ont été fournis par un théodolite installé au phare Amédée et par deux balises Trident installées sur le phare Amédée et sur l'îlot Brun.

Les coordonnées des différentes stations sont données en annexe, et les emplacements des stations figurent sur la planche n° 11.

3.2.3.3. Vérification des profondeurs

La vérification des profondeurs a été faite à l'aide d'un sondeur latéral (sonal) Edgerton Mark 1 B sur des profils radioguidés à partir d'une station optique, espacés au maximum de 100 mètres et suivis à une vitesse voisine de 5 nœuds. La portée maximale sélectionnée sur l'enregistreur était de 125 m.

Les échos significatifs obtenus ont été reportés sur des minutes de construction sonal avec leur cote approximative et leur hauteur au-dessus du fond.

Un levé bathymétrique classique a été effectué en même temps que l'exploration au sonal. Les sondes ont été réduites de la marée enregistrée à l'observatoire permanent de Nouméa.

26 recherches de roche ont été effectuées dans le chenal, dont 9 à partir d'échos enregistrés au sonal, 11 à partir du levé bathymétrique et 6 d'après la carte marine 6687. Presque toutes se situent dans la partie Sud du tronçon orienté au 356°. Aucune différence sensible n'a été trouvée par rapport à la carte en service et aux levés précédents.

8 recherches de roche ont aussi été effectuées dans la zone de mouillage interdit, dont 6 d'après des échos sonal, 1 d'après le levé bathymétrique, et 1 d'après la carte.

Un écho remarquable obtenu au sonal et investigué par plongeurs a permis de détecter un plateau corallien de 30 m de long sur 10 m de large, et dont la cote minimale de 8,2 m se situe à la position de coordonnées MTU :

X = 650 900; Y = 7 515 560

A cette position la carte n° 6687 indiquait une sonde de 11,4 m.

3.2.3.4. Courants

Des mesures de courant de 5 jours ont été effectuées à l'aide de courantomètres Mécabolier aux profondeurs de 5 m et 15 m aux 2 points suivants :

I : L = 22°28,6' S; G = 166°26,5' E
J : L = 22°24,0' S; G = 166°23,7' E

Ces points figurent sur la planche n° 11.

3.2.3.5. Information nautique

L'épave toujours découvrante, indiquée sur la carte n° 6687 et située sur les Petits Bancs des récifs Snack à la position :

L = 22°25,8' S; G = 166°25,8' E

n'est plus visible.

Sur le récif Tabu, une goélette de 15 m de long s'est échouée en 1983 près de la tourelle, à la position MTU :

X = 648 544; Y = 7 512 521

Cette épave est toujours découvrante et bien visible.

3.2.3.6. Documents établis

Les documents suivants ont été rédigés à la suite de ce levé :

- 3 minutes de bathymétrie au 1/10 000
- 2 minutes de recherche au 1/10 000
- 1 carte renseignée (CM 6687)
- 4 dossiers de mesure de courant.

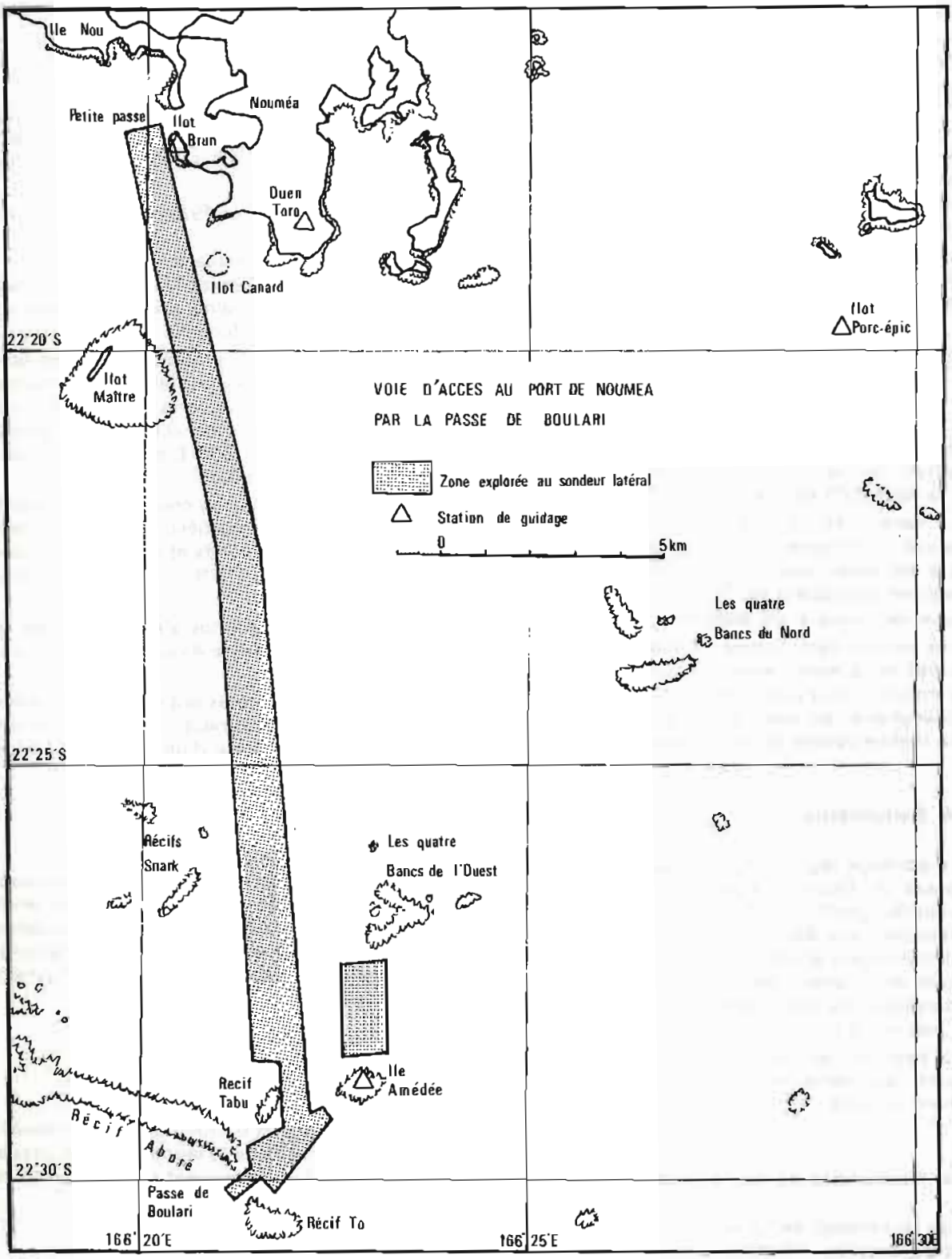
Les sondes figurant sur les anciennes minutes et qui étaient inférieures aux sondes trouvées en 1984, ont été reportées entre crochets sur les minutes de bathymétrie. Ces sondes sont à conserver.

3.3. LEVÉ DE LA CÔTE EST DE NOUVELLE-CALÉDONIE, DANS LES LIMITES DE LA CARTE N DU PLAN DE CARTOGRAPHIE

3.3.1. Généralités

Ce levé, prescrit par les Instructions Techniques n° 965 SHOM/EM/NP du 9 novembre 1983 et destiné à compléter la couverture hydrographique du lagon de la côte Est de Nouvelle-Calédonie au Nord de Touho, ainsi que l'exploration du talus continental, a été entamé dès septembre 1983 dans le lagon.

Les travaux sur le terrain n'étant pas terminés et la rédaction étant en cours, le compte rendu complet des résultats paraîtra dans le prochain Rapport de Mission. Un compte rendu succinct des opérations effectuées jusqu'au 30 avril 1984 est donné dans les paragraphes suivants.



PL. 11. — Voie d'accès au port de Nouméa à partir de la passe de Boulari.

3.3.2. Géodésie

Le réseau de Triangulation du Service Topographique s'arrêtait au niveau de Touho en fin 82. Des signaux ont été mis en place par ce service au début de 1983 jusqu'à l'Ouest de Hienghène, des mesures de triangulation effectuées et des coordonnées provisoires calculées avec une précision suffisante pour les travaux d'hydrographie. Quelques stations complémentaires ont été placées par la MOP sur le rivage et sur les îlots jusqu'à Hienghène.

L'implantation du réseau géodésique figure sur la planche n° 12. Des fiches géodésiques ont été établies.

3.3.3. Marée

Les sondes dans le lagon ont été réduites de la marée enregistrée par un marégraphe installé sur le wharf de Touho, à l'emplacement déjà utilisé par la MHNC (*) en 1963.

Le repère A1 de nivellement n'ayant pu être retrouvé, un nouveau zéro de réduction des sondes a été déterminé par concordance avec l'observatoire permanent de Thio. Une fiche d'observatoire de marée a été établie.

Les sondes dans la baie de Hienghène ont été réduites de la marée enregistrée par un marégraphe installé sur la rive Ouest de l'embouchure de la Hienghène, au pied de la gendarmerie. Une fiche d'observatoire de marée a aussi été établie.

3.3.4. Bathymétrie

Le sondage régulier du lagon a été effectué de la passe de Touho à la passe de Tilguitt à 99 % suivant des profils circulaires centrés sur la balise Trident de Coco Beach et espacés de 100 m; les lieux traversiers étaient fournis par des distances Trident des stations de Vieux Touho, Bounou et Lindéralique, ou des visées optiques à partir de ces stations à l'arrivée à la côte des profils.

La baie de Hienghène a été sondée au 1/5 000 suivant des profils radioguidés avec un positionnement optique.

3.3.5. Recherches de hauts-fonds

Les recherches de hauts-fonds ont été faites à l'Est du méridien 165°06'E.

Un chenal d'environ 1 000 m de large a été exploré au sonal le long de la côte, de la passe de Touho à la passe de Tilguitt. Les abords de la baie de Hienghène ont aussi été explorés.

3.3.6. Topographie

Pour la restitution topographique de la côte et des récifs, la Mission disposait de photos aériennes verticales de l'IGN en noir et blanc d'excellente qualité :

- au 1/20 000 prises en 1976 pour la côte et les îles proches
- au 1/8 000 pour l'estuaire de la Hienghène

et de photos verticales au 1/35 000 plus anciennes et de moins bonne qualité, prises par l'Aéronavale, sur le Grand Récif Mengalia.

Une nouvelle mission photo en noir et blanc a été effectuée par l'Aéronavale, à la demande de la MOP. La zone couverte par cette mission, interrompue en cours de vol, va de la passe de Touho au méridien 165°06'E environ. L'échelle des négatifs est du 1/15 000.

Une mission photo en couleur complémentaire a été effectuée par un hélicoptère Puma de l'Armée de l'Air sur les récifs et les îlots non couverts par les photos de l'IGN à l'Ouest du méridien 165°06'E.

Le piquage des photos s'est fait sur les récifs à l'aide d'un hélicoptère Alouette III de l'Armée de l'Air.

De nombreuses cotes ont été prises à la perche sur des récifs faiblement immergés, au moyen d'une coralline équipée d'un récepteur Trident.

3.3.7. Courants

Des mesures de courant de plusieurs jours ont été effectuées en 7 points, dans les endroits resserrés et les passes, à l'aide d'un courantographe Mécabolier à enregistrement photographique, immergé à 5 m. Les points de mesure figurent sur la planche n° 10.

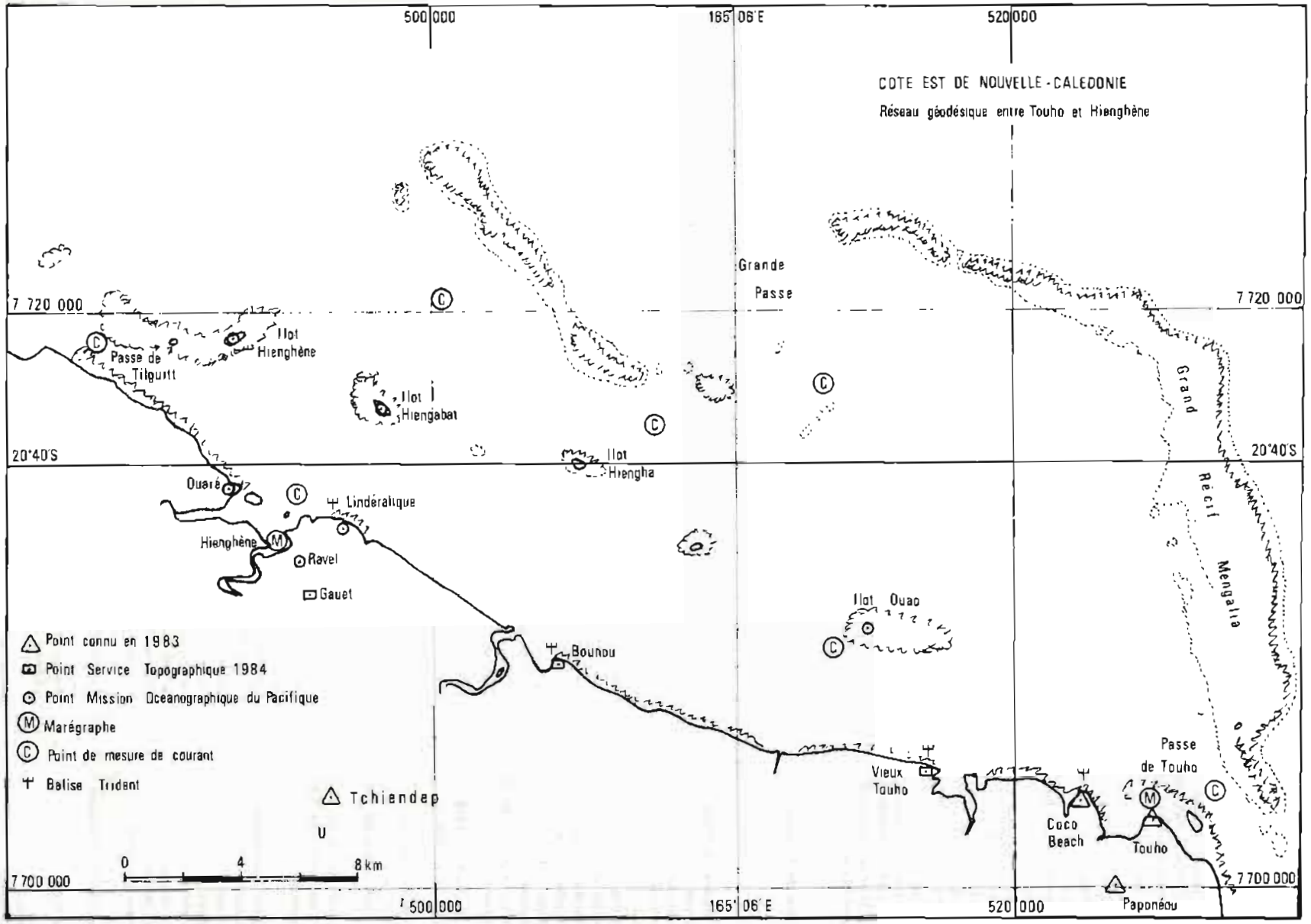
3.3.8. Natures de fond

Des échantillons du fond ont été ramassés à la benne preneuse dans le lagon entre les passes de Touho et de Tilguitt, suivant un maillage carré de 1 000 m de côté.

3.3.9. Magnétisme

Des mesures de déclinaison de 24 h ont été faites sur les îlots de Ouao et Hienghène, avec un théodolite Wild T0.

(*) Mission Hydrographique de Nouvelle-Calédonie.



PL. 12. — Réseau géodésique entre Touho et Hienghène.

ANNEXE AU PARAGRAPHE 3.1.2.

Liste des points bornés

Point	Repère	X	Y	Observations
A) Au Nord de Yaté				
Port Combui : Petit Borindi	Calvaire	654 087,05	7 588 418,84	
Port Combui : Petit Borindi		654 088,07	7 588 422,95	Station Trident
Mont Ouinné	Signal MOP sur point Service Topographique	675 492,99	7 571 010,65	Point Service Topographique (1er ordre)
Tonnedu	Repère SHOM	681 317,72	7 567 277,84	
Tonnedu		681 315,55	7 567 276,01	Station Trident
Balise verte Port Ounia	Cône vert	690 613,7	7 562 981,8	Balisage fixe
Urbain	Douille scellée dans borne MOP 1982	690 248,8	7 562 363,4	
Jetée d'Ounia	Repère SHOM scellé	690 997,2	7 562 433,2	
Natore	Repère SHOM	694 908,7	7 559 206,4	Station Trident
Natore	Borne	694 906,3	7 559 214,4	
Natore	Pylone TV	694 856	7 559 086	Amer
Île Ouénou	Signal MOP	699 178,7	7 556 431,0	
Île Ouénou station 1		699 158,4	7 556 434,9	
Île Ouénou station 2		699 181,2	7 556 438,4	
Île Ouénou station 3		699 175,3	7 556 436,0	
Mont Mamié	Signal MOP sur point Service Topographique	693 415,85	7 555 222,79	Point Service Topographique n° 35-23
Phare de Pouaréti	Lanterne du phare	698 736,5	7 554 865,4	Amer
	Douille scellée	698 739,9	7 554 864,5	
	Croix gravée	698 742,8	7 554 853,9	
	Borne PVC	698 745,55	7 554 863,71	Station Trident
B) Rivière de Yaté				
Denise	Douille scellée	700 406,85	7 549 114,57	
Chocolat	Douille SHOM	698 714,9	7 548 568,2	
Remblai	Douille SHOM	698 143,5	7 548 489,8	
Shirley	Douille SHOM	699 302,0	7 548 294,7	
Vanille	Piquet provisoire	699 873,2	7 548 192,7	
Piquet vert		699 627,6	7 548 826,5	Balisage fixe
Tripode rouge	Sommet tripode	699 755,5	7 548 600,0	Balisage fixe
Tripode rouge	Sommet tripode	700 028,6	7 548 718,8	Balisage fixe
Balise inférieure de l'alignement	Sommet balise	699 410	7 549 052	Balisage fixe
Balise supérieure de l'alignement	Sommet balise	698 997	7 549 151	Balisage fixe
C) Au Sud de Yaté				
Mont Gouemba	Antenne fouet relais de télévision	699 528,0	7 545 898,4	
Mont Gouemba	Pylone axe et sommet	699 527,3	7 545 897,4	Amer
Mont Gouemba	Douille SHOM	699 530,2	7 545 903,6	
Ancien phare de Yaté	Axe du phare	700 027,4	7 546 397,0	Amer remarquable station Trident
Ancien phare de Yaté	Douille SHOM	700 028,4	7 546 403,4	
Ancien phare de Yaté	Borne PVC	700 041,7	7 546 402,6	
Touaourou	Douille SHOM dans borne MOP	703 335,6	7 544 938,0	
Eglise Touaourou	Sommet du clocher	703 260,7	7 544 817,1	Amer
Tougou	Douille SHOM	704 738,3	7 543 482,0	
Gouae	Douille SHOM	705 037,5	7 543 049,4	
Peggy	Piquet en fer scellé	706 919,0	7 540 340,5	
Kuebini	Douille SHOM	708 314,0	7 539 192,2	
Coronation	Douille SHOM	709 017,0	7 538 434,8	
Îlot Neae	Repère MHNC 1970	709 373,04	7 533 250,88	
Phare de Goro	Repère MHNC, douille scellée	709 518,6	7 529 164,49	
Cap Reine Charlotte	Borne MOP 1974, douille scellée	705 749,25	7 528 012,87	Station Trident
Île Kié	Repère MHNC 1970, douille scellée	711 989,62	7 523 620,97	Station Trident
Île Kié		711 990,51	7 523 622,35	Station Trident
Pic Nga	Borne MOP 1978	752 651,23	7 492 480,66	Station Trident

ANNEXE AU PARAGRAPHE 3.2.2.

Liste des coordonnées des stations utilisées

Nom du point	Utilisation	X	Y	Observations
Îlot Freycinet	Théodolite	642 705,2	7 541 137,9	Borne Service Topo
Mont Téréka	Trident	642 919,3	7 538 350,2	Borne Service Topo
Mont Ouen Toro	Théodolite	649 450,3	7 532 344,0	Borne MOP
Pointe de l'Artillerie	Théodolite	647 333,4	7 534 850,5	Borne Service Topo
Îlot Brun I	Trident	646 596,0	7 533 870,6	A côté borne MOP
Îlot Brun II	Trident	646 596,6	7 533 872,8	Utilisé pour les recherches
Îlot Brun III	Théodolite	646 596,1	7 533 870,7	Borne MOP

ANNEXE AU PARAGRAPHE 3.2.3.

Liste des coordonnées des stations utilisées

Nom du point	Théodolite ou Trident	X	Y	Observations
Îlot Brun	Théodolite	646 596,1	7 533 870,7	Borne MOP
Îlot Brun	Trident	646 596,6	7 533 872,0	Piquet en fer
Bt ORSTOM (Ouen-Toro)	Théodolite	649 477,7	7 532 110,1	Douille SH MOP
Bt ORSTOM (Ouen-Toro)	Trident	649 478,5	7 532 110,8	Station excentrée
Îlot Porc-épic	Trident	661 331,5	7 529 854,1	Station excentrée près douille MOP
Phare Amédée	Trident	650 682,3	7 513 254,5	Station excentrée
Phare Amédée	Théodolite	650 683,47	7 513 255,35	Croix gravée MOP

CHAPITRE 4

LEVÉS HYDROGRAPHIQUES DE DÉTAIL DESTINÉS A PERMETTRE LE PLAGEAGE D'UN BÂTIMENT DE TRANSPORT LÉGER (BATRAL)

4.1. PLAGEAGE DE WADRILLA A OUVÉA

4.1.1. Préambule

La zone de plageage retenue se trouve immédiatement au Sud du wharf de Wadrilla (voir planche n° 13). Les approches de ce wharf, et par conséquent de la zone de plageage, ont fait l'objet d'un levé au 1/2 500 en 1981. La zone levée au 1/1 000 en avril 1983 prolonge vers le Sud le levé à la même échelle des abords mêmes du wharf, effectué en 1976 en vue de sa prolongation.

A l'endroit choisi pour le plageage, le trait de côte est une marche corallienne de 2 m de haut; par endroits on observe un estran sableux d'une vingtaine de mètres de large; à pleine mer l'eau atteint la base de la marche corallienne.

Il existe une route menant au wharf de Wadrilla. Pour rendre ce site utilisable il conviendrait de prolonger cette route jusqu'à l'endroit même choisi pour le plageage.

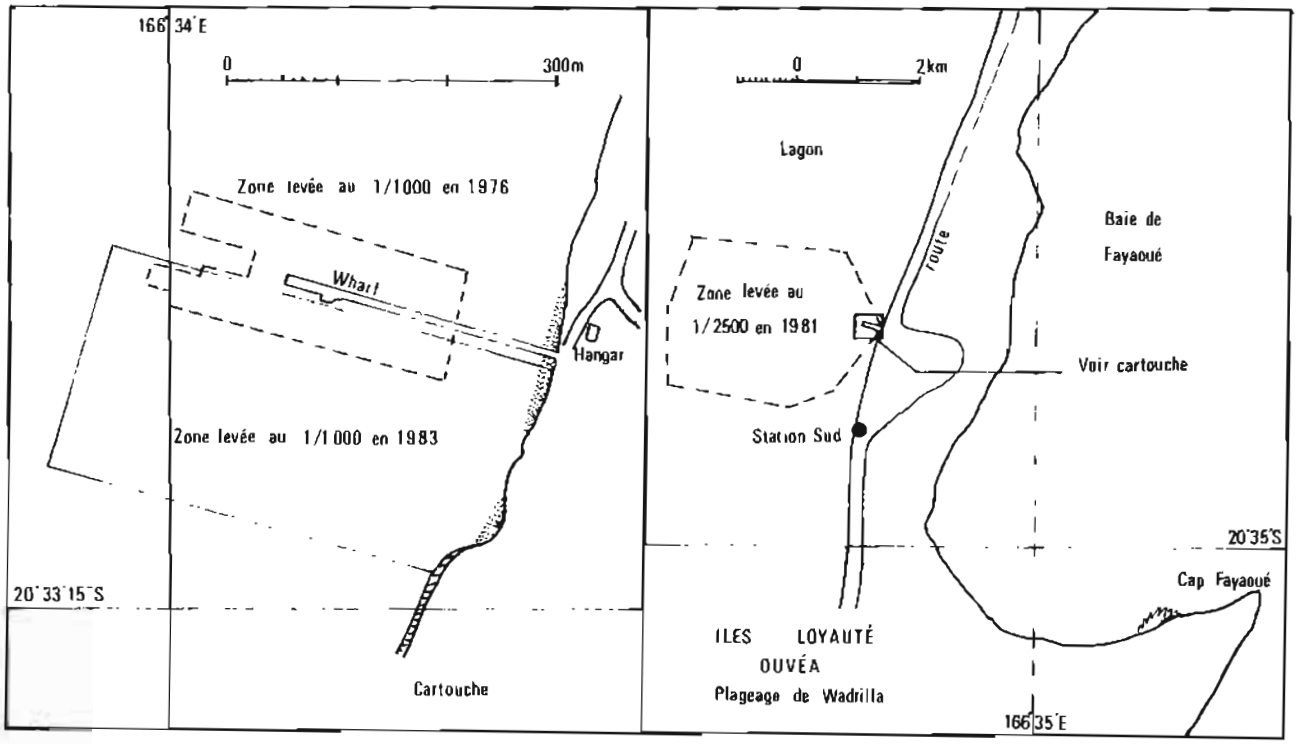
4.1.2. Géodésie

La géodésie s'appuie sur 3 points MOP 81 :

- Le pylone PTT de Fayaoue
  X = 660 563,8 Y = 7 715 306,5
- La station Sud du wharf de Wadrilla
  X = 663 389,24 Y = 7 725 681,29
- Le repère « 2 » du wharf
  X = 663 436,78 Y = 7 726 673,88

Le repère « 1 » n'a pas été retrouvé.

Le système géodésique utilisé est le MHNC 72, avec la projection UTM, Ellipsoïde International.



PL. 13. — Plageage de Wadrilla à Ouvéa.

Un point Doppler sur satellite a été obtenu à partir de 25 passages à l'aide d'un récepteur JMR 4 embarqué sur la *Boussole*, le bâtiment étant à quai. Les résultats sont les suivants (avec les éphémérides précaculées) :

ΔX (Doppler — MHNC 72) = — 701 m,
σX Doppler = 17 m

ΔY (Doppler — MHNC 72) = + 280 m,
σY Doppler = 22 m

Altitude géoïde = 73 m

Une mesure effectuée dans les mêmes conditions en 1981 à partir de 10 passages avait donné :

ΔX = — 685 m
ΔY = + 305 m
Altitude géoïde = 74 m

En tenant compte des 2 mesures, on adoptera pour les coordonnées horizontales les valeurs arrondies ΔX = — 690 m, ΔY = + 290 m.

4.1.3. Bathymétrie

Le sondage a été effectué à l'aide d'une coralline équipée d'un sondeur à base hors bord et positionnée par 3 théodolites, sur des profils parallèles au wharf, qui est lui même perpendiculaire à la côte. Ces profils ont été poursuivis jusqu'aux fonds de 4,70 m au moins. Le fond étant sableux, l'écartement entre profils a été fixé à 10 m et il n'y a pas eu de profils intermédiaires.

L'examen des photos aériennes en couleur de la mission IGN 82 n'a permis de déceler aucune roche. La reconnaissance visuelle du fond a permis de découvrir une seule roche, qui a été cotée, et quelques cailloux de faible dimension.

4.1.4. Marée

Les 3 repères de nivellement installés en 1981 ont été retrouvés avec les mêmes dénivelées relatives. Un croquis donnant l'emplacement de ces repères figure sur la planche n° 14. Une fiche de marée avait été établie en 1981.

La marée a été observée pendant 3 jours complets sur une échelle de marée (E 2) adossée au wharf. Une concordance avec Thio a été établie. Cette concordance nous donne un niveau des plus basses mers à Wadrilla à la graduation — 0,03 m de l'échelle. Or, le zéro de réduction adopté en 1981 correspond à la graduation — 0,19 m de l'échelle. Malgré cet écart de 0,16 m entre les 2 déterminations, le zéro de réduction de 1981 a été conservé.

4.1.5. Topographie

Le dessin du trait de côte a été fait à partir de mires de topographie et avec l'aide de la photo aérienne au 1/10 000.

4.1.6. Documents rédigés

Les documents suivants ont été rédigés :

- 1 minute de bathymétrie et de topographie au 1/1 000
- 1 minute de synthèse au 1/1 000
- 2 fiches géodésiques
- 1 fiche d'observation JMR 4.

La minute de synthèse englobe la zone levée au 1/1 000 en 1976.

4.1.7. Conclusion

Les approches de la zone de plageage sont saines, et déjà utilisées par des bâtiments de tirant d'eau analogue à celui d'un Batral, se rendant au wharf de Wadrilla. Par contre à l'emplacement choisi pour le plageage la présence d'une marche corallienne et la pente insuffisante aux abords de la plage nécessitent la prolongation de la route existante et la construction d'un épi s'avançant dans la mer jusqu'à 80 m de la côte environ.

4.2. PLAGEAGE DE CHÉPÉNÉHÉ À LIFOU

4.2.1. Préambule

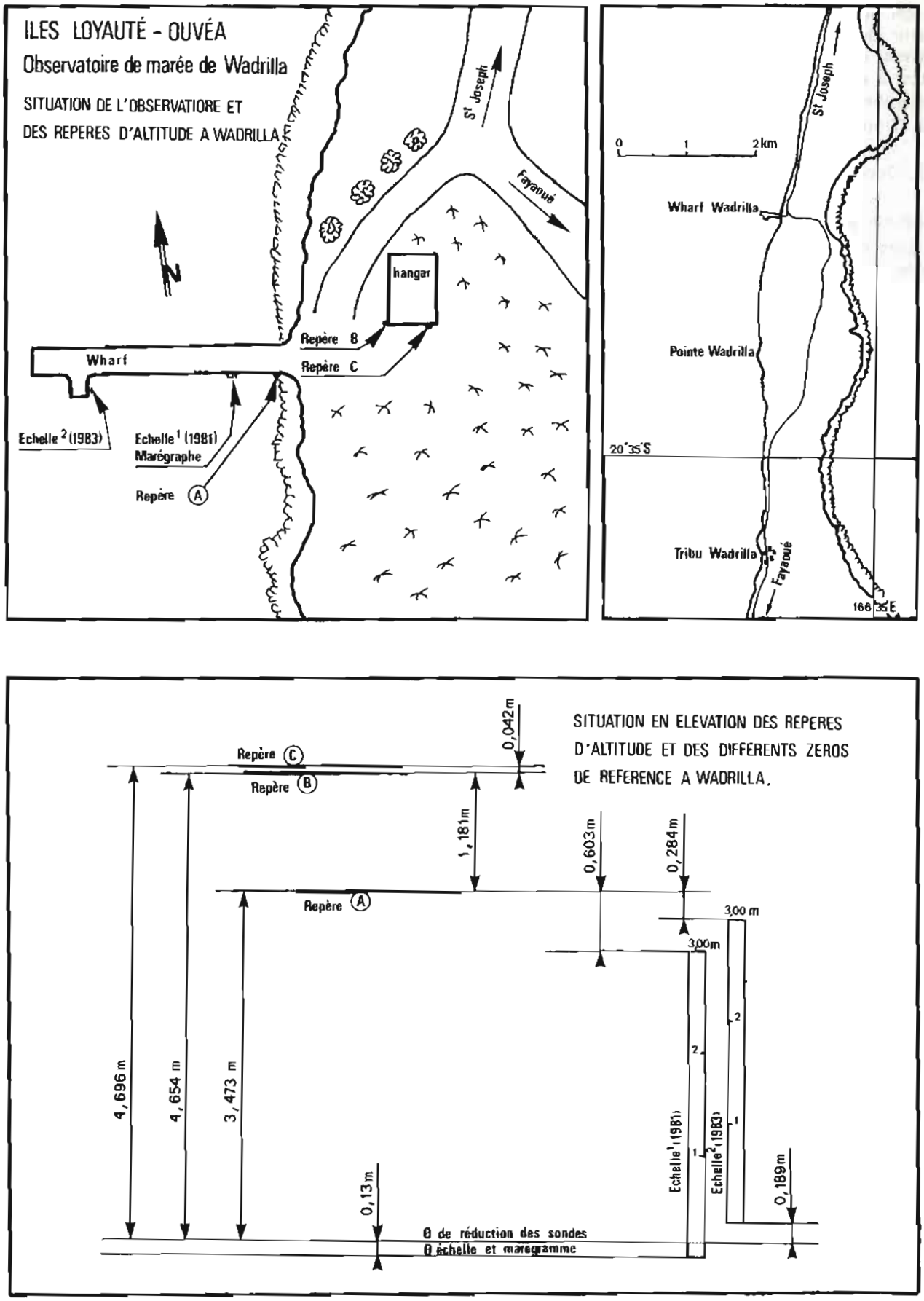
Le plageage se trouve dans le village de Chépénéhé. La côte est formée par une marche corallienne dont le pied baigne dans l'eau à marée haute. Il existe un accès en plan incliné vers la mer taillé dans la marche corallienne. L'axe d'approche du plageage est parsemé de nombreux pâtés et plateaux coralliens sur un fond sableux.

Ce site est bien protégé des vents dominants, et aucun clapot important n'a été observé pendant la durée des travaux. La zone à lever figure sur la planche n° 15. Le levé a été exécuté en octobre 82 et terminé en avril 83, avec l'aide des photographies aériennes prises par un avion de l'IGN en décembre 82.

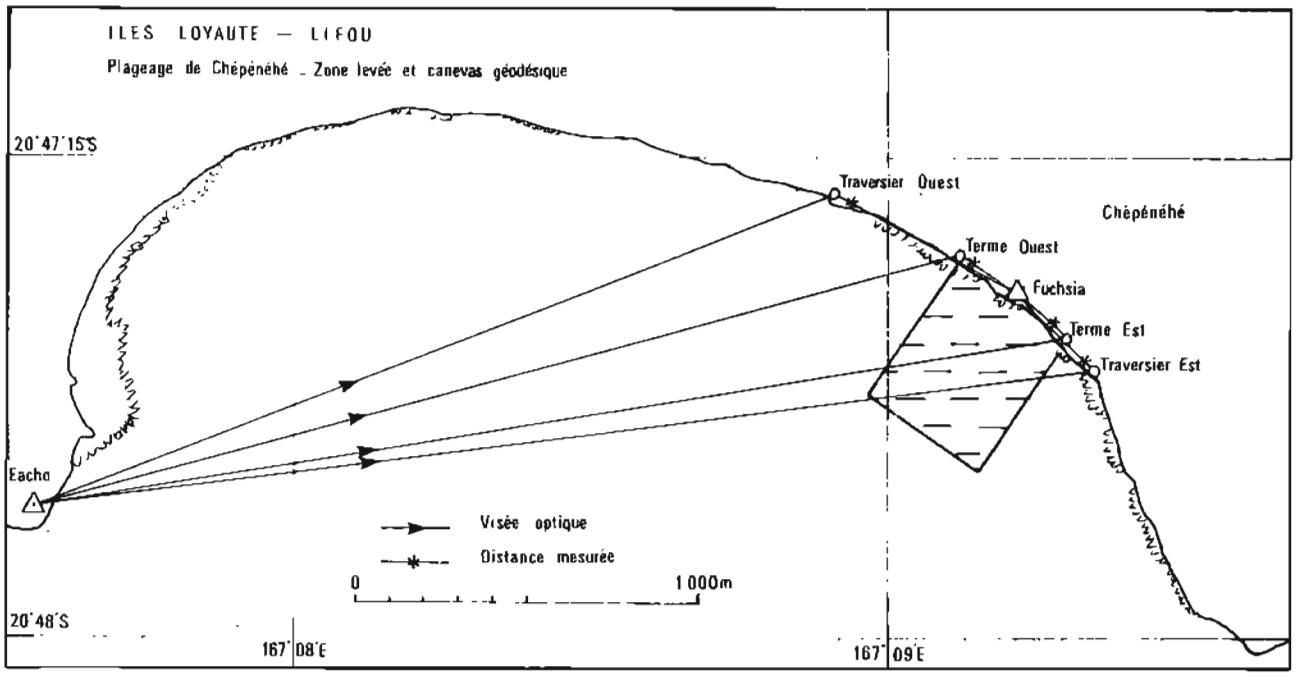
4.2.2. Géodésie

La géodésie s'appuie sur 2 points : le point MOP 76 « Fuchshia » et le point IGN situé près de l'église ND de Lourdes à Eacho. Des fiches géodésiques ont été établies pour ces 2 points, ainsi que pour les 2 stations ayant servi de traversier. Les stations de radioguidages des profils ont été piquetées entre 2 stations extrêmes placées par triangulation. Les coordonnées des différentes stations sont données en annexe.

Le système géodésique utilisé est le système IGN-54, avec la projection UTM, fuseau 58, comme en 1976.



PL. 14. — Observatoire de marée de Wadrilla.



PL. 15. — Plageage de Chépénéhé à Lifou.

Un point Doppler sur satellite effectué à l'aide d'un récepteur JMR 4, bâtiment au mouillage, à partir de 30 passages, a donné les résultats suivants :

X Doppler — X IGN 54 = — 288 m
Y Doppler — Y IGN 54 = — 252 m
Altitude du géoïde = 85 m

La précision estimée de ces différences est de l'ordre de 100 m.

4.2.3. Bathymétrie

La zone à lever étant parsemée de nombreux pâtés et plateaux coralliens, l'espacement des profils de sonde prévu à 10 m a été resserré à 5 m jusqu'aux fonds de 15 m. Ces profils sont perpendiculaires à la côte.

Les sondages ont été exécutés à l'aide d'une coralline équipée d'un sondeur Atlas DESO 10 à base hors bord, et positionnée par 3 théodolites.

La photo en couleur au 1/10 000 de la mission IGN 82 a été agrandie au 1/1 000 dans la zone à lever. Cet agrandissement a permis de dessiner les contours de tous les pâtés immergés à faible profondeur, à leur emplacement. La cote minimale de chaque pâté a été mesurée au sondeur ou à la perche.

4.2.4. Marée

La marée a été observée sur une échelle placée au même endroit qu'en 1976 et uniquement pendant les travaux. Aucune concordance n'a été faite.

Les quatre repères installés en 1976 ont été retrouvés et les dénivelées relatives ont été mesurées. Le schéma de nivellement figurant sur la fiche du 31 janvier 1977, qui présente une erreur, doit être remplacé par celui figurant sur la planche n° 16.

4.2.5. Courants

Cinq jours d'observation ont mis en évidence un courant très faible.

4.2.6. Topographie

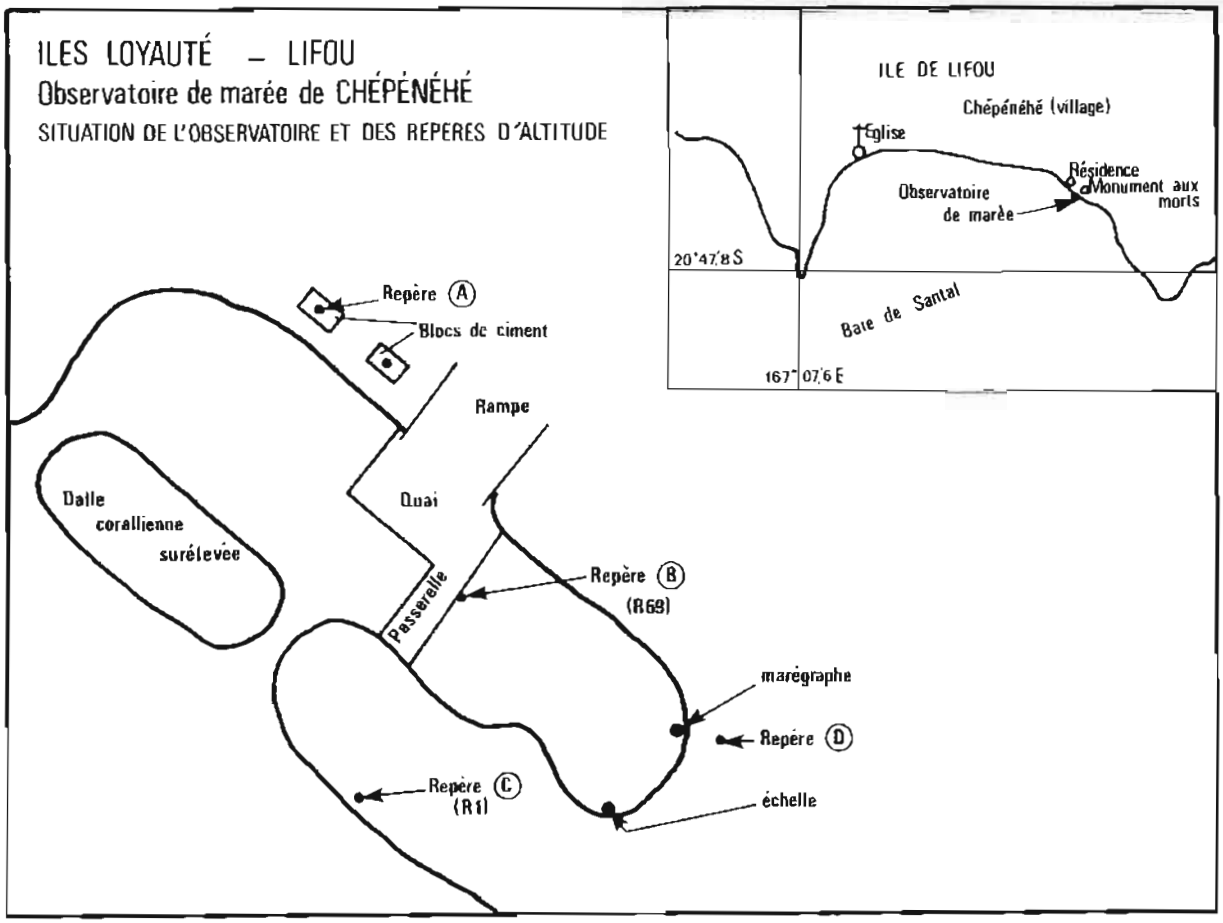
La photo aérienne au 1/10 000 de la mission IGN 82, agrandie au 1/1 000 a servi pour interpoler le trait de côte entre les mires de topographie.

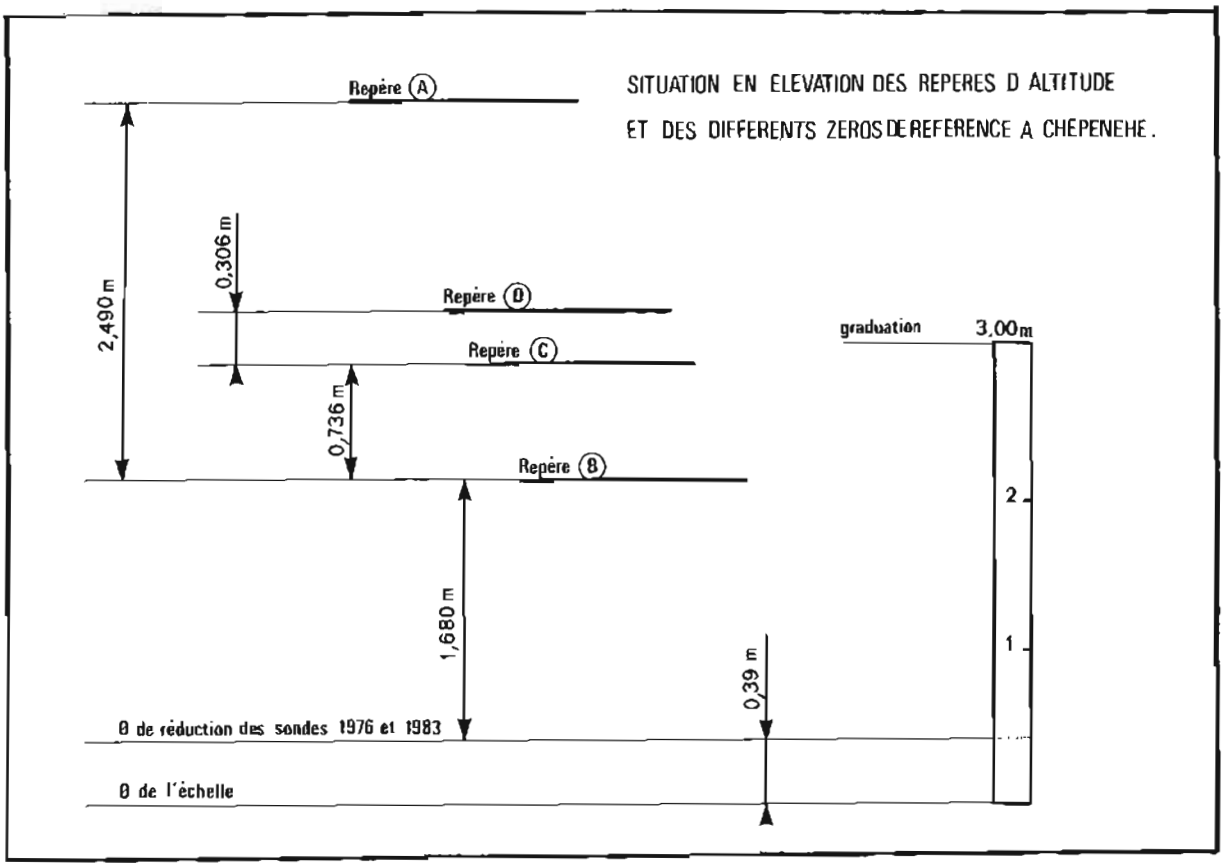
Le trait de côte est une marche corallienne d'environ 3 m de haut. La zone d'estran est pratiquement inexistante.

4.2.7. Documents rédigés

Les documents suivants ont été rédigés

- 1 minute de bathymétrie au 1/1 000
- 1 minute de recherche au 1/1 000
- 1 minute de synthèse au 1/1 000
- 1 fiche d'observation JMR 4
- 2 fiches géodésiques





PL. 16. — Observatoire de marée de Chépénéhé.

• 1 dossier d'observation de courant.

La minute de synthèse comporte :

• la topographie du trait de côte et des récifs émergés.
• le tracé des isobathes sur le fond de sable.
• le dessin du contour des pâtés de corail immergés et leur cote minimale.
• des sondes mesurées à la perche au pied de la marche corallienne.

4.2.8. Conclusion

Le plageage d'un Batral devant Chépénéhé est possible moyennant :

a) la construction d'un chemin de roulement pour véhicules d'environ 70 m de long (jusqu'aux fonds de 1,5 m)
b) des opérations de déroctage pour étêter les quelques pâtés de corail de brassiage inférieur à 3 m se trouvant sur l'axe d'accès au point de plageage.

4.3. BAIE DE THOGONE À MARÉ

4.3.1. Péambule

La baie de Thogone, dite aussi baie de Rho, est située sur la côte Nord de l'île de Maré dans les Loyauté.

Le site envisagé pour le plageage a été imposé par l'existence d'une route, seule voie d'accès à la mer à travers la falaise bordant le plateau intérieur. Ce site est bien protégé des vents dominants mais est parsemé de nombreux hauts fonds coralliens.

La côte elle-même est une marche corallienne de 2 à 3 m de haut, grossièrement aménagée sur le lieu de plageage pour l'accostage des petites embarcations.

Les travaux effectués en octobre-novembre 1982 ont été complétés par 2 journées de recherches de roche en avril 1983, et par 2 journées de topographie et de recherches de roche à l'aide des photos aériennes en couleur prises par hélicoptère, effectuées en octobre 1983.

4.3.2. Géodésie

La géodésie s'appuie sur deux points IGN :

• Thalakon (n° 3)
• Laositien (n° 1)

Le système géodésique est l'IGN 54 (projection UTM, fuseau 58, ellipsoïde international).

La station Rosalie à l'Est de la baie a été placée par gisement-distance à partir de Thakalon. A partir de Rosalie des visées ont été faites sur Roger et Tenane, ainsi que des mesures de distance entre Rosalie et ces stations. La station Rho a été placée dans un cheminement entre Takalon, Roger et Marégraphe par résolution du Triangle Rosalie-Marégraphe-Tenane.

La liste des coordonnées des points bornés est donnée en annexe et le canevas géodésique figure sur la planche n° 17.

4.3.3. Marée

La marée a été observée du 20.10.82 au 25.11.82 à l'aide d'un marégraphe OTT R16. Le niveau de réduction des sondes a été déterminé par concordance avec Thio, il se situe à la graduation 0,35 m de l'échelle (E2). Le graphique de concordance est donné sur la planche n° 19.

Trois repères de nivellement ont été implantés au voisinage du marégraphe et une fiche d'observatoire de marée a été rédigée. L'implantation horizontale et en altitude des repères figurent sur la planche n° 18.

Du 10 au 11 octobre 1983 une échelle (E3) fut utilisée, dont la graduation zéro se trouvait 1,27 m au-dessous du zéro hydrographique.

4.3.4. Courants

Neuf jours d'observation montrent que le courant est pratiquement nul sur la zone.

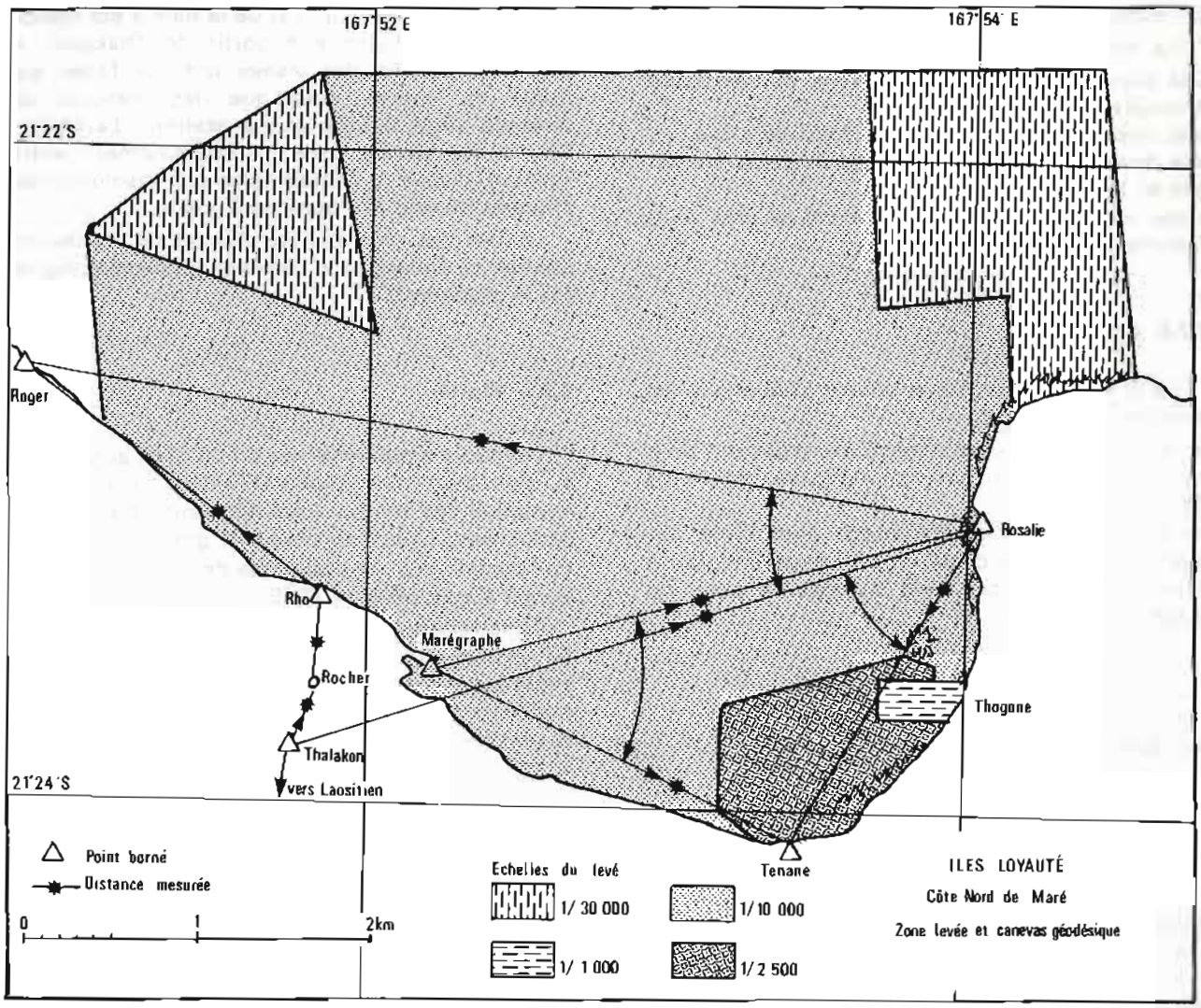
4.3.5. Topographie

La Mission disposait de la couverture aérienne IGN de 1954 au 1/40 000, et à partir de septembre 1983, des photos aériennes en couleur prises à son intention par un hélicoptère Puma spécialement équipé.

Ces photos prises au 1/5 000 et tirées au 1/2 500 couvrent bien la zone levée au 1/2 500; malheureusement par suite d'une mauvaise navigation de l'aéronef, il n'a pu être obtenu de photo prise à la verticale du lieu de plageage.

La méthode employée pour le levé topographique est différente pour les 3 échelles de levé.

• pour la zone au 1/1 000 : devant l'absence de photos aériennes, la topographie a été effectuée à la perche.
• pour la zone levée au 1/2 500 : la topographie de côte et des roches découvrantes a été effectuée par restitution à la chambre claire des photos couleur au 1/2 500.



PL. 17. — Levé de la baie de Thogone à Maré.

• pour la zone levée au 1/10 000 : la topographie de la côte a été faite par restitution à la chambre claire des photos au 1/40 000 IGN préalablement agrandies au 1/10 000.

4.3.6. Bathymétrie

La baie de Thogone a été sondée :

1) au sondeur vertical suivant des profils espacés de 100 m à l'intérieur de la baie, puis espacés de 300 m jusqu'aux limites de la carte marine en service (n° 5223).

2) au sondeur vertical selon des profils espacés de 25 m et au sondeur latéral selon des profils espacés de 100 m dans une zone encadrant largement le plageage.

3) au sondeur vertical suivant des profils espacés de 10 m dans la zone du plageage (environ 200 m de part et d'autre de l'axe de présentation du bâtiment), ces profils étaient radioguidés depuis la station Marégraphe.

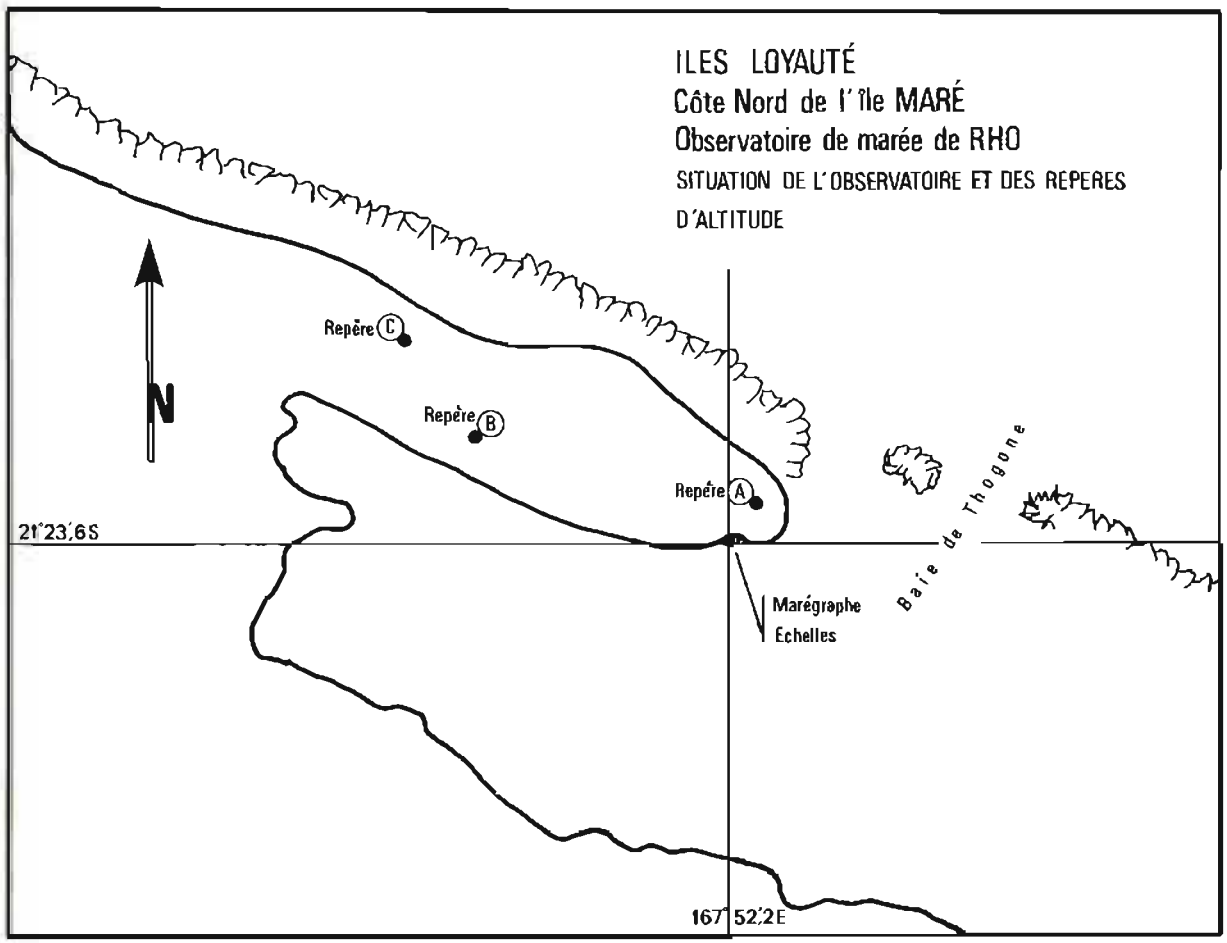
Les zones levées aux différentes échelles figurent sur la planche n° 17.

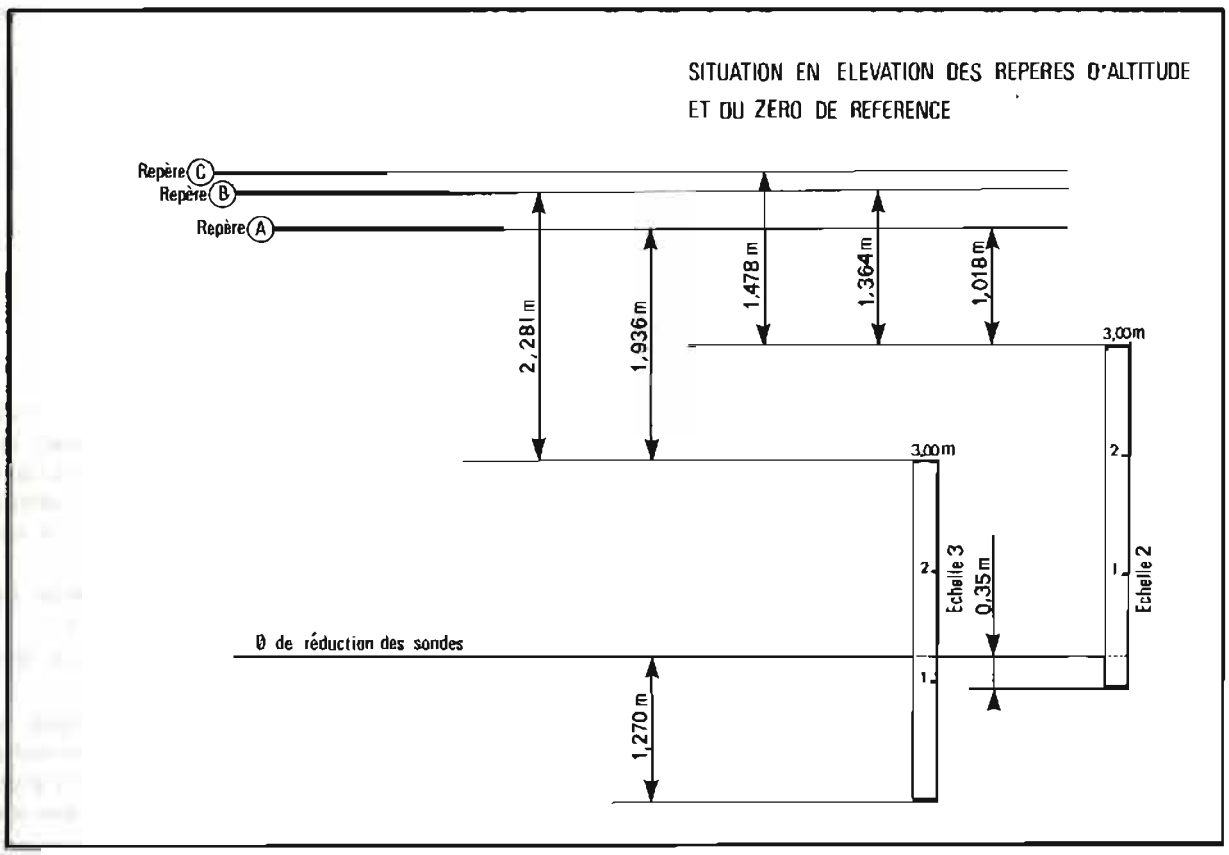
Les recherches de roche ont été définies à vue et à partir des bandes de sonde, mais aussi, partout où l'on disposait de photos aériennes en couleur, à l'aide de ces photos.

4.3.7. Documents rédigés

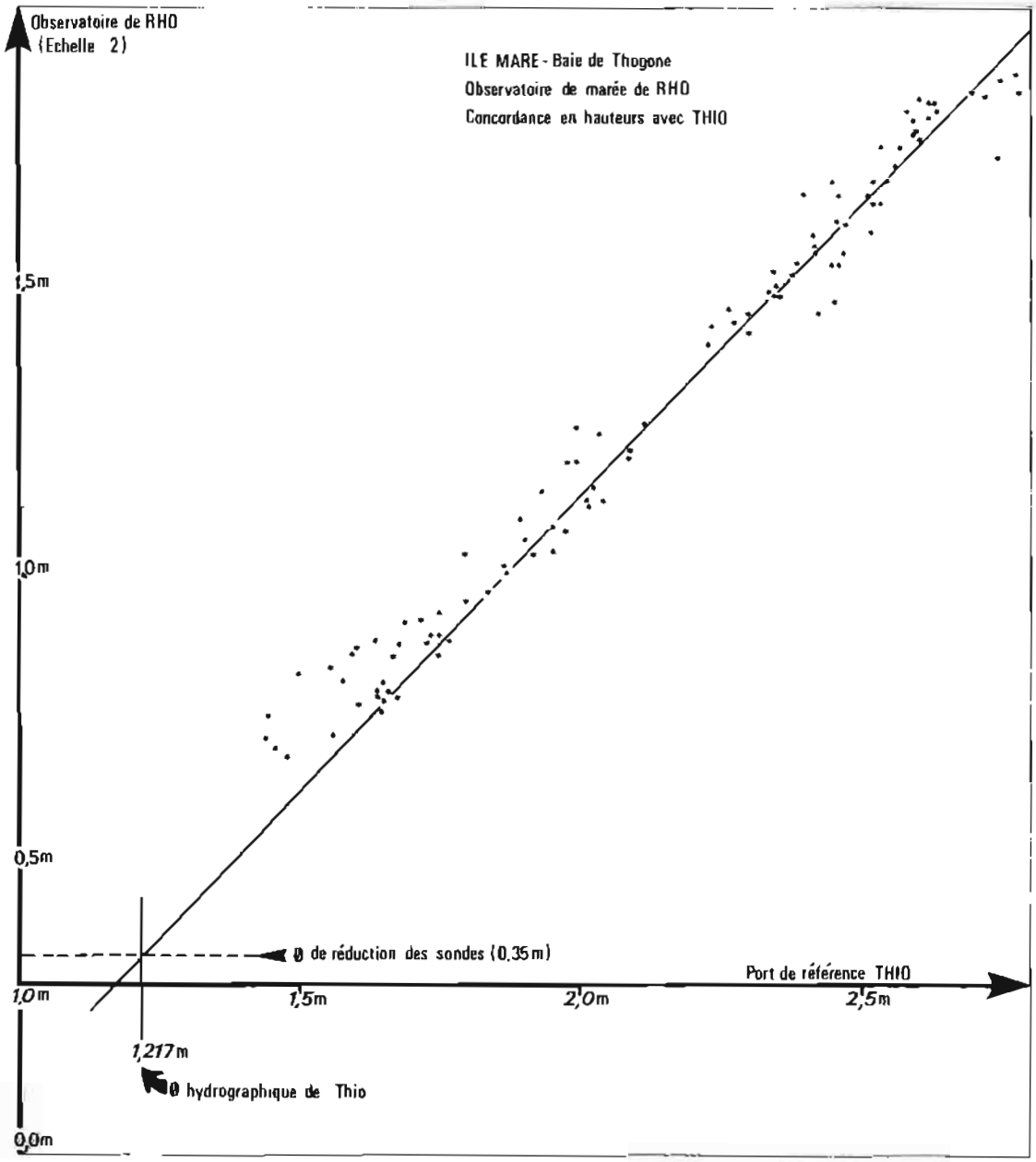
A la suite de ce levé, les documents suivants ont été rédigés :

- 1 minute de bathymétrie au 1/1 000
- 1 minute de topographie et recherche de roche au 1/1 000
- 1 minute de bathymétrie au 1/2 500
- 1 minute de topographie et recherche de roche au 1/2 500





PL. 18. — Observatoire de marée de Rho.



PL. 19. — Concordance Rho-Thio.

- 1 minute de bathymétrie au 1/10 000
- 1 minute de topographie et recherche de roche au 1/10 000
- 1 fiche d'observatoire de marée
- 5 fiches géodésiques
- 1 dossier d'observation de courant.

4.4. BAIE DE TADINE À MARÉ

4.4.1. Préambule

Le plageage qui se trouve dans le village de Tadine face au monument aux morts est déjà équipé d'un plan incliné en béton. Cependant de nombreux patés en rendent l'accès délicat; de plus la présence d'une dalle corallienne dans l'axe de plageage à proximité du slip empêche certainement le bâtiment de reposer sur le sol à cet endroit.

La baie de Tadine étant largement ouverte, on observe souvent un clapot assez important.

Au Nord du plageage se trouve le quai des caboteurs qui a été inclus dans le levé.

A l'exception de ces deux sites aménagés, la côte se présente partout comme une marche corallienne de 2 à 3 mètres de haut dont le pied est toujours couvert d'eau, même aux marées les plus basses.

Le levé a été entrepris en octobre-novembre 1982, et des recherches de roche effectuées en avril 1983. Des photographies aériennes en couleur ont été prises en septembre 1983 à partir d'un hélicoptère Puma de l'Armée de l'Air. La topographie et les recherches de roche ont été complétées à partir de ces photos.

4.4.2. Géodésie

La géodésie s'appuie sur trois points placés par la MHNC en 1971 (cf. rapport de M. Blavin : *Annales Hydrographiques* n° 742, Vol. 3, Fasc. 1. 1975) :

- le monument aux morts de Tadine (axe du monument et douille MHNC)
- le mât de pavillon de la gendarmerie, dont seul subsiste le socle
- la borne Lyon.

La cohérence de ces trois points a été vérifiée.

Le système géodésique est le système IGN 54 (projection UTM, fuseau 58, ellipsoïde international).

La liste des coordonnées des points bornés est donnée en annexe et leur emplacement figure sur la planche n° 20.

D'autre part ont été observés 24 passages JMR au mouillage; les résultats de cette observation sont donnés ci-dessous :

	X	Y	Altitude géoïde	σ mètres	σ mètres
Coordonnées IGN 54	797 625	7 614 377		100 (estim)	100 (estim)
Coordonnées Doppler	797 388	7 614 211	68	67	34

4.4.3. Marée

Les deux repères de marée (A et B) signalés par la fiche de marée du 18 janvier 1972 ont été retrouvés et un troisième (C) repère a été installé.

A la demande des Travaux Maritimes, un repère de nivellement a été posé à chaque extrémité du slip.

Tous ces repères sont rattachés au nivellement local effectué par la Sofratop en 1970.

La marée a été observée à l'aide d'un marégraphe OTT R16 du 21.10.82 au 25.11.82, et à l'aide d'une échelle (E3) du 26.04.82 au 29.04.82. La concordance de ces observations avec celles de l'observatoire de Thio donne un niveau des plus basses mers à la graduation 0,21 m de l'échelle, alors que le zéro de réduction des sondes de 1971 correspond à la graduation 0,10 m. C'est ce zéro de 1971 qui a été adopté pour le levé.

Le niveau moyen sur la période d'observation est à la graduation 1,10 m environ, qui correspond à la cote 0,19 m Sofratop 1970 dont le niveau de réduction semble donc en première approximation avoir été choisi un peu bas.

Une fiche d'observatoire de marée a été rédigée. Un extrait de cette fiche figure à la planche n° 21.

Une nouvelle échelle de marée (E 4) fut mise en place du 27.09.83 au 29.09.83 dont la graduation zéro était située 0,24 m sous le zéro hydrographique.

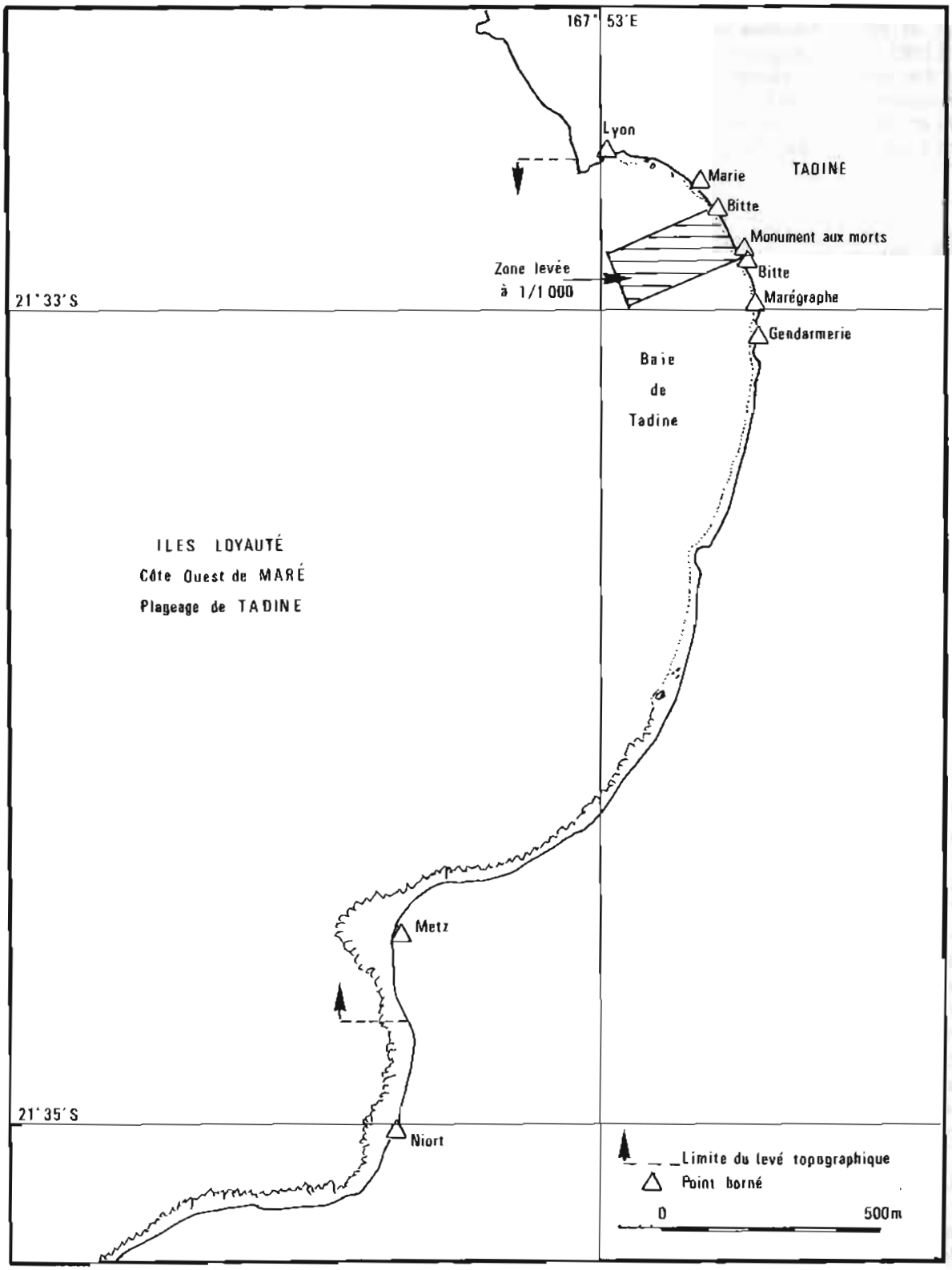
4.4.4. Topographie

- Une première topographie du trait de côte et des roches découvrantes faite à la perche et rédigée au 1/1 000 a été complétée par restitution de photographies aériennes en couleur obtenues à partir d'un hélicoptère Puma équipé pour la circonstance d'un bâti permettant la prise de vues verticales. Ces photographies, agrandies au 1/1 000 se sont révélées l'outil le mieux adapté, tant pour la topographie que pour la définition des recherches de roches.
- Une minute de topographie au 1/10 000, complémentaire de la minute de bathymétrie dressée en 1964 par M. Vicariot, a été rédigée après restitution des photos IGN au 1/40 000 de 1954 préalablement agrandies au 1/10 000. La superposition des 2 minutes montre qu'il faut corriger le tracé des isobathes en certains endroits près de la côte sur la minute de 1964.

4.4.5. Bathymétrie

La zone à lever, qui figure sur la planche n° 20, a été sondée au sondeur vertical suivant des profils rectilignes espacés de 10 m et perpendiculaires à la côte, resserrés à 5 m dans l'axe de plageage.

Les recherches de roche ont été définies à vue, d'après les bandes de sonde et à partir des photos aériennes en couleur au 1/1 000.

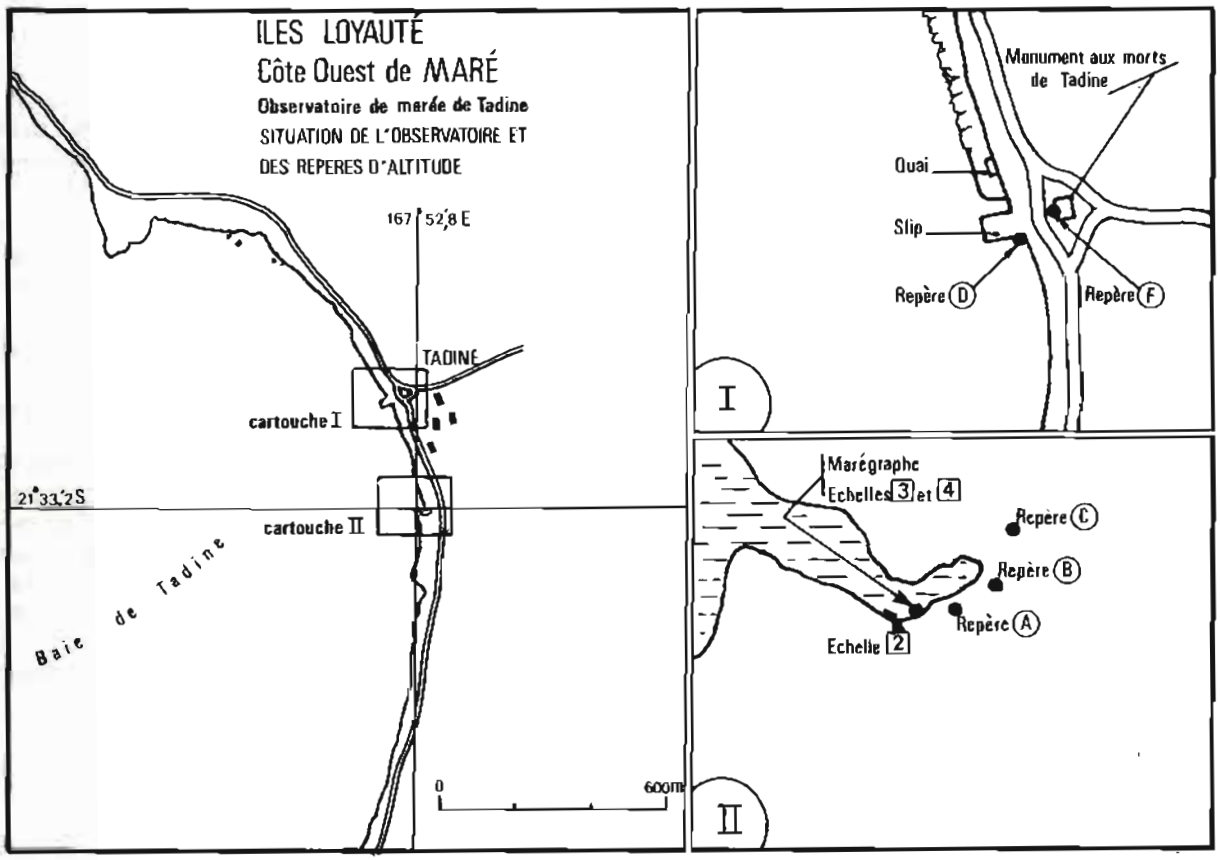


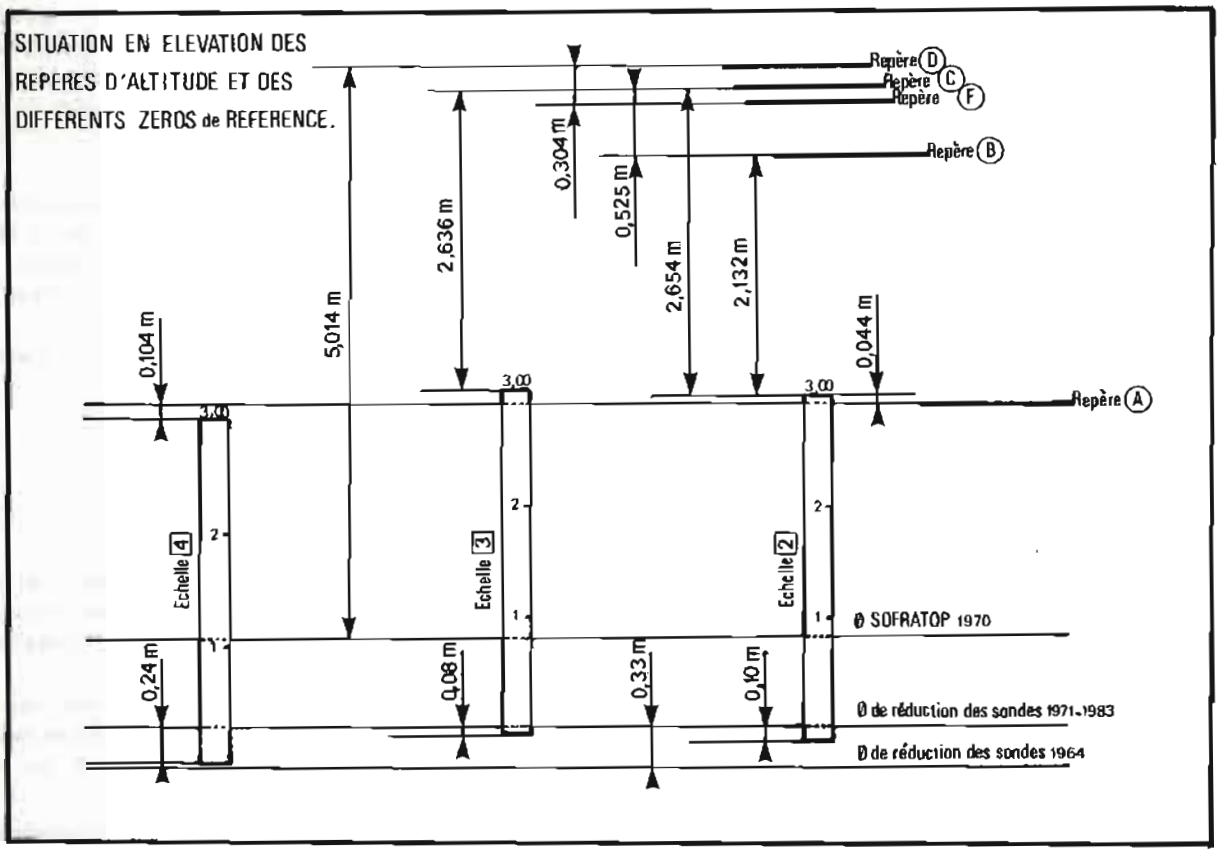
PL. 20. — Plageage de Tadine à Maré.

4.4.6. Documents rédigés

A la suite de ce levé, les documents suivants ont été rédigés :

- 1 minute de bathymétrie au 1/1 000
- 1 minute de topographie de côte et de recherche de roche au 1/1 000
- 1 minute de topographie de côte au 1/10 000





PL. 21. — Observatoire de marée de Tadine.

- 1 fiche d'observatoire de marée
- 4 fiches géodésiques
- 1 fiche d'observation JMR
- 1 fiche d'amer.

4.5. PLAGEAGE DE POINDIMIÉ SUR LA CÔTE EST DE NOUVELLE-CALÉDONIE

4.5.1. Préambule

Située à Tiéti, au Nord du village de Poindimié, la zone levée s'étend sur trois cents mètres de côte, en un endroit où le récif frangeant s'interrompt pour faire place à une plage de sable quasi-franche de tout obstacle corallien.

L'approche par mer est aisée et se fait par fonds sableux en pente douce; ce n'est qu'aux abords immédiats de la laisse de pleine mer que la pente augmente sous l'action de la houle qui vient se briser sur la plage et la creuser.

Quoique située à l'intérieur du lagon, et donc protégée par la barrière corallienne, la plage est peu abritée des vents dominants et du clapot qu'ils génèrent, car grande ouverte au Nord et à l'Est.

L'accès par la terre se fait par la route goudronnée Poindimié-Touho (RT3) qui longe la plage sur toute son étendue.

4.5.2. Géodésie

Le canevas géodésique s'appuie sur l'infrastructure locale du Service Topographique, plus particulièrement les points :

d'ordre 3 : 13-10 et 13-12
d'ordre 4 : 13-III-402
d'ordre 5 : 13-III-5002 et 13-III-5003

Le point d'ordre 5, 13-III-5001, qui se trouve être le point connu le plus près de la plage, n'a pas été utilisé, car les repères retrouvés ne correspondaient pas à la description qui en est faite dans le carnet de coordonnées.

Du 14 au 16 novembre 1983 furent positionnés, en bordure de plage, deux stations traversières matérialisées par des bornes PVC, et 8 stations guides (G1 à G8) alignées et espacées de 50 m qui étaient matérialisées par des piquets en bois enfoncés de 50 cm. Devant la précarité de la matérialisation de ces points, aucune fiche géodésique n'a été rédigée.

Les coordonnées des points utilisés figurent en annexe.

Le système géodésique est l'IGN 72 (projection UTM, fuseau 58, ellipsoïde international).

4.5.3. Marée

Lors du levé au 1/20 000 effectué au large de Poindimié en 1966 par la MHNC, les sondes avaient été réduites de la marée observée à l'observatoire de Touho (*Annales Hydrographiques* n° 736).

Or en décembre 1983 la MOP poursuivit le levé régulier du lagon au Nord de Touho; aussi cet observatoire était armé en permanence et équipé d'un marégraphe enregistreur OTT R 16.

Néanmoins une échelle de marée fut mise en place le long d'une pile du pont enjambant la rivière Ina à Poindimié. La trop courte durée d'observation (le temps du levé, soit 1,5 jour) ne permet pas de définir un zéro local, toutefois la comparaison de la courbe obtenue avec l'enregistrement du marégraphe de Touho au même instant permet de constater le très faible décalage entre les deux courbes et autorise à réduire les sondes de la marée observée à Touho, ce qui a été fait.

Il n'a pas été rédigé de fiche d'observatoire de marée.

4.5.4. Bathymétrie

Le levé a été effectué du 10 au 12 décembre 1983 par une coralline munie d'un sondeur hors-bord DESO 10 suivant les profils radioguidés perpendiculaires à la plage et espacés de 10 m. La zone levée est représentée sur la planche n° 22.

Pour faciliter le guidage chaque profil était matérialisé par un alignement.

Les profils ont été poursuivis jusqu'aux fonds de 10 m soit à peu près jusqu'à 400 m de la côte. Quarante et un profils ont ainsi été réalisés, qui couvrent toute la portion de côte dépourvue de récif frangeant.

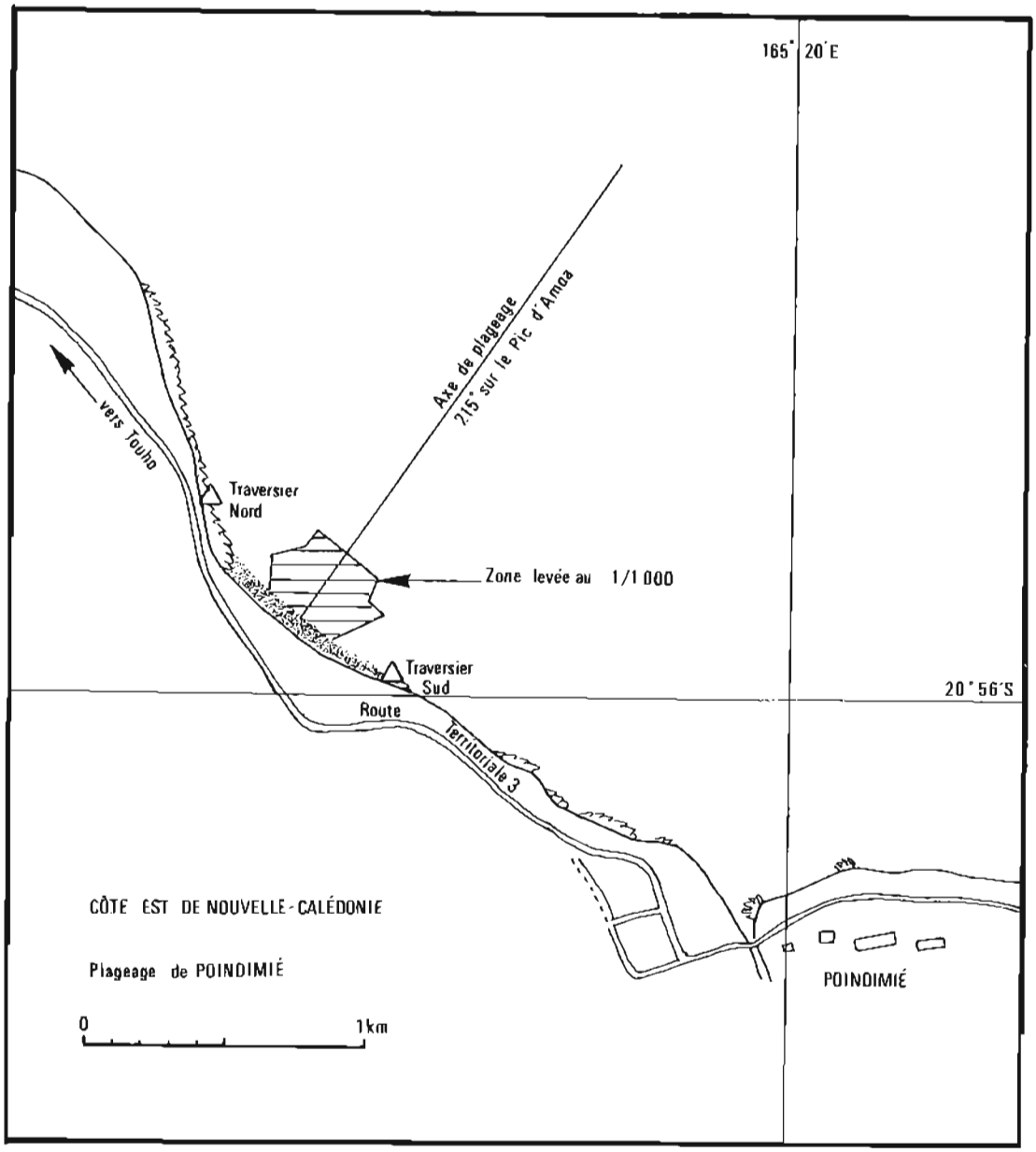
Le positionnement était assuré par trois théodolites (2 traversiers et un guide).

4.5.5. Topographie

La topographie du trait de côte a été effectuée par restitution à la chambre claire d'une photographie aérienne IGN de 1982 au 1/8 000 préalablement agrandie au 1/2 000.

La pente de la plage a été déterminée tous les cinquante mètres dans le prolongement des profils sondés, par visées angulaires de site sur une perche tenue verticalement.

Les cotes ainsi obtenues ont été rattachées au zéro hydrographique et figurent sur la minute rédigée.



PL. 22. — Plageage de Poindimié.

4.5.6. Courants

Un courantomètre a été mouillé du 3 au 18 janvier 1984 à 5 m sous la surface, par fonds de 15 m, dans l'axe du plageage.

4.5.7. Documents rédigés

1 minute de bathymétrie-topographie au 1/1 000 a été rédigée.

1 minute à la même échelle ne comportant que les isobathes tous les 0,5 m jusqu'aux fonds de 5 m et quelques sondes, a été rédigée. Des coupes verticales de profils et des vues de côte ont aussi été établies pour le dossier de plageage.

ANNEXE AU PARAGRAPHE 4.2.2.

Coordonnées des points bornés (Système IGN 54)

Nom du point	X	Y	Nature
Fuchshia	724 201,22	7 700 346,06	Borne MOP 76
Eacho	721 314,25	7 699 810,48	Point IGN
Terme Ouest du piquetage	724 032,25	7 700 470,40	Borne MOP 83
Terme Est du piquetage	724 333,50	7 700 217,75	Borne MOP 83
Station traversier Est	724 411,86	7 700 124,09	Borne MOP 83
Station traversier Ouest	723 670,06	7 700 648,47	Borne MOP 83

ANNEXE AU PARAGRAPHE 4.3.2.
Baie de Thogone

Liste des coordonnées des points bornés

Point	Matérialisation	X	Y
Rho	Douille SHOM	797 011,15	7 632 020,90
Marégraphe	Douille SHOM	797 624,7	7 631 614,3
Rosalie	Douille SHOM	800 769,15	7 632 374,22
Roger	Douille SHOM	795 244,42	7 633 341,55
Tenane	Douille SHOM	799 689,6	7 630 594,7

ANNEXE AU PARAGRAPHE 4.4.2.
Baie de Tadine

Liste des coordonnées des points bornés

Point	Matérialisation	X	Y
Monument aux morts	Axe monument	798 348,00	7 614 537,60
Monument aux morts	Douille scellée MHNC 71	798 323,58	7 614 527,52
Gendarmerie	Embase ancien mât de pavillon	798 399,8	7 614 040,7
Gendarmerie	Douille scellée dans borne MOP 83	798 395,70	7 614 051,08
Borne Lyon	Douille scellée MHNC 71	797 754,26	7 615 075,73
Terme Sud	Douille scellée	798 357,02	7 614 459,50
Marie	Douille scellée	798 196,47	7 614 834,30
Bitte d'amarrage Nord du quai des caboteurs	Centre de la face supérieure de la bitte	798 261,8	7 614 633,7
Borne Niort*	Douille scellée MHNC 71	796 460,27	7 610 485,58
Borne Metz*	Douille scellée MHNC 71	796 634,62	7 611 148,30

* points anciens utilisés pour la topographie au 1/10 000

ANNEXE AU PARAGRAPHE 4.5.2.

Liste des coordonnées des points utilisés

Nom du point	Matérialisation	X	Y
13-10	Jalon IGN	531 700,12	7 685 598,88
13-12	Borne en fonte	535 290,57	7 683 600,44
13-III-402	Jalon IGN	532 398,00	7 684 842,60
13-III-5002	Borne en fonte	533 345,60	7 685 102,48
13-III-5003	Clocher église	534 171,53	7 684 588,59
Station 1	Piquet provisoire	533 394,12	7 685 131,05
Traversier Nord	Borne PVC	532 628,0	7 685 914,1
Traversier Sud	Borne PVC	533 257,5	7 685 256,9
Guide 1	Piquet en bois	532 772,9	7 685 570,7
Guide 2	Piquet en bois	532 811,9	7 685 539,5
Guide 3	Piquet en bois	532 850,9	7 685 508,2
Guide 4	Piquet en bois	532 889,9	7 685 477,0
Guide 5	Piquet en bois	532 929,0	7 685 445,7
Guide 6	Piquet en bois	532 968,0	7 685 414,5
Guide 7	Piquet en bois	533 007,0	7 685 383,3
Guide 8	Piquet en bois	533 046,1	7 685 351,9

CHAPITRE 5

TRAVAUX POUR DES ORGANISMES PUBLICS OU PRIVÉS

5.1. TRAVAUX POUR LE PORT AUTONOME DE NOUMÉA

5.1.1. Préambule

Les travaux pour le Port Autonome de Nouméa font l'objet de la convention n° 02.80 entre le SHOM et le Port Autonome.

Ces travaux sont entrepris par la MOP à la demande du Port Autonome, quand les moyens en embarcations de sonde et en personnel sont disponibles.

Entre le 1er octobre 1982 et le 30 avril 1984, ces travaux ont consisté en vérification de profondeurs dans la Grande Rade, et en sondage le long des quais.

5.1.2. Levé le long des quais

Un sondage au 1/500 à la cordelle le long du quai au long cours et du quai des remorqueurs a été effectué en août 1983.

Ce sondage avait été demandé à la suite de travaux de dragage exécutés le long de ces quais en mars 1983. Le dernier levé avant dragage avait été effectué en 1981 par l'ICA Souquière.

Les profils longs de 70 m et espacés de 5 m sont perpendiculaires au quai. Le positionnement de l'embarcation de sonde se faisait sur une cordelle graduée tendue perpendiculairement au quai par une autre embarcation au moyen d'un alignement matérialisé par 2 piquets tous les 5 m. Les marques d'alignement du précédent sondage de 1981, encore visibles sur le quai, ont été reprises, et les profils des 2 levés sont superposables.

Les sondes ont été réduites de la marée de l'observatoire de Nouméa.

Une minute de bathymétrie au 1/500 a été rédigée pour chacun des quais. Les limites des zones sondées figurent sur la planche n° 23.

5.1.3. Vérification de profondeurs dans la Grande Rade

Des déroctages ont été faits en 1982 dans la Grande Rade du port de Nouméa, sur quelques hauts fonds de moins de 10 m mis en évidence par le levé de 1981 (ICA Souquière), au Sud de l'axe d'approche du port, dans la zone de présentation au quai au long cours.

Une première vérification des profondeurs a été faite par la MOP en novembre 1982. Des travaux de déroctage ont dû être repris, et une deuxième vérification a eu lieu en avril 1983. Une sonde a été, par la suite vérifiée en janvier 1984, après dragage, près du quai au long cours.

Le point de déroctage était balisé par des plongeurs. Les profils guidés par théodolite étaient espacés de 5 m autour du point balisé pour tenter d'avoir une insonification complète du fond.

Une minute de recherche au 1/1 000 a été rédigée. Sur cette minute ne figurent que les profils sur lesquels ont été trouvées des sondes minimales fournies par les dernières recherches effectuées avant le 30 avril 1984. Les autres profils figurent sur les minutes de construction.

La localisation de l'embarcation était assurée par 2 théodolites et un angle au cercle. Les coordonnées des stations et amers utilisés sont données en annexe.

De nouvelles têtes ont été découvertes au cours des recherches. Un sondage systématique au 1/500 de toute la zone de moins de 12 m de profondeur où évoluent les bâtiments avoisinant 10 m de tirant d'eau semble nécessaire pour assurer une sécurité complète.

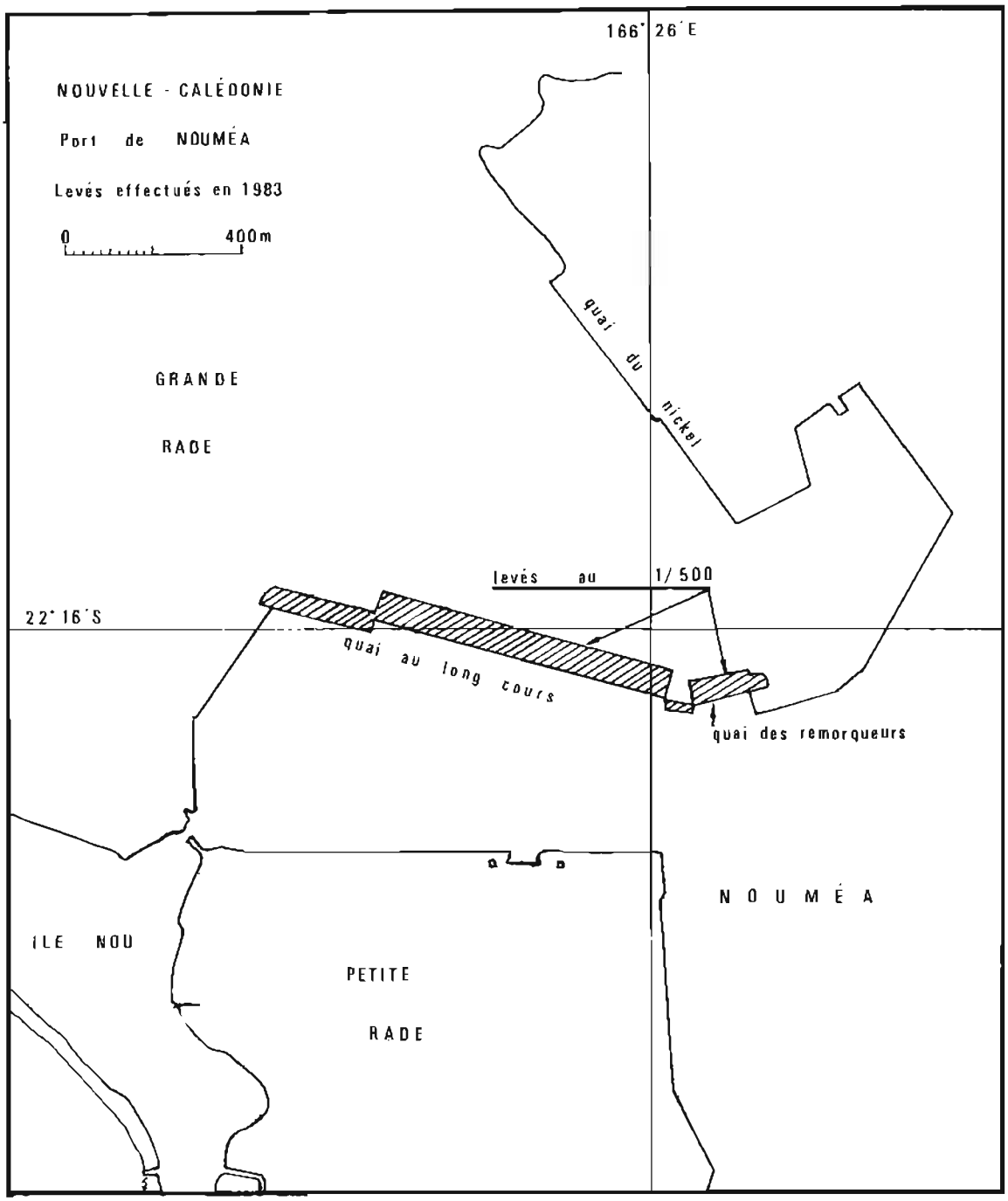
Les sondes ont été réduites de la marée enregistrée à l'observatoire permanent de Nouméa.

5.2. LEVÉ DE DÉTAIL POUR UN APPONTEMENT À THIO

5.2.1. Préambule

La Société Polypêche, dont les entrepôts sont implantés sur le port de Thio, a demandé au Territoire, conjointement avec la Mairie de Thio, la construction, près du port actuel de Thio, d'un appontement destiné à recevoir des cargos frigorifiques pouvant caler 4,5 m.

La Marine, qui dispose d'une mission hydrographique et d'un service des Travaux Maritimes, a



PL. 23. — Port de Nouméa : schéma index des zones levées.

été chargée de l'étude du projet, et la MOP de sa partie hydrographie.

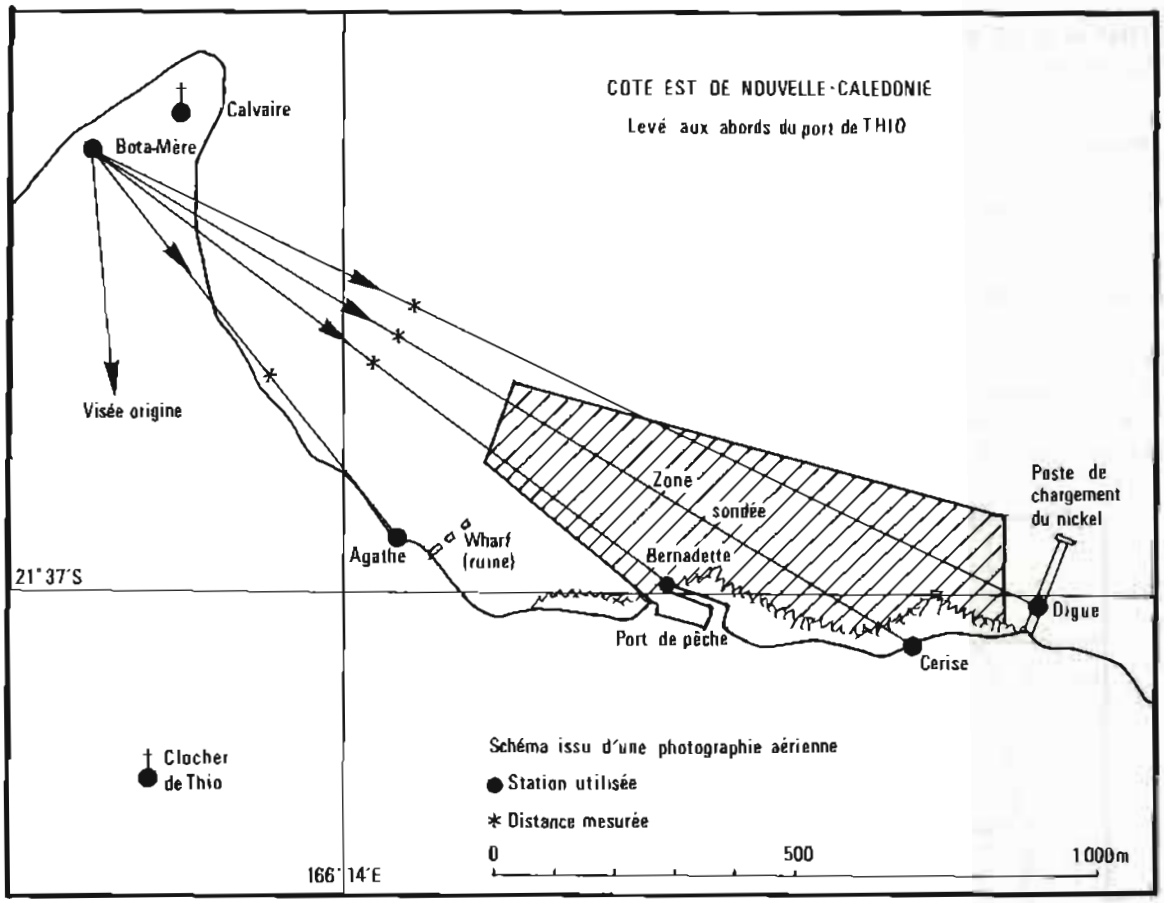
Le levé a été effectué du 16 au 20 novembre 1983.

5.2.2. Géodésie

4 stations pour théodolite ont été placées le long de la côte, au voisinage du port, par gisement et distance (théodolite T2 et AGA 14) à partir du point du Service Topographique Bota-Mère, situé sur un promontoire rocheux à l'Ouest, le gisement origine étant pris sur le clocher de Thio, autre point du Service Topographique.

L'emplacement des stations figure sur la planche n° 24; leurs coordonnées sont données en annexe.

La durabilité des stations placées par la MOP étant précaire, aucune fiche géodésique n'a été établie.



PL. 24. — Levé de détail à Thio pour un appontement.

5.2.3. Bathymétrie

Le lagon devant Thio avait été sondé par la MOP au 1/10 000 en 1979-80, et un sondage au 1/1 000 avait été fait en 1953 autour du poste de chargement de nickel situé à 500 m à l'Est du port.

Le choix de l'emplacement pour la construction de l'appontement dépendait de la topographie du fond. Une zone rectangulaire longue de 700 m et large de 250 à 300 m a été levée de façon à explorer une longueur suffisante de côte et recouper les sondages au 1/10 000 sur une profondeur suffisante pour assurer la sécurité des approches immédiates du futur wharf.

Le levé bathymétrique a été effectué sur des profils radioguidés par une station optique installée sur Bota-Mère, le positionnement étant complété par 2 théodolites traversiers installés sur 2 des 4 stations placées le long de la côte; l'espacement entre profils est de 10 m à la côte.

Les profils radioguidés ont été complétés par un sondage au plomb de sonde le long de la côte et quelques profils au cap, perpendiculaires à la côte.

Les sondes ont été réduites de la marée enregistrée à l'observatoire permanent de Thio. Sur les 3/4 de la zone levée, le fond est sableux, en pente douce et régulière; seule une roche isolée de 3,7 m de brassiage, figurant sur la minute au 1/10 000, a été trouvée dans les fonds de 6 m. Sur le quart Ouest de la zone levée, le fond est rocheux et tourmenté.

La zone sondée est représentée sur la planche n° 24.

5.2.4. Topographie

Le trait de côte et les limites du corail immergé ont été restitués à la chambre claire à partir de photos IGN au 1/8 000 prises en 1982 et agrandies au 1/1 000.

Les piliers de l'ancien chemin de roulement, les coffres d'amarrage et le balisage flottant ont été positionnés par visées au théodolite et figurent sur la minute de rédaction.

5.2.5. Documents rédigés

- 1 minute bathymétrie-topographie au 1/1 000 a été rédigée.

5.3. SONDAGE DE 2 PROFILS ENTRE TAHITI ET MOOREA

5.3.1. Préambule

Le but de ce sondage était de fournir une coupe verticale du tracé du fond entre Tahiti et Moorea, pour le passage d'un cable électrique devant alimenter l'île de Moorea en électricité à partir de la centrale de Papeete.

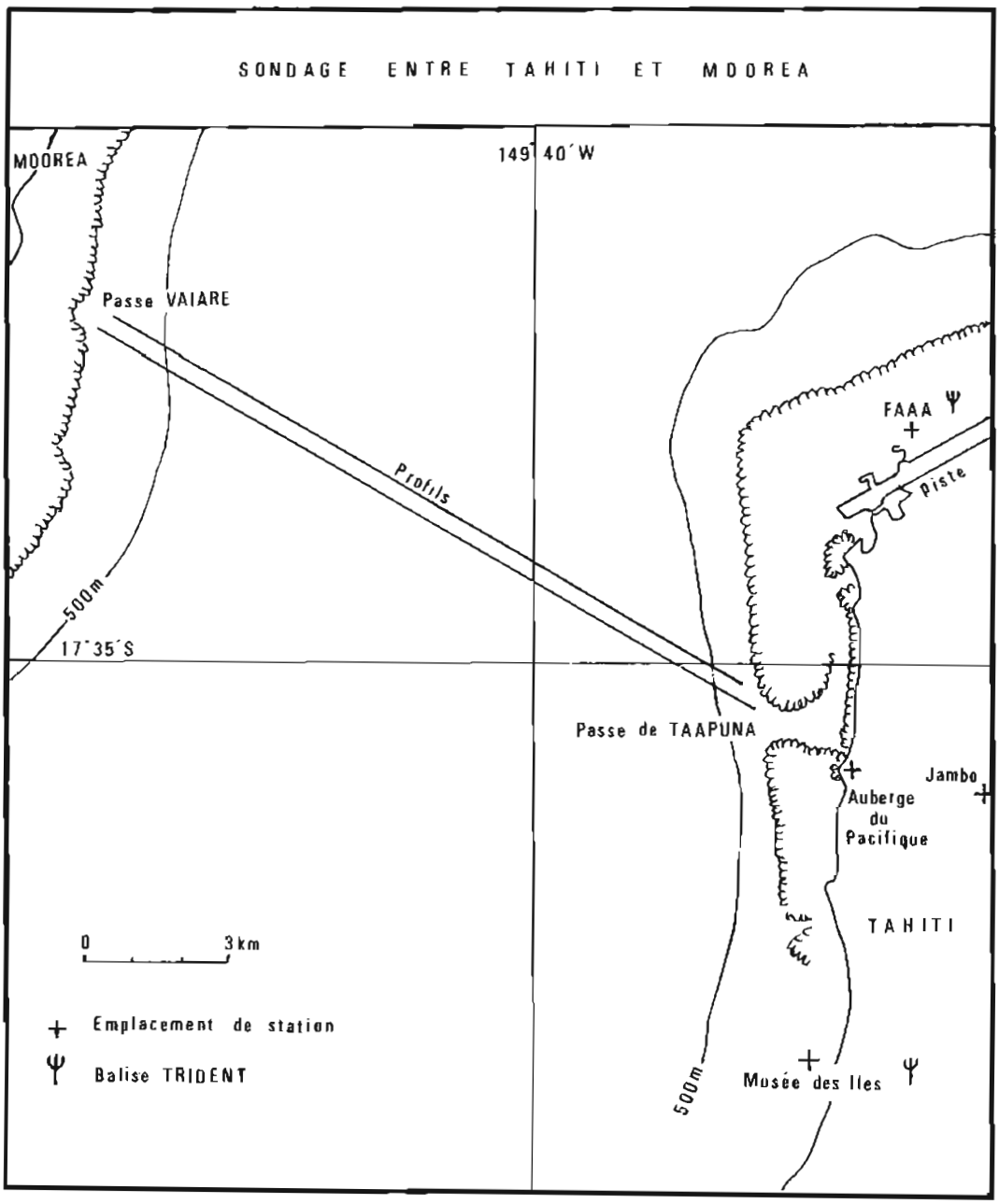
Il a été demandé à *L'Estafette* d'effectuer 2 profils parallèles de bathymétrie, espacés de 300 m le long du trajet prévu pour le cable, entre la passe de Taapuna sur la côte Ouest de Tahiti et la passe de Vaiare sur la côte Est de Moorea. Le gisement des profils est 299°04,5'.

5.3.2. Localisation

Les profils ont été radioguidés à l'aide d'un théodolite Wild T 16 à partir de 2 stations situées à Tahiti sur l'arrivée de la passe de Taapuna.

2 lieux traversiers étaient assurés au moyen de distances fournies par 2 balises Trident installées à l'aéroport de Faaa et au musée des Îles.

Les coordonnées de toutes les stations, qui ont été déterminées par le cabinet de M. Grand, sont données en annexe et leur position figure sur la planche n° 25.



PL. 25. — Sondage de 2 profils entre Tahiti et Moorea.

5.3.3. Déroulement des opérations

Le sondage a été exécuté le 1er mars. Le profil le plus au Sud a dû être terminé au cap à l'arrivée sur Moorea, le passage d'un grain empêchant de voir le bâtiment de la station guide. Les profils ont été effectués à la vitesse de 10 nœuds et les éléments de position relevés toutes les 30 secondes. Le sondeur Raytheon a été utilisé sur la fréquence 12 kHz.

5.3.4. Documents établis

• 3 minutes de bathymétrie ont été rédigées à l'échelle 1/5 000.

Les minutes de construction ont été rédigées par le cabinet Grand à l'aide d'une table traçante, à partir des listings de coordonnées qui lui ont été fournis par la MOP.

ANNEXE AU CHAPITRE 5.1.

Liste des points de la rade de Nouméa sur lesquels s'est appuyée la localisation

Nom des points	X	Y
Station sémaphore	648 619,57	7 536 580,22
Station n° 14	646 000,85	7 536 595,45
Antenne ORTF sémaphore	648 614,9	7 536 586,75
Croix de Lorraine	648 738,4	7 535 175,15
Station 28 A3 quai au long cours	647 181,9	7 536 914,4
Station 1 B quai des caboteurs	647 507,96	7 536 789,73

ANNEXE AU PARAGRAPHE 5.2.2.

Coordonnées des stations utilisées (IGN 72)

Nom de la station	X	Y	Z
Bota-Mère (point du service topo)	627 240,05	7 609 769,76	89,6
Agathe	627 754,63	7 609 152,30	
Bernadette	628 168,01	7 609 083,63	
Cerise	628 597,78	7 608 974,97	
Diane	628 809,71	7 609 034,32	

ANNEXE AU PARAGRAPHE 5.3.2.

Coordonnées des stations (UTM fuseau 5)

Nom de la station	Nature	X	Y
Auberge du Pacifique	Guide n° 1	222 604,07	8 051 158,41
Jumbalia	Guide n° 2	223 500,83	8 050 972,46
Faaa	Antenne Trident	222 626,68	8 057 228,73
Musée des Îles	Antenne Trident	222 541,55	8 048 401,54

CHAPITRE 6

TRAVAUX DIVERS

6.1. TRAVAUX DE GÉODÉSIE À MAUPITI

6.1.1. Préambule

L'Institut Géographique National n'ayant jamais opéré à Maupiti, la dernière triangulation remonte aux travaux de la Mission des Etablissements Français d'Océanie en 1954-55.

Pour permettre un levé hydrographique du chenal d'accès à l'appontement par la *Lorientaise*, la MOP était chargée de mettre en place un réseau géodésique moderne, avec point fondamental placé par observation Doppler, mesure de base au telluromètre et mesure d'orientation par visée astronomique.

La correspondance des coordonnées avec celles du système de 1954 devait être établie. La MOP était aussi chargée de positionner dans le nouveau système, le balisage du chenal d'accès à l'appontement et de mettre en place un observatoire de marée.

Les travaux prescrits ont été exécutés entre le 12 et le 22 février 1983 par un détachement de la Mission embarqué sur la *Lorientaise* et sous les ordres de l'IPA Guevel.

6.1.2. Etablissement d'un système géodésique WGS 72-1983

Ce système s'appuie sur une base de 1981,90 mètres de longueur, dont le terme Sud a été positionné au JMR4, et dont l'orientation a été déterminée par visée du soleil au théodolite.

Le terme Sud, point fondamental, situé au Nord de l'îlot Pitiahe, a été positionné par 41 passages satellites classés SMO1, et matérialisé par une stèle en parpaings.

Les coordonnées de l'axe de la stèle, et l'altitude de son bord supérieur sont les suivantes :

latitude : −16°28'28"942 (S)
longitude : −152°14'55"059 (W) WGS 72
altitude : 19,0 mètres

Le terme Nord de la base est matérialisé par une douille SHOM scellée dans la bitte d'amarrage du nouveau quai. Deux stations auxiliaires sont rattachées à ce terme.

L'orientation de la base a été obtenue par visée au théodolite Wild T2 du soleil au lever et au coucher (4 séries chaque fois).

L'azimut de la base « quai vers stèle » vaut 172°48'22"; pour diverses raisons cette détermination est donnée avec une incertitude de ± 20". Le système de coordonnées est obtenu par projection UTM (ellipsoïde international — fuseau 5).

6.1.3. Triangulation

Six stations de sondage, deux amers, 17 balises et 5 espars ont été posisitionnés à partir de la base décrite au paragraphe précédent. Les coordonnées de ces points sont données en annexe. Le canevas géodésique et le schéma de balisage figurent sur la planche n° 26.

6.1.4. Rattachement au système géodésique de 1954

Aucun des 3 points fondamentaux de 1954 n'a été retrouvé. Il n'est donc pas possible de rattacher le système 1983 au système 1954 de façon précise. Le seul point que l'on puisse rapprocher est sur l'ancien quai de Petei; ces coordonnées sont :

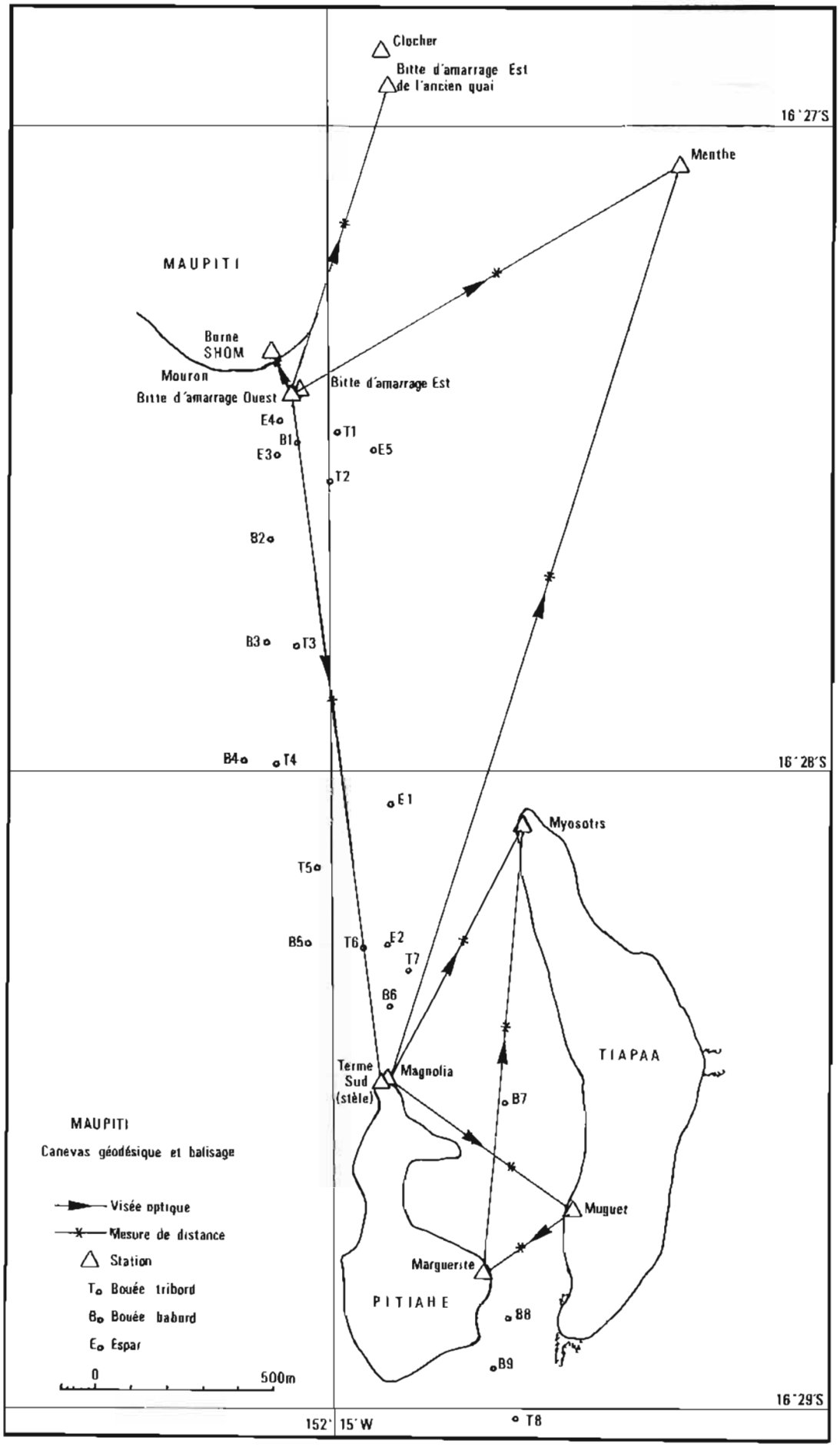
1954 { X = 1155,8
Y = 4858,2

1983 { X = 580234
Y = 8181217 (établi d'après les coordonnées de la bitte d'amarrage EST-précision 1 m).

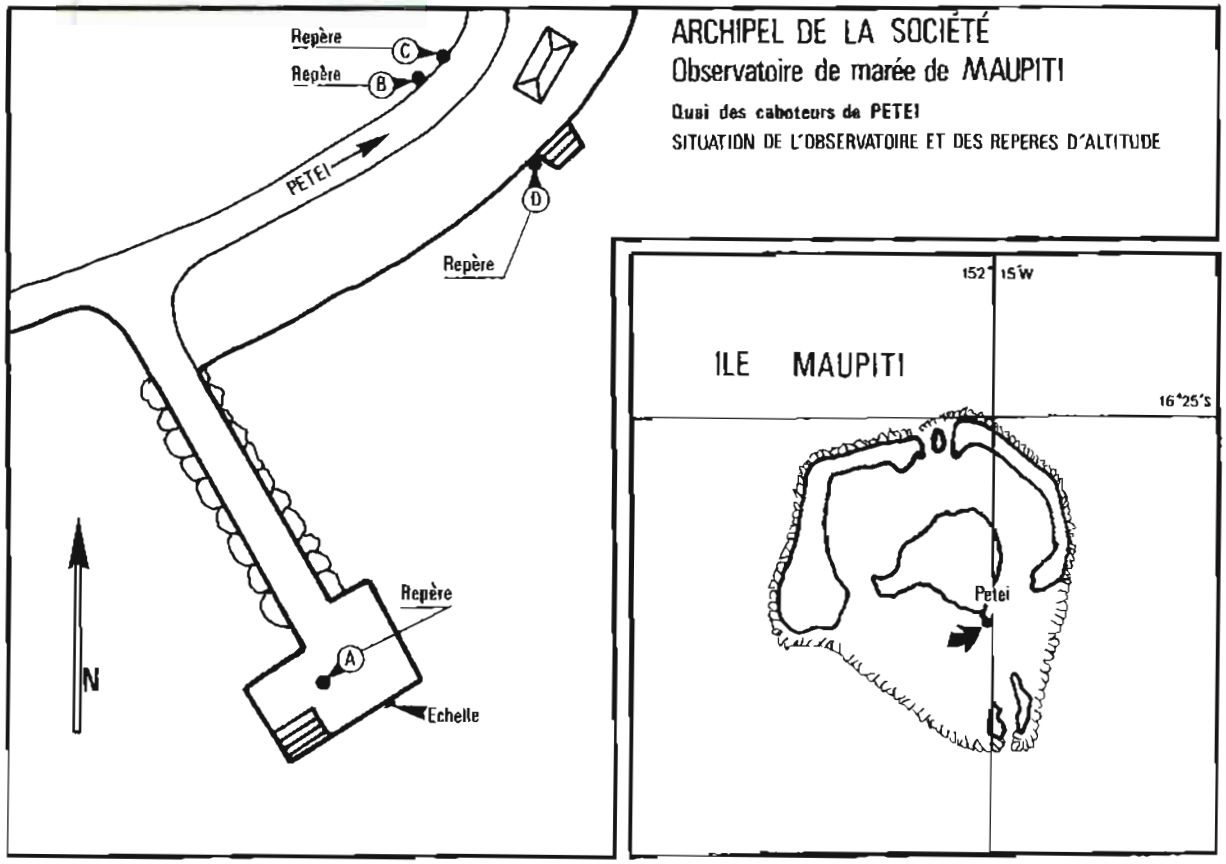
L'orientation du levé de 1983 par rapport à 1954 peut être obtenue en collant « graphiquement au mieux » les balises et stations de 1983 sur le levé de 1954. Il apparaît ainsi que le gisement de oy (1983)/(1954) est −0°18'. Cet écart s'explique en grande partie par le fait que l'axe oy (1954) est dans la direction du Nord vrai et que la convergence des méridiens vaut 0°13' (Est).

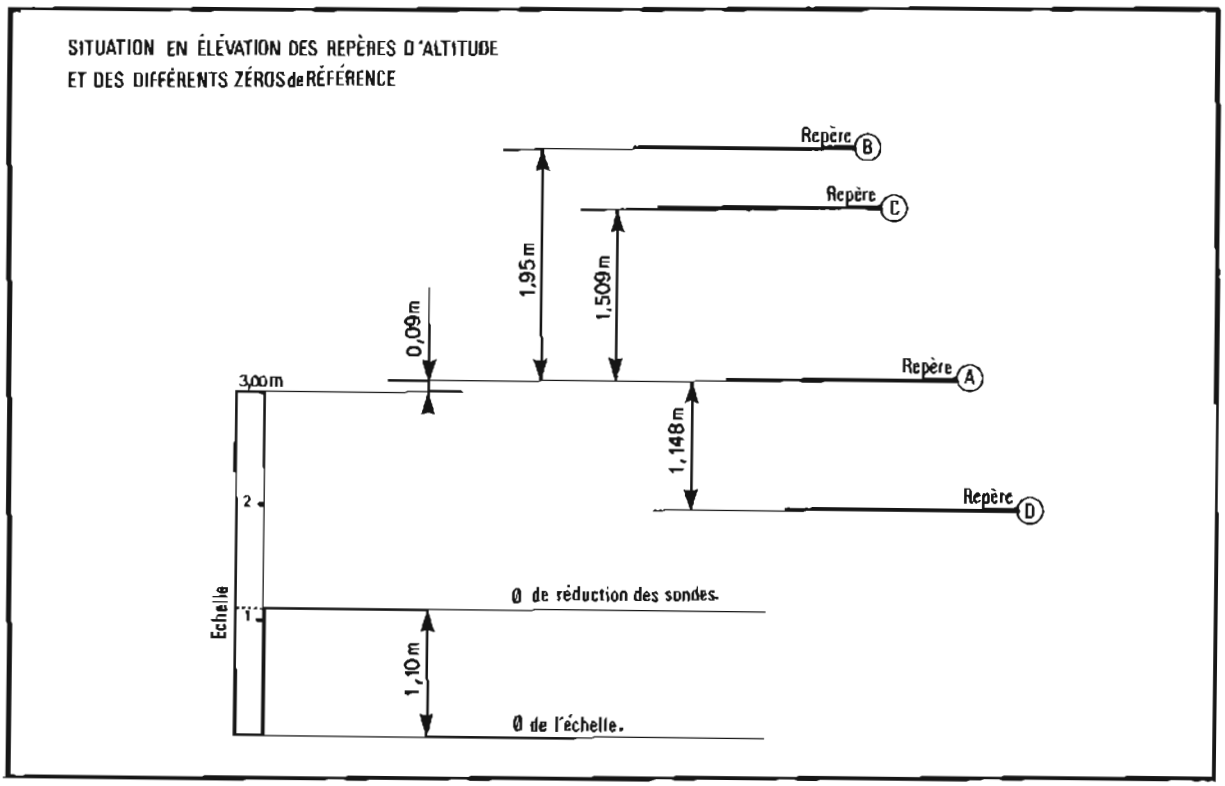
6.1.5. Marée

Une échelle de marée a été installée sur le grand quai où se trouve le terme Nord et 4 repères



PL. 26. — Maupiti : balisage du chenal d'accès à l'appontement et canevas géodésique.





PL. 27. — Observatoire de marée de Maupiti.

d'altitude ont été mis en place. La situation de l'échelle et des repères figure sur la planche n°27. La proximité de la *Lorientaise* sur ce même quai a permis d'observer la marée pendant toute la durée des travaux. Le zéro de réduction des sondages a été déterminé par concordance sur 7 jours avec la marée prédite de Matavaï (Tahiti), l'observatoire de Matavaï étant en réfection à cette époque. Il a été choisi à 1,99 mètre en dessous de la douille SHOM du terme Nord.

6.1.6. Documents établis

Les documents suivant ont été établis :

- 1 dossier d'observation Doppler
- 8 fiches géodésiques
- 1 dossier d'observatoire de marée

6.2. LOCALISATION DE 6 ATOLLS SUR LA ROUTE PAPEETE-MURUROA

6.2.1. Préambule

La position de 6 atolls situés entre Tahiti et Mururoa a été contrôlée au moyen du récepteur de satellites JMR 4 embarqué sur *L'Estafette*. La position de ces atolls avait été déterminée au moyen de mesures astronomiques par la Mission Géodésique des Tuamotu vers 1950.

Les quatre atolls de Hereheretue, Anuanu Raro, Anuanu Ruga et Nukutipipi ont été localisés lors du transit aller de *L'Estafette* entre Papeete et Mururoa entre le 6 et le 10 décembre 1982. Les 2 derniers : Anaa et Meetia l'ont été lors du transit retour de *L'Estafette* entre le 7 et le 10 février 1983.

La situation des 6 atolls est donnée sur la planche n° 28.

6.2.2. Méthode utilisée

Pour chaque atoll on a utilisé deux passages de satellites (élévation comprise entre 20° et 78°), le bâtiment, stoppé, étant localisé par rapport aux atolls grâce à des relèvements optiques et des distances radar sur l'atoll. Le report du point en vue de terre s'est effectué par les minutes de topographie au 1/10 000 établies par la Mission Géodésique des Tuamotu.

Les latitudes et longitudes ainsi obtenues ont été comparées à celles fournies par le JMR 4.

Pour l'atoll de Meetia, il n'a été obtenu qu'un seul point classé SM01. Mais deux autres points classés SM06 et SM07 (élévation maximum de 80°) ont donné des résultats très voisins.

6.2.3. Précision de la méthode

Cette méthode de localisation est affectée de deux sources d'erreur.

a) Précision du point en vue de terre. Le bâtiment se tenant à une distance d'environ un mille de l'atoll, l'erreur commise sur ce point reste inférieure à 100 mètres.

b) Précision du point JMR 4. Elle est surtout affectée par le déplacement du bâtiment pendant les comptages Doppler.

Le bâtiment stoppé est en effet soumis au vent et au courant. La dérive qui en résulte est calculée grâce à des points en vue de terre avant le début du passage, puis est introduite dans le calculateur du JMR 4. La précision du point JMR 4 dans de telles conditions peut être estimée à 200 mètres.

La précision théorique globale de la méthode est donc meilleure que 300 mètres ce qui est confirmé par les écarts constatés entre les deux déterminations effectuées pour chaque atoll. La plus grande dispersion en longitude montre que la principale source d'erreur est celle due à l'estimation de la dérive pendant les passages de satellites.

6.2.4. Résultats des mesures

Les résultats des mesures sont résumés dans le tableau dressé en annexe. Dans ce tableau, latitudes et longitudes sont prises en valeur algébrique, les latitudes Sud et les longitudes Ouest étant négatives.

6.3. LOCALISATION D'UN HAUT-FOND À L'EST DES TONGA

Un haut-fond d'existence et de position douteuse avait été découvert par la Frégate *Antiope* en 1886 à l'Est de l'archipel des Tonga.

Le cargo *Rostand* de la CGM a confirmé son existence et l'a situé à la position approchée :

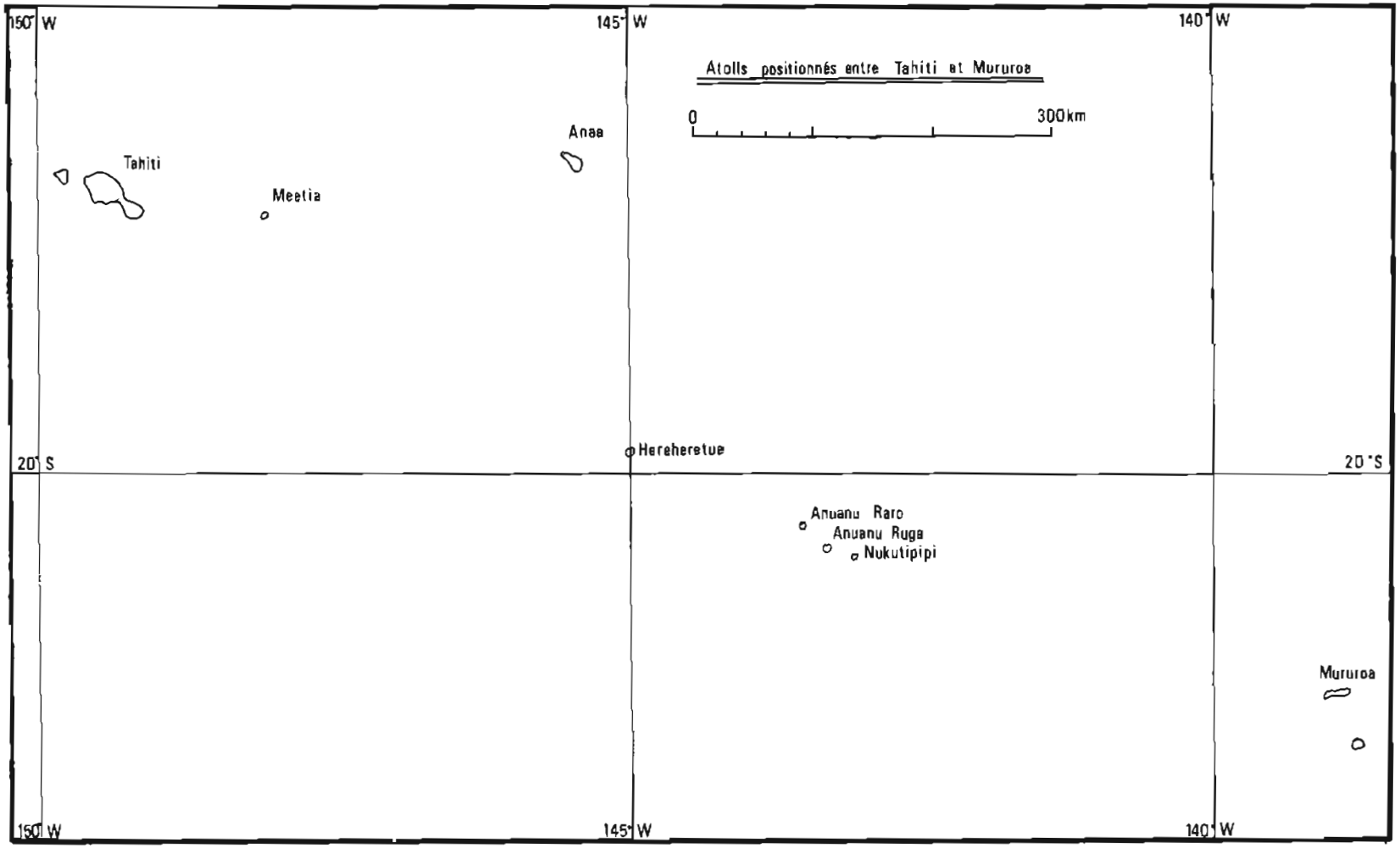
L = 18°10′ S
G = 168°25′ W

L'Estafette a effectué une recherche autour de cette position le 15 janvier 1984 au cours de son transit entre Nouméa et Papeete.

Un plateau de forme vaguement circulaire et de 400 m de diamètre environ a été reconnu, et la sonde minimale trouvée était de 9,5 m à la position :

L = 18°15,1′ S
G = 168°23,6′ W

Cette position a été obtenue à l'aide d'un récepteur de satellites JMR 4.



PL. 28. — Situation des atolls positionnés entre Tahiti et Moorea.

ANNEXE AU CHAPITRE 6.1

Coordonnées UTM des points géodésiques

Désignation	Matérialisation	X	Y	Z
Point fondamental (terme sud)	— Axe stèle	580 203,00	8 178 383,00	19,0
S^ion^ Magnolia près du terme sud	— Borne et douille SHOM	580 214,60	8 178 390,20	18
Mouron terme nord	— Bitte d'amarrage Ouest	579 962,20	8 180 349,58	20
	— Bitte d'amarrage Est	579 981,55	8 180 362,32	20
	— Borne + douille SHOM	579 894,30	8 180 464,25	24,6
Menthe	— Borne et douille SHOM	581 055,29	8 180 981,43	18
Myosotis	— Borne et douille SHOM	580 593,86	8 179 109,14	18
Muguet	— Borne et douille SHOM	580 713,75	8 178 001,95	18
Marguerite	— Borne et douille SHOM	580 480,27	8 177 822,06	18
Clocher de l'église	Axe	580 225,32	8 181 318,53	
Ancien quai (près de l'église)	Bitte d'amarrage Est	580 239,24	8 181 216,07	
	BALISAGE			
Balise noire n° 1		580 086,32	8 180 239,39	
Balise noire n° 2		580 061,44	8 180 097,52	
Balise noire n° 3		579 965,21	8 179 629,81	
Balise noire n° 4		579 907,36	8 179 297,43	
Balise noire n° 5		580 019,46	8 178 993,22	
Balise noire n° 6		580 147,20	8 178 766,25	
Balise noire n° 7		580 268,20	8 178 697,43	
Balise noire n° 8		580 557,69	8 177 408,04	
Balise rouge n° 1		579 974,06	8 180 204,05	
Balise rouge n° 2		579 895,08	8 179 938,22	
Balise rouge n° 3		579 883,36	8 179 636,82	
Balise rouge n° 4		579 818,15	8 179 306,65	
Balise rouge n° 5		579 991,77	8 178 778,86	
Balise rouge n° 6		580 218,61	8 178 602,49	
Balise rouge n° 7		580 537,15	8 178 316,78	
Balise rouge n° 8		580 538,90	8 177 693,63	
Balise rouge n° 9		580 499,23	8 177 554,85	
Espar 1		580 226,26	8 179 176,44	
Espar 2 (noir)		580 215,73	8 178 773,65	
Espar 3 (rouge)		579 917,73	8 180 175,79	
Espar 4 (rouge)		579 925,36	8 180 262,77	
Espar 5		580 183,10	8 180 189,13	

ANNEXE AU CHAPITRE 6.2

Tableau des résultats des mesures

Atoll	Nombre de passages exploités	ΔL = L transit-L (opt-radar)	ΔG = G transit-G (opt-radar)
Hereheretue	2 SMO1	− 4″	+ 14″
Anuanu Raro	2 SMO1	− 12″	− 1″
Anuanu Ruga	2 SMO1	− 8″	+ 8″
Nukutipipi	2 SMO1	− 16″	− 11″
Anaa	2 SMO1	+ 4″	− 52″
Meetia	1 SMO1 1 SMO7 1 SMO6	+ 2″	− 1″

CHAPITRE 7

LEVÉS BATHYMÉTRIQUES PENDANT LES TRAVERSÉES ET LEVÉS OCÉANIQUES À PETITE ÉCHELLE

7.1. LEVÉS BATHYMÉTRIQUES PENDANT LES TRAVERSÉES

Entre le 1er octobre 1982 et le 30 avril 1984, *L'Estafette* a effectué :

- 2 traversées Nouméa-Papeete aller et retour
- 2 traversées Papeete-Mururoa aller et retour
- 1 traversée Nouméa-Fidji aller et retour
- 1 traversée Nouméa-Matthew aller et retour.

La *Boussole* 1 traversée Nouméa-Vanuatu.

La bathymétrie pendant ces traversées a été enregistrée sur sondeur de grand fonds Raytheon et rédigée sur 9 graphiques Mercator à l'échelle 1/1 000 000 à la latitude 33° S (bathymétrie des traversées Tahiti-Mururoa de 1984 n'a pas encore été rédigée au 30 avril 1982).

La position des bâtiments était assurée par un récepteur de satellite JMR 4.

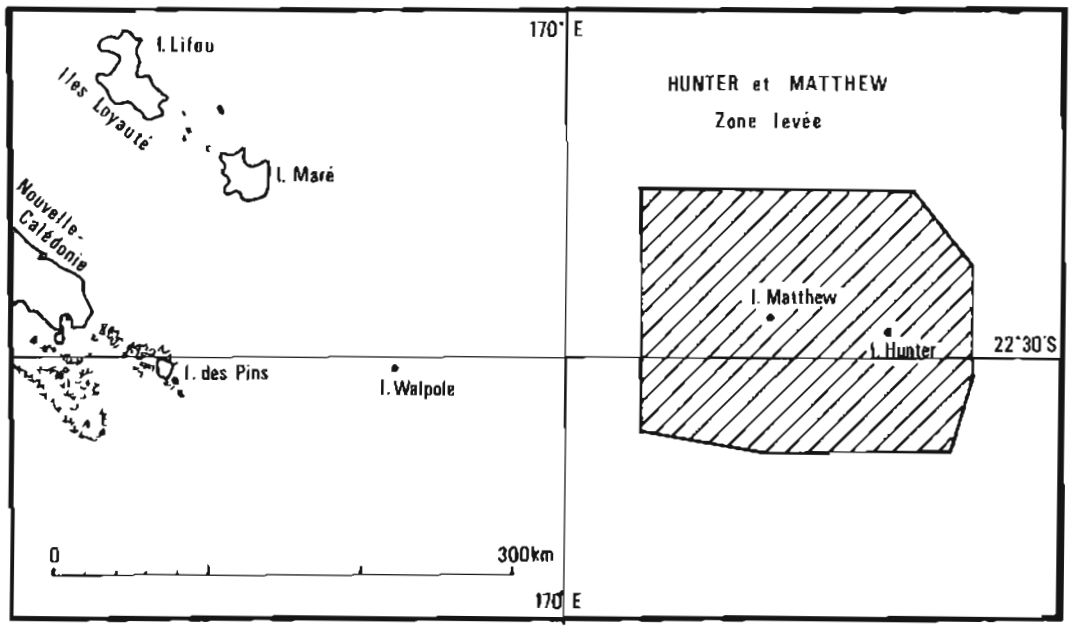
7.2. LEVÉ AUTOUR DE HUNTER ET MATTHEW

Un levé bathymétrique exploratoire a été fait en mars-avril 1983 par *L'Estafette* sur la dorsale des îlots Hunter et Matthew, dépendances de la Nouvelle-Calédonie, situés à environ 400 milles à l'Est de Nouméa. Les profils, orientés Nord-Sud, étaient espacés de 5 milles, et resserrés à 2,5 milles près des îlots.

La position du bâtiment était donnée par azimut-distance radar sur les îlots et par satellite. Les îlots avaient été eux-mêmes placés en 1981, et des minutes de topographie établies.

La zone explorée figure sur la planche n° 29.

Une minute de bathymétrie au 1/25 000 a été rédigée. Sur cette minute ont aussi été reportés les profils effectués par le navire océanographique *Vauban* de l'ORSTOM, en position relative par rapport aux îlots.



PL. 29. — Zone sondée autour de Hunter et Matthew.

CHAPITRE 8

CONCOURS APPORTÉS PAR LA MOP

8.1. OPÉRATION MARARAI À TAHITI

La MOP a apporté son concours en personnel et matériel au CNEXO du 29 avril au 16 mai 1983 pour la localisation du navire océanographique *Marara* effectuant des sondages devant Papeete en vue de la pose d'une conduite d'eau destinée à une usine pilote utilisant l'énergie thermique des mers.

Les sondages ont été effectués à faible allure suivant des profils perpendiculaires à la côte, guidés au théodolite à partir de stations optiques installées sur la côte. La position du bâtiment était déterminée toutes les minutes par 3 lieux optiques (le théodolite guide et 2 théodolites traversiers).

Quelques profils parallèles à la côte ont été suivis, le bâtiment étant positionné aussi toutes les minutes par 3 visées optiques.

Les stations utilisées pour les théodolites guides et traversiers étaient soit des points de coordonnées connues du réseau géodésique de l'île, soit des points placés par triangulation à partir de ces derniers (en particulier le long de la digue extérieure).

Le schéma des emplacements de station et des profils suivis figure sur la planche n° 30, et la liste des coordonnées des stations est donnée en annexe. La construction des profils suivis a été faite avec le concours de l'EPSHOM.

8.2. SIMULATION SPOT EN NOUVELLE-CALÉDONIE

Le Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (GTDA), a organisé, conjointement avec le SHOM et d'autres organismes, une mission en Nouvelle-Calédonie en novembre-décembre 1983. Les appareils destinés aux satellites SPOT et dont il fallait tester les performances, étaient montés sur un appareil Neptune P2V7 de l'Aéronavale.

En ce qui concerne le SHOM, le but de la mission était d'étudier l'intérêt de doter le troisième satellite SPOT d'un canal bleu-vert favorable à l'étude bathymétrique des petits fonds.

Des essais avaient été faits auparavant sur la côte Sud de Bretagne au-dessus des Glénans.

L'intérêt du lagon calédonien est de présenter de vastes étendues de profondeur appropriée pour ces mesures, une bonne luminosité, et une eau assez transparente, mais aussi d'avoir fait l'objet de levés récents au 1/10 000 permettant de comparer les résultats obtenus par la télédétection avec ceux obtenus par les sondages.

Pour pouvoir faire ces comparaisons, il est nécessaire de pouvoir caler avec précision les clichés obtenus sur les minutes de bathymétrie, au-dessus de l'eau, en l'absence de tout détail topographique permettant ce calage. Il faut donc connaître avec précision la position du centre de prises de vues, c'est-à-dire de l'avion au moment du déclenchement de l'obturateur.

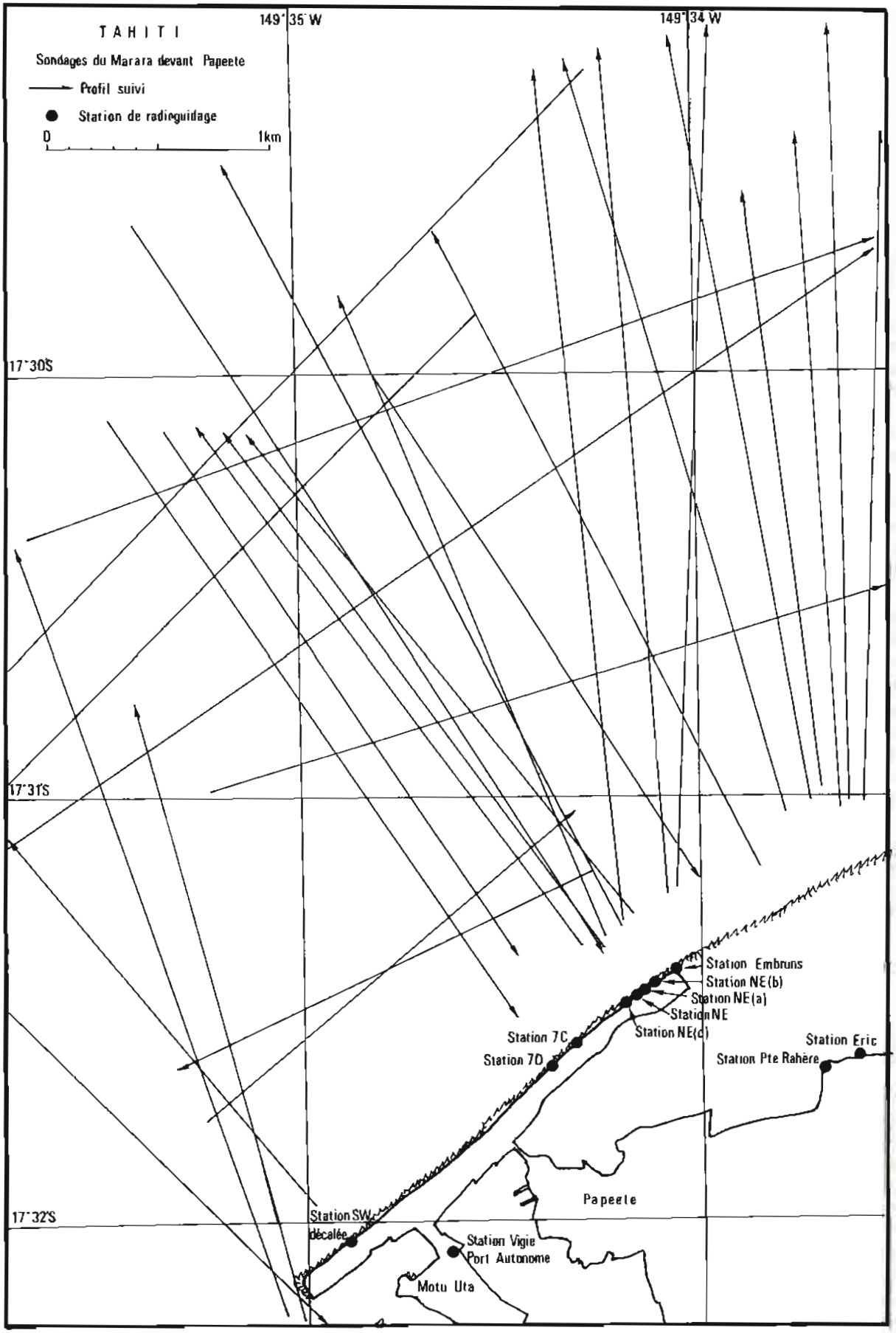
Le système Trident a été utilisé pour positionner l'avion. Ce positionnement peut se faire à partir de 3 balises, mais il est préférable d'en avoir 4 pour améliorer la précision et pallier la défaillance d'une balise au cours du vol. L'altitude de l'avion fournit un lieu supplémentaire; cette altitude connue de façon approchée par un altimètre à pression, est supposée constante pendant le vol et déterminée avec précision par minimisation des écarts dans un système d'équations surabondantes.

L'avion peut être guidé sur des profils rectilignes par visualisation au poste de pilotage de l'écart entre le profil à suivre et la position instantanée de l'avion fournie par un calculateur recevant les données du Trident.

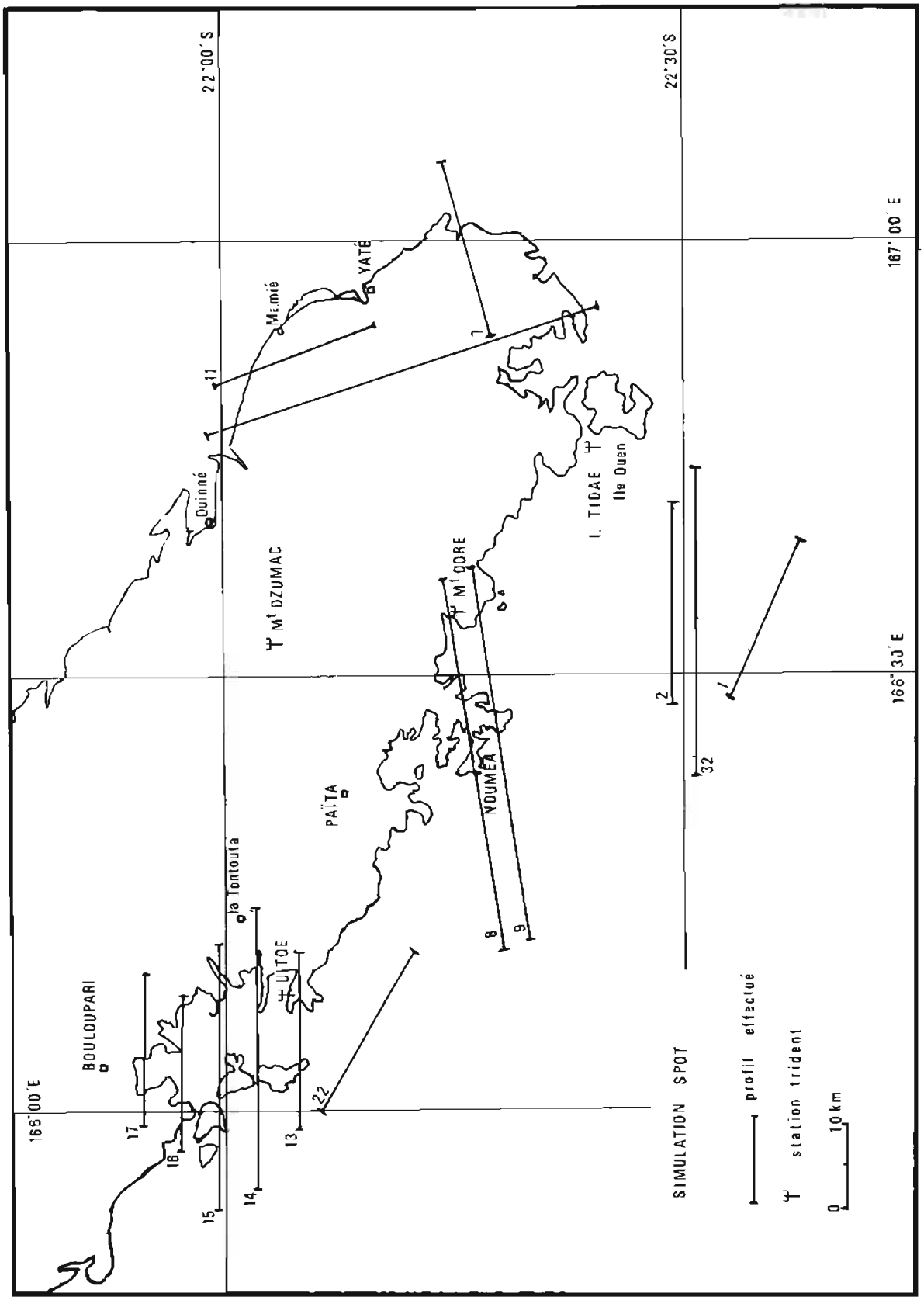
Un rapport détaillé sur l'utilisation du Trident pour la localisation des aéronefs a été rédigé par l'IA Le Gouic chargé de l'opération SPOT (n° 582 EPSHOM/E/GG/NP du 4 juillet 1984). Il ressort de ce rapport que les performances du Trident ont été bien meilleures en Nouvelle-Calédonie qu'en Bretagne grâce à l'utilisation d'une antenne baton au lieu d'une antenne sabre.

Le rôle de la MOP dans cette opération a consisté à mettre en place, et à faire fonctionner pendant toute sa durée, 4 balises Trident en des points choisis pour assurer un bon recoupement entre au moins 3 balises dans les zones d'expérimentation prévue.

Les emplacements de ces stations et les profils suivis par l'avion figurent sur la planche n° 31, et les coordonnées des stations sont données en



PL. 30. — Sondages du *Marara* devant Papeete.



PL. 31. — Simulation SPOT.

ANNEXE AU PARAGRAPHE 8.1.

Coordonnées des stations de guidage

Nom de la station	X	Y
I. Anciennes stations		
Eric	228 171,8	8 060 315,6
Temple (A)	226 688,5	8 058 339,4
Digue NE	227 169,2	8 060 551,2
Embruns	227 355,8	8 060 676,4
Faaa	222 635,2	8 057 219,4
Phare Pte Venus (A)	235 139,9	8 060 676,4
II. Nouvelles stations		
SW Digue décalée	225 903,5	8 059 472,1
NE Digue (a)	227 198,0	8 060 571,0
NE Digue (b)	227 261,0	8 060 613,1
NE Digue (c)	227 140,5	8 060 531,0
Digue 7 C	226 914,9	8 060 356,9
Digue 7 D	226 800,2	8 060 250,8
Piscine	225 994,9	8 058 162,2
Pte Rahere	228 009,7	8 060 244,1

annexe. Il s'agissait des points dont les coordonnées étaient déjà connues.

Le technicien électronicien de la MOP a aussi participé à la mise en place dans l'appareil de l'interrogateur Trident et de son antenne.

ANNEXE AU PARAGRAPHE 8.2.

Coordonnées des stations Trident

Nom de la station	X	Y	Z
Uitoé	616 893,83	7 555 800,56	76,5
Mt Dzumak	648 853,68	7 553 943,55	65,0
Mt Dore	660 203,06	7 536 575,83	47,2
Ilot Tioae	680 788,24	7 520 001,03	44,0

MISSION OCÉANOGRAPHIQUE DE MÉDITERRANÉE

(14 octobre 1983 — 7 octobre 1985)

par

M. J. LAPORTE
Ingénieur Principal de l'Armement (Hydrographe)

SOMMAIRE

Première partie

1. Circonstances succinctes
2. Principaux travaux
3. Personnel de la mission (unité hydrographique et base, navires exclus)
4. Moyens flottants
   4.1. BH1 *La Recherche*
   4.2. BSR *Gazelle*
   Le conteneur de vingt pieds
5. Base de la mission
6. Moyens propres
   6.1. Véhicules
   6.2. Drôme
   6.3. Hélicoptères
   6.4. Equipements
      6.4.1. Matériels spécifiques
         6.4.1.1. Sondeurs
         6.4.1.2. Trident III
         6.4.1.3. Courantomètres
         6.4.1.4. Matériel de recherche d'obstructions
         6.4.1.5. Matériel d'acquisition et de traitement des données
      6.4.2. Matériel de transmissions
7. Méthodes
   7.1. Emploi des moyens — Les détachements isolés
   7.2. Organisation pour les levés
   7.3. Acquisition et traitement semi-automatique des données
   7.4. Etalonnages
      7.4.1. Sondeurs
      7.4.2. Trident III
   7.5. Préparation topographique des sondages

Deuxième partie

8. Levé côtier de la Corse occidentale
9. Sondages de complément dans la rade de Toulon
10. Levé côtier de la Provence
11. Mission de photographies par hélicoptère des amers des côtes méditerranéennes de la France
12. Etalonnage des réseaux Syledis de Marseille et de Toulon
13. Vérification au sondeur latéral des accès aux ports de Sète et de l'Espiguette
14. Sondage au large des îles d'Hyères
15. Travaux divers
   15.1. Compléments de topographie dans le Roussillon
   15.2. Etablissement de documents cartographiques
   15.3. Concours aux autorités locales
   15.4. Essais de matériels

Appendice 1 : Signification des sigles et abréviations rencontrés dans le texte
Appendice 2 : Etude des écarts de mesure lors des sondages par fortes pentes.

PREMIÈRE PARTIE

1. CIRCONSTANCES SUCCINCTES

Pendant la période comprise entre les mois d'octobre 1983 et 1985, le fonctionnement de la Mission Océanographique de Méditerranée (MOM) s'inscrit dans le prolongement naturel de celui de l'unité créée en 1972, et largement décrite dans le rapport de mission [1] de son premier directeur.

Si l'organisation de l'époque est restée pratiquement inchangée, la MOM a vu disparaître au fil des années les navires qui constituaient son groupe naval, et dont il ne reste plus que l'élément

[1] *Annales Hydrographiques* 1978 — n° 750 — p. 79 et suivantes.

De gauche à droite : le C.V. Martin de Marolles, l'IPA Laporte, le C.A. Lanxade, l'IETA Sauvage.

principal, le bâtiment hydrographique de 1ère classe *La Recherche*.

Ces pertes sont partiellement compensées par l'emploi à mi-temps du bâtiment de soutien de région (BSR) *Gazelle*, et par l'introduction de travaux ou de méthodes n'impliquant pas l'emploi de navire en soutien.

Mis au point bien avant octobre 1983, les procédés informatiques de traitement des données géoscientifiques ont été généralisés, et c'est au cours de la présente période que furent signés les derniers documents bathymétriques manuscrits. Les ordinateurs et leurs traceurs associés assurent aujourd'hui la totalité de la rédaction.

Les Préfets Maritimes de la Troisième Région, dont dépendait la mission sur le plan organique furent successivement les Vice-Amiraux d'Escadre Orosco puis Gagliardi, représentés par leurs adjoints opérations, les Contre-Amiraux Doniol puis Lanxade.

La Recherche et la base de la mission étaient rattachées pour leurs parts aux Capitaines de Vaisseau Reul, puis Martin de Marolles, qui se suivirent au commandement de la Flottille de Méditerranée.

Le BSR *Gazelle*, enfin, relevait de la Direction du Port de Toulon, placée sous les ordres du Capitaine de Vaisseau Martin.

2. PRINCIPAUX TRAVAUX

L'activité de la mission se déroula entièrement sur les façades méditerranéennes des côtes de France.

Elle est décrite dans la deuxième partie et comprend les travaux suivants :

1) Levé côtier de la Corse occidentale (octobre à décembre 1983, mai à octobre 1984, mai à septembre 1985)
2) Sondages de complément dans la rade de Toulon (janvier à mai 1984, janvier à juin 1985)
3) Levé côtier de la Provence (novembre 1984 à mai 1985)
4) Mission de photographies par hélicoptère des amers des côtes méditerranéennes de la France (octobre 1983 à mai 1984)
5) Etalonnage des réseaux Syledis de Marseille et de Toulon
6) Vérification au sondeur latéral des accès aux ports de Sète et de l'Espiguette (été 84)
7) Sondages au large des îles d'Hyères (hiver 84)
8) Travaux divers : Compléments de topographie dans le Roussillon
Etablissement de documents cartographiques
Mesures de courant à Monaco
Concours et essais divers

3. PERSONNEL DE LA MISSION (unité hydrographique et base, navires exclus)

L'organisation interne de la mission subdivisait cette dernière en trois services.

L'ingénieur hydrographe adjoint placé à la tête du service chargé de l'exécution des levés fut l'IPA Roudaut jusqu'au 10 avril 1985 puis l'IETA Sauvage.

Le service technique, regroupant les ateliers et magasins, fut dirigé par l'IETA électronicien Pellé jusqu'au 7 décembre 1984 puis par le TCT Quelen.

Le service général était confié au chef de la base, l'OT1 Berder jusqu'au 8 janvier 1985 puis le MP hydrographe Durand.

Deux EOR complétaient l'état-major de la mission. Ces postes furent occupés successivement par MM. Fromage et Fumey puis MM. Devois et Roux.

Les officiers mariniers hydrographes étaient 13 en principe, sous l'autorité du Major Vittenet puis du MP de Kersauson. Cependant cet effectif ne fut plus honoré à partir de mai 1984. Il descendit même, pour des raisons conjoncturelles, à six personnes à la fin de 1984, renforcées à vrai dire par des stagiaires de l'école des hydrographes.

A ce personnel s'ajoutaient 24 officiers mariniers, quartiers maîtres et matelots des autres spécialités de la marine et un TSO dessinateur, maintenu en supplément aux effectifs et formé depuis treize ans à la stéréorestitution.

4. MOYENS FLOTTANTS

4.1. BH1 *La Recherche*

Il serait difficile d'apporter des éléments d'information nouveaux sur *La Recherche*, trente quatre ans après son lancement.

Tout a été dit sur les caractéristiques de ce bâtiment dans les précédents rapports, et ces dernières sont figées à l'approche de sa condamnation.

La simplicité de sa conception et son habitabilité en font toujours un excellent support pour les sondages côtiers, et rien ne laisse supposer qu'il n'en soit pas ainsi jusqu'à son retrait du service, fixé actuellement à 1988.

Malheureusement, sur ce bâtiment vétuste, tout bruit anormal, toute avarie, font surgir la perspective d'une condamnation anticipée.

L'expérience de ces dernières années a montré que ces craintes étaient peu fondées. Ainsi, une fuite sur un cylindre, qui faisait redouter une fêlure irrémédiable du bloc moteur, fut réparée par simple douillage d'un pont d'eau; des bruits de ligne d'arbre jugés très préoccupants disparurent après quelques ajustements mineurs; des trous mis en évidence lors d'un sablage des œuvres vives se révélèrent localisés et purent être bouchés par soudure de placards rapportés.

Moins inquiétante en apparence, l'usure normale de certaines pièces sur les groupes électrogènes pourrait avoir de sérieuses conséquences sur la disponibilité du bâtiment, par suite de la difficulté à se procurer des rechanges.

En dehors du problème d'approvisionnement des pièces pour matériel ancien se pose également pour l'autorité organique celui de la définition de lots de rechange pour les sondeurs NUBS 15A et B (DESO 20), installés pourtant depuis trois ans, et de l'aboutissement des procédures de modification engagées sur les vedettes de 8 mètres.

Disons, parmi ces dernières, un mot des plus importantes :

— Fixation du moteur et des auxiliaires sur un bâti unique : faute d'avoir pris à la construction cette précaution de montage, on observe une usure anormale des courroies de transmission, peu gênante à Toulon où se trouve le fabricant, mais néanmoins inacceptable.

— Protection des œuvres vives : il est préconisé d'installer sous la quille une bande moulante démontable en acier inoxydable, analogue à celle qui protège l'étambot.

Rappelons enfin que la protection des équipements contre le parasitage n'a toujours pas trouvé de solution satisfaisante, que la modification visant à réduire le bruit dans l'habitacle a été apportée sur l'une des vedettes sans résultat concluant et que l'handicap le plus grave, représenté par la fragilité des commandes de coquille, a entièrement disparu avec la mise au point par les ateliers de la Flottille de Méditerranée d'un nouveau boîtier, où le chemin de billes guidant le téléflex est remplacé par une bague en téflon.

La Recherche fut commandée par le L.V. (S) Latil jusqu'au 13 septembre 1984 puis par le L.V. (S) hydrographe Olivier.

4.2. BSR *Gazelle*

La *Gazelle* est un bâtiment doté de deux équipages. Les autorités de la Trosième Région Maritime veillent à l'entretenir en parfait état, aussi souhaitent elles que son activité soit maintenue au plus haut niveau, et que sa disponibilité ne soit pas réduite par des séjours à quai en dehors des relèves mensuelles d'équipage.

C'est dire la part qu'elle occupe dans le potentiel d'activité annuelle de la MOM, pendant les trois mois au cours desquels elle lui est affectée.

Elle eut pour commandants les officiers mariniers suivants :

Equipage A : Major Laurent jusqu'au 14 septembre 1984 puis Major Coulomb

Equipage B : Major Boucher jusqu'au 11 mars 1985 puis Major Mathelin.

On ne reviendra pas sur ses caractéristiques qui sont déjà décrites dans les deux rapports de mission précédents, à l'exception de celles du conteneur de vingt pieds qui équipe le bâtiment, dans sa version hydrographique, depuis juillet 1985.

Le conteneur de vingt pieds

Ce conteneur, dont le schéma se trouve à la figure 1 avait été livré meublé à la MOM. Le service technique procéda à divers aménagements qui lui permirent de disposer de quatre postes de travail confortables et de recevoir simultanément les équipements suivants :

— Deux ensembles informatiques de type HP 85 ou HP 9816 et périphériques associés

— Valise de commande du sondeur latéral Edgerton

— Enregistreurs des sondeurs DESO 20 petits et moyens fonds

— Tout radiolocalisateur ou équipement susceptible d'être installé sur l'une ou l'autre des deux armoires standards de 19 pouces, suspendues sur cylindres amortisseurs.

Les raccordements aux capteurs du bord furent réalisés par les constructions navales, en liaison avec la mission, au moyen de prises étanches (Jupiter).

L'alimentation électrique est assurée par trois convertisseurs 24 volts continus, à partir du courant 380 volts triphasé du bord, et par l'intermédiaire d'un transformateur d'isolement. L'originalité de l'installation réside dans la fabrication de plateaux amovibles, adaptés aux différents appareils équipant les postes de travail, et leur assurant une parfaite tenue à la mer.

Le conteneur de 20 pieds est monté sur la plage arrière, et surélevé de trente centimètres au moyen de structures métalliques. Cette disposition lui permet de ne pas tremper en permanence dans l'eau qui circule sur le pont dès que la mer est tant soit peu agitée, mais ne l'abrite pas des embruns auxquels les œuvres mortes des BSR sont continuellement exposées.

Il conviendra de l'améliorer encore en montant des amortisseurs pour réduire les bruits de machine. Mais la *Gazelle* dispose dès à présent d'un central opérationnel très supérieur à celui de *La Recherche*.

5. BASE DE LA MISSION

La composition des locaux attribués à la mission est fixée par PREMAR III [2].

Elle correspond à peu de choses près à la situation de 1975, légèrement dégradée par suite de la condamnation de bâtiments vétustes.

En dehors de la base proprement dite, qui est trop exiguë, ces locaux comprennent des magasins ou aires de stockage difficilement aménagea-

[2] Ordre 02 CECMED/AG/ORG/NP du 11 janvier 1985.

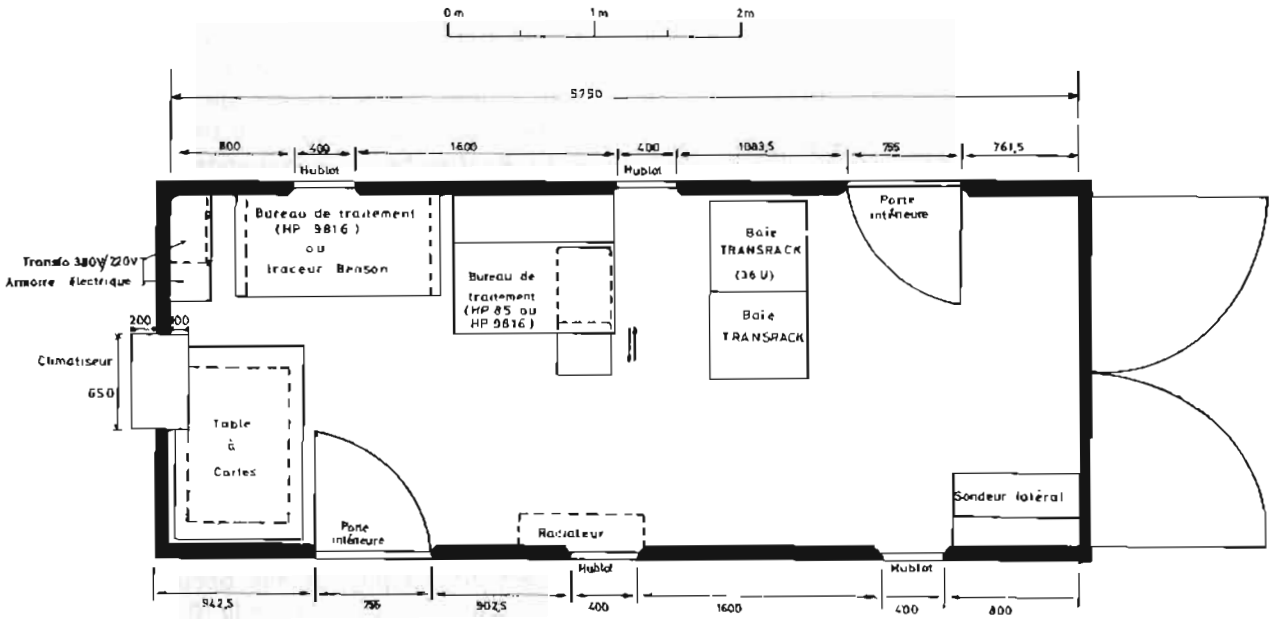


FIG. 1. — BSR *Gazelle*; conteneur de vingt pieds

Le BSR *Gazelle*

bles, partagés avec d'autres services de la Flottille de Méditerranée.

En 1985, les emprises étaient les suivantes :

Base proprement dite : 298 m²

Magasins couverts de l'îlot Castigneau : 35 m²

Aires de stockages couvertes, mais non aménagées ni fermées : 100 m².

Leur superficie totale n'atteint pas la moitié de celle dont disposent les autres missions métropolitaines. Aussi le directeur de la mission partage-t-il son bureau avec deux ingénieurs, le chef du service technique avec trois adjoints; il n'existe aucun bureau pour accueillir les stagiaires ou les ingénieurs de passage; le bureau informatique, créé en 1984, est un réduit obscur dont l'inadaptation aux normes d'hygiène et de sécurité du travail n'a pas échappé à l'autorité organique, etc.

Il est surprenant dans ces conditions qu'il ait fallu attendre dix ans pour que PREMAR III soit saisi d'une demande de refonte des locaux. cette demande ([3]) a été transmise au Département. Il

([3]) Préétude de définition n° 132 MOM/NP du 6 mai 1985, transmise sous timbre n° 301 CECMED/INFRA/NP du 26 juin 1985.

Le conteneur hydrographique de vingt pieds

conviendra maintenant de ne plus la perdre de vue.

A ce problème de fond s'ajoutaient des anomalies de forme concernant les mobiliers équipant les bureaux et salles de dessin, qui comprenaient de nombreuses antiquités échappant aux règles de gestion.

La situation fut rétablie avec l'aide des services du Commissariat local, non seulement sur le plan réglementaire, mais aussi sur celui de la qualité des meubles à usage technique.

En ce qui concerne le personnel, aucune différence ne peut être faite entre les effectifs de la base et ceux de l'unité hydrographique : les uns comme les autres participent aux travaux à la mer.

Une refonte du plan d'armement conduisit au remplacement de l'officier chef de la base, par un MP hydrographe. Cette modification sans incidence sur la qualité des relations avec FLOMED se révéla être plutôt heureuse pour les travaux, auxquels le chef de la base fut désormais plus étroitement associé.

5. MOYENS PROPRES

5.1. Véhicules

Bien que la mission dispose en principe de cinq véhicules utilitaires, cette règle ne fut respectée qu'à la fin de l'année 1984.

Avant cette date, on ne pouvait compter que sur quatre véhicules très usagés dont l'allure générale et la fiabilité ne permettaient pas d'envisager les travaux loin de Toulon sans de sérieuses appréhensions.

Des véhicules d'appoint furent souvent demandés, et généralement accordés, par le Centre Auto Principal de la Troisième Région Maritime, mais la situation ne redevint normale qu'avec l'arrivée de trois fourgonnettes Peugeot 504 tous terrains.

Fourgon vitré 504 tous terrains

Il se pourrait que ces nouveaux véhicules soient plus fragiles, à la longue, qu'ils ne paraissent, mais ils se sont révélés jusqu'à présent parfaitement adaptés aux travaux en Corse.

Le plus réussi d'entre eux est le fourgon vitré dont la carrosserie spécialement conçue permet le transport dans de bonnes conditions de personnel ou de matériel précieux.

D'une manière générale, le remplacement dans les missions hydro-océanographiques de camions par des fourgonnettes polyvalentes s'est révélé bénéfique.

Cependant, la part donnée aux utilitaires est trop importante. Il serait opportun de la réduire afin de laisser la place à une berline routière mieux adaptée aux liaisons rapides et aux visites d'autorités.

5.2. Drôme

Le plan d'armement de la MOM, qui comporte un zodiac, sa remorque et trois propulseurs hors bord semble bien étriqué pour une mission qui passe le plus clair de son temps en sondages côtiers.

Le youyou de *La Recherche* aménagé en porte sondeur

Il ne permet pas, en particulier, d'effectuer de sondages détaillés dans les darses ou sur les plans d'eau resserrés.

Le youyou de *La Recherche* n'étant guère utilisable, sauf par très beau temps, il fallut emprunter des embarcations en fonction des besoins, et les doter d'installations de fortune.

C'est ainsi que le sondage du port de Toulon fut presqu'entièrement réalisé par un Boston Whaler prêté par la D.P. Mais il est urgent de mettre un terme à cette dépendance, et de doter la MOM — comme les autres missions — d'une plate légère capable de recevoir un sondeur hors bord, un récepteur de radiolocalisation et une équipe de trois personnes.

6.3. Hélicoptères

Pour la première fois dans l'histoire de la MOM, l'hélicoptère fut régulièrement utilisé, d'abord pour les prises de vues obliques puis en soutien pour les levés hydrographiques.

L'Alouette III dotée de l'interrogateur Trident se révèla presqu'indispensable pour les travaux en terrain difficile. On l'utilisa en Corse en 1985 pour les mises en place de stations radioélectriques, les relèves d'équipe, les ravitaillements, la topographie, la photographie verticale, les revues d'amers, les liaisons en tout genre.

Le treuillage à partir des bâtiments ne souleva aucune difficulté.

On utilisa également une Alouette II pour les missions de photographies obliques. Ce petit aéronef se montra beaucoup mieux adapté que l'Alouette III à ce type d'opérations.

6.4. Equipements

6.4.1. Matériels spécifiques

A quelques exceptions près, concernant des équipements qu'il n'était pas nécessaire de mettre en œuvre, le MOM disposait des matériels spécifiques prévus dans les textes réglementaires ([4]).

Les remarques qu'appelèrent ces matériels sont énoncées ci-après :

6.4.1.1. Sondeurs

L'IPER, dont bénéficia la *Gazelle* en 1985 ayant vu la disparition des derniers sondeurs de coque ELAC et DESO 10, l'ensemble des moyens flottants de la MOM est désormais doté du sondeur DESO 20.

Ce matériel performant et simplifié souleva des difficultés d'entretien par suite du manque de lot de rechanges et de l'impossibilité de commander au service gestionnaire des pièces non encore nomenclaturées.

Parmi les avantages du DESO 20 se trouve la possibilité d'entrer sous forme numérique les paramètres du sondage (immersion des bases, célérité) sur l'enregistreur.

Il est possible que cette procédure simplifiée résolve une fois pour toutes les problèmes de dérive observés sur les matériels les plus anciens, mais il a semblé utile de poursuivre l'évaluation de cet équipement, et de ne pas faire une confiance aveugle aux données affichées.

Les méthodes employées, décrites au § 7.4.1. relatif aux étalonnages, conduisirent notamment à l'acquisition d'un transducteur de contrôle permettant de vérifier simplement la vitesse de déplacement des styles pour une célérité du son affichée.

Les sondeurs DESO 10 continuèrent à être utilisés avec leurs bases hors bord pour les sondages portuaires.

Le sondeur Raytheon de *La Recherche* fut mis en œuvre régulièrement. Il permit de sonder sans difficulté jusqu'à 4 000 mètres par mer de force 4.

6.4.1.2. Trident III

Ce système de radiolocalisation, de portée géographique, mis en œuvre systématiquement lors des levés côtiers fut particulièrement éprouvé en Corse, où se trouvaient réunis certains facteurs défavorables tels que la fréquence des changements d'implantation ou l'obligation d'avoir recours à des alimentations autonomes, faute de courant secteur facilement accessible.

En 1985, la MOM disposait de 5 interrogateurs et de 9 balises.

Les alimentations autonomes étaient assurées par batteries au plomb de 100 ampères/heure, associées parfois à des groupes électrogènes et à des panneaux solaires.

Ces derniers, étaient répartis en deux ensembles constitués comme suit :

— un ensemble comportant quatre panneaux France-Photon rechargeant deux batteries de 100 Ah

— un ensemble de quatre panneaux Motorola rechargeant deux batteries de 100 Ah.

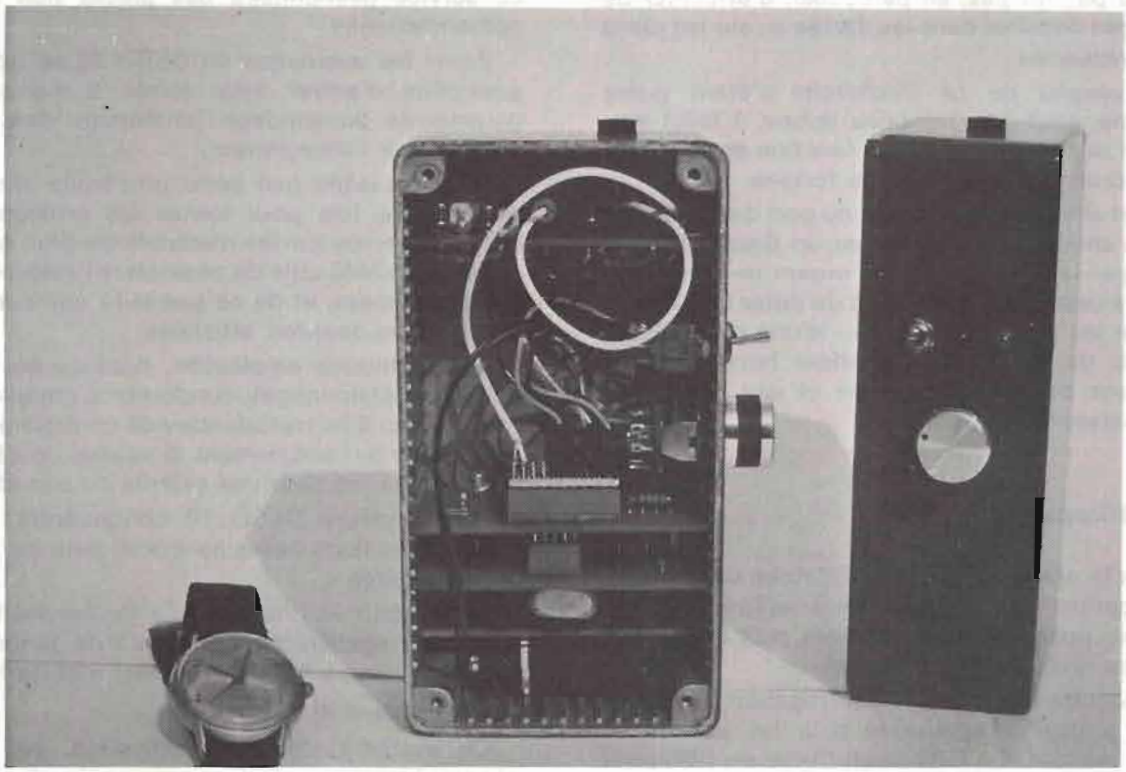
Le montage et le transport de ces panneaux restèrent toujours assez laborieux, et l'on s'efforça de ne les utiliser que pour les stations les plus permanentes.

Chaque ensemble permettait en principe d'assurer le fonctionnement d'une balise sans recharge extérieure, pourvu que les interrogations soient limitées à la journée de travail des vedettes.

Des essais de fonctionnement en mode continu aboutirent à l'épuisement des batteries en moins de 48 heures.

Pour terminer sur ce sujet, la collection d'appareils de mesure utilisée pour le contrôle des matériels Trident III fut enrichie en 1984 d'un

([4]) Instruction 1103 SHOM/EM/NP du 19 décembre 1983.



Le simulateur d'émissions Trident Mobilet

émetteur portable simulant l'émission d'un interrogateur. Cet appareil miniaturisé, destiné à tester les balises sur le terrain, avait été entièrement conçu par le service technique de la MOM qui l'avait baptisé de l'acronyme Mobilet (Mobile Emetteur Trident).

Après avoir été testé par le bureau des instruments scientifiques de l'EPSHOM, qui lui fit apporter certaines améliorations, le prototype du Mobilet fut reproduit à une dizaine d'exemplaires et complété d'une notice descriptive ([5]) à l'usage des utilisateurs des autres missions.

6.4.1.3. Courantomètres

La collection d'appareils à mesurer le courant comportait en 1983 quatre courantomètres Suber et deux Mécabolier.

Ces instruments étaient mis en œuvre sur des dispositifs sub-surface très classiques, ou à partir des bouées du Service des Phares et Balises et de la Navigation.

Les 4 Suber furent perdus en l'espace de 24 heures, en Corse, par suite du pillage des lignes de mouillage, confirmé par une recherche effectuée au moyen de l'engin sous-marin *Griffon.*

Un peu plus tard, c'était au tour d'un courantomètre Mécabolier d'être démonté, dans un acte de malveillance caractérisé commis cette fois au large de Saint-Tropez.

Des plaintes sans résultat furent déposées en justice, et l'on cessa de faire des mesures de courant, afin d'épargner le courantomètre rescapé.

6.4.1.4. Matériels de recherche d'obstructions

Les trois sondeurs latéraux EG & G Mark 1 B et le magnétomètre Barringer furent régulièrement utilisés.

Une amélioration sensible des enregistrements fut obtenue quand la MOM prit le parti d'entretenir elle même les sondeurs latéraux, plutôt que de recourir aux lenteurs de la procédure réglementaire, aux termes de laquelle les réparations sont confiées à la DCAN de Brest.

Les réglages furent repris notamment à chaque étape de la détection et de l'amplification, au moyen d'un dictionnaire de signaux électroniques ([6]) optima, établi après 5 années d'expérience dans les missions hydrographiques.

Le magnétomètre enfin, fut doté d'une alimentation spécifique étudiée au laboratoire de la MOM, et permettant de disposer de deux sources distinctes, l'une à 24 volts pour l'électronique de commande, l'autre à 48 volts pour la polarisation du capteur.

([5]) La série de Mobilet accompagnée de ses notices fut remise à l'EPSHOM (Bordereau 98 MOM/Bord du 4.09.1984).

([6]) Une copie de ce dictionnaire peut être obtenue à la MOM ou à la Mission Océanographique du Pacifique.

En plus de ces équipements courants, la MOM disposait de deux dragues hydrographiques en mauvais état. L'une de ces dragues fut remise à niveau et déployée non sans peine dans le port de Toulon; l'autre n'est plus utilisable.

6.4.1.5. Matériel d'acquisition et de traitement des données

Jusqu'en 1985, on disposait de deux chaînes de traitement de données centrées autour de l'utilisation d'une paire de calculateurs Tektronix 4052, dont un doté d'une extension de mémoire.

A compter de cette date, deux calculateurs Hewlett Packard HP 9816, destinés à remplacer progressivement les Tektronix, furent affectés à la mission.

L'acquisition des données ne se faisait en temps réel qu'à bord des bâtiments au moyen du module Hydroboucle associé au calculateur HP 85.

Ce n'est qu'à la mi-85 que trois modules d'acquisition Hydrac pour vedettes complétèrent la dotation.

6.4.2. Matériel de transmissions

Pour ses liaisons en travaux, la mission mettait en œuvre 14 émetteurs-récepteurs dont 8 TRPP 13 et 6 TRPP 11. Le taux de panne se situait aux environs de 30 % et la durée des dépannages était comprise entre 4 et 8 mois.

Il devient donc urgent de procéder au remplacement de ce matériel critique.

7. MÉTHODES

7.1. Emploi des moyens

En complément de *La Recherche*, la MOM disposa des principaux concours suivants :

Hélicoptères : 115 heures d'Alouette II, pour la mission de photographies obliques de 1983-1984
50 heures d'Alouette III, pour les sondages en Corse en 1985

BSR *Gazelle* : 100 jours en 1984
90 jours en 1985.

Le calendrier d'entretien de ce bâtiment, et sa période d'affectation à la MOM, pendant laquelle il est entièrement disponible, sont fixés par PREMAR III.

Cette période coïncida avec la belle saison en 1984; elle fut beaucoup moins avantageuse en 1985.

Le rythme d'entretien et d'activité de *La Recherche* est fixé en principe par une décision ministérielle ([7]) qui attribue à ce bâtiment un supplément d'équipage afin de porter son activité à 160 jours par an.

En accord avec la mission, FLOMED modifia le calendrier d'activité afin d'introduire une période d'entretien intermédiaire en été.

Cette initiative, largement justifiée par des considérations techniques et par le fait que la période favorable aux travaux en Méditerranée excède le créneau de six mois théorique (1er mai-15 novembre), fut compensée par des activités supplémentaires confiées à des détachements isolés.

Les détachements isolés

Forts de 20 à 25 personnes comprenant des effectifs issus de tous les éléments de la MOM (*La Recherche*, unité hydrographique et base de la mission), deux détachements isolés opérèrent en juillet 1984 et 1985 dans les golfes d'Ajaccio et de Valinco.

Les détachements disposaient de trois embarcations mouillées à proximité, d'un parc de véhicules, de lots de rechanges et d'une collection importante de matériel spécifique entreposé dans une remise prêtée par les administrations locales.

La préparation et l'exploitation primaire des travaux se faisaient dans une salle de dessin aménagée sommairement, où étaient installés calculateurs et périphériques.

Le personnel était hébergé dans des campings publics, avec des équipements fournis par la mission.

Sur le plan administratif, le personnel non-officier était placé en régime de vivres « isolés » et percevait une allocation de 100 francs par jour en 1984, 120 en 1985. La location des terrains de camping était prise en charge par les Travaux Maritimes.

On obtint par ce procédé des résultats comparables à ceux qu'auraient eu un bâtiment hydrographique.

L'opération permit de remonter notablement le niveau d'activité de 1984, qui était resté faible par suite d'une longue indisponibilité de *La Recherche*. Elle fut moins justifiée en 1985 quand les conditions redevinrent favorables.

7.2. Organisation pour les levés

Si l'emploi des moyens et l'échelonnement des travaux furent toujours définis par le directeur de mission, la conduite des opérations à la mer et sur le terrain fut entièrement confiée au Commandant de *La Recherche*, dans le cadre des instructions particulières qui lui étaient remises à chaque appareillage.

Le plein commandement relatif à l'exécution des levés s'exerçait aussi bien dans les domaines opérationnels que militaires; il s'appliquait non

([7]) D.M. 253 EMM/PL/ORG du 23 mai 1980.

seulement à *La Recherche*, mais aussi aux personnes et aux éléments engagés dans un même secteur.

Dans les périodes fastes la force navale occasionnelle ainsi constituée comprit *La Recherche*, la *Gazelle*, un hélicoptère ainsi que toutes les équipes isolées et les moyens mis en œuvre sur le terrain.

L'ingénieur embarqué occupait les fonctions de directeur technique, mais ne détenait, une fois la mission définie, ni le pouvoir de décision ni celui de coordination.

Cette organisation s'avèra d'autant plus satisfaisante que le commandement de *La Recherche* fut confié à un officier spécialisé en hydrographie.

7.3. Acquisition et traitement semi-automatique des données

Depuis septembre 1983, la MOM met en œuvre un système de traitement de la sonde reposant sur l'emploi du calculateur Tektronix 4052, associé à des logiciels mis au point à la mission depuis 1982.

L'objectif recherché étant la production de documents de rédaction définitifs, et non de fichiers informatisés, ces derniers ont un format simplifié et ne sont pas conservés.

En 1985, seuls les bâtiments disposaient d'un système d'acquisition de la localisation en temps réel par coffret Hydroboucle et calculateur HP 85. La localisation des vedettes, la numérisation de la sonde et de la marée se faisaient en temps différé au moyen d'un calculateur Tektronix muni d'une extension de mémoire.

Il comprenait les étapes suivantes :

— fusion des différents fichiers de données
— choix de sonde sur écran
— écriture automatique des minutes sur traceur Benson 1313.

En complément aux examens traditionnels des documents définitifs, de nombreux tests automatiques ou visuels permettaient de contrôler la validité des données à différentes étapes de l'acquisition et du traitement.

Bien qu'elle soit destinée à évoluer avec les calculateurs HP 9816, les nouveaux logiciels et les systèmes d'acquisition Hydrac, la méthode actuelle permet déjà de réaliser des gains de temps appréciables par rapport aux procédés de rédaction manuels. Elle leur est également supérieure pour la netteté de la présentation, et surtout pour la réduction du taux d'erreurs.

7.4. Etalonnages

7.4.1. Sondeurs

L'erreur sur la profondeur mesurée par les sondeurs comprend deux termes :

— un terme constant qui intègre l'immersion du transducteur et les retards électroniques de l'instrument,
— un terme progressif qui résulte d'un rapport inexact entre la célérité réelle du son et la vitesse des styles.

Des contrôles méticuleux ayant montré que la barre d'étalonnage ne permettait d'accéder à ces deux corrections que de manière approximative, la procédure traditionnelle fut remplacée par les opérations suivantes :

A. La correction de tirant d'eau, lue directement sur la coque du porte-sondeurs, était affichée sur les enregistreurs DESO 20 et Raytheon.

B. La célérité était observée régulièrement, et initialisée de la même manière sur les enregistreurs qui permettaient l'affichage de ce paramètre.

C. Les retards électroniques étaient contrôlés par un étalonnage à la barre, réalisé dans des conditions idéales. Cette opération, qui prenait une demi-journée, resta exceptionnelle.

D. Une vérification du bon fonctionnement des sondeurs sans modification des réglages était effectuée avant et après chaque séance de sonde, par comparaison des valeurs enregistrées sur les appareils mis en route simultanément.

De plus, la vraisemblance des indications fournies par les sondeurs de *La Recherche*, utilisés comme références pour les vedettes, était contrôlée au moyen du sondeur Warluzel, sans reprise des réglages pré-établis.

Les derniers tests de cohérence permettaient de déceler les erreurs grossières, mais pas de vérifier que les sondeurs tenaient compte sans dériver des éléments affichés.

Bien qu'il ne semble précis que dans la gamme 0-5 mètres, l'emploi systématique du transducteur d'étalonnage DESO 20 évalué sommairement à la MOM devrait suffire pour s'assurer de ce dernier point.

Conséquence pour les sondages

La méthode de réglage des sondeurs consistant à remplacer l'étalonnage à la barre par un affichage méticuleux de la célérité du son et de l'immersion des transducteurs fut adoptée lors des sondages côtiers.

On s'efforça dans la mesure du possible d'étendre ce procédé sur la tranche de 0 à 100 mètres, qui correspond ainsi à des profondeurs réelles. Mention de cette particularité fut faite dans le titre des minutes de bathymétrie.

Dans un domaine connexe, on s'intéressa aux écarts observés par fonds de forte pente, aux intersections entre les routes du sondage régulier et les profils de vérification. Les conclusions de cette étude se trouvent en appendice 2.

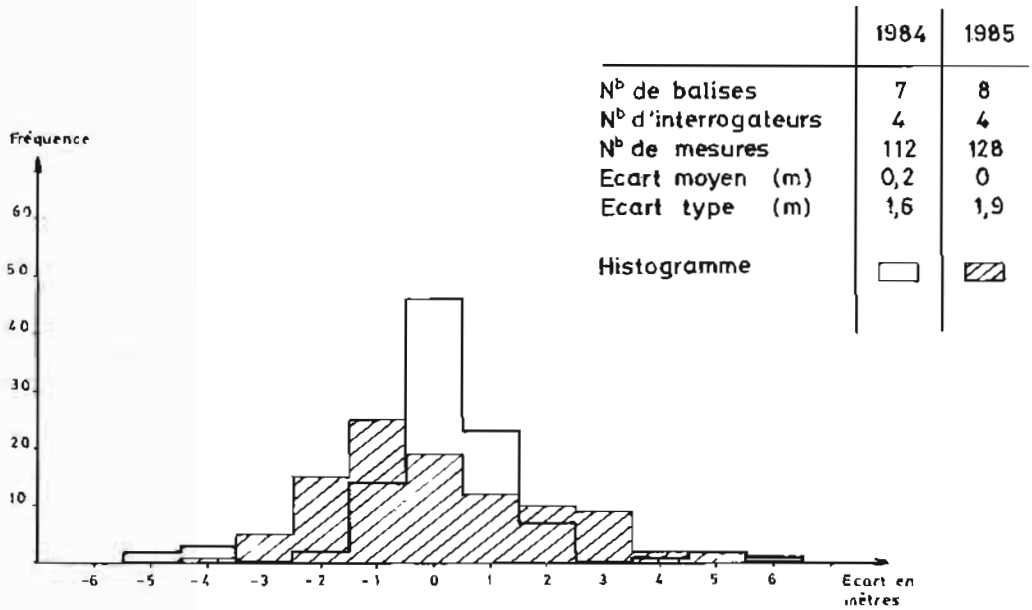


FIG. 2. — Ecarts résiduels après étalonnage de la chaîne Trident III

7.4.2. Trident III

Principal moyen de localisation, le Trident III fit l'objet d'étalonnages annuels et de vérifications systématiques au cours des sondages et à l'ouverture de nouveaux levés.

Etalonnage annuel

L'ensemble du matériel Trident bénéficie chaque hiver d'une révision complète dans les services techniques de la mission.

Cette révision se termine par un étalonnage sur une base géodésique de 17 km au cours de laquelle les écarts sur chaque couple balise-interrogateur et pour chaque voie sont minimisés.

La répartition des écarts observés en 1984 et 1985 après étalonnage est représentée à la figure 2.

Etalonnages systématiques

Un étalonnage consistant à faire relever par trois théodolites une embarcation, équipée du Trident III et parcourant la zone à sonder, fut effectué lors de chaque nouveau levé.

Cette précaution, appliquée systématiquement dans les zones urbanisées, (Provence), fut simplifiée dans celles où l'insuffisance de la couverture radio-électrique imposait de maintenir des stations optiques permanentes, et où le contrôle des distances Trident était assuré de manière continue (la méthode de traitement automatique de la localisation fait en effet apparaître les écarts entre les lieux de position et les points adoptés).

A titre indicatif, on avait fixé à 5 mètres pour un levé au 1/10 000 l'écart en deçà duquel un lieu de position pouvait être validé sans examen complémentaire.

7.5. Préparation topographique des sondages

La MOM, depuis 1979, fait précéder les sondages côtiers par une préparation topographique rassemblant avec la meilleure précision possible tous les renseignements topographiques et les anomalies bathymétriques connues.

De 1983 à 1985, cette méthode, qui permet une meilleure planification des sondages, comportait les étapes décrites ci-après :

A. Etude préalable.

Examen des documents existants

Recherche d'une couverture photographique aérienne de qualité

B. Levé topographique.

Triangulation des points de calage des photos verticales et des stations complémentaires nécessaires à la localisation.

C. Etablissement des préparations.

Ces documents, qui sont les ébauches des minutes de topographie contiennent les informations suivantes :

— trait de côte et roches visibles sur les photographies aériennes

— renseignements bathymétriques issus des cartes marines (hauts-fonds, épaves, balisage)

— renseignements géodésiques (stations, lieux de position).

Les coupures et les titres furent harmonisés avec ceux des minutes de bathymétrie.

Quelques vérifications effectuées sur des points de contrôle connus, et surtout une comparaison avec des minutes de topographie réalisées au moyen du restituteur analytique Traster (cf. § 15.1.2.) montrèrent que la précision planimétrique de ces documents était meilleure que dix mètres au voisinage du plan d'eau, adopté comme plan neutre. Cette précision est sans doute inférieure à celle qu'on pourrait attendre de documents rédigés au 1/10 000, mais néanmoins suffisante pour les besoins des levés.

La restitution était faite avec un Stéréoflex SOM, associé pour les compléments détaillés à un appareil optique de transfert Bausch et Lomb.

D. Etablissement des minutes définitives

Les préparations topographiques étaient les documents de travail des équipes de sonde. Il suffisait, pour les compléter et les transformer en minutes de topographie, de procéder avec des moyens légers à une cotation des roches à la perche ou au sondeur, mais sans localisation puisque ces dernières étaient déjà placées.

DEUXIÈME PARTIE

8. LEVÉ CÔTIER DE LA CORSE OCCIDENTALE

8.1. Généralités

Les sondages systématiques de la Corse occidentale concernent une bande côtière dont la longueur rectifiée avoisine les 150 kilomètres.

Tous les moyens de la mission : BH1 *La Recherche*, BSR *Gazelle*, hélicoptère, détachements isolés, véhicules et matériels les plus divers furent engagés dans ces travaux de longue haleine qui s'étendirent d'août à octobre 1983, puis de mai à octobre 1984 et enfin de mai à septembre 1985.

8.2. Description de l'environnement

8.2.1. Morphologie côtière

La région comprend trois vastes échancrures exposées au vent d'Ouest, les golfes de Sagone, d'Ajaccio et de Valinco, séparées par des chaînes granitiques se terminant tantôt en falaises (Capu di Fenu, Capu di Muru), tantôt en chaussées semi-émergées (archipel des Sanguinaires).

L'allure des fonds est à l'image du relief côtier : ils sont monotones devant les plages situées au fond des golfes, et particulièrement rugueux dans le prolongement des éperons rocheux. Les falaises sont souvent doublées d'une ceinture d'écueils affleurants, semblables pour les couleurs et la soudaineté aux têtes de nègres des milieux coralliens, dont ils partagent la mauvaise réputation auprès des navigateurs.

Les plateaux continentaux, qui dépassent rarement quelques kilomètres, se terminent par un talus très raide.

L'une des conséquences de ce relief ingrat est la difficulté des communications; alors que les fonds des golfes sont bien desservis par la route, les massifs montagneux sont de véritables déserts où l'on circule par d'interminables routes sinueuses. Les accès à la côte, quand ils sont possibles, se font par des chemins muletiers praticables par les seuls véhicules tous terrains. Ailleurs, il faut débarquer avec des embarcations de servitude.

8.2.2. Météorologie

Les statistiques météorologiques des Sanguinaires montrent que le nombre de jours perdus pour l'hydrographie (vent fort de secteur Ouest) se situe aux environs de 30 % en hiver. Ce taux se réduit de moitié pendant les mois d'été.

Aux époques les moins favorables, les vents d'Ouest soulèvent de fortes houles qui rendent impossible tout débarquement de matériel à la côte et interdisent l'accès à certaines stations de localisation.

Pendant la première moitié de l'année 1984, on observa de plus des conditions exceptionnelles, et de multiples records de précipitations et de vents furent établis par les stations météorologiques de l'île.

8.3. Localisation

La localisation fut assurée au moyen des balises Trident implantées sur les stations énumérées dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Position des balises Trident III
(NTF - Projection Lambert IV)

Nom du point	Coordonnées rectangulaires X	Y	Z
Ancône	528 926,07	191 836,81	78,2
Molendinu	519 776,3	200 464,0	56,5
Pointe de Triu	522 803,4	198 394,6	53,8
Pointe de San Ghjiaseppu	526 551,3	196 775,0	2,7
Sagone-Tour génoise	524 913,1	199 333,3	36,4
Pointe de Capligliolu	528 084,6	194 402,1	28,0
Pointe de Palmentoju	528 096,0	192 104,7	4,0
Pointe de Pelusella	523 660,56	185 999,43	4,0
Piombata	519 832,5	184 080,30	14,0
La Botte	518 270,98	180 108,82	26,0
La Parata	520 941,07	176 546,95	146,0
Les Sanguinaires 1. (W)	519 190,80	173 094,80	97,0
Les Sanguinaires 2. (SE)	519 194,83	173 090,73	97,0
Les Sanguinaires 3. (NE)	519 199,28	173 095,58	97,0
Citadelle	531 031,40	178 188,60	17,0
Aspretto	532 741,98	179 521,18	49,9
La Castagna	529 806,60	164 980,10	101,06
Isolella	532 831,33	170 272,74	68,1
Cacalu	527 154,70	159 520,35	25,0
Capu di Muru	525 868,40	158 171,90	51,0
Capu Neru	529 488,00	156 833,00	15,55
Cigalle	530 847,25	156 866,80	17,0
Cupabia	536 614,20	159 655,82	148,53
Portu Pollu. 1	536 775,12	154 794,60	44,14
Portu Pollu. 2	536 925,80	154 975,10	39,5
Portu Pollu. 3	536 918,99	154 978,71	39,5
Vigianellu	550 895,70	153 392,50	450,0
Phare Propriano	545 966,10	152 806,10	17,0
Laurosu	545 175,30	151 689,90	63,0
Campu Moru	538 835,9	147 836,3	89,5
Lattonicia. 1	543 412,74	135 233,01	140
Lattonicia. 2	544 785,6	136 082,4	138,8
U Grecu	548 214,23	135 052,20	175

A chaque top correspondaient au moins trois lieux bien sécants permettant d'adopter un point avec la précision hydrographique. Dans les cas où l'on observait des fluctuations par suite de la configuration des côtes, ou quand les lieux Trident se coupaient mal (Ouest des Sanguinaires ou Golfe de Lava, par exemple), on recourrait systématiquement aux relèvements optiques afin d'éliminer tout risque d'ambiguité.

8.4. Bathymétrie (voir figures 3 et 4)

Sauf dans la Baie de Cupabia où ils ne sont pas achevés, les sondages furent exécutés à l'échelle 1/10 000, avec doublement de la densité dans les zones tourmentées.

Dans les régions de forte pente, les bâtiments durent procéder eux-mêmes aux sondages, en remplacement des vedettes qui perdaient le fond aux environs de 150 mètres par suite de la trop faible réflectivité.

On profita de ces occasions pour étudier les écarts observés sur certains profils quand on fait varier l'angle de gîte du porte-sondeurs. Les résultats de cette analyse figurent en appendice 2.

Des explorations systématiques au sondeur latéral furent conduites devant les ports d'Ajaccio et de Propriano, dans les mouillages de Campu Moru et de Portu Pollu ainsi que dans la passe de Torra Tarrana.

La plupart des recherches correspondant à des brassiages inférieurs à 30 mètres furent effectuées par plongeur, sauf dans le Golfe de Sagone.

Cette méthode rapide et sûre (élimination des faux échos), quand les eaux sont transparentes, donna naissance à un symbole particulier explicité sur les minutes de recherche.

Parmi les recherches négatives effectuées, deux d'entre elles se rapportent aux obstructions remarquables décrites au tableau 2.

Les épaves ou obstructions décrites au tableau 3 furent également investiguées.

TABLEAU 2
Recherches négatives remarquables

Désignation	Position (approx) CM 4790 L (N)	G (E)	Observations
Roche toujours submergée	42° 04,5'	8° 42,8'	Recherche négative au sondeur latéral. Il s'agissait d'un tronc d'arbre vertical qui aurait été emporté.
20 (PA)	42° 05,8'	8° 35,2'	Haut-fond non retrouvé, ni lors des sondages, ni lors des survols par l'aéronavale.

8.5. Topographie

La topographie résulte d'une restitution au moyen du stéréoflex SOM, et de l'appareil de transfert Bausch & Lomb des couvertures aériennes suivantes :

au Nord des Sanguinaires : IGN 75 FR 2699/170 (E = 1/17 000; 1975)

au Sud des Sanguinaires : IGN 78 FR 9083/145 (E = 1/14 500; 1978)

En outre, des mesures complémentaires furent effectuées à la côte.

8.6. Nivellement

8.6.1. Observatoires de marée

Deux observatoires furent implantés à Aspretto et Propriano pour la réduction des sondes.

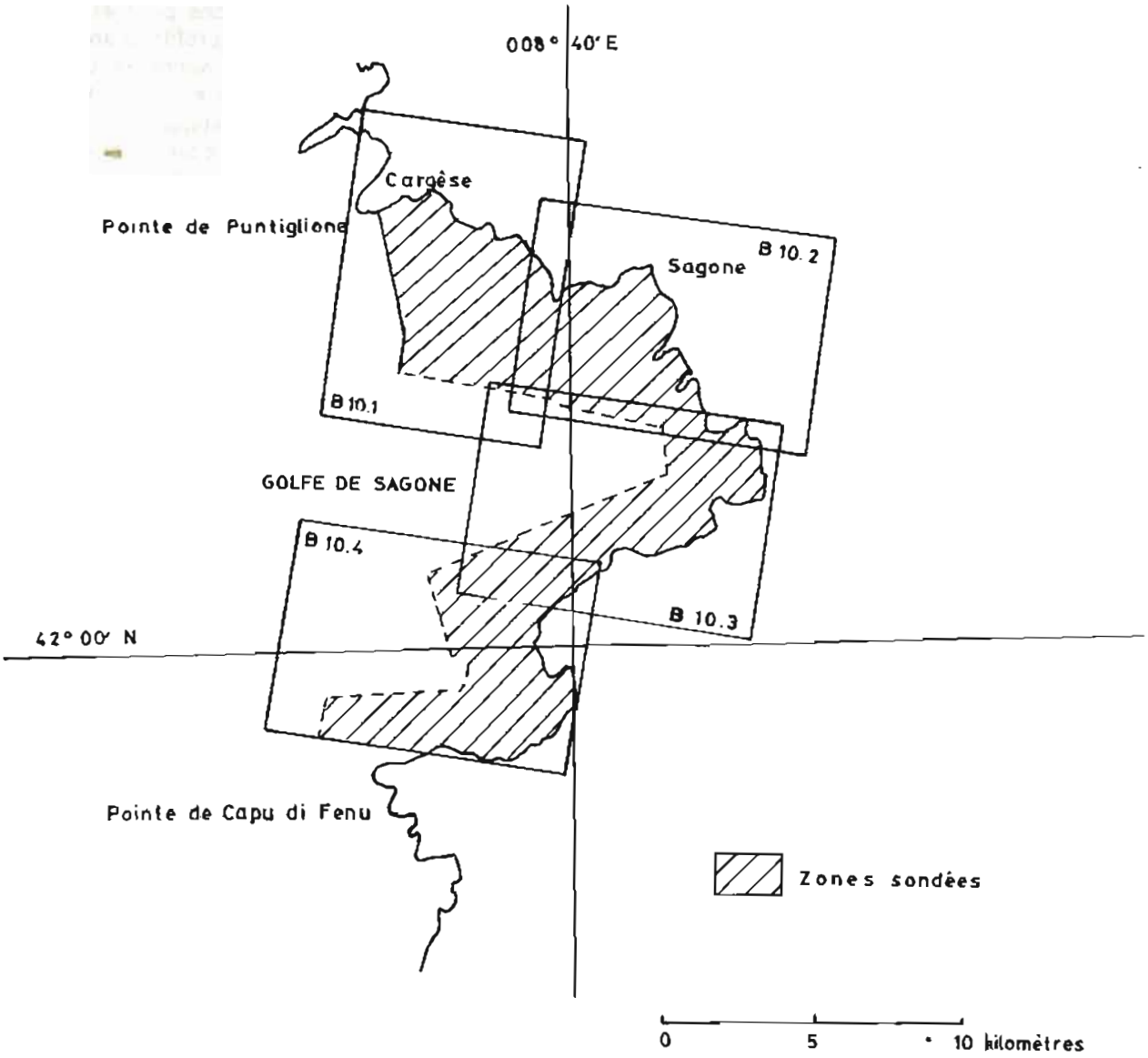


FIG. 3. — De la pointe de Puntiglione à la pointe de Capu di Fenu : Schéma des coupures et des zones sondées

TABLEAU 3
Epaves et obstructions

Désignation	Position (approx) L (N)	G (E)	Observations (Brassiage — etc.)
Flûte *La Girafe*	42° 06,3'	8° 41,3'	17,7 (0,5 m au-dessus du fond) — CM 4790
Hydravion Canadair	42° 06'	8° 41,1'	25,8 (3,2 m au-dessus du fond) — CM 4790
Chaîne de mouillage (Propriano)	41° 40'42"	8° 54'12"	Obstruction relevée en 1983 et 1985
Blocs de béton (Ajaccio)	41° 55'11,5"	8° 44'41"	11 (7 m au-dessus du fond) — CM 3760
Emissaire de Propriano	Ouest du phare de Scogliu Longu		Cette obstruction d'une longueur de 500 m s'enracine sur la côte

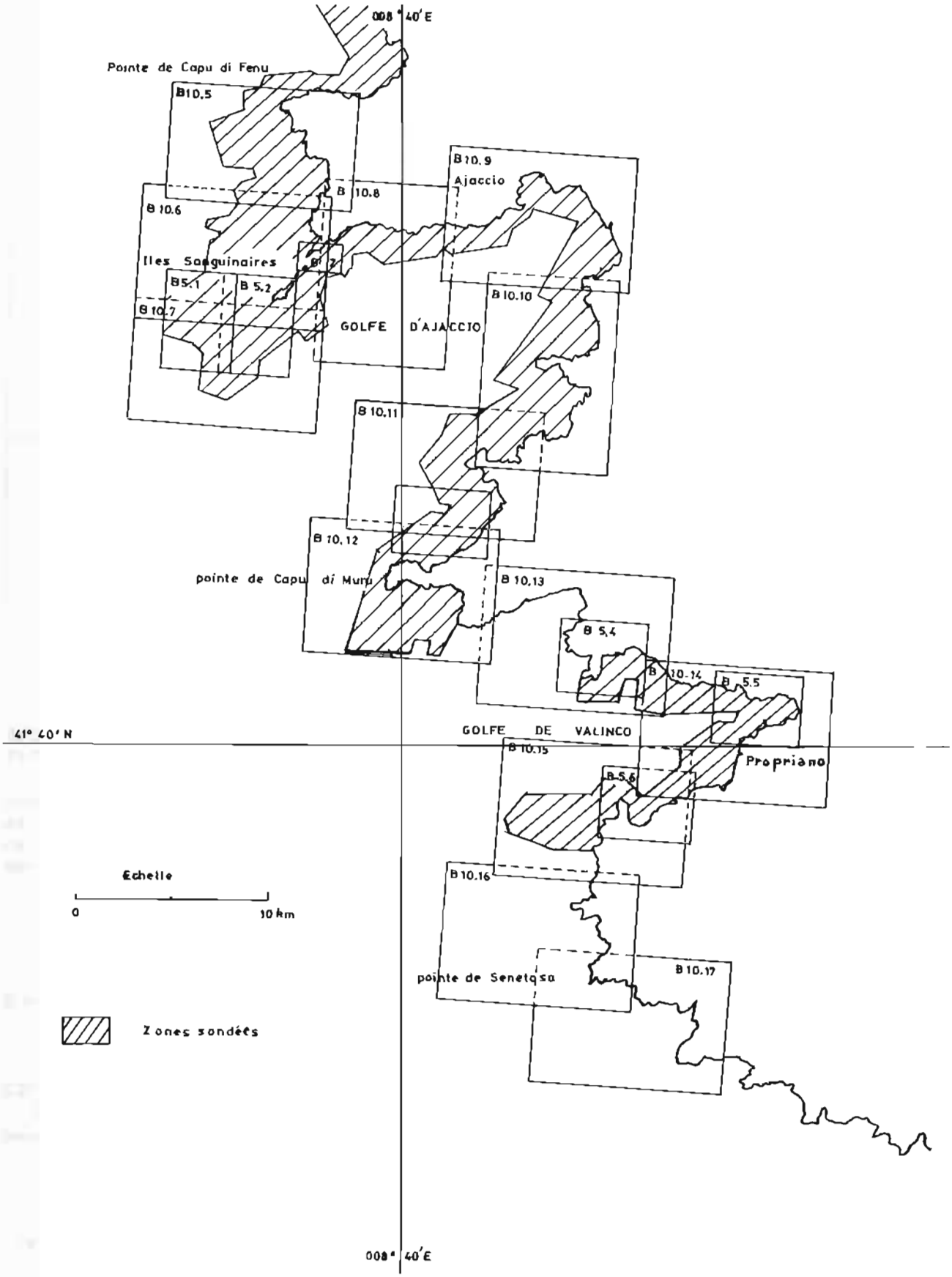


FIG. 4. — De la pointe de Capu di Fenu à la pointe de Senetosa : Schéma des coupures et des zones sondées

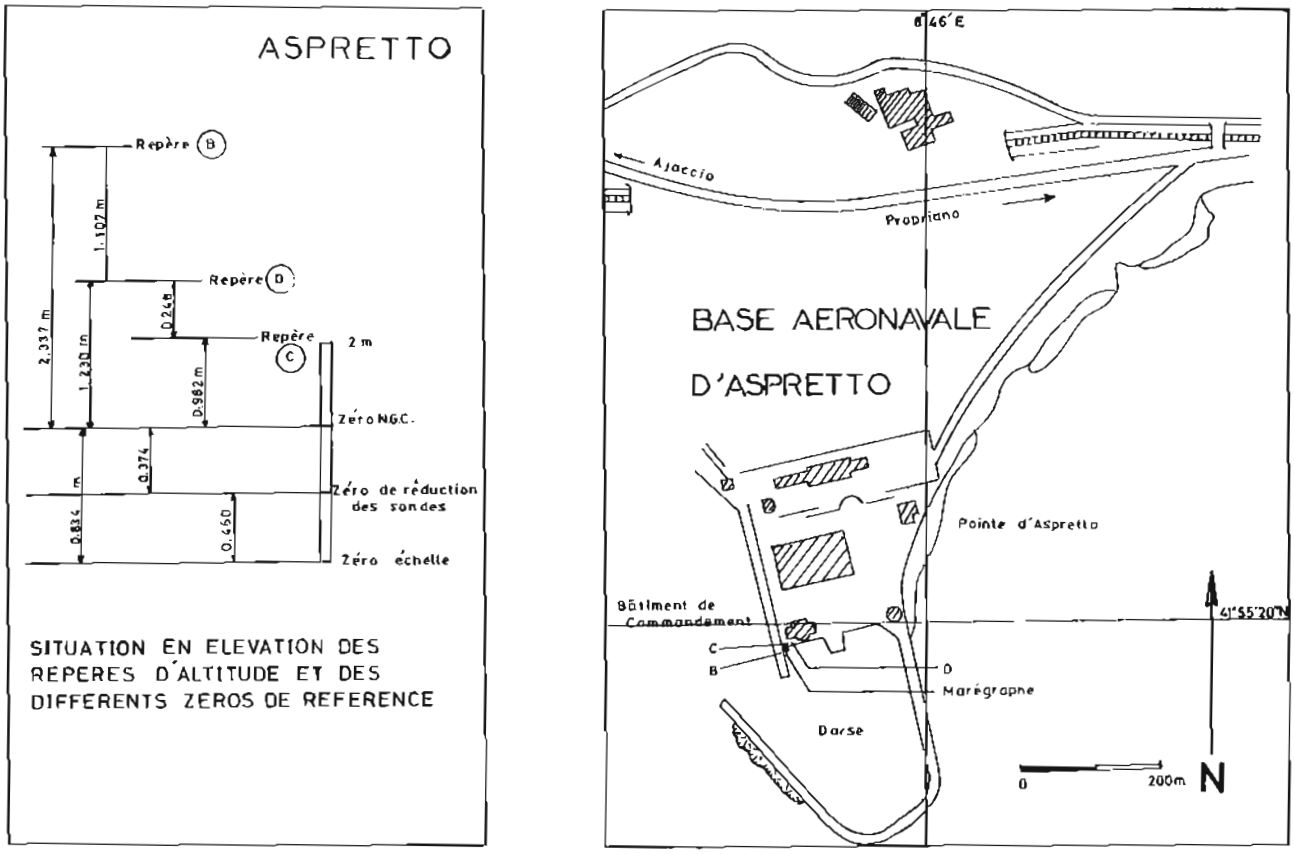


FIG. 5. — Observatoire de marée d'Aspretto.

Ces observatoires font l'objet de la figure 5 et 5 bis.

Les marégrammes obtenus en ces deux ports étant superposables, il se confirma que la région sondée appartenait bien à une même zone de marée.

8.9. Toponymie

La vérification de la toponymie fit l'objet d'une enquête approfondie intéressant les vingt-trois communes côtières comprises entre Cargèse et Bonifacio.

Un effort dépassant la simple révision prévue dans les instructions avait en effet semblé nécessaire dès qu'il était apparu qu'il existait un fossé entre les termes figurant sur les documents officiels et les parlers courants employés par les Corses eux-mêmes et surtout par les Français d'autres origines.

La situation actuelle est marquée par une grande confusion entre les noms portés sur les panneaux indicateurs et les édifices publics, les toponymes figurant sur les cartes anciennes ou nouvelles et les plans du cadastre.

Elle irrite autant les pouvoirs publics que les usagers non familiers de la langue corse, sans satisfaire ceux qui la pratiquent couramment, et qui souhaiteraient voir introduire les réformes linguistiques de façon moins anarchique.

Les résultats de l'enquête comparative furent consignés dans une publication interne ([8]). Ils intéressent plus de 330 toponymes, tous relatifs au domaine maritime ou aux détails de la bande côtière significatifs pour les navigateurs.

8.10. Documents établis

20 minutes de bathymétrie :	B 10.1 à B 10.12 et B 10.14 B 5.1 à B 5.6 B 2
12 minutes de topographie :	T 10.1 à T 10.6, T 10.8 à T 10.12, T 10.14
19 minutes de recherche, ou recherche avec sondage latéral :	R 10.1 à R 10.9, R 10.11, R 10.12, R 10.14, R 5.1 à R 5.3, RS 10.10 et RS 5.4 à RS 5.6.

([8]) Rapport Particulier 2508 MOM/NP du 6 octobre 1985.

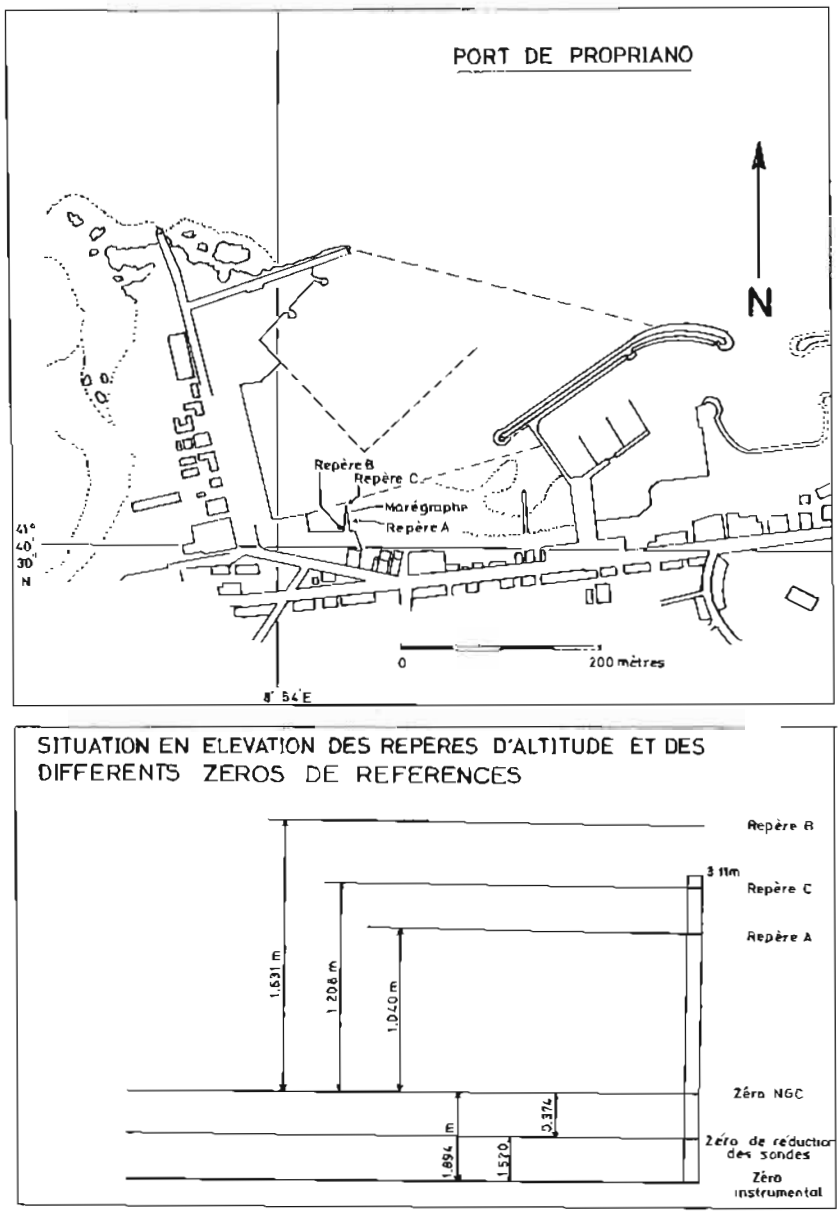


FIG. 5 bis. — Observatoire de marée de Propriano.

2 minutes de sondage latéral : S 10.9 et S.2
3 fiches d'observatoire de marée
51 fiches géodésique ou d'amer
5 dossiers de courantométrie

9. SONDAGES DE COMPLÉMENT DANS LA RADE DE TOULON

9.1. Généralités

Les sondages du port de Toulon se déroulèrent de janvier à mai 1984 et de janvier à juin 1985 selon un rythme peu soutenu, sauf pendant les périodes d'indisponibilité des bâtiments pendant lesquelles un potentiel important leur fut consacré.

La mission disposait pour les exécuter de moyens médiocrement adaptés aux levés portuaires. Par ailleurs, l'encombrement des quais fut une gêne permanente, aussi bien pour les équipes de sonde que pour les services du port chargés de déplacer les navires amarrés.

9.2. Localisation

A défaut d'équipement permettant de mesurer simultanément l'azimut et la distance du porte-

TABLEAU 6
Position des stations de localisation

Désignation	Type T : Trident O : Optique	Position géographique (LAMBERT III-NTF)		
		X	Y	Z
Tour Royale	T	892 116,4	95 582,5	20
Vigie D.P.	T	891 592,45	97 363,93	30
Station A 1 (Tour Royale)	O	892 118,2	95 567,2	
Station A 2 (D.P.)	O	891 616,57	97 381,64	
Station A 3 (G.P.D.)	O	890 927,9	97 115,49	
Station A 4 (Milhaud 1)	O	890 791,13	96 720,76	
Station A 5 (Milhaud 5)	O	890 158,84	96 736,97	
Station A 6 (Milhaud 6) (La Seyne)	O	899 770,08	96 605,26	
Station 2.6 (Quai Artillerie)	O	891 944,04	97 766,05	
Station 1.3 (Quai d'Honneur)	O	892 161,59	97 276,28	

sondeur, la localisation fut entièrement assurée par procédé optique, sauf dans le canal Suffren où l'on utilisa le procédé de la cordelle.

Des essais de localisation avec des balises Trident III montrèrent que ce système ne permettait pas d'assurer la précision hydrographique pour un levé au 1/1 000.

On utilisa néanmoins le Trident pour le guidage des vedettes dans la partie Est de la rade, couverte par un sondage au 1/2 000.

Par suite des problèmes de masquage, il fallait souvent disposer de quatre théodolites pour avoir trois lieux, et procéder à de fréquents changements de station. 169 stations optiques furent ainsi occupées.

Les coordonnées des balises Trident et des principales stations optiques sont indiquées dans le tableau 6 :

9.3. Bathymétrie (voir figure 6)

Les sondages furent effectués principalement par une embarcation de servitude prêtée par la Direction du Port et équipée sommairement d'un sondeur DESO 10 hors-bord.

L'échelle du levé fut le 1/1 000, sauf pour le plan d'eau conduisant de la grande passe aux bassins Vauban, où la densité fut réduite de moitié.

Cette zone fit toutefois l'objet d'une exploration au sondeur latéral EG & G selon des profils espacés de 70 mètres. On y procéda en outre, et avec beaucoup de difficultés, à un dragage hydrographique qui permit d'atteindre un plafond de 10,1 mètres.

Plusieurs centaines de recherches furent effectuées, avec le concours de plongeurs de la D.P. Elles concernaient toutes des objets de faible dimension (fûts, paquets de câble, épaves métalliques diverses) qui furent relevés immédiatement ou qu'il est prévu de relever rapidement.

Bien qu'une grande partie de la rade ait été levée, il reste encore à sonder les abords des quais Noël et les zones moins prioritaires de Brégaillon et du Lazaret pour clore définitivement les travaux.

9.4. Marée

Les sondes furent réduites de la marée observée à Toulon, où se trouve un observatoire permanent entretenu par les Travaux Maritimes, et complété à certaines époques par un marégraphe supplémentaire fourni par la mission.

Les caractéristiques de cet observatoire sont à la figure 7.

9.5. Autres travaux

Des mesures permettant de compléter les plans topographiques au 1/1 000 et au 1/2 000 des Travaux Maritimes furent effectuées. On procéda également à la mise à jour de la toponymie sur ces documents.

Des corrections très limitées furent enfin apportées à la revue d'amers exécutée en 1983 ([9]).

9.6. Documents établis

7 minutes de bathymétrie : B 1.1 à B 1.4, B 1.6 et B 1.7, B 2.2

7 minutes de recherche : R 1.1 à R 1.4, R 1.6 et R 1.7, R 2.2

1 minute de dragage : D 2.2

([9]) *Annales Hydrographiques* n° 759 — 1984 — p. 171.

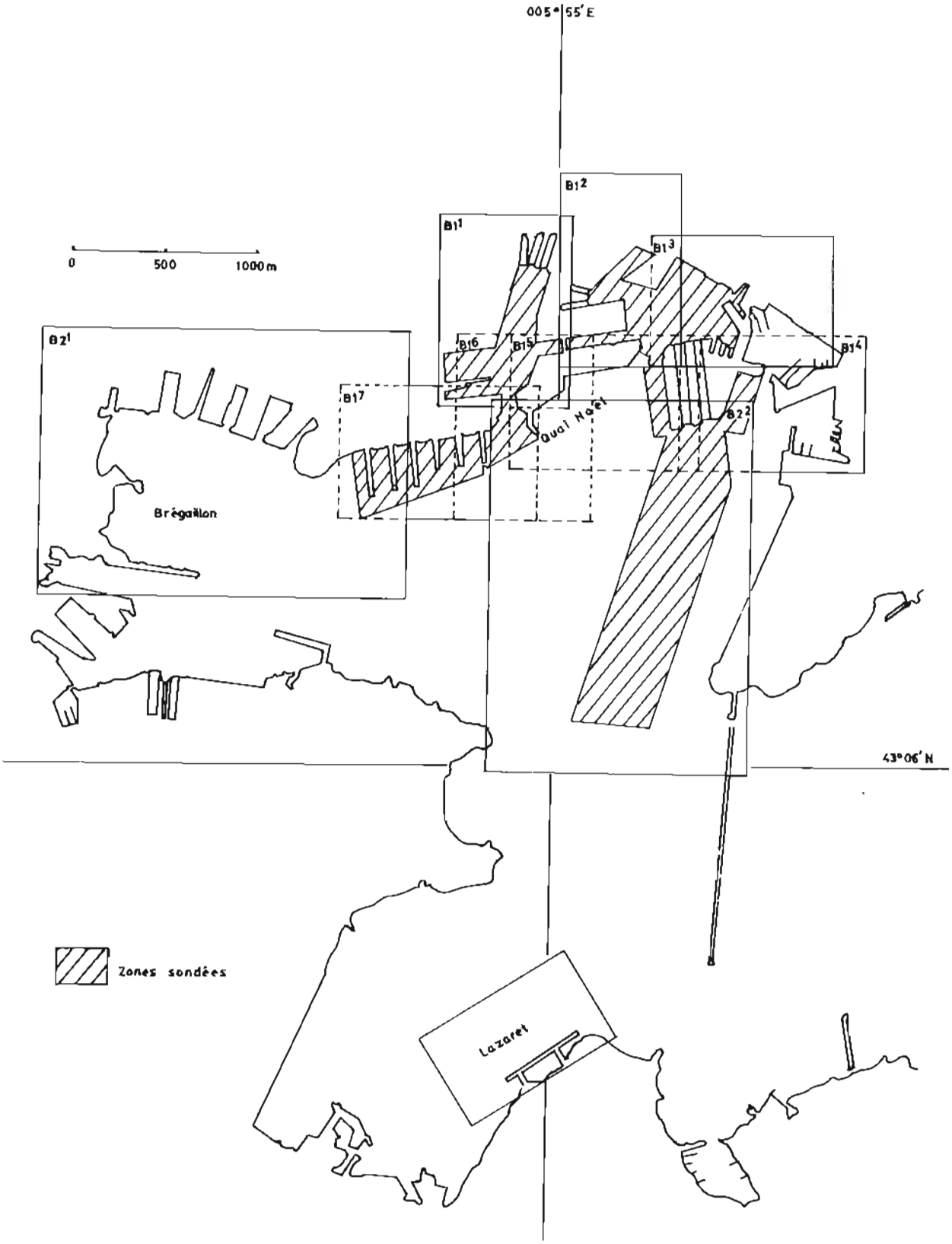


FIG. 6. — Rade de Toulon : Schéma des coupures et des zones sondées

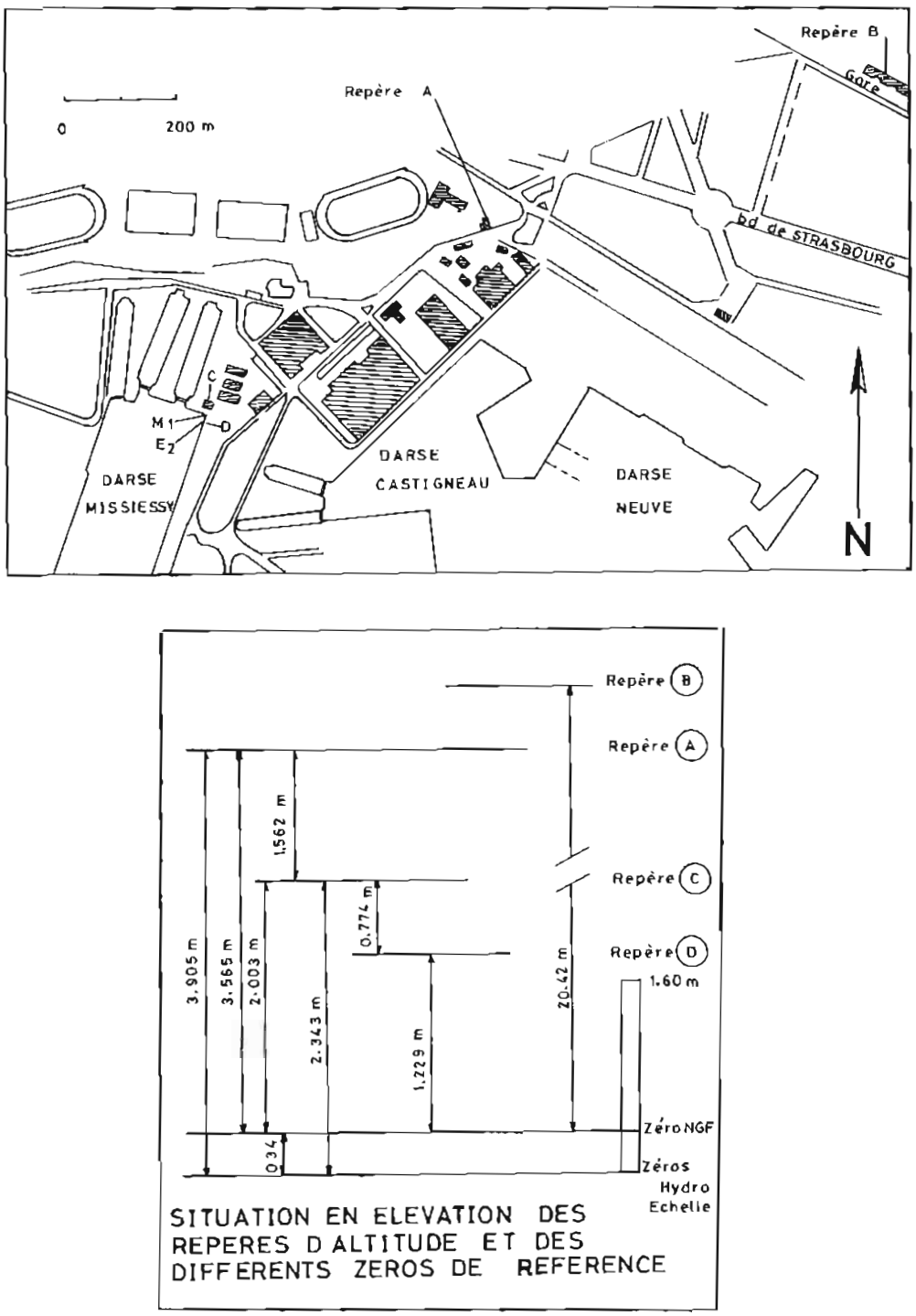


FIG. 7. — Observatoire de marée de Toulon

10. LEVÉ CÔTIER DE LA PROVENCE

10.1. Généralités

Le sondage systématique des côtes de Provence entre le Cap d'Antibes et le Cap Cabuel fut exécuté de novembre 1984 à mai 1985 par *La Recherche*, alors que les sondages en Corse étaient suspendus en attendant le retour de conditions plus clémentes. De fait, la météorologie fut presque toujours favorable en dépit d'un hiver exceptionnellement froid et les travaux progressèrent sans difficulé.

10.2. Localisation

Les porte-sondeurs furent toujours localisés avec un minimum de trois lieux bien sécants,

combinant des distances Trident III et, dans les fonds de baie et les zones de fluctuation, un complément de relèvements optiques.

On prit la précaution de faire précéder les sondages d'un étalonnage du réseau Trident sur l'ensemble de la zone.

Les principaux résultats de cet étalonnage, sont les suivants :

— écart entre les centres de gravité des cibles Trident/optique : 1,6 m,

— écart type des distances points Trident-points optique : 2,1 m.

Les coordonnées des stations utilisées pour la localisation figurent au tableau 7.

10.3. Bathymétrie (voir figure 8)

Les côtes de cette région sont accores et la largeur du plateau continental n'excède jamais trois kilomètres.

On procéda à un sondage au 1/10 000, à l'exception de la Baie de Villefranche où la densité fut doublée et une exploration systématique conduite au sondeur latéral.

Il y eut peu de recherches; on se contenta surtout d'effectuer des intercalaires dans les secteurs les plus accidentés, complétés éventuellement au sondeur latéral. On eut recours aux plongeurs pour les investigations par petits-fonds.

Les chutes très brutales du plateau aux environs de l'isobathe 100 mètres furent à l'origine de pertes de fond par les sondeurs des vedettes, et *La Recherche* du compléter les profils avec ses sondeurs grands-fonds.

Quelques épaves ou obstructions furent détectées. La liste en est donnée au tableau 8.

Une recherche négative, enfin, fut exécutée sur l'obstruction cotée 30 mètres par fonds de 150 mètres, en :

L = 43° 40,2′ N
G = 07° 19,9′ E (CM 6952)

L'enquête qui suvit montra qu'il s'agissait d'un dispositif relevé en 1979.

10.4. Géologie

La densité des natures de fond figurant sur les cartes en service fut jugée suffisante, sauf devant l'aéroport de Nice où s'étaient produits des terrassements et des mouvements de terrain, et où l'on procéda à quelques prélèvements.

10.5. Nivellement

10.5.1. Observation de la marée

Les sondes furent réduites de la marée observée à Nice où se trouvait un observatoire permanent dépendant de l'IGN.

TABLEAU 7
Côtes de Provence : Position des stations de localisation

Nom de la station	Type T : Trident O : Optique	Projection Lambert III — NTF)		
		X	Y	Z
Phare Ferrat	O	1 002 147,68	164 991,72	72,0
Station 2	O	1 000 578,80	166 872,80	1,0
Station 3 bis	O	1 001 546,30	166 788,40	1,0
Station 4	O	1 001 819,50	167 213,20	1,0
Station 5	O	1 000 667,70	167 595,50	10,0
Station 6	O	1 001 531,20	167 724,80	0,5
Sémaphore Ferrat	T	1 002 130,47	165 806,83	151,0
Parking des Restanques	T	1 000 774,70	168 431,00	75,0
Restanques	O	1 000 773,70	168 431,40	75,0
Cap d'Ail	T	1 007 492,88	170 418,76	77,0
La Garoupe	T	987 279,78	151 793,84	91,0
Réservoir St-Pierre de Féric	T	995 327,14	168 399,97	206,0
Cap Roux Hôtel	T	1 003 855,35	170 033,75	38,0
Gordon Bénet	T	1 002 715,25	169 293,44	53,0
Station 3	O	1 001 502,00	166 687,90	1,0
Fossettes	O	1 003 259,88	165 988,41	2,0
Port de Beaulieu	O	1 002 686,79	168 493,88	12,0
Silva Maris	O	1 003 865,43	169 739,61	3,0
Texas Instrument	T	985 843,76	160 830,88	117,0
Théoule	T	971 360,60	145 360,10	157,0
Le Pêcheur	O	1 002 803,60	165 561,90	3,0
La Garoupe	O	987 279,50	151 793,80	91,0
Méridien	O	997 328,60	166 882,65	8,0
Bamboury	O	999 433,50	166 318,10	11,0
Californie	O	994 381,50	164 956,00	2,0
L'Ilette	O	986 532,40	149 300,20	2,0

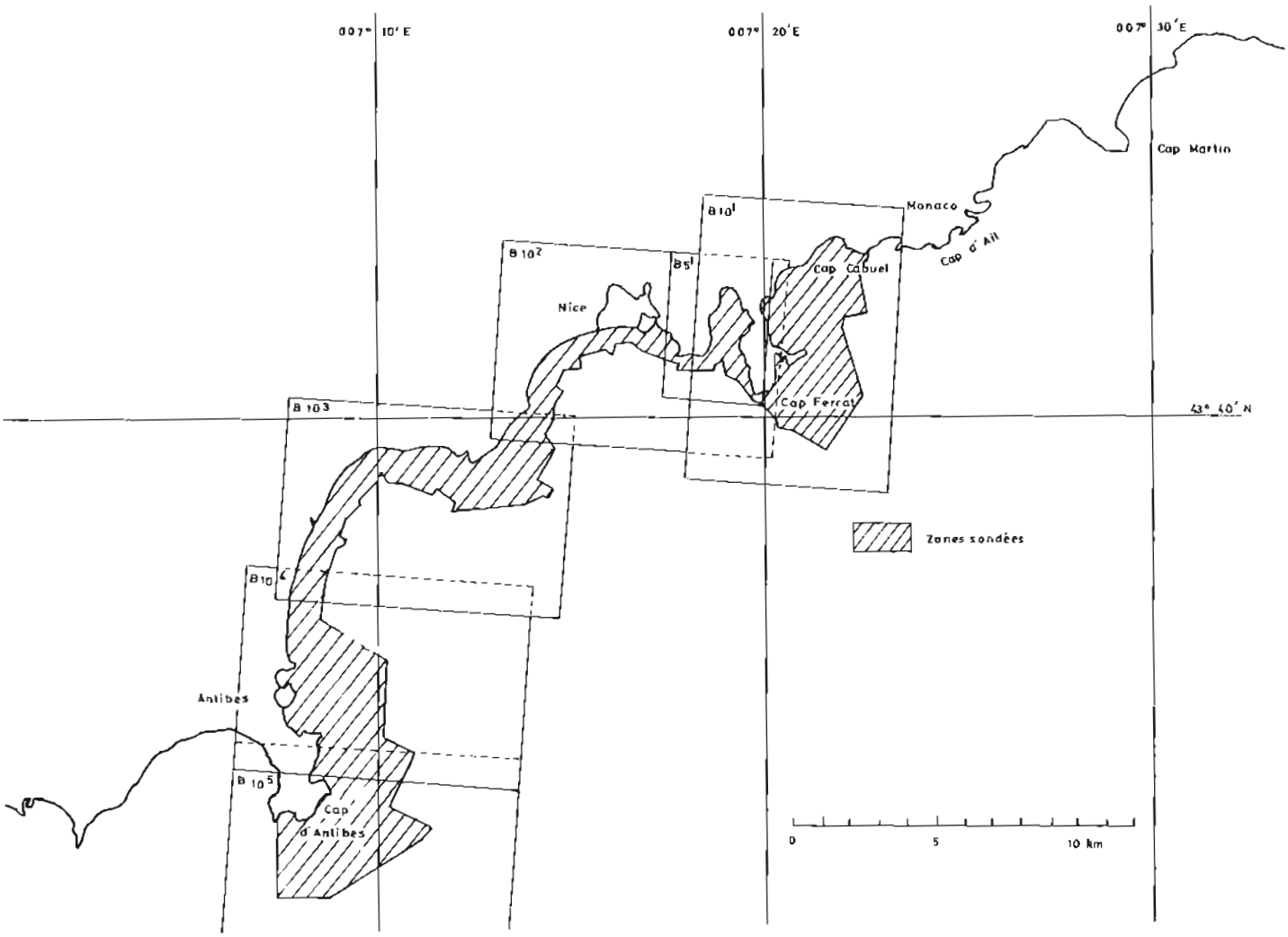


FIG. 8. — Côtes de Provence : Schéma des coupures et des zones sondées

TABLEAU 8
Epaves et obstructions

Désignation	Situation géographique (Lambert III — NTF)		Brassiage (en m)	Observations Hauteur au-dessus du fond (en m)
	X	Y		
Barque de pêche	1 000 906	168 220	12,3	2
Ponton	1 001 040	168 112	15,3	2,4
Avion	1 001 445	166 590	38	4
Câble sous-marin	017/Sém. La Garoupe / 1 590 m		/	orientation Est-Ouest

On installa également pendant deux mois un observatoire à Antibes afin de vérifier la similitude des marées dans ces deux ports voisins.

La comparaison aboutit aux conclusions suivantes :

Les marées de Nice et d'Antibes sont identiques.

Le nivellement hydrographique fait apparaître une légère différence entre les deux ports, le zéro observé à Antibes étant 4 cm plus haut que celui de Nice.

Les caractéristiques de ces observatoires sont à la figure 9.

10.5.2. Concordance Toulon-Nice

On procéda également à un nivellement de contrôle et à une reprise des concordances entre

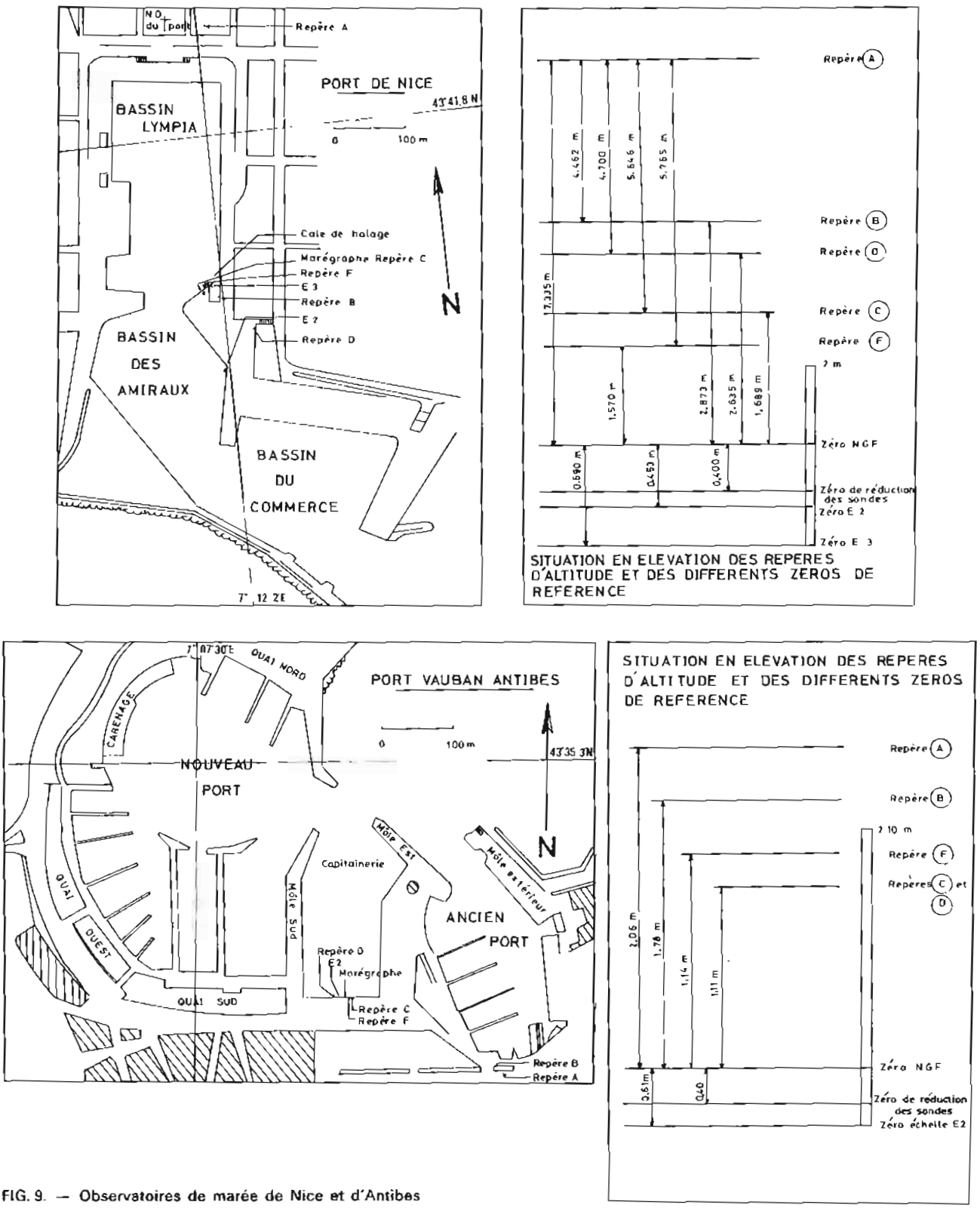


FIG. 9. — Observatoires de marée de Nice et d'Antibes

les ports de Nice et de Toulon, portant sur les observations de 1983.

L'étude du nuage de points représenté à la figure 10 fait apparaître deux groupements comprenant respectivement 85 % et 10 % des pleines et basses mers (collection de 500 points).

La droite de concordance, calculée par moindres carrés dans le groupement principal, a pour

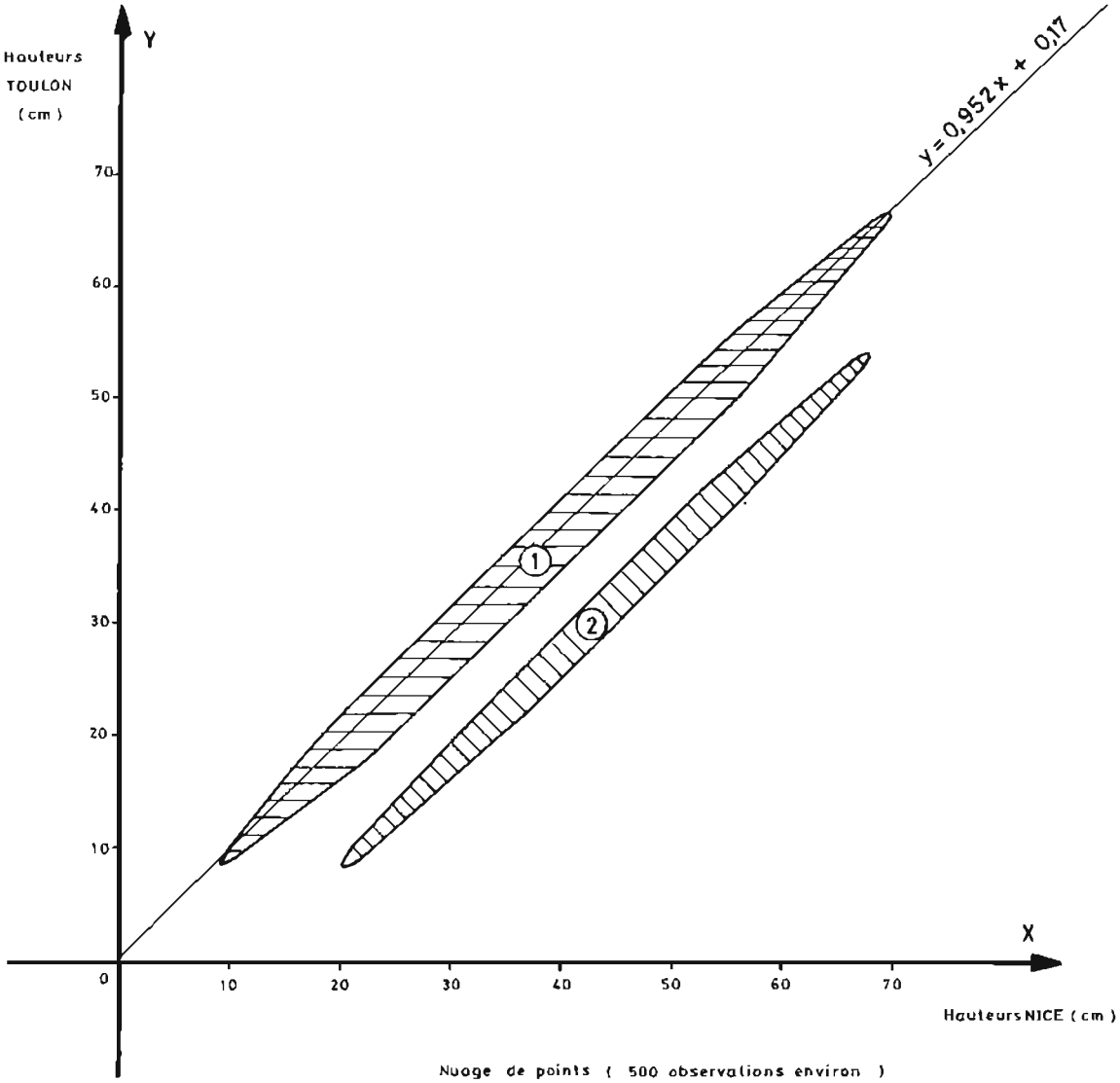


FIG. 10. — Concordance en hauteurs entre les ports de Nice et Toulon (année 1983)

équation :

$$y = 0{,}952\ x + 0{,}17$$

où y est la hauteur d'eau à Toulon, x celle de Nice et l'unité le centimètre.

Le second groupement correspond à des dénivellations atteignant à Toulon jusqu'à 20 cm au-dessous de la hauteur prévue. L'analyse des bulletins météorologiques montra qu'il s'agissait toujours de situations où le vent soufflait du secteur WNW et atteignait une vitesse supérieure à 15 nœuds.

La concordance en temps, représentée à la figure 11, confirma enfin que les marées étaient en phase, le retard de 3 minutes environ entre Nice et Toulon n'étant pas significatif.

10.6 Courants

Des mesures de courant de longue durée furent exécutées aux points suivants :

Situation géographique			durée (heure)	Immersion sous la surface	Type de courantomètre
Nom du lieu	L (N)	G (E)			
Haut-fond de la Nioulargo	43° 13′ 18″	6° 47′ 18″	1 500	5 m par fonds de 80 m	Mécabolier
Sud Ile St Honorat	43° 29′ 37,3″	7° 02′ 54,6″	1 004	5 m par fonds de 30 m	Mécabolier
Sud Cap d'Ail	43° 42′ 15″	7° 24′ 13″	840	5 m par fonds de 47 m	Suber

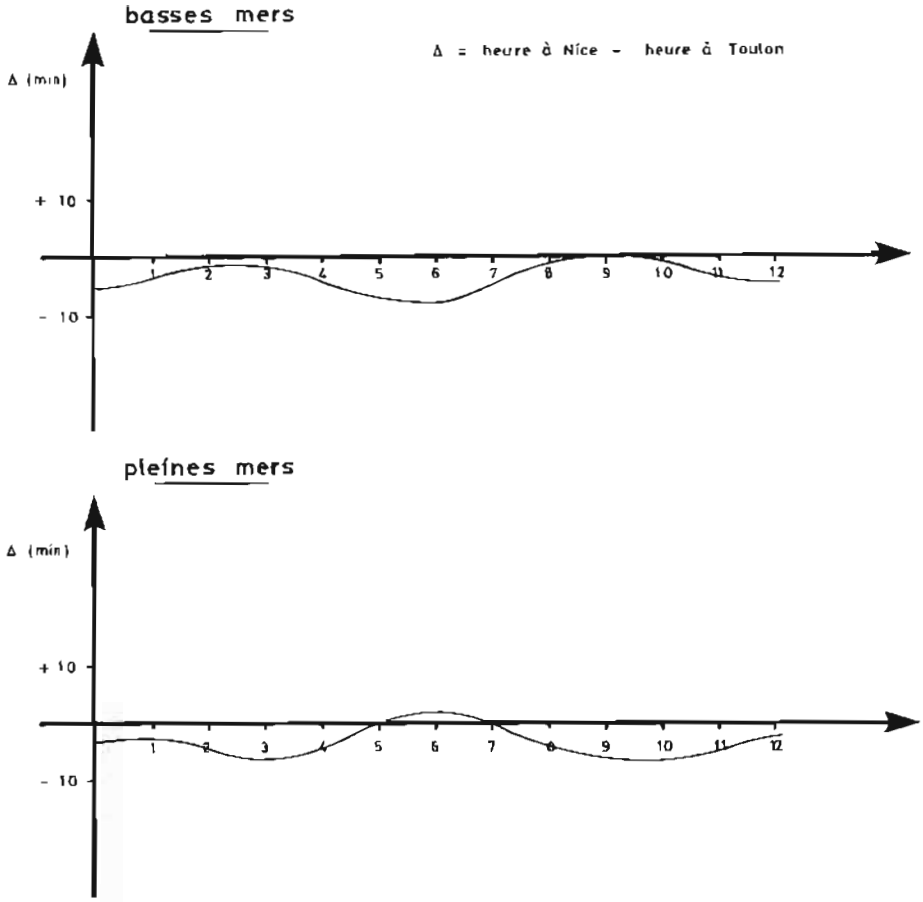


FIG. 11. — Concordance en heures entre les ports de Nice et de Toulon (année 1983)

10.7. Revue d'amers

On profita du levé pour exécuter une revue d'amers, que l'on étendit de la frontière italienne au Cap Camarat, en reprenant intégralement les travaux de 1979 à Monaco ([10]).

Il fut constaté que 34 % seulement des cercles de position figurant sur les 17 cartes en service correspondaient effectivement à des amers.

Cette situation résultait principalement du maintien abusif de constructions existantes, mais peu remarquables, sur ces côtes très urbanisées.

Le bilan chiffré de cette revue est présenté au tableau 9 :

TABLEAU 9
Bilan de la revue d'amers entre le Cap Camarat et la frontière italienne

Nombre de points examinés	613
Amers nouveaux	129
Amers confirmés	164
Amers supprimés	71
Amers reclassés comme détails topographiques	250
Nombre de fiches établies	292

([10]) *Annales Hydrographiques* n° 758 — 1983 — p. 121 et 122.

Les mesures géodésiques nécessaires pour la triangulation des points furent réduites au minimum. On se borna, pour plus d'une centaine d'entre eux, à indiquer des coordonnés approchées permettant une exploitation ultérieure plus précise par un appareil de stéréorestitution analytique.

10.8. Documents établis

6 minutes de bathymétrie B 10.1 à B 10.5 et B 5.1
6 minutes de recherche R 10.1 à R 10.5 et R 5.1
2 fiches d'observatoire de marée
3 fiches d'épave
292 fiches géodésique ou d'amer
6 dossiers de courantométrie

11. MISSION DE PHOTOGRAPHIES PAR HÉLICOPTÈRES DES AMERS DES CÔTES MÉDITERRANÉENNES DE LA FRANCE

11.1. Généralités

Une mission de photographies obliques des amers des côtes méditerranéennes de la France et de certaines îles italiennes fut exécutée de no-

vembre 1983 à juin 1984, avec des compléments jusqu'en novembre et décembre de la même année.

Première opération complète de ce type a être exécutée par le SHOM, cette mission permit d'acquérir une expérience suffisante pour définir la méthodologie applicable à cette activité.

11.2. Conduite des travaux

Les missions furent exécutées par des équipages entrainés au préalable par les soins de l'EPS-HOM et de l'Aéronautique Navale.

Les méthodes britanniques furent adoptées comme référence de départ, et modifiées en cours de travaux pour satisfaire aux besoins de l'Etablissement, qui se précisaient au fur et à mesure que lui parvenaient les résultats.

Une centaine d'heures de vol, et un détachement de quarante jours de l'hélicoptère Alouette II sur terrain extérieur, furent nécessaires pour achever cette mission dont le bilan approché figure au tableau 10.

TABLEAU 10
Bilan de la mission de photographie oblique

Sites photographiés	530
Prises de vue	2 800
Films utilisés	41

Si la pratique de la photographie oblique ne souleva pas de difficulté avec le personnel convenablement formé de l'escadrille 23 S et la MOM, il s'avèra qu'il était assez rare, même dans le midi de la France, de trouver des conditions météorologiques vraiment favorables aux prises de vue, et que ce point délicat commandait de fait tout le reste de la mission.

11.3. Moyens utilisés

11.3.1. Alouette II

Capacité : 5 personnes en transit,
3 personnes en mission photo (pilote — photographe — secrétaire).

Autonomie (avec 3 personnes) : 2 h 30.

Survol maritime limité à la distance maximum de 20 milles des côtes.

Contraintes particulières :

— pas de moyen de localisation précise,
— mesure des relèvements approximative (compas magnétique léger),
— obligation d'enlever une porte latérale pendant les missions, imposant au photographe le port d'un harnais limitant ses mouvements,
— place réduite à l'arrière pour l'opérateur et son matériel,
— faible vitesse en transit par vent contraire.

Malgré ses limites, l'Alouette II se révéla mieux adaptée aux missions photographiques et moins onéreuse que l'Alouette III, que l'on utilisa à titre de comparaison pour les dernières prises de vues.

11.3.2. Matériel de prises de vues

La Chambre Hasselblad est un appareil lourd et encombrant, muni de nombreux accessoires. Son fonctionnement est très fiable : aucun problème mécanique ne se posa en sept mois d'utilisation.

Cet appareil est muni de dos interchangeables contenant 70 vues d'un emploi très pratique; cependant la diversité des prises de vues impose des changements fréquents d'objectifs et il serait indiqué, pour éviter les erreurs de manipulation, de disposer de deux chambres, malgré le peu de place disponible dans l'hélicoptère.

11.4. Documents établis

Les vues prises au cours de la mission furent rangées dans quatre classeurs comportant des feuillets amovibles sur lesquels furent collées les épreuves contact de chaque cliché, accompagnées d'un commentaire résumé.

L'accès aux classeurs se fait par un index cartographique muni d'un mode d'emploi.

Ces documents accompagnés d'un projet d'instruction définissant la terminologie et les méthodes de travail applicables à ce type d'activité furent adressés aux services concernés.

12. ÉTALONNAGE DES RÉSEAUX SYLEDIS DE MARSEILLE ET DE TOULON

12.1. Déroulement succinct

Conçu comme l'application des procédures définies lors de l'évaluation du réseau Syledis-Bretagne ([11]), l'étalonnage des réseaux Syledis de Marseille et de Toulon aurait du se borner à une définition de la géométrie de ces deux chaînes distinctes, à la détermination, par des mesures à terre, des retards applicables à chaque émetteur et à la vérification, par des mesures à la mer, de la validité des constantes ainsi calculées.

Ces opérations furent conduites au cours du deuxième semestre de 1984. Elles permirent de s'assurer que le système répondait grosso modo aux normes de précision escomptées par la marine

([11]) *Annales Hydrographiques* n° 759 — 1984 — p. 15 et suivantes.

Prise de vues obliques d'un phare par Alouette II

L'Alouette II en station, photographiée à partir du site de prise de vues

et qu'il couvrait largement les plateaux continentaux situés devant les deux ports concernés, même si l'on n'atteignait pas en premier examen la portée espérée.

On s'aperçut cependant que les faibles corrections apportées aux constantes de réseau à l'issue des travaux en mer semblaient avoir dégradé la précision du Syledis, dégradation confirmée au printemps 1985 par une vérification limitée aux abords de Toulon.

En octobre 1985, une nouvelle campagne de mesures en mer plus exhaustive que la précédente était programmée, afin de déterminer de nouveaux retards.

12.2. Caractéristiques générales du système Syledis (rappel)

Le Syledis est un système de radiolocalisation pouvant fonctionner selon les modes actif, passif ou mixte.

Dans le mode actif ou circulaire, le mobile à localiser est équipé d'une balise émettrice et d'un récepteur.

L'ensemble permet de déterminer la distance de l'antenne du mobile à plusieurs stations fixes, chacune émettant un signal de réponse.

Dans le mode passif ou hyperbolique, une station fixe dite maîtresse émet un signal relayé par des stations secondaires. Le mobile reçoit le signal direct et les signaux relayés, dont les déphasages donnent naissance à un réseau d'hyperboles.

Un récepteur d'emploi commode, le SR 3, programmé pour analyser les signaux et calculer la position du mobile, ouvre l'accès aux pseudo distances du mobile aux stations fixes, grandeurs résultant d'un filtrage des observations et permettant à l'utilisateur de se ramener au mode circulaire.

Un troisième mode de fonctionnement appelé mixte permet d'acquérir outre les pseudo distances du mode passif, une à plusieurs distances en mode actif en fonction des possibilités des récepteurs.

12.3. Géométrie des réseaux

12.3.1. Réseau de Marseille

Le réseau Syledis de Marseille se compose de 5 stations représentées à la figure 12.

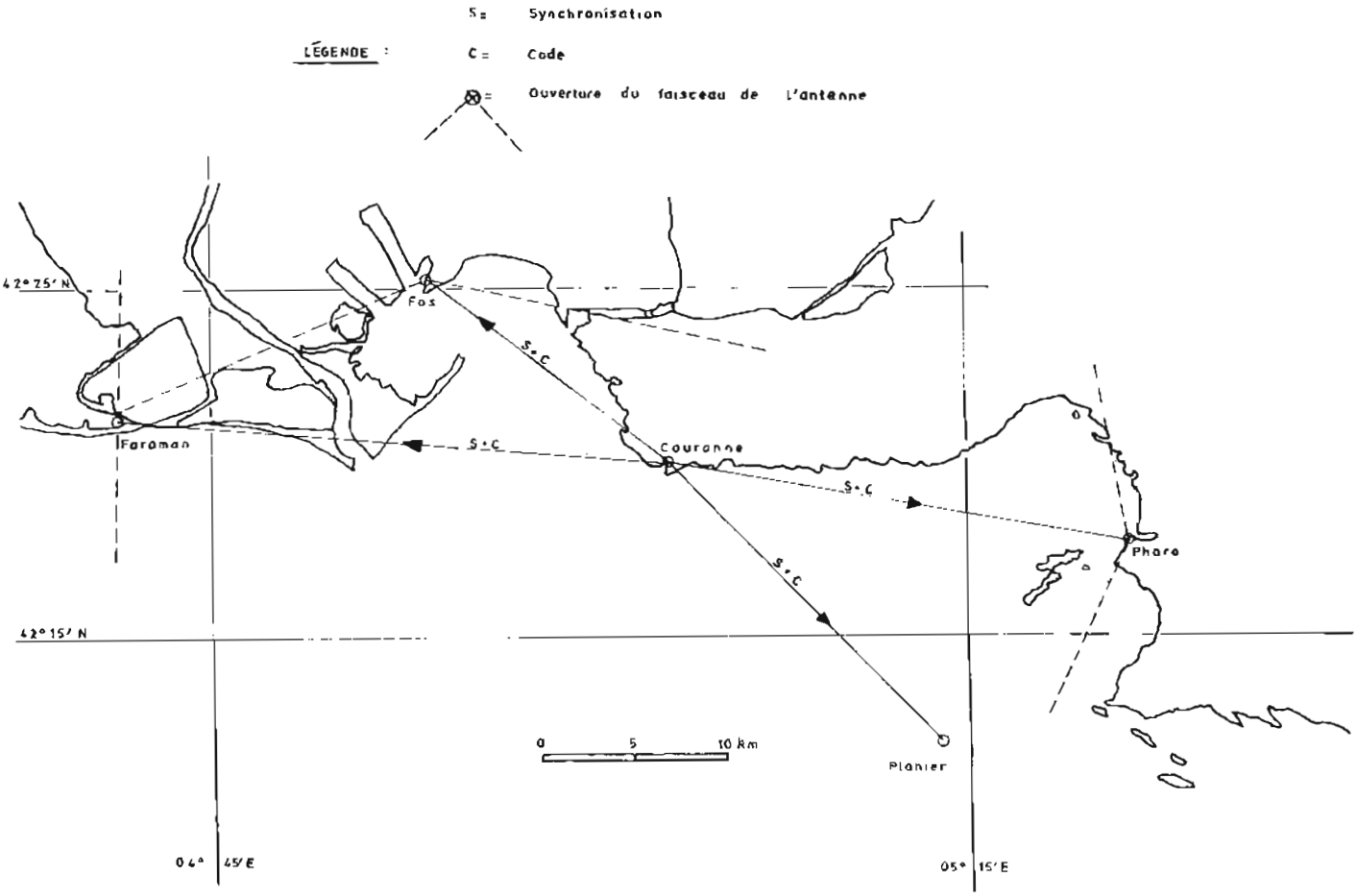


FIG. 12. — Réseau Syledis de Marseille

La station maîtresse du réseau, qui génère la synchronisation et le code émis, est installée au sémaphore du cap Couronne. Les stations installées à la vigie de Fos, aux phares de Faraman et du Planier et à la vigie du Pharo reçoivent directement la synchronisation et le code de la balise maîtresse. Les trois stations de Couronne, Faraman et Pharo fonctionnent également en mode circulaire.

Les caractéristiques des antennes sont indiquées au tableau 11.

Leurs positions, déterminées par les méthodes de triangulation classiques, figurent au tableau 12.

12.3.2. Réseau de Toulon

Le réseau Syledis de Toulon est constitué de 4 stations représentées à la figure 13. En mode hyperbolique, la station maîtresse du réseau, qui génère la synchronisation et le code émis, est installée près du sémaphore de Cépet.

Les stations secondaires installées à Porquerolles et Saint-Antoine reçoivent directement la synchronisation et le code de la station maîtresse. La station secondaire installée au sémaphore de Bénat reçoit directement la synchronisation mais le chemin du code transite par la station secondaire de Porquerolles.

Les quatre stations de Porquerolles, Bénat, Saint-Antoine et Cépet fonctionnent en mode circulaire.

Les stations de Porquerolles et Saint-Antoine fonctionnent en mode mixte.

Les caractéristiques des antennes sont au tableau 13, leurs positions, déterminées par les méthodes de triangulation classiques figurent au tableau 14.

12.4. Détermination des retards des balises

12.4.1. Méthodes de calcul

Les retards en mode circulaire peuvent être calculés des trois manières suivantes :

— Par addition des retards théoriques induits par les antennes et coaxiaux de chaque station (valeur

TABLEAU 11
Caractéristiques des antennes du réseau Syledis de Marseille

Station	Antenne	Azimut de l'axe du faisceau	Ouverture du faisceau
Couronne	Omnidirectionnelle	/	/
Fos	Directionnelle	160°	155°
Faraman	Directionnelle	090°	180°
Planier	Omnidirectionnelle	/	/
Pharo	Directionnelle	265°	155°

TABLEAU 12
Position des antennes du réseau Syledis de Marseille

Balises	Coord. Lambert III — NTF			Coord. géographiques (E. 50)	
	X	Y	Z	Longitude Est	Latitude Nord
Fos	806 758,8	127 663,1	48	4° 53′ 28, 69″	43° 25′ 15, 89″
Couronne	820 180,6	118 449,1	57	5° 03′ 11, 52″	43° 20′ 03, 57″
Faraman	790 529,1	119 915,7	41	4° 41′ 17, 67″	43° 21′ 20, 62″
Planier	835 169,8	104 016,4	68	5° 13′ 53, 97″	43° 11′ 59, 63″
Pharo ancienne position-1984	844 862,2	114 987,4	34	5° 21′ 20, 78″	43° 17′ 43, 63″
Nouvelle position-1985	844 858,4	114 984,6	33		

TABLEAU 13
Caractéristiques des antennes du réseau Syledis de Toulon

Situation	Antenne	Azimut de l'axe du faisceau	Ouverture du faisceau
Porquerolles B1 (secondaire)	Omnidirectionnelle	/	/
Bénat B2 (secondaire)	Directionnelle	200°	155°
St Antoine B3 (secondaire)	Directionnelle	140°	110°
Cépet B4 (maîtresse)	Omnidirectionnelle	/	/

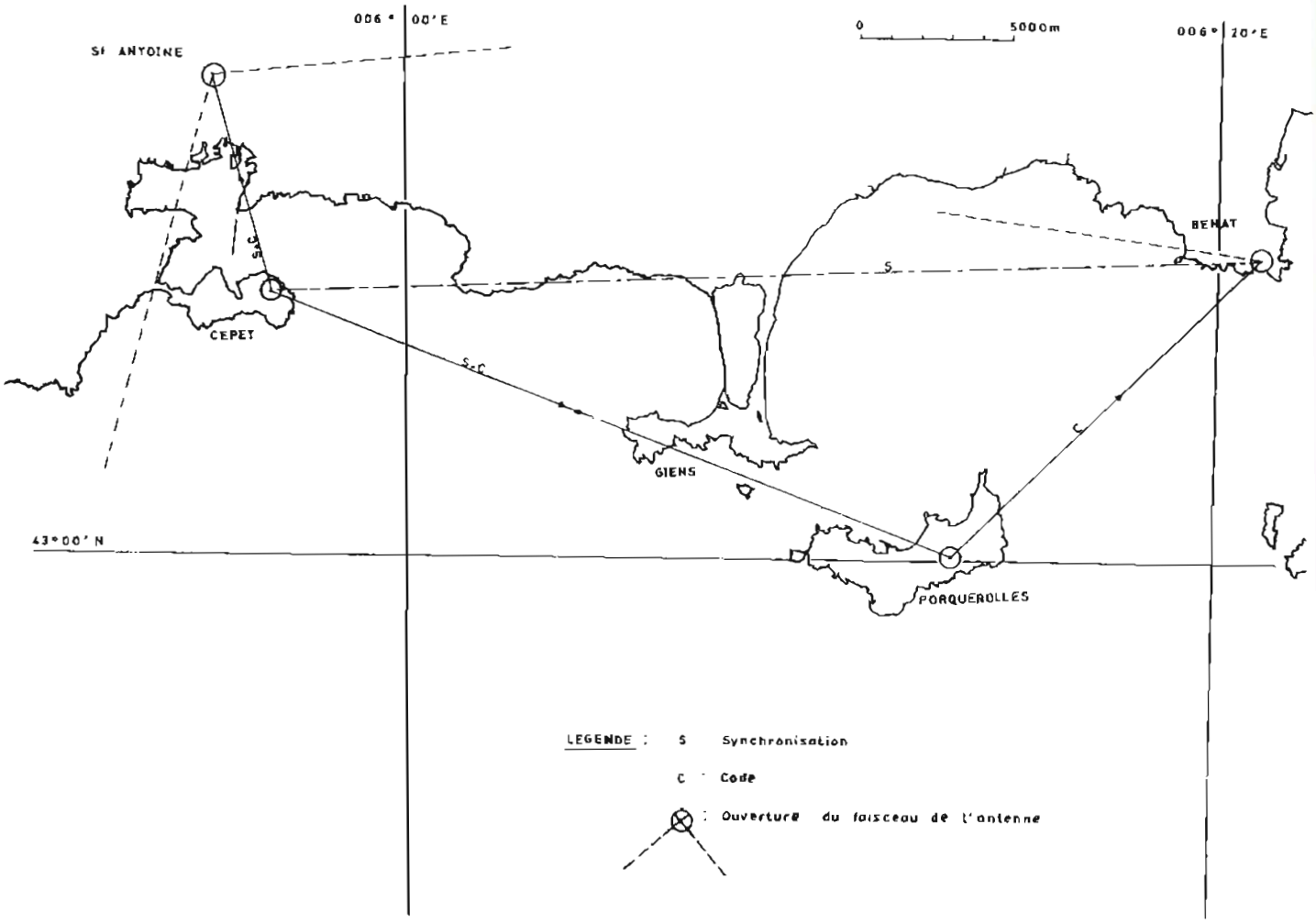


FIG. 13. — Réseau Syledis de Toulon

théorique)
— Par mesures sur des points connus (calibration)
— Par comparaison, en différents points de la zone couverte par le Syledis, des distances observées par un mobile, et mesurées par un autre procédé de localisation (stations optiques — franchissements de lignes de base et de lignes d'ombre, comparaison avec un autre procédé de radiolocalisation de précision connue).

12.4.2. Mesures sur des points connus (calibration)

Plusieurs mesures furent effectuées sur des points déterminés par distancemètre infra rouge, dans le secteur d'utilisation et à des distances voisines de 500 mètres des antennes.

D'autres mesures furent effectuées sur des points géodésiques, à des distances comprises entre 3 et 40 kilomètres des stations.

12.4.3. Mesures sur un mobile

Ces mesures, qui constituent l'étalonnage proprement dit, furent réalisées à bord de *La Recherche* équipée de deux récepteurs SR3, l'un fonctionnant en mode hyperbolique, l'autre en mode circulaire.

Le schéma de l'installation est donné à la figure 14.

TABLEAU 14
Position des antennes du réseau Syledis de Toulon

Stations	Coordonnées Lambert III		
	X	Y	Z
Porquerolles B1	917 091,4	85 328,5	168
Bénat B2	927 276,7	96 011,5	192
St Antoine B3	891 111,6	100 125,2	179
Cépet B4	893 692,0	93 026,6	144

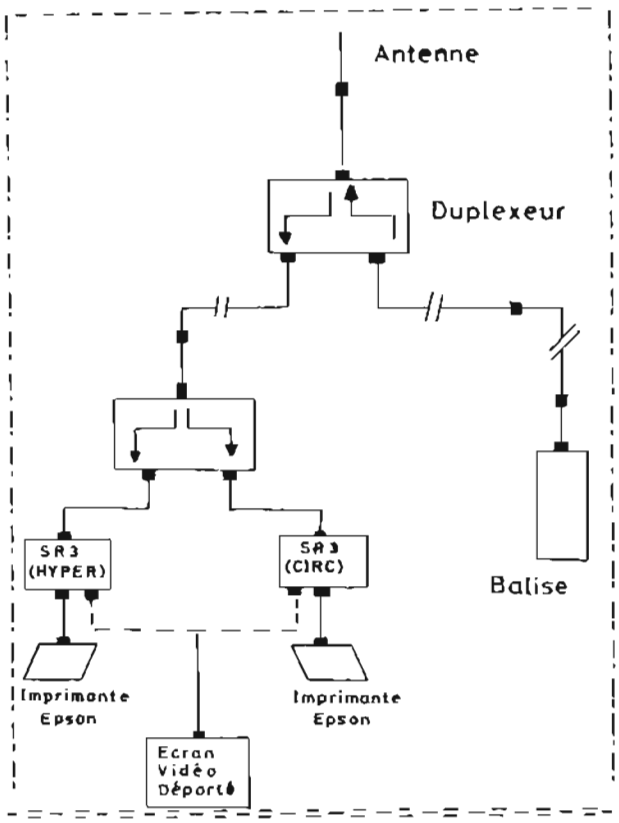


FIG. 14. — Schéma d'installation à bord de *La Recherche*

La Recherche devait occuper successivement des stations régulièrement réparties dans les zones de Toulon et de Marseille. Une fois le navire stoppé quatre théodolites placés sur des points connus de la côte effectuaient une série de visées optiques, tandis que les informations issues des deux récepteurs étaient listées sur imprimante.

Cette évaluation était complétée par des enregistrements effectués lors des franchissements de ligne de base ou de ligne d'ombre.

Les figures 15 et 16 indiquent respectivement pour les réseaux de Marseille et de Toulon la répartition des points d'évaluation et les lieux de franchissement de ligne d'ombre ou de ligne de base.

12.4.4. Résultats

Les résultats des différentes mesures figurent au tableau 15.

La prise en compte des retards sur les balises se fit en deux temps. On afficha d'abord les retards déduits des mesures de calibration sur base géodésique; et bien qu'il soit peu probable que chaque balise admette une correction d'étalonnage valable pour l'ensemble de la zone, on estima opportun, dans le but de faciliter l'exploitation ultérieure, de corriger les retards initiaux des biais calculés lors de l'étalonnage à la mer.

12.4.5. Evolution du système

Quelques modifications destinées à améliorer la couverture du système furent apportées. La principale concernait la balise du Pharo qui fut déplacée en 1985 (voir tableau 12).

Certaines mesures ayant montré par la suite que la précision absolue du système semblait s'être dégradée, on procéda à un nouvel étalonnage de vérification analogue à celui décrit au § 4.3, mais limité à une petite zone située entre Toulon et Giens. Cet étalonnage exécuté dans de mauvaises conditions fit apparaître une dérive des constantes du réseau de Toulon de l'ordre de 3 à 4 mètres.

Il fut décidé alors de reprendre l'étalonnage de manière plus exhaustive. Cette opération devait être programmée pour l'hiver 1985-1986.

12.5. Précision du système

L'étude des cibles réalisées en rapportant les points Syledis aux points optiques montre que la

TABLEAU 15

Valeur des retards des balises

Balise	Retard initial		Correction au retard		Retard définitif
	Valeur théorique	Calibration	Circulaire	Hyperbolique	
Porquerolles	58,4	58,8	1,5	0,7	60,3
Bénat	51	52	2,8	– 0,6	54,8
St Antoine	66	66,6	4,9	– 1,4	71,5
Cépet	57	59	3,5	– 0,4	62,4
Couronne	57	57	3		60
Fos	51	51	1		52
Faraman	51	54,5	– 2		52,5
Planier	61,5	59	0,5		59,5
Pharo	51	57	0,5		57,5
La Recherche	2,5		0	– 0,5	

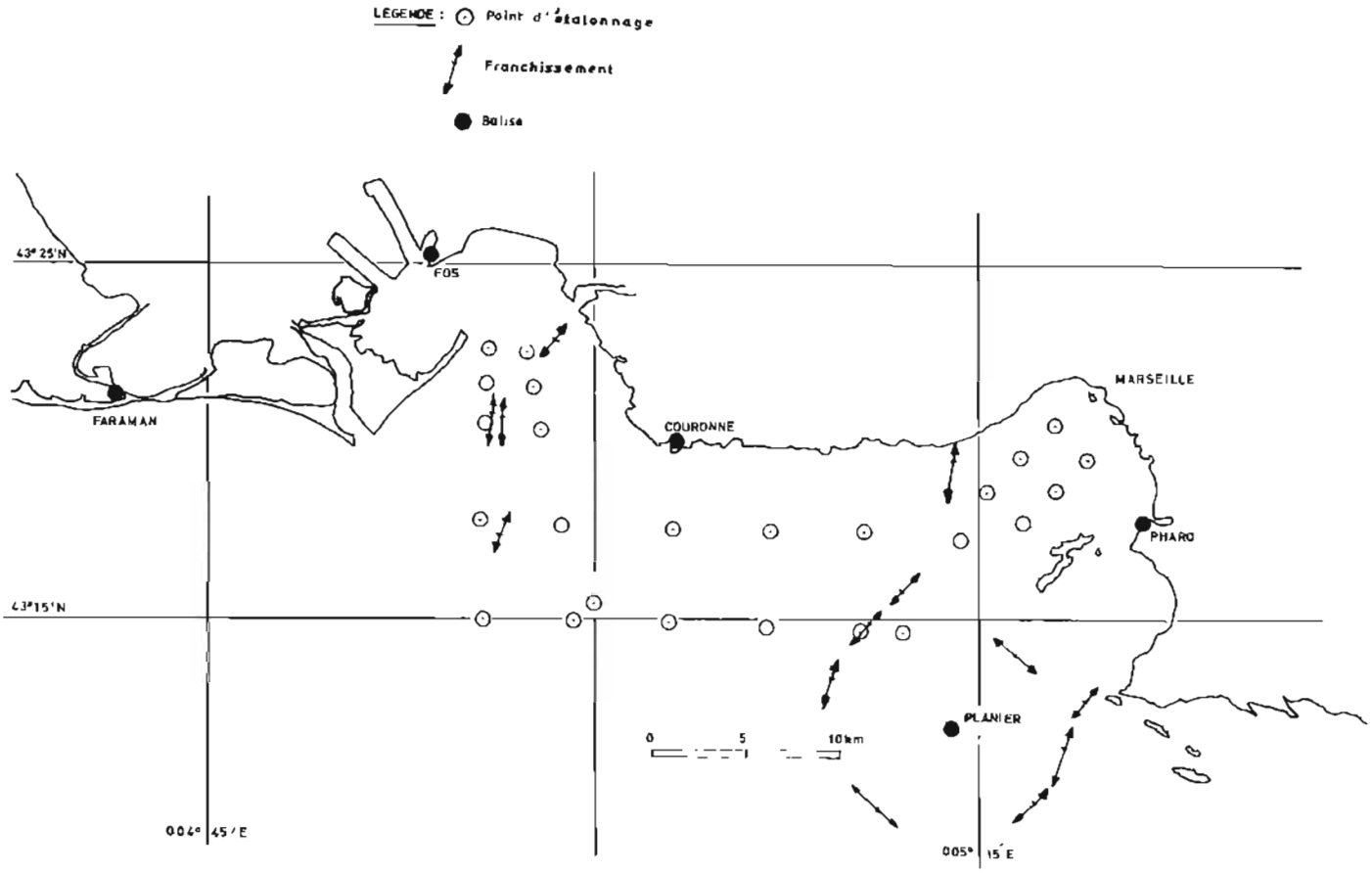


FIG. 15. — Réseau Syledis de Marseille : Points d'étalonnage et lieux de franchissement

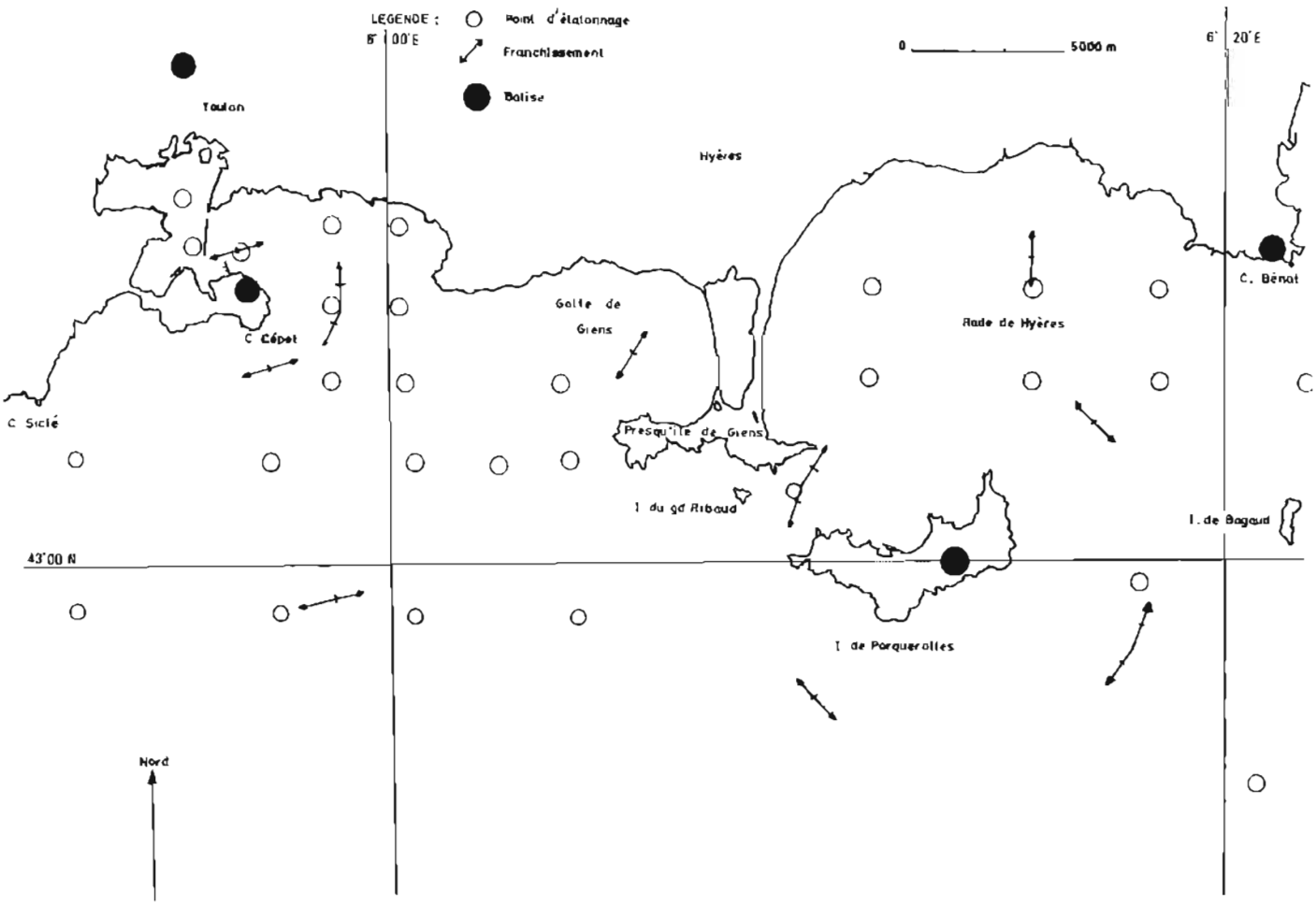


FIG. 16. — Réseau Syledis de Toulon : Points d'étalonnage et lieux de franchissement

précision absolue du système est meilleure que 10 mètres en mode circulaire, et 15 mètres en mode hyperbolique sur l'ensemble des deux zones d'évaluation, à l'exception des entrées du golfe de Fos et de la rade de Marseille pour lesquelles des écarts de 90 mètres furent constatés.

Il suffirait pour réduire ces écarts d'affecter l'un des créneaux libres du format Syledis à la station du Planier, afin de disposer d'une quatrième station en mode circulaire non alignée avec les autres.

De même, la réception de la balise de St Antoine est perturbée en rade des Salins d'Hyères, tandis que celle de Bénat l'est en rade des Vignettes.

A moins de compléter le réseau de Toulon d'une cinquième balise, le système Syledis devrait rester limité dans ces deux zones à trois lieux circulaires ou deux lieux hyperboliques.

En complément des visées optiques et des franchissements de lignes d'ombre ou de base, une comparaison fut effectuée avec les distances Trident issues d'un réseau couvrant le littoral au Sud de Toulon.

Ces comparaisons montrèrent que la précision des deux systèmes est comparable dans la zone côtière accessible aux visées optiques.

12.6. Contrôle de la portée

Quelques contrôles de portée furent effectués par *La Recherche*, en éloignement dans les secteurs couverts par les antennes.

Ces contrôles permirent de dresser les figures 17 et 18, montrant les limites de portée des réseaux Syledis de Marseille et de Toulon pour un mobile équipé d'une antenne de 15 mètres.

Mais il va sans dire que cette représentation est très approximative. Une connaissance approfondie du réseau ne pourra être obtenue qu'après l'étude des données que communiqueront les utilisateurs au cours des années à venir.

13. VÉRIFICATION AU SONDEUR LATÉRAL DES ACCÈS AUX PORTS DE SÈTE ET DE L'ESPIGUETTE

13.1. Généralités

Les vérifications des accès au port de Sète et au terminal pétrolier de l'Espiguette furent effectuées par le BH1 *La Recherche* et le BSR *Gazelle* de juillet à septembre 1984.

Les travaux comportèrent une exploration systématique au sondeur latéral en complément des levés déjà existants, quelques mesures de courant, et les natures de fond qui n'avaient pas été exécutées lors des campagnes précédentes ([12]).

13.2. Localisation

La localisation fut assurée au moyen de balises Trident III, complétées de stations optiques de telle sorte que chaque point soit obtenu par intersection cohérente de trois lieux au moins.

Les positions des antennes Trident et des stations optiques sont définies au tableau 16.

13.3. Recherches d'obstruction

13.3.1. Sète (voir figure 19)

Les recherches d'obstruction furent conduites systématiquement par fonds inférieurs à 50 mètres à l'aide du sondeur latéral, de telle sorte que chaque point de la zone soit éclairé au moins deux fois sous des angles différents.

Le sondeur latéral fut maintenu en fonction durant les investigations, mais les normes du levé ainsi réalisé ne sont pas celles d'une hydrographie

([12]) *Annales Hydrographiques* N° 758, 1983, p. 145
Annales Hydrographiques N° 759, 1984, p. 142.

TABLEAU 16

Position des antennes Trident et des stations optiques

Nom du site	Type T = Trident O = Optique	Coordonnées rectangulaires (Système NTF-proj.LAMBERT III) X	Y	Altitude (m)
Agde (mont Saint-Loup)	T	694 645,40	111 607,30	126
Sète (mont Saint-Clair)	T	709 190,20	123 368,10	189
Mont Bouzille (borne IGN)	T	719 225,23	138 373,55	185,6
Mèze (clocher)	T	702 933,9	125 898,5	34
L'Espiguette (phare)	T	746 007,86	133 566,83	26
Feu rouge passe Ouest de Sète N° 1	O	710 602,8	122 514,2	3
Feu rouge passe Ouest de Sète N° 2	O	710 604,6	122 514,7	3

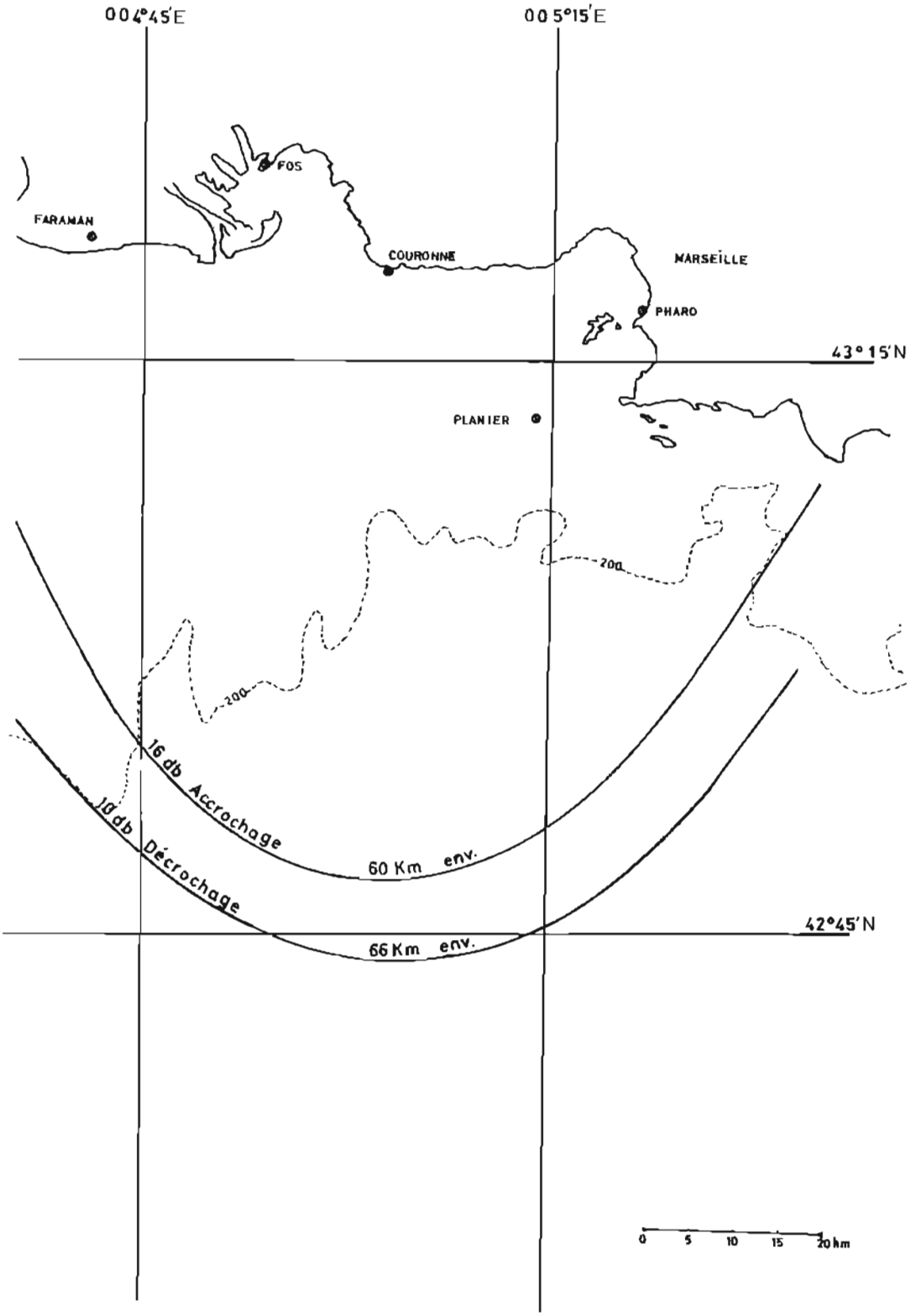


FIG. 17. — Limite de portée du réseau Syledis de Marseille

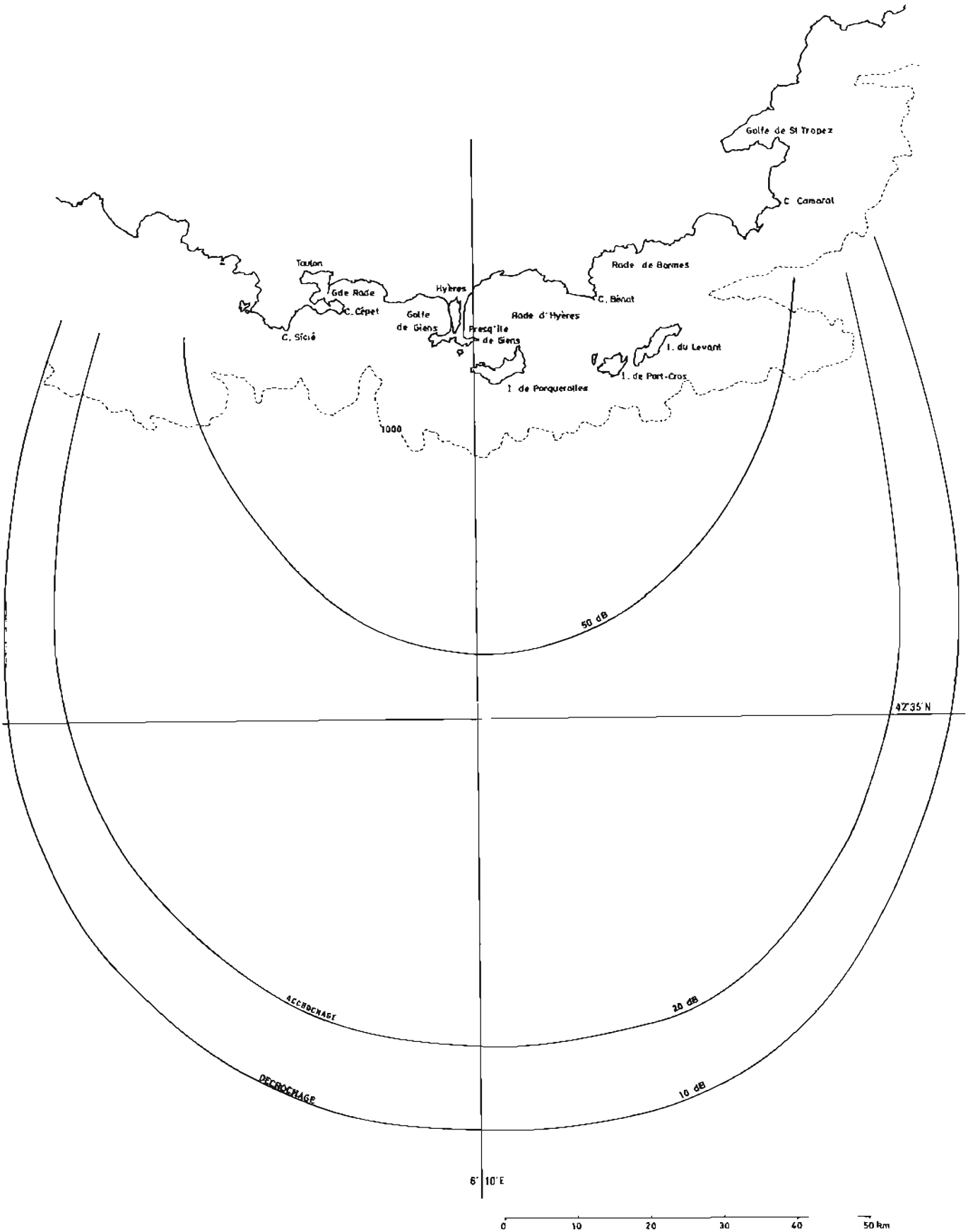


FIG. 18. — Limite de portée du réseau Syledis de Toulon

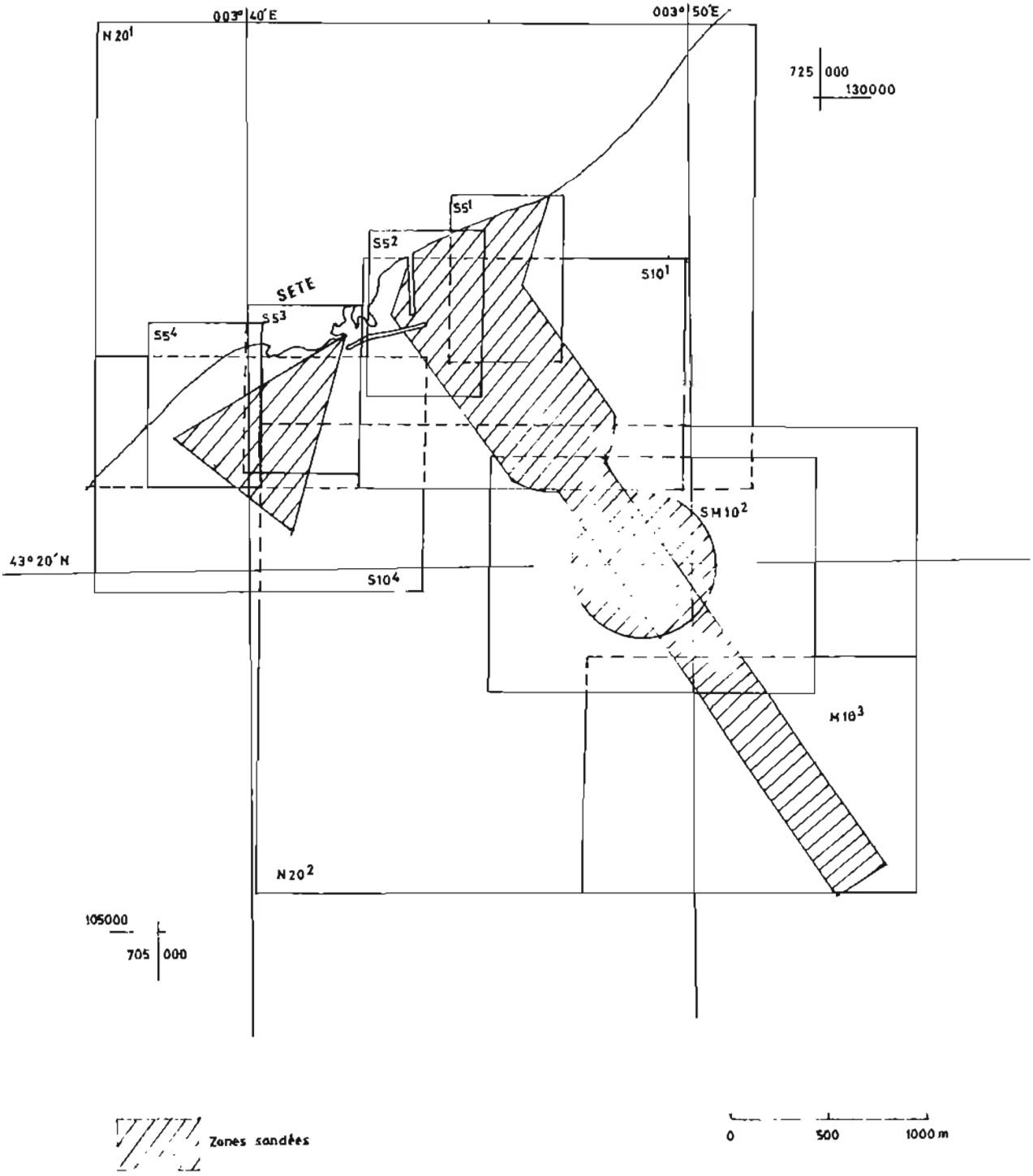


FIG. 19. — Accès au port de Sète : Schéma des coupures et des zones sondées

totale, cette dernière ayant été effectuée lors des campagnes évoquées au § 6.1.

Une investigation au magnétomètre fut effectuée par fonds supérieurs à 50 mètres selon des profils espacés de 200 mètres.

Une épave, fut détectée au Sud de la passe Est du port et investiguée par plongeurs.

13.3.2. L'Espiguette (voir figure 20)

Les recherches furent conduites comme à Sète au moyen du sondeur vertical et du sondeur latéral.

Aucune obstruction ne fut détectée.

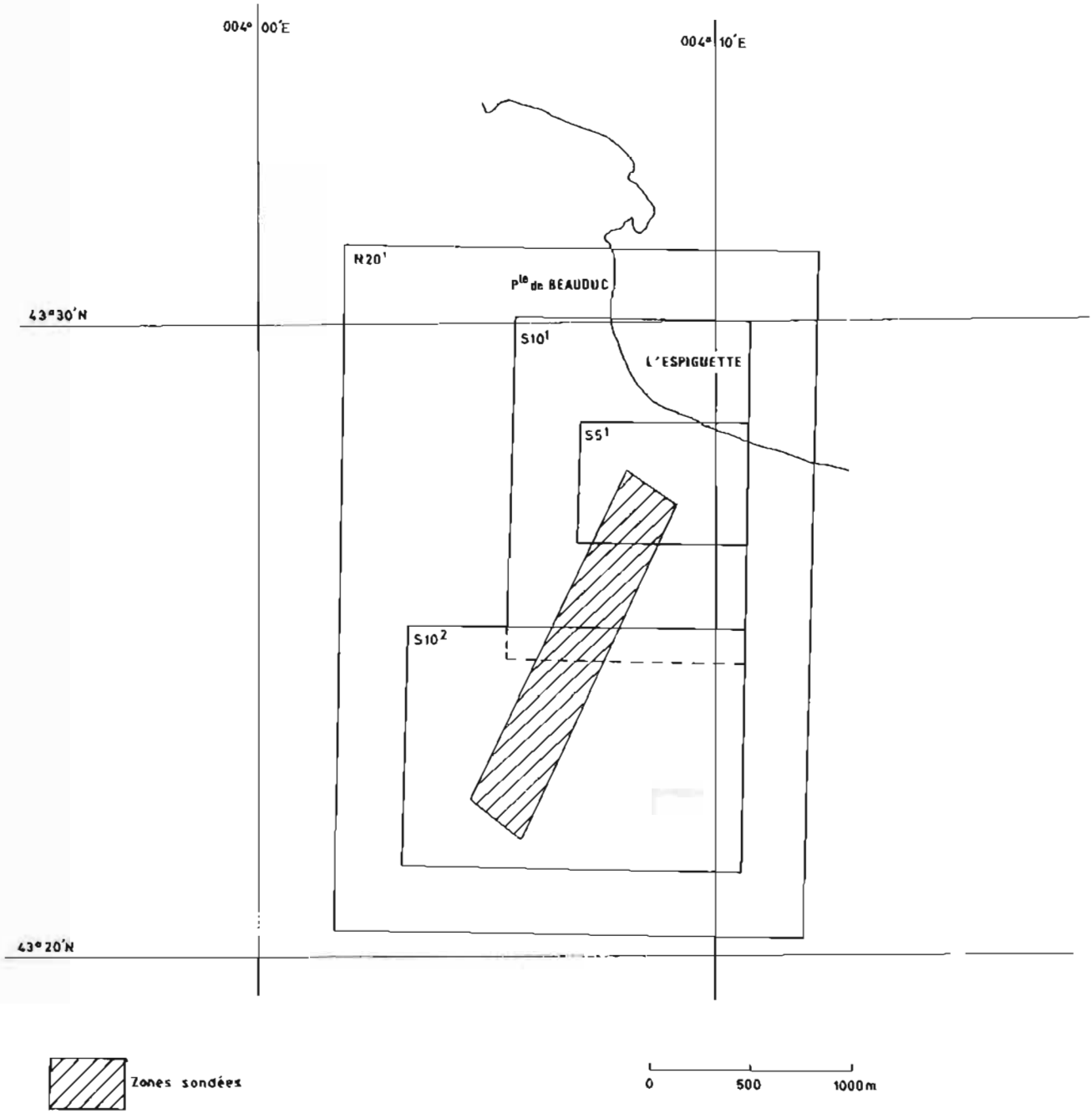


FIG. 20. — Accès au terminal pétrolier de l'Espiguette : Schéma des coupures et des zones sondées

13.4. Marée

Les sondes inférieures à 100 mètres furent corrigées de la marée observée à Sète.

L'observation de marée de Sète fait l'objet de la figure 21.

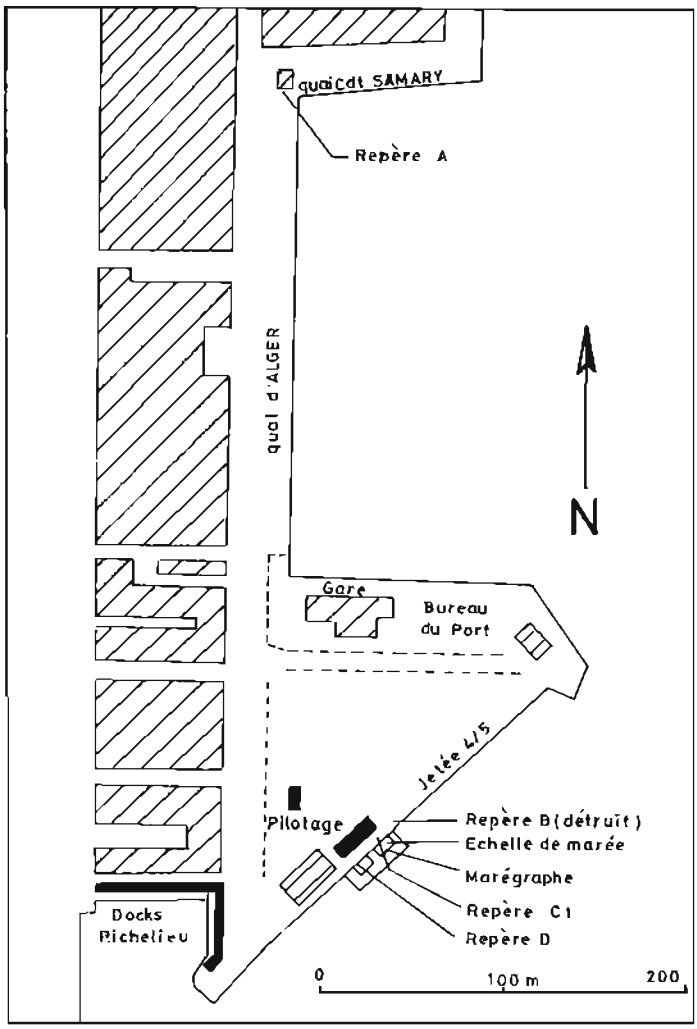
13.5. Natures de fond

Les natures de fond furent déterminées aux nœuds d'un carroyage à mailles rectangulaires de 1 000 à 1 500 mètres de côté.

Les distances résultaient d'un compromis entre les prescriptions des instructions techniques et les possibilités des moyens mis en œuvre, notamment à la suite de limitations de manœuvre imposées à *La Recherche*.

13.6. Mesures de courant

Des mesures de courant furent effectuées avec des courantomètres Suber aux stations définies au tableau 17.



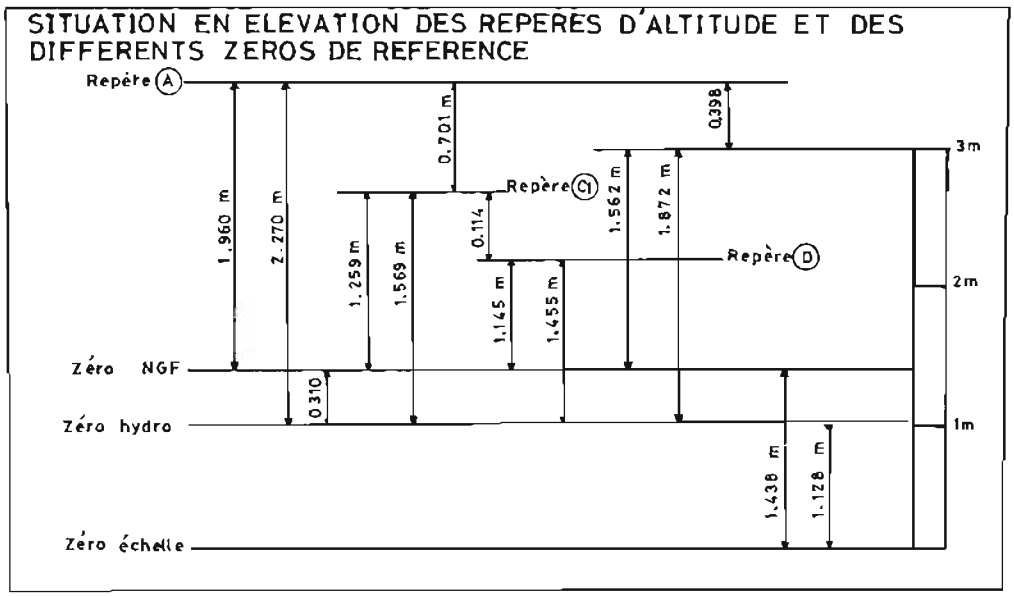


FIG. 21. — Observatoire de marée de Sète

TABLEAU 17

Caractéristiques des stations de courantométrie

Situation géographique (Lambert III-NTF)			Durée approx. (heures)	Immersion sous la surface
Nom de lieu	X	Y		
Passe Ouest de Sète	710 097	121 088	100	5 m
Passe Est de Sète	714 600	124 050	100	5 m
Bouée terminal Nord Sète	714 819	123 137	360	5 et 10 m
Bouée d'atterrissage Sète	726 336	107 227	360	5 et 10 m
Bouée d'exercice Sète	722 930	119 871	360	5 et 10 m
Bouée Sud l'Espiguette	745 857	129 594	144	5 et 10 m
Chenal de l'Espiguette	741 507	122 617	216	5 et 10 m

13.7. Information nautique

La région de Sète-l'Espiguette fut couverte par une revue de balisage flottant (cf § 15.1.3 ci-après) et par la mission de photographies obliques par hélicoptère (cf : chapitre 2).

La revue d'amers avait été exécutée précédemment, lors du levé ([13]) du golfe du Lion.

13.8. Documents établis

13.8.1. Sète

6 minutes de sondeur latéral S 10.1, S 10.2 et S 5.1 à S 5.4
1 minute de sondeur latéral et magnétométrie SM 10.3
1 minute de magnétométrie M 10.4
2 minutes de natures de fond N 20.1 et N 20.2
5 minutes de recherche sondeur latéral et/ou magnétométrie RS 5.2, RS 10.1, RS 10.2, RSM 10.3 et RM 10.4
1 fiche d'épave
12 dossiers de courantométrie
1 fiche de marée
3 fiches de balisage
1 fiche d'amer.

13.8.2. L'Espiguette

3 minutes de sondeur latéral BS 10.1, BS 10.2 et BS 5.1
1 minute de nature de fond N 20.1
4 dossiers de courantométrie.

14. SONDAGE AU LARGE DES ÎLES D'HYERES

14.1. Généralités

Le sondage de la zone de fortes pentes située au Sud des îles d'Hyères, et représentée à la figure 22, fut entrepris pour répondre à une demande du CTME.

C'est *La Recherche* qui exécuta ce levé, en plusieurs sorties étalées entre juillet 1983 et janvier 1984, pendant les périodes où les sites du Centre d'Essais de la Méditerranée (CEM) n'étaient pas occupés.

14.2. Localisation

14.2.1. La localisation fut assurée au moyen du système Trident III comportant trois balises fournies par le CEM et deux balises mises en œuvre par la MOM. Quelques visées optiques furent effectuées pour contrôler l'étalonnage de la chaîne. Par ailleurs, l'étude des résidus du calcul des points par moindres carrés confirma l'homogénéité du système.

14.2.2. La position des balises Trident est indiquée dans le tableau 18 (projection Lambert III, système NTF 69,70).

14.3. Bathymétrie

Les sondages furent conduits selon des profils rectilignes fournis par le système de traitement de données Hydrac.

L'espacement des profils est le suivant :
— 50 m pour les profondeurs inférieures à 100 m,
— 100 m pour les profondeurs comprises entre 100 et 700 m
— 200 m pour les profondeurs supérieures à 700 m.

Les résultats confirmèrent la carte marine 5329 sauf pour la sonde 484 m située en L = 42° 56,3′ N et G = 06° 20,5′ E qui n'existe pas.

Les profondeurs furent mesurées au moyen des sondeurs Atlas DESO 20 (version grands fonds) et Raytheon, réglés pour une célérité stantard du son de 1 500 m/s et non compensé de la houle.

Les quelques sondes inférieures à 100 mètres furent corrigées de la marée observée à Toulon.

([13]) *Annales Hydrographiques* N° 759, 1984, p. 140.

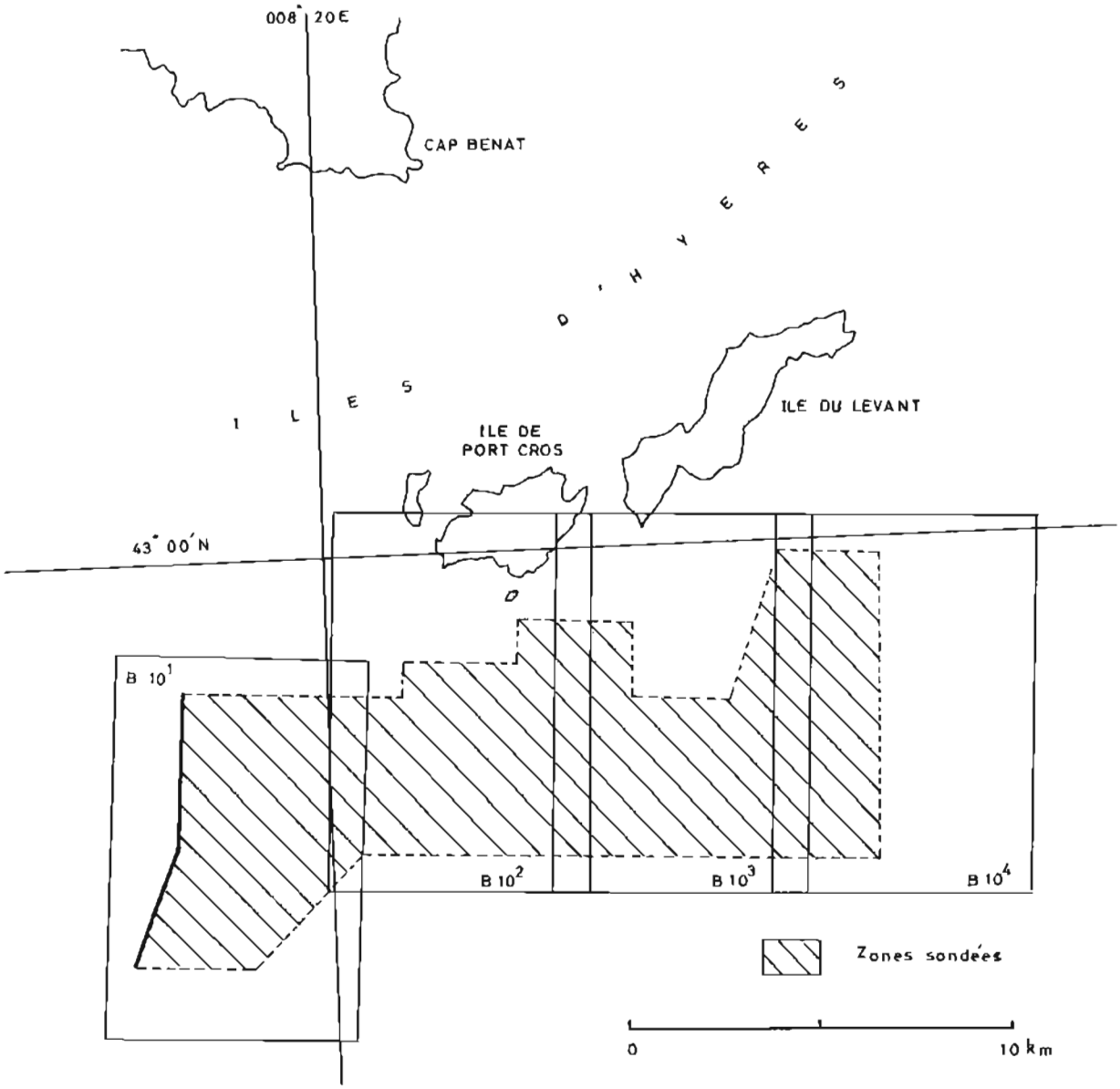


FIG. 22. — Sud des îles d'Hyères : Schéma des coupures et des zones sondées

TABLEAU 18

Position des balises Trident

Noms	X	Y	Z	Observations
Levant (Maupertuis)	934 363,00	87 112,00	110	CEM
Levant (Titan)	939 596,57	91 767,61	113	CEM
Port Cros (vigie)	931 298,47	85 854,27	195	CEM
Porquerolles (vigie)	931 238,34	84 719,97	125	MOM
Bénat (sémaphore)	927 277,03	96 012,40	187	MOM

Du fait des différences entre les lobes insonifiés, 8° et 30° respectivement à − 3 dB, on obtint par fortes pentes des résultats contradictoires entre les deux sondeurs.

Afin d'obtenir une bonne homogénéité sur les minutes de bathymétrie, seules les profondeurs les plus précises, mesurées au moyen du DESO 20 furent retenues.

Par ailleurs, on procéda comme pour les sondages en Corse (cf. § 1.4) à une analyse des écarts observés sur certains profils de vérification. Cette analyse figure en appendice 2.

14.4. Documents établis

4 minutes de bathymétrie B 10.1 à B 10.4
3 fiches géodésique

15. TRAVAUX DIVERS

15.1. Compléments de topographie dans le Roussillon

15.1.1. Généralités

La topographie côtière entre Valras et la frontière espagnole constitue le dernier volet du levé du golfe du Lion, exécuté à partir de 1980 sous les directions des ICA Thouin puis Habert.

Considérée comme un objectif secondaire, l'essentiel du levé ayant été achevé en 1983, elle fut poursuivie quand la disponibilité des moyens de la mission le permettait, avec le rendement médiocre qui caractérise les opérations menées sur le terrain par intermittence.

La rédaction s'appuya largement sur l'emploi du restituteur Stéréoflex, mais bénéficia dans la région du cap Béar d'une comparaison avec le Traster de l'Etablissement Principal.

15.1.2. Topographie (voir figure 23)

L'ensemble de la zone fut traité selon les méthodes habituelles de la MOM (cf. § 7.5), à

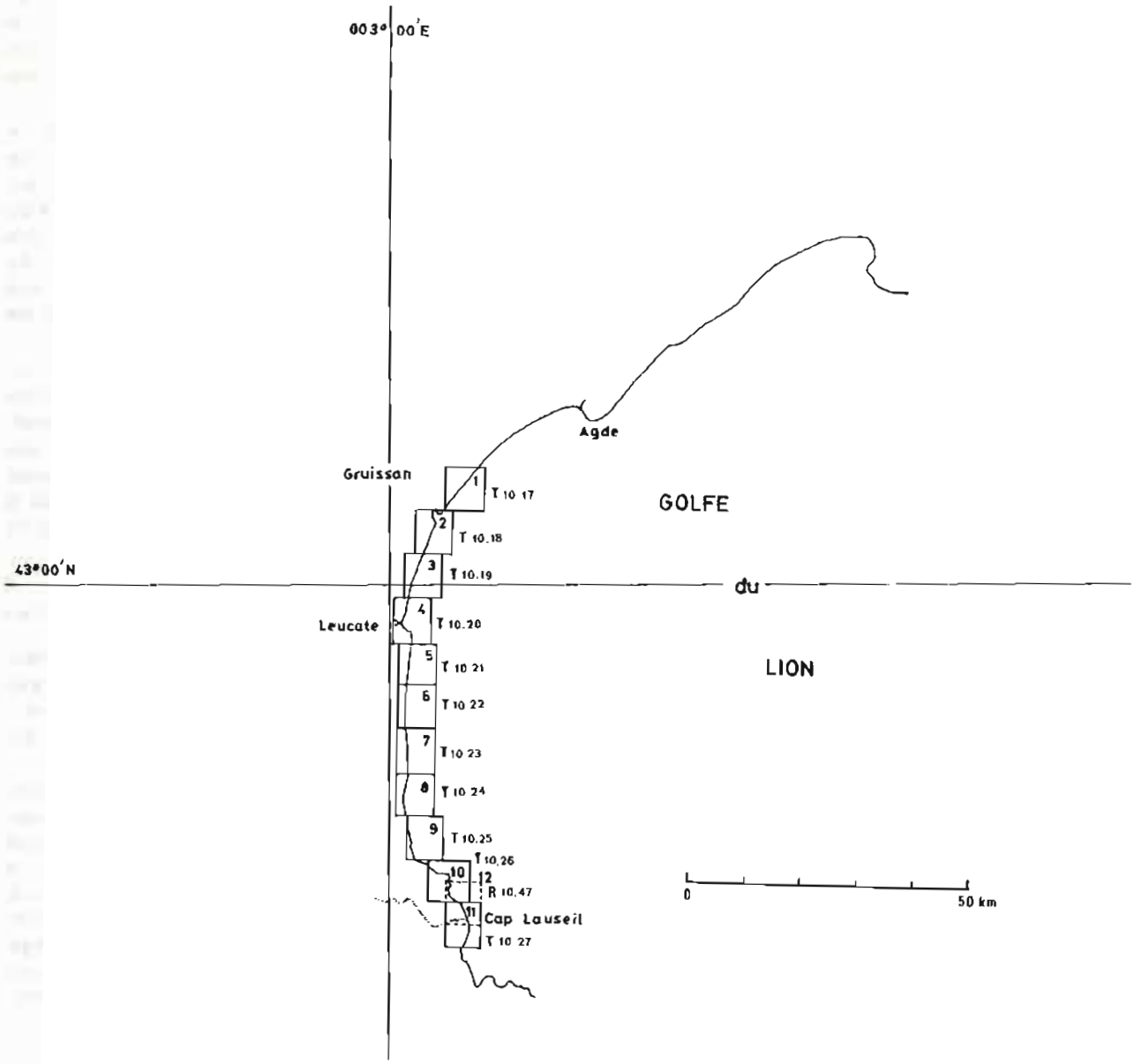


FIG. 23. — Roussillon : Schéma des coupures et de la côte topographiée

partir des couvertures 1977 et 1980 de l'IGN au 1/20 000.

L'EPSHOM procéda de son côté à une restitution, limitée à un couple de photographies, de la couverture 1982 de l'Inventaire Permanent du Littoral (IPLI).

Sauf dans la région du cap Béar, où l'insuffisance des points de calage pénalisa les minutes traditionnelles et où l'écart maximum atteint 1,5 mm, soit 15 mètres sur le terrain, la comparaison démontra la cohérence des documents entre eux et la validité des procédures en vigueur à la MOM, avec lesquelles on assure partout une précision planimétrique meilleure que 10 mètres au voisinage de plan neutre.

Elle confirma également la valeur du Traster qui permet de supprimer la phase de restitution au Stéréoflex, et d'alléger sensiblement les travaux de cotation de roches découvrantes ainsi que la préparation terrain.

Sauf quand on dispose de photographies de très bonne qualité — ce qui n'était pas le cas — l'emploi du stéréorestituteur analytique ne réduit pas cependant la charge représentée par la cotation des roches submergées : deux d'entre elles seulement parmi les quarante deux figurant sur les minutes traditionnelles purent être représentées avec leur cotation.

La méthode traditionnelle conserve donc son intérêt, même s'il faut pour une précision égale lui consacrer un potentiel plus important, car elle confère aux travaux une souplesse et une indépendance que le programme chargé du Traster n'est pas toujours en mesure d'égaler.

15.1.3. Travaux de complément

Une enquête de toponymie, dont les résultats ont été consignés sur les minutes de topographie, fut conduite entre Port-la-Nouvelle et la frontière espagnole.

La revue d'amers entre Gruissan et la frontière espagnole, que M. Habert n'avait pu entreprendre ([14]) fut menée à son terme, ainsi que la revue de balisage qui lui correspondait.

15.1.4. Documents établis

11 minutes de topographie T 10.17 à T 10.27
1 minute de recherche R 10.47
94 fiches géodésique, d'amer ou de marque de balisage.

([14]) *Annales Hydrographiques* n° 759 — 1984 p. 140.

15.2. Etablissement de documents cartographiques

La MOM eut à deux reprises l'occasion de dépasser le niveau de l'exploitation primaire des levés à la mer, et de participer à l'élaboration de documents s'approchant des cartes marines définitives.

La première occasion fut donnée par l'envoi d'une force navale au large du Liban, pour laquelle il fallut dresser rapidement un document de synthèse plus complet que la carte en service.

La seconde concernait la préparation d'une carte destinée à la navigation de plaisance sur l'Etang de Thau.

15.2.1. Document cartographique des abords de Beyrouth à Jounié

Pour répondre aux besoins du Groupe Olifant, dont l'activité lors de l'hiver 83-84 fut régulièrement décrite par la presse de l'époque, il fut décidé d'établir un plan rassemblant toutes les données cartographiques disponibles sur les côtes du Liban, entre Beyrouth et Jounié.

Ce document fut dressé par compilation de cartes françaises et américaines, des cartes de l'IGN, des coupures GEBCO, des photographies panoramiques prises à partir des postes à terre ou des passerelles des bâtiments de combat, des images radar enfin et des schémas réalisés par ces mêmes bâtiments. Il était accompagné d'une notice explicative comportant une procédure de recueil de renseignements sur zone.

Il avait été convenu que les unités engagées sur le théatre des opérations du Liban en recevraient une nouvelle édition après chaque mise à jour, comme cela se pratique pour la documentation aéronautique, mais cette mesure ne fut appliquée qu'une fois, car le Groupe Olifant fut conduit à opérer plus loin des côtes et la demande se fit moins pressante.

15.2.2. Projet cartographique pour l'Etang de Thau

L'Etang de Thau avait été sondé sous la direction de M. Habert en 1983, mais il avait été prévu de s'intéresser davantage aux besoins des pratiques en réalisant un projet cartographique qui tienne mieux compte de leurs aspirations.

Une enquête ayant montré qu'il fallait compléter les sondages d'une cartographie des principaux ports utilisés pour la plaisance, un projet constitué de deux cartes en format A1, l'une relative à l'étang, l'autre aux ports de plaisance, fut établi à partir des données du levé régulier, complétées d'informations relatives au balisage, aux sondages dans les canaux et les concessions portuaires, à la topographie détaillée et à l'information nautique en général.

Les informations manquantes furent recueillies par des équipes itinérantes et recoupées d'après des photos prises par Alouette II.

Sur la pseudo-carte marine ainsi dressée, l'Etang de Thau fut représenté à l'échelle 1/25 000, le port de Sète et les voies navigables au 1/10 000, les ports de plaisance au 1/5 000.

Outre la valeur d'estime qu'il représenta pour ses réalisateurs immédiats, l'établissement du projet cartographique de l'Etang de Thau permit de mesurer les difficultés qu'il faut surmonter pour passer d'un levé hydrographique standard à un document utilisable pour la navigation.

15.3. Concours aux autorités locales

Les principaux concours accordés par le Département aux autorités civiles ou militaires de la région furent les suivants :

— Mise à disposition de matériel Trident ou de petits équipements spécifiques à divers organismes de la Défense.

— Assistance à l'Université de Toulon pour l'enseignement de la maîtrise Sciences et Techniques de la Mer.

Ce concours annuel assez contraignant, mais souhaité par PREMAR III, comportait notamment la conduite d'une série de travaux pratiques par un officier marinier hydrographe.

— Sondage de l'appontement St Joseph, à Ajaccio, pour le compte de la marine en Corse.

— Reconnaissances géodésiques, localisations, triangulations de faible importance pour l'ECAN St Tropez, la DCAN Toulon (système PARC ERIC), le GISMER, le service des transmissions du littoral (réseau Syledis mobile).

— Recherche d'un haut-fond douteux au large de Sète sur demande de PREMAR III.

— Achèvement des mesures de courant commencées par M. Habert au Larvotto, dans la Principauté de Monaco.

15.4. Essais de matériels

Il fut procédé à l'évaluation des matériels énumérés ci-après :

— Théodolite T 2000 et distancemètre DI 20 associé

— Transducteur d'étalonnage Atlas SW 6026 A 003

— Emetteur-récepteur portatif Motorola

— Système Trident III A, émettant à la fréquence 1200 MHz

— Module d'acquisition Hydrac pour vedettes, en soutien de l'EPSHOM.

Tous ces essais firent l'objet de comptes rendus succincts à usage interne.

APPENDICE 1

Signification des sigles et abréviations rencontrés dans le texte

Ah : Ampère/heure
BSR : Bâtiment de soutien de région
BH1 : Bâtiment hydrographique de 1ère classe
CA : Contre-Amiral
CEM : Centre d'Essais de la Méditerranée
CM : Carte marine
CTME : Centre des techniques et moyens de mesure et d'essais
CV : Capitaine de Vaisseau
DESO 10 : Sondeur Atlas pour petits fonds
DESO 20 : Sondeur Atlas pour petits fonds, nouveau modèle
DCAN : Direction des Constructions et Armes Navales
DP : Direction du Port
ECAN : Etablissement des Constructions et Armes Navales
EOR : Elève officier de réserve
EPSHOM : Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
FLOMED : Flottille de Méditerranée
GEBCO : Carte Bathymétrique Générale des Océans
GISMER : Groupe d'intervention sous la mer
HP : Hewlett Packard
IETA : Ingénieur des Etudes et Techniques d'Armement
IGN : Institut Géographique National
IPA : Ingénieur Principal de l'Armement
IPER : Indisponibilité périodique
IPLI : Inventaire Permanent du Littoral
LV (S) : Lieutenant de Vaisseau (spécialisé)
MOM : Mission Océanographique de Méditerranée
MP : Maître Principal
NGC : Nivellement général de la Corse
NTF : Nouvelle triangulation française
OMH : Officier marinier hydrographe
OT1 : Officier technicien de 1ère classe
PREMAR III : Préfet Maritime de la IIIe Région
TCT : Technicien Chef de Travaux
TSO : Technicien à statut ouvrier
SOM : Société d'optique et de mécanique de haute précision
23 S : 23e escadrille de servitude

APPENDICE 2

Etude des écarts de mesure lors des sondages par fortes pentes

1. RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE

A l'époque où *La Recherche* avait été amenée à sonder la chute du plateau continental, en Provence puis en Corse, des différences de l'ordre de 5 à 10 % sur les profondeurs mesurées en un même point furent constatées quand se trouvait réalisée l'une des conditions suivantes :

— sondage d'un même profil à deux dates différentes

— intersection du sondage régulier avec les profils de vérification

— mesure d'un même profil avec deux sondeurs d'ouverture différente

— recouvrement avec un levé ancien.

Lorsqu'une anomalie se présentait, les profondeurs mesurées avaient toutes en commun qu'elles étaient concordantes par fond plat et d'autant plus divergentes que la pente était forte.

Les sondages au Sud des îles d'Hyères se prêtèrent à une analyse a posteriori des sources d'erreur et conclurent à l'influence probable d'une inclinaison de l'axe du pinceau du sondeur, par suite d'un changement d'assiette de *La Recherche*.

Pour vérifier cette hypothèse, on profita d'une période de calme plat, en Corse, pour créer artificiellement des conditions favorables à l'apparition de tels écarts, en imposant au navire des angles de gîte par déplacement de charges d'un bord à l'autre.

Cette opération confirma que tout se passait bien comme dans la théorie, et qu'il convenait d'accorder beaucoup d'importance à la gîte, lors des sondages à partir d'un bâtiment à faible couple de redressement.

2. ANALYSE DES CAUSES D'ERREUR

2.1. Paramètres du sondage

La Recherche sondait le talus situé au Sud des îles d'Hyères à la vitesse de 10 nœuds.

La pente des fonds était 33° dans la zone étudiée; la pente apparente P à la route suivie était 25°.

Les caractéristiques acoustiques des deux sondeurs grands fonds utilisés sont indiquées au tableau 19.

TABLEAU 19

Sondeur	Fréquence (kHz)	Demi-angle au sommet du pinceau (atténuation – 3 dB)
Raytheon	12	15°
DESO 20	33	4°

Aucun des deux sondeurs n'était relié au compensateur de houle. Un dispositif d'atténuation du roulis par contrôle de phase est prévu sur le DESO 20.

2.2. Erreurs systématiques applicables à un sondeur donné (DESO 20)

2.2.1. Mesure de temps

Une dérive de l'oscillateur des sondeurs peut être écartée, puisque les mesures sont cohérentes par fond plat. Par ailleurs, les deux sondeurs étaient réglés pour une même célérité du son de 1 500 m/s.

2.2.2. Ecartement transducteur-antenne Trident

La projection de construction rapporte la position du sondeur à celle de l'antenne Trident, or ces deux éléments sont distants de 14,5 mètres à bord de *La Recherche*.

L'erreur Δz, commise sur les profondeurs en un même point et à deux caps opposés est égale à $2\Delta L \tan p$ (fig. 24).

Cette omission fut rectifiée dans les traitements de localisation qui suivirent.

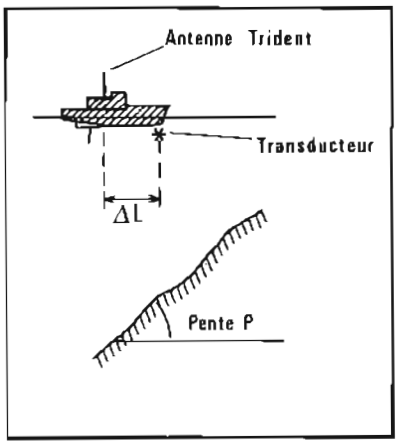


FIG. 24

2.2.3. Déplacement du bâtiment entre l'émission et la réception de l'écho

L'écho reçu à l'instant T a été émis à T − ΔT. Pendant l'intervalle de temps ΔT, *La Recherche* a parcouru la distance V. ΔT.

L'erreur ΔZ2 commise en un même point à deux caps opposés est égale 2.V. ΔT. tan *p* (fig. 25).

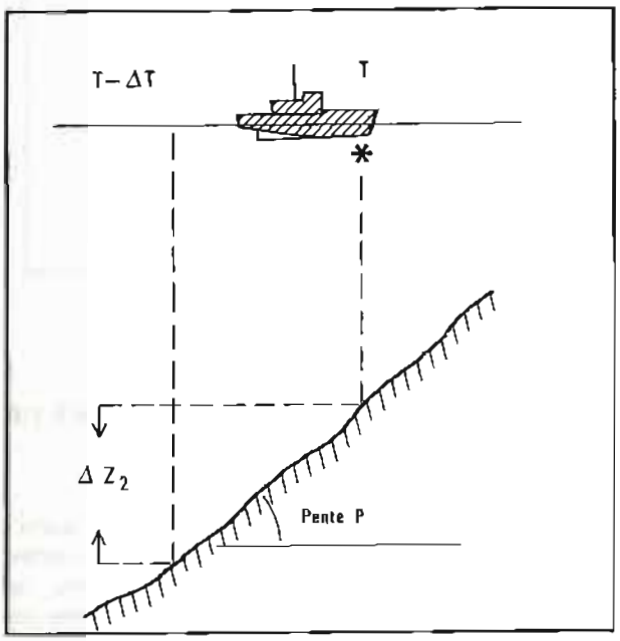


FIG. 25

2.2.4. Marée

Erreur négligeable en Méditerranée

2.2.5. Célérité du son

La Méditerranée est pratiquement isocélère à partir de 100 mètres. Les conditions extrêmes observées dans un atlas d'océanographie permettent de fixer à 2 mètres le majorant Z3 de l'erreur commise, quelle que soit l'époque du sondage.

2.2.6. Application numérique (DESO 20)

Les intersections des profils de vérification et du sondage régulier d'une part, les profils repris deux fois à des époques différentes d'autre part, fournissent pour chaque point caractéristique du fond des couples de sondes distinctes et d'autant plus divergentes que la profondeur est grande.

Les couples correspondant aux profondeurs voisines de 1 000 et 1 500 mètres ont été portés dans le tableau 20.

On a écrit dans la colonne A les profondeurs lues sur les bandes de sonde où des valeurs sont les plus grandes, et dans la colonne C celles des points homologues correspondant à des profondeurs apparentes moindres.

TABLEAU 20
Profondeurs observées et corrigées

A	Corrections			B	C
	Δz1	Δz2	Δz3		
1 000 m	− 13	+ 6	− 2	991 m	970 m
1 500 m	− 13	+ 9	− 2	1 494 m	1 450 m

Les écarts systématiques résultant des hypothèses mentionnées au § 2.2 à 2.2.5 ci-dessus ont été appliqués à la colonne A. On constate que les profondeurs corrigées, portées dans la colonne B, sont encore très distinctes de celles de la colonne C, et que la correction ne permet pas d'expliquer les écarts observés.

2.3. Erreurs imputables au pinceau insonifié

2.3.1. Inclinaison de l'axe du pinceau

Sur le schéma de la figure 26, on voit que la profondeur mesurée est affectée par une inclinaison permanente α de l'axe du transducteur, pour peu que la somme de cette inclinaison et du demi-angle au sommet du pinceau soit inférieure à la pente.

En appelant *z* la profondeur observée, Z la profondeur nominale et R l'angle formé par la route du bâtiment avec la direction des isobathes, on peut écrire les relations suivantes :

1er cas ($\theta + \alpha \cos R > p$)

$Z \simeq Z \cos p$ (pas d'influence de la gîte)

2e cas ($\theta + \alpha \cos R < p$)

$$z \simeq \frac{Z}{\cos(\theta+\alpha \cos R)+\sin(\theta+\alpha \cos R)\tan p}$$

On a représenté au tableau 21 quelques valeurs montrant l'influence d'une gîte permanente de ± 5° sur les profondeurs mesurées, pour les pentes rencontrées au Sud des îles d'Hyères.

TABLEAU 21
Profondeurs théoriques pour différents angles de gîte
(unité = le mètre)

Z profondeur nominale	Angle de gîte					
	− 5°	0°	+ 5°	− 5°	0°	+ 5°
1 000	992	959	931	900	882	867
1 500	1 488	1 438	1 397	1 350	1 323	1 301
	sondeur DESO 20 (θ = 4°)			sondeur Raytheon (θ = 15°)		

Les ordres de grandeur calculés par ce procédé élémentaire correspondent bien à ce qui a été observé.

Une inclinaison du transducteur selon une longue période peut avoir les origines suivantes :

— erreur de montage : ce type de défaut est

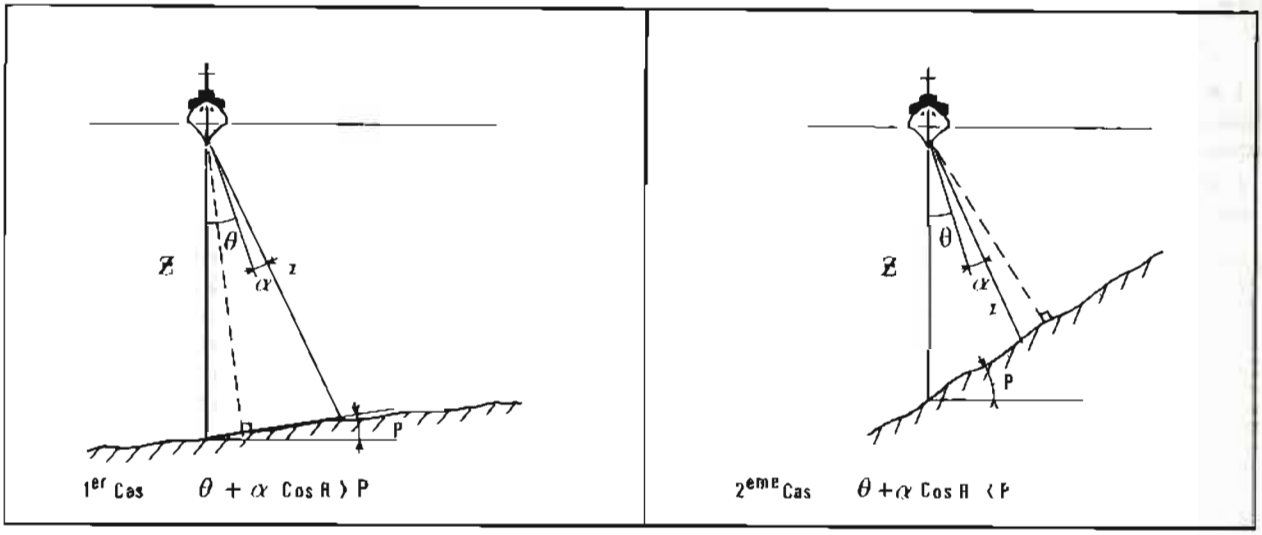


FIG. 26

estimé très improbable par les services qui procèdent aux installations des sondeurs
— variation de l'assiette du bâtiment à deux caps inverses
— gîte systématique du bâtiment sous l'action du vent :

Il est possible que les écarts observés résultent d'une combinaison de ces trois facteurs, mais les deux premiers doivent être faibles, car ils devraient conduire systématiquement à l'apparition de doigts de gants dès que le bâtiment sonde à un cap inverse. Or ce n'est pas le cas : les sondages effectués dans une même direction sont cohérents à une époque donnée, quel que soit le sens du parcours. Les écarts apparaissent quand la direction des profils change (profils de vérification) et surtout quand on compare des profils effectués à des époques différentes.

L'examen des conditions météorologiques confirma que le vent aux périodes incriminées soufflait dans des directions opposées. *La Recherche,* dont le faible couple de redressement est bien connu, est particulièrement sensible à l'effet du vent : la gîte atteint couramment 5° quand celui-ci souffle fortement du travers.

2.3.2. Type de sondeur

La lecture du tableau 21 montre qu'aucune comparaison n'est possible quand l'ouverture des princeaux insonifiés est différente. Par forte pente, le DESO 20 d'une part, le Raytheon ou l'Ocean Sonic utilisé par l'*Origny* de 1969 à 1974 d'autre part, ne mesurent pas la même chose.

L'ordre de grandeur des écarts théoriques calculés est tout à fait compatible avec les différences observées sur les minutes ou les bandes de sonde. Au Sud de l'île du Levant, ces dernières dépassaient 100 mètres par fonds de 1 500 m.

3. SONDAGES AVEC DIFFÉRENTS ANGLES DE GÎTE CRÉÉS ARTIFICIELLEMENT

L'analyse précédente conclut à la prédominance de la gîte sur toutes les autres sources d'erreurs affectant les sondages, mais elle ne s'appuie encore sur aucune mesure réelle de ce paramètre.

Afin de vérifier expérimentalement cette hypothèse, on profita d'une période de grand beau temps pour poursuivre l'étude sur le talus continental au Sud-Ouest de la Corse, en imposant artificiellement à *La Recherche* différents angles de gîte.

3.1. Conditions de l'expérimentation

Météorologie : Vent, mer et houle nuls

Région concernée : Ouest du golfe de Valinco, par des fonds compris entre 500 et 1 200 mètres et des pentes de plus de 20°.

Localisation : Système de suivi de profil assurant une précision moyenne de trois mètres.

Vitesse : Comprise entre 8,5 et 9,5 nœuds.

Sondeur : Raytheon 34 kHz.
Angle d'ouverture du pinceau à -3 dB : $2\theta = 10° \pm 2°$
Le sondeur DESO 20 avait été stoppé pour éviter les interférences.

Gîte : Mesurée au moyen du pendule de passerelle.
Créée par déplacement d'une vedette d'un bord à l'autre, brassage extérieur d'un bossoir et mouvements d'eau dans les ballasts.

TABLEAU 22

N° du Profil	Route	Gite	Site de l'axe du pinceau (repère absolu)
1	345° (Perpendiculaire aux courbes de niveau)	0°	90°
2	165° (Perpendiculaire aux courbes de niveau)	0°	90°
3	250° (Parallèle aux courbes de niveau)	0°	90°
4	70° (Parallèle aux courbes de niveau)	5,5°	95,5°
5	250° (Parallèle aux courbes de niveau)	5,5°	84,5°

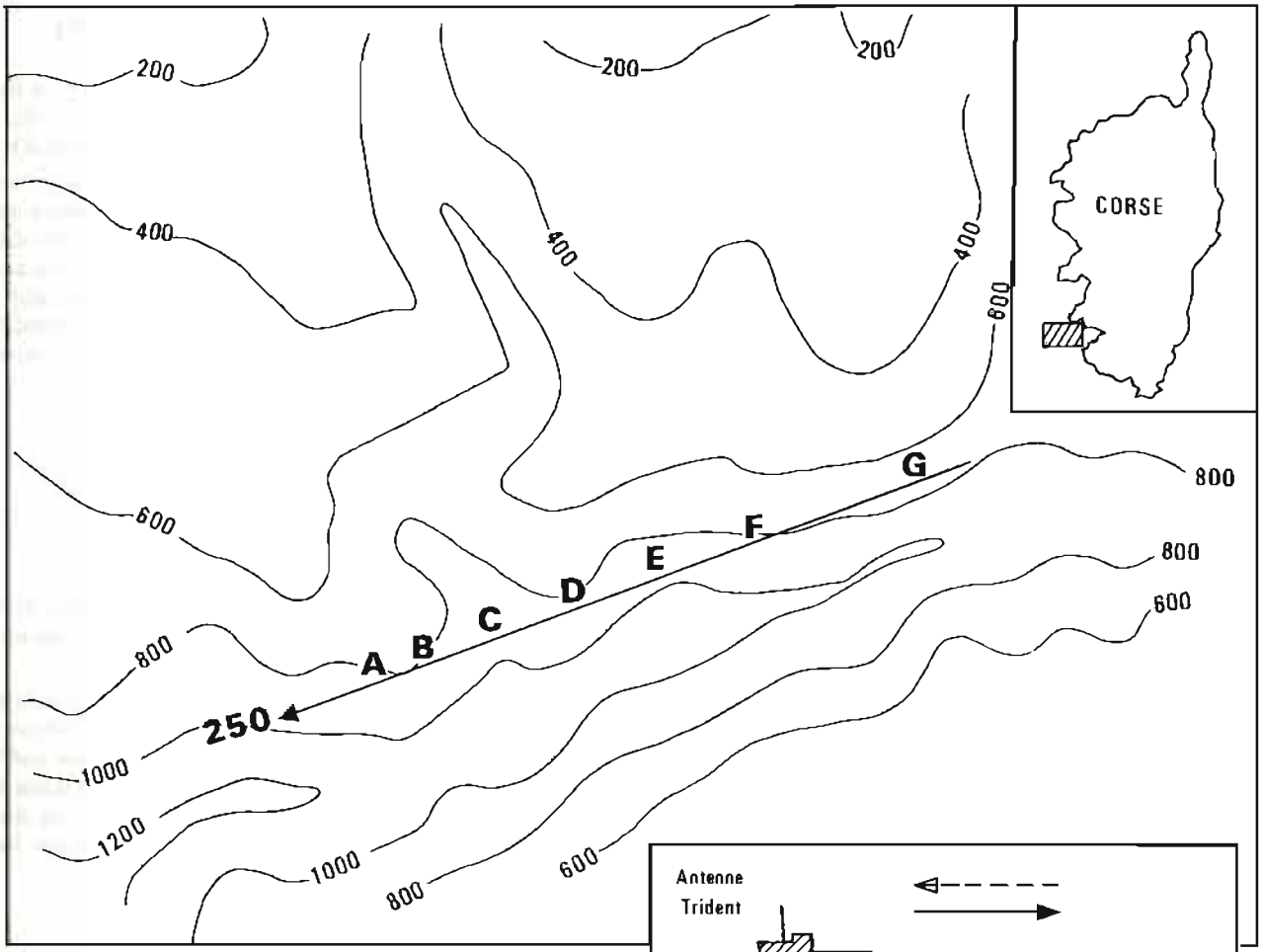


FIG. 28. — Golfe de Valinco : Zone d'expérimentation

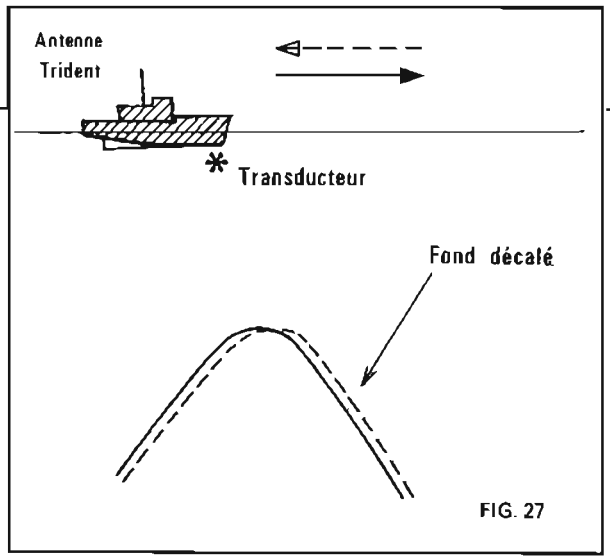


FIG. 27

Profils suivis : Voir tableau 22 et figure 28
Les profils 1 et 2 d'une part, 3, 4 et 5 d'autre part, sont confondus.

3.2. Constatations effectuées

3.2.1. Profils perpendiculaires aux courbes de niveau

Les enregistrements correspondant aux profils 1 et 2 sont pratiquement superposables.

Les cotes des minima et des maxima sont identiques; par contre on observe (voir fig. 27) le très léger décalage longitudinal induit par l'écartement transducteur-antenne Trident, et par le déplacement du bâtiment entre l'émission et la réception de l'écho (cf. § 2.2.2. et 2.2.3.).

Ce décalage est trop faible pour donner lieu à des mesures significatives.

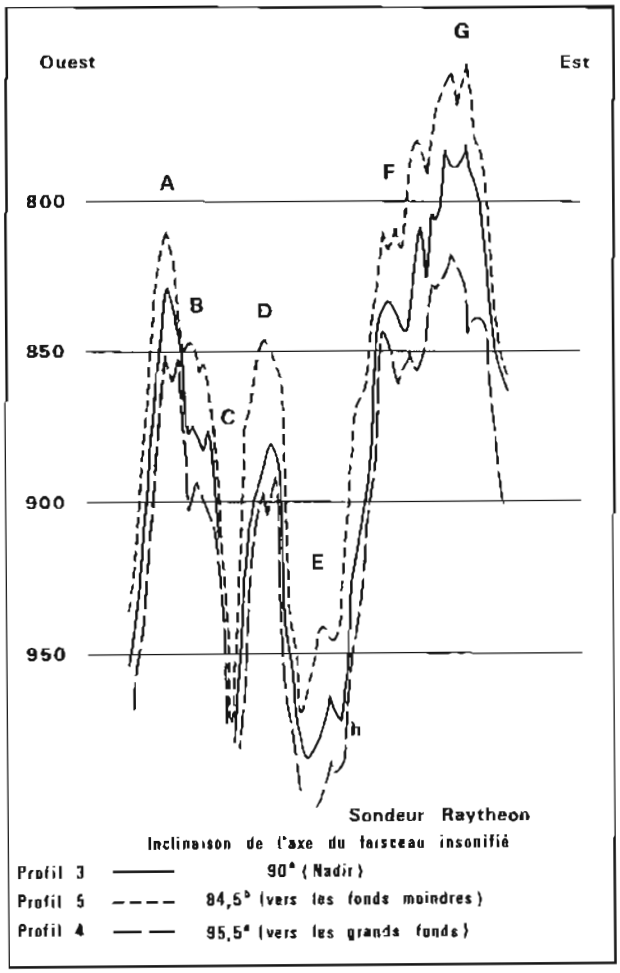


FIG. 29

3.2.2. Profils parallèles aux courbes de niveau (voir figure 28)

Bien que la reproduction des bandes de sonde figurant à la figure 29 traduise imparfaitement les diverses nuances des enregistrements originaux, on observe un décalage très net entre les profils 3, 4 et 5.

Les écarts approximatifs observés aux points caractéristiques, sur les profils 4 et 5 parcourus avec des angles de gîte d'effets opposés atteignent plusieurs dizaines de mètres.

3.3. Application numérique (voir figure 29)

La formule théorique énoncée au § 2.3.1. a été appliquée aux points caractéristiques des profils 4 et 5. Les résultats du calcul sont au tableau 23.

Compte tenu de l'imprécision du dépouillement et de l'appréciation de la pente, la corrélation est significative. On observe bien ce qui semble évident dans la théorie, à savoir que l'inclinaison du sondeur, plus que tout autre paramètre, est à l'origine des variations apparentes des profondeurs mesurées quand les fonds sont très accidentés.

4. CONCLUSION

L'expérience simple conduite avec le seul sondeur Raytheon montre l'importance de la gîte lors des sondages par fortes pentes.

Il convient de noter sa valeur avec les autres paramètres du sondage, afin de procéder sinon à une correction — faute d'une connaissance suffisamment rigoureuse des éléments entrant dans la formule théorique — du moins à un contrôle des ordres de grandeurs des écarts rencontrés sur les profils de vérification.

TABLEAU 23

Points caractéristiques	Profondeur mesurée sur le profil 3 (m)	Pente en degrés mesurée sur les minutes	Ecart théorique (m)	Ecart observé (m)
A	825	25	58	48
B	875	25	62	61
C	Echo diffus — Pente trop forte			
D	875	22	52	48
E	980	23	62	49
F	825	20	43	30
G	780	27	61	65

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
Publications scientifiques et littéraires
05002 GAP — Tél. . 92.51 35 23
Dépôt légal : 304 — Juin 1987

AVIS AUX AUTEURS

Les auteurs sont priés de se conformer aux indications suivantes :

Texte

1) Les manuscrits doivent être remis dactylographiés de préférence avec double interligne et sur le recto seulement de feuilles format 21 × 29,7 cm.

2) Les noms propres doivent être écrits en capitales ou soulignés d'un double trait; les noms des espèces animales et végétales ainsi que les noms de navires doivent être soulignés d'un trait.

3) Le titre de l'article ou de la communication doit être suivi du prénom usuel et du nom du ou des auteurs; il doit comporter ensuite l'indication du laboratoire ou de l'institution d'origine.

4) Les articles doivent être accompagnés d'un résumé en français, et si possible d'un résumé en anglais.

5) Les références bibliographiques seront groupées à la fin du manuscrit; elles seront classées dans l'ordre d'apparition dans le texte. Ces références comporteront : nom de l'auteur, initiales des prénoms, date, titre complet de l'article, titre du périodique abrégé selon les règles internationales, volume, pagination complète.

6) Les manuscrits dactylographiés et les planches ne doivent pas excéder 25 pages.

Illustration

1) Les dessins doivent être exécutés à l'encre de Chine sur papier calque de préférence, sinon sur bristol ou carte grattage (les tirages Ozalid, photocopies ou tout autre moyen de reproduction ne peuvent être acceptés).

2) Ils doivent être envoyés roulés ou à plat, mais jamais pliés.

3) Ils peuvent être présentés à grande échelle; des réductions, exécutées par l'atelier de photographie, les ramèneront au format exigé de la publication : 16,5 × 25 cm; ils ne devront en aucun cas être présentés à une échelle nécessitant un agrandissement. Lettres et chiffres seront écrits soigneusement et suffisamment grands pour qu'ils demeurent facilement lisibles une fois la réduction effectuée. Il est demandé de tenir compte dans la préparation des planches de la présentation du texte sur deux colonnes.

4) Pour les cartes et plans, il convient de faire figurer une échelle linéaire dont l'unité de mesure sera évidemment indiquée, et de ne pas mentionner d'échelle numérique susceptible d'être modifiée par réduction du cliché.

Tirés à la suite

Les auteurs d'une même communication reçoivent collectivement vingt-cinq exemplaires de leur article. Les tirés à la suite supplémentaires doivent être commandés à l'envoi du manuscrit en précisant le nombre d'exemplaires ainsi que l'adresse à laquelle doivent être envoyées les factures.

SOMMAIRE

Première partie

Pages

Etude analytique d'un modèle des marées littorales à l'aide des multiplicités bicaractéristiques. Troisième partie (A) : étude qualitative de singularités a priori rencontrées au voisinage de la frontière côtière. Application aux baies et aux caps, par MM. Y. BIOLLAY, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne (Suisse) et J. KRAVTCHENKO, Université Scientifique et Médicale, Grenoble 5

Localisation d'un avion au cours de missions photoaériennes, par MM. J.M. CHIMOT et M. LE GOUIC, Ingénieurs Principaux de l'Armement (Hydrographe) 33

Partie 1. — Choix d'un modèle d'évolution à court terme de la couche de mélange océanique, par M. J. SAUVEL, Ingénieur de l'Armement (Hydrographe) 41

Partie 2. — Test sur une utilisation opérationnelle simple d'un modèle d'évolution à court terme de la couche de mélange océanique, par M. J. SAUVEL, Ingénieur de l'Armement (Hydrographe)..... 49

Partie 3. — Echelles temporelles et verticales pour la température et pour ses variations à court terme au point P (50° N, 145° W) par M. J. SAUVEL, Ingénieur de l'Armement (Hydrographe)..... 57

Deuxième partie

Mission Océanographique du Pacifique (1er octobre 1982 — 30 avril 1984) par M. J.P. THOUIN, Ingénieur en Chef de l'Armement (Hydrographe) 69

Mission Océanographique de Méditerranée (14 octobre 1983 — 7 octobre 1985) par M. J. LAPORTE, Ingénieur Principal de l'Armement (Hydrographe) 131

ISSN 0373-3629