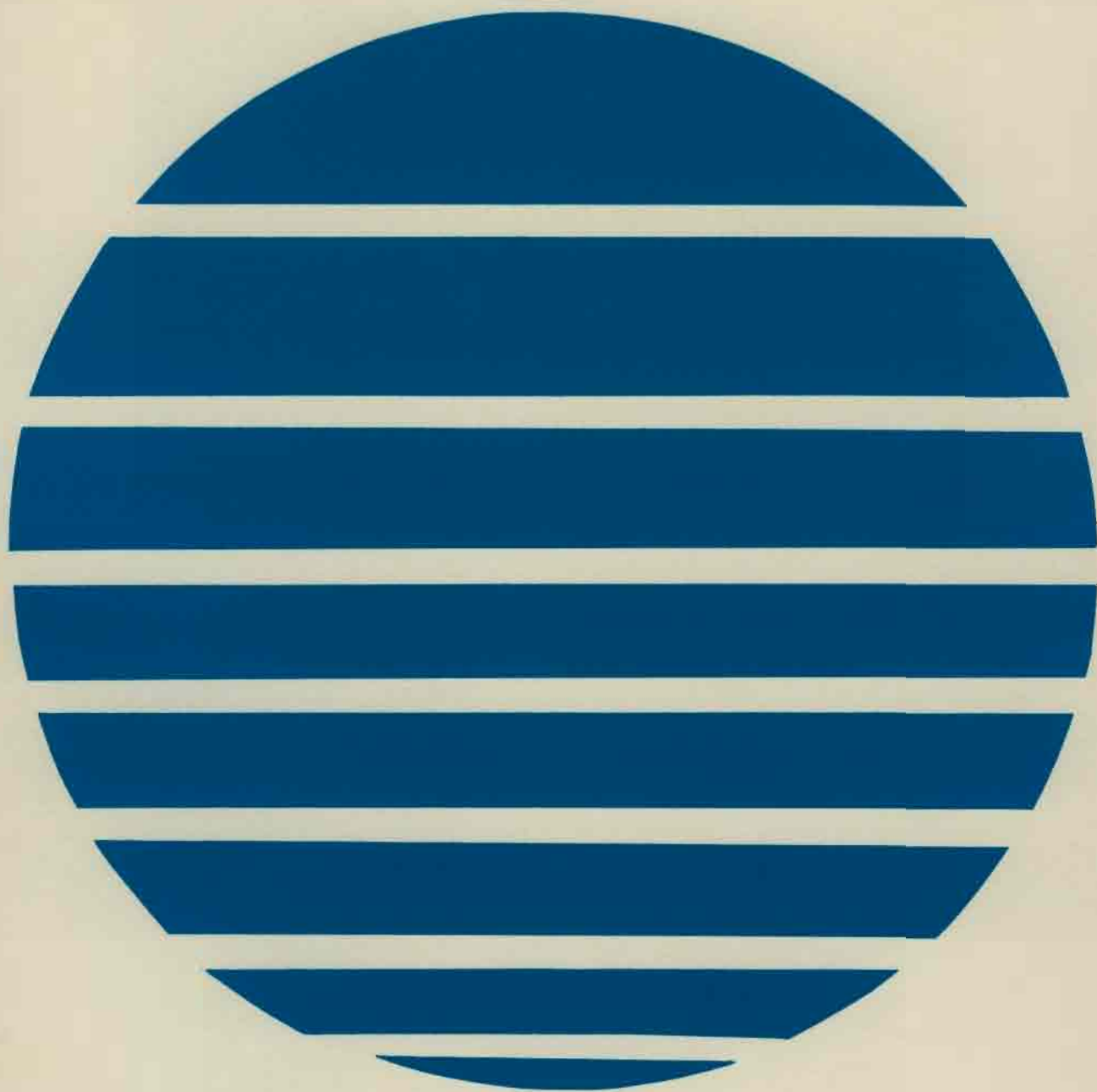


# ANNALES HYDROGRAPHIQUES

5<sup>ème</sup> Série – Vol. 19 – 1993

N° 766



Service Hydrographique  
et Océanographique de la Marine - Paris

- Toute correspondance relative au contenu de cette publication, et notamment à l'insertion d'articles, doit être adressée au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 3, avenue Octave Gréard, 00300 Armées.
- 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'Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 13, rue du Chatellier, B.P. 426, 29275 Brest Cedex.

# ANNALES HYDROGRAPHIQUES

---

## TABLE DES MATIÈRES

Pages

### Première partie

Sur la projection de Mercator transverse de l'ellipsoïde terrestre, par J.J. LEVALLOIS, Ingénieur Général Géographe	5
Essai d'approche statistique prévisionnelle du courant côtier en fonction du vent, par P. RÉVILLON, Capitaine de Vaisseau honoraire, Centre d'Études et de Recherches de Biologie et d'Océanographie Médicale, Nice .....	13
Évaluation et procédures d'exploitation du sondeur multifaisceaux Lennermor, par L. KERLÉGUER, Ingénieur de l'Armement.....	37

### Deuxième partie

Mission Océanographique du Pacifique – Échelon de Polynésie (décembre 1988 – juillet 1990), par M. LE GOUIC, Ingénieur Principal de l'Armement (hydrographe) .....	77
--	----



5<sup>e</sup> Série, Vol. 19 – 1993  
N° 766

*PREMIÈRE PARTIE*

---

## SUR LA PROJECTION DE MERCATOR TRANSVERSE DE L'ELLIPSOÏDE TERRESTRE

par

J.J. LEVALLOIS, Ingénieur Général Géographe

### RÉSUMÉ

Quand deux fonctions holomorphes coïncident en tous points d'une portion si petite soit-elle du plan complexe, elles coïncident dans tout le domaine de validité (théorème connu). Par conséquent, étant donné deux représentations conformes de l'ellipsoïde terrestre, admettant chacune une image rectiligne du méridien origine choisi comme axe réel ( $y, 0$ ) (ex : projections Lambert, Mercator, Doppelprojektion, ...) on peut généraliser au plan complexe la transformation de l'une ou de l'autre – par exemple par les polynômes de Lagrange sur l'axe réel ( $y$ ). On pourrait donc ainsi calculer l'UTM à partir du Lambert sans même connaître les équations de l'UTM. On peut enfin trouver une formulation nouvelle et rigoureuse de la projection UTM à partir de la Doppelprojektion, en développant le méridien origine en fonction de la latitude isométrique. Le domaine de validité des formules nouvelles est beaucoup plus vaste que celui des formulations classiques.

### ABSTRACT

Given two conformal projections of the earth ellipsoid admitting a rectilinear representation of the Eastings origin meridian (Lambert, UTM, Mercator, Doppelprojektion, ...), one may extend to the conformal plane the function expressing, on the real axis ( $y$ ), the relationship between the two projections. For instance, a development in Lagrange polynomials gives – in a limited area – the UTM coordinates out of Lambert, or Mercator, or Doppelprojektion ones, even without knowing – but on the ( $y, 0$ ) axis – the equations of UTM coordinates. Similarly, it is possible to obtain a quite new and rigorous way of computing the UTM coordinates out of the Doppelprojektion ones, by developing the arc of the elliptic meridian as a function of the isometric latitude on the axis ( $y, 0$ ). The domain of validity is extensive.

### I.

À une époque où la géodésie spatiale pénètre même le domaine de la topométrie (GPS) il est assez naïf de revenir sur un sujet classique de cartographie mathématique dont au surplus des solutions numériques sont en usage courant. C'est pourtant le but de cet article.

La formulation des équations de la projection de Mercator transverse (ou Gauss-Krüger, ou UTM) sous la forme classique est pénible, un certain courage est nécessaire pour s'y attaquer. C'est un calcul fastidieux de dérivations successives, où les termes correctifs s'accroissent sans autre vérification possible que la reprise complète de tout le calcul, par un autre algébriste. J'admire sincèrement ceux qui ont eu la patience et l'art de le conduire jusqu'au bout,

sans être certains d'ailleurs que de minimes erreurs ne subsisteront pas dans les termes correctifs, ou que le développement n'aurait pas demandé quelques termes de plus; la correction des épreuves est à la hauteur des embûches du calcul.

L'ordinateur il est vrai, a bien changé les possibilités; un ordinateur même modeste avale sans difficulté le calcul des coordonnées UTM par la formulation classique; il peut donc paraître inutile de chercher autre chose, mais on peut toujours songer à des approches différentes. Ceci nous conduit à quelques divertissements numériques, et finalement à une formulation très naturelle rigoureuse, extensible à un domaine complet de représentation de l'ellipsoïde de référence, sur un seul fuseau de large extension en longitude, valable jusqu'au pôle, autrement dit représentable sur la totalité d'une ceinture centrale du cylindre circonscrit au méridien.

## Problème de l'adaptation

C'est un problème classique que les géodésiens des organismes géographiques officiels connaissent bien : on donne dans une même région géographique deux systèmes conformes de coordonnées et l'on désire exprimer dans l'un d'eux les coordonnées de l'autre, connaissant, dans chaque système des coordonnées d'un petit nombre de points communs :

$$Z_1 \Leftrightarrow Z_2.$$

La méthode classique consiste à chercher un polynôme complexe des variables  $z_1 = y_1 + ix_1$  et  $z_2 = y_2 + ix_2$  :

$$Z_2 = P(Z_1) = A_0 + A_1 Z_1 + A_2 Z_1^2 + A_3 Z_1^3 + \dots + A_p Z_1^p$$

dont on identifie les coefficients  $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_p$  en écrivant l'identité sur les  $(p+1)$  points communs ( $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_p$  complexes).

La transformation par homothétie-rotation  $Z_2 = A_0 + A_1 Z_1$  en est un cas particulier.

Si les deux représentations sont rigoureusement conformes et si les coordonnées transposées correspondent au même système de points, en vertu du théorème d'approximation polynomiale ce procédé peut être correct à  $\varepsilon$  près, et suffira dans un domaine restreint. La seule difficulté consiste à rechercher le nombre minimum  $(p+1)$  des points nécessaires pour assurer l'exactitude à  $\varepsilon$  près : ce nombre est lié à l'extension du domaine commun.

Ce sera précisément le cas lorsque l'on voudra transposer la représentation conforme d'un système de coordonnées géographiques  $\phi, \lambda$  en un autre système conforme des mêmes points, sans passer par l'intermédiaire des coordonnées géographiques.

## Établissement des correspondances

Certaines projections ont une définition géométrique assez simple pour que le passage direct de l'une à l'autre soit facile; tel est le cas bien connu des projections Lambert (cf. [6] – Tome II – pp. 174-176); mais le calcul est souvent beaucoup plus compliqué, voire inextricable.

Il est un cas particulier commode : lorsque deux projections admettent un même méridien origine rectiligne, il est possible d'obtenir dans un domaine raisonnable une transposition conforme automatique en utilisant – par exemple – les polynômes de Lagrange sous forme complexe.

Citons quelques unes de ces projections :

- projection de Mercator
- projection Lambert
- projection UTM
- Doppelprojektion (c'est la projection UTM de la sphère – voir plus loin).

Considérons deux quelconques de ces projections et leur méridien origine commun rectiligne de longitude zéro.

Les abscisses des points de même latitude ellipsoïdique sont données par la définition particulière de chaque projection.

Précisons les variables :  $y, x$  coordonnées rectangulaires (Northings, Eastings)

$a$  demi grand axe de l'ellipsoïde de référence

$b$  demi petit axe,  $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$

$\phi, \lambda$  latitude, longitude d'un point

$N$  grande normale à l'ellipsoïde en  $\phi$

$\phi_0$  latitude origine sur le méridien origine

$\mathcal{L}$  variable de Mercator :

$$\mathcal{L}(\phi) = \text{Log} \left[ \text{tg} \left( \pi/4 + \phi/2 \right) \left( \frac{1 - e \sin \phi}{1 + e \sin \phi} \right)^{e/2} \right]$$

Sur le méridien origine le point de latitude  $\phi$  aura pour ordonnée :

– en projection de Mercator :  $a \mathcal{L}(\phi) = y$

– en projection Lambert :

$$N_0 \cotg \phi_0 \cdot \exp(-\sin \phi_0 (\mathcal{L} - \mathcal{L}_0)) = y$$

– en projection UTM, l'abscisse curviligne de l'arc d'ellipse méridienne  $s$  en  $\phi$

– en Doppelprojektion, l'abscisse curviligne  $aL$  où  $L$  est la latitude isométrique, définie par l'égalité des variables de Mercator :

$$1/2 \text{Log} \left( \frac{1 + \sin L}{1 - \sin L} \right) = \text{Log} \text{tg} (\pi/4 + L/2) = \mathcal{L}(\phi)$$

## Sur cet axe ( $\lambda = 0$ )

Nous pouvons calculer en fonction de  $\phi$  tous les points correspondants que nous voulons; leurs affixes  $y$  sont pour chaque projection de la forme  $y + ix$  ( $x = 0$ ). Si l'on peut, par un calcul algébrique définir exactement la correspondance fonctionnelle  $Y = f(y)$  où  $Y$  est la projection dans le système de laquelle on veut exprimer la projection  $y$ , on en déduira  $Z = f(z)$  et ce sera la meilleure solution. Sinon on peut avoir recours dans un domaine raisonnable au polynôme de Lagrange de degré  $p-1$  basé sur  $p$  points  $(Y, y)$  connus dans les 2 systèmes.

$$Z = \sum_{k=1}^p \frac{(z - z_{k+1})(z - z_{k+2}) \dots (z - z_{k+p-1})}{(z_k - z_{k+1})(z_k - z_{k+2}) \dots (z_k - z_{k+p-1})} z_k$$

$$z_k : 1 < k < p$$

où  $z_{k+p} = z_k$ ;  $z$  est la valeur connue que l'on veut transposer en  $Z$ .

Les nombres complexes  $Z_k = (Y_k, 0)$  et  $z_k = (y_k, 0)$  définissent la correspondance : on sait en effet qu'un polynôme (complexe) de degré  $p-1$  est parfaitement et univoquement déterminé par la donnée de  $p$  de ses points; ce qui est le cas des points  $Z_k, z_k$ . Le choix est une question de commodité : si dans une projection (Lambert par exemple) on connaît les coordonnées  $z = y + ix$  d'un point  $(\phi, \lambda)$  on aura ses coordonnées en UTM sans même connaître le développement  $X, Y$  de ce même point, en calculant



Tableau 1

Points { 1 à 9 10 à 36		Coordonnées rectangulaires (calcul classique)											
		UTM			Mercator			Lambert			Doppelprojektion		
n°	num	latitude	longitude	abscisse	ordonnée	abscisse	ordonnée	abscisse	ordonnée	abscisse	ordonnée	abscisse	ordonnée
1	1	44.00000000	0.00000000	500000.000	4303437,312	0.000	4700014,168	600000.000	190359,000	500000.000	430359,000	500000.000	4307317,169
2	2	46.00000000	0.00000000	500000.000	4503242,000	0.000	5043336,630	500000.000	399330,730	500000.000	450330,730	500000.000	4507495,244
3	3	48.00000000	0.00000000	500000.000	4703111,276	0.000	5313209,726	500000.000	599014,516	500000.000	470314,516	500000.000	4707737,301
4	4	50.00000000	0.00000000	500000.000	4903043,127	0.000	5593308,079	500000.000	799072,082	500000.000	490308,082	500000.000	4908074,141
5	5	52.00000000	0.00000000	500000.000	5103030,510	0.000	5870427,097	500000.000	1000000,000	500000.000	510300,000	500000.000	5100000,000
6	6	54.00000000	0.00000000	500000.000	5303077,350	0.000	6175299,330	500000.000	1200000,000	500000.000	530300,000	500000.000	5300000,000
7	7	56.00000000	0.00000000	500000.000	5503219,305	0.000	6483012,099	500000.000	1400000,000	500000.000	550300,000	500000.000	5500000,000
8	8	58.00000000	0.00000000	500000.000	5703403,766	0.000	6807008,947	500000.000	1601277,536	500000.000	570300,000	500000.000	5700000,000
9	9	60.00000000	0.00000000	500000.000	5903649,001	0.000	7135696,908	500000.000	1802799,131	500000.000	590300,000	500000.000	5900000,000
10	10	44.00000000	1.50000000	615912,425	4304307,043	150207,227	4700016,168	716704,079	199362,053	616116,760	4308105,740	616116,760	4308105,740
11	11	46.00000000	1.50000000	612054,569	4504122,131	150207,227	5043336,630	713333,053	400312,054	613005,113	4508032,064	613005,113	4508032,064
12	12	48.00000000	1.50000000	609604,411	4703995,925	150207,227	5313209,726	709000,666	600700,269	609000,794	4708000,395	609000,794	4708000,395
13	13	50.00000000	1.50000000	606405,000	4903929,611	150207,227	5593308,079	706452,145	800000,311	606000,787	4908000,468	606000,787	4908000,468
14	14	52.00000000	1.50000000	603021,131	5103973,339	150207,227	5870427,097	703016,651	1000000,725	603000,186	5100000,173	603000,186	5100000,173
15	15	54.00000000	1.50000000	599534,259	5303977,023	150207,227	6170299,330	699300,037	1200000,150	599000,203	5300000,472	599000,203	5300000,472
16	16	56.00000000	1.50000000	595948,379	5504000,340	150207,227	6480012,099	696130,023	1401273,066	596000,164	5500000,809	596000,164	5500000,809
17	17	58.00000000	1.50000000	592265,903	5704023,730	150207,227	6807008,947	692000,665	1602073,570	592000,509	5700000,125	592000,509	5700000,125
18	18	60.00000000	1.50000000	588493,665	5904049,400	150207,227	7135696,908	689000,516	1803065,441	590000,787	590000,787	590000,787	590000,787
19	19	44.00000000	2.50000000	691193,390	4300000,000	250470,711	4700016,168	794024,452	201405,706	690000,000	430000,000	690000,000	430000,000
20	20	46.00000000	2.50000000	680094,550	4500000,000	250470,711	5043336,630	780071,910	400000,000	680000,000	450000,000	680000,000	450000,000
21	21	48.00000000	2.50000000	600000,000	4700000,000	250470,711	5313209,726	763133,760	600000,000	680000,000	470000,000	680000,000	470000,000
22	22	50.00000000	2.50000000	677342,720	4900000,000	250470,711	5593308,079	777004,734	800000,000	677000,000	490000,000	677000,000	490000,000
23	23	52.00000000	2.50000000	671700,144	5100000,000	250470,711	5870427,097	771000,000	1000000,000	670000,000	510000,000	670000,000	510000,000
24	24	54.00000000	2.50000000	665000,000	5300000,000	250470,711	6170299,330	765000,000	1200000,000	660000,000	530000,000	660000,000	530000,000
25	25	56.00000000	2.50000000	659000,000	5500000,000	250470,711	6480012,099	750000,000	1400000,000	650000,000	550000,000	650000,000	550000,000
26	26	58.00000000	2.50000000	653772,000	5700000,000	250470,711	6807008,947	734000,000	1600000,000	640000,000	570000,000	640000,000	570000,000
27	27	60.00000000	2.50000000	647401,955	5900000,000	250470,711	7135696,908	718000,000	1800000,000	630000,000	590000,000	630000,000	590000,000
28	28	44.00000000	3.50000000	770403,303	4300000,000	350670,195	4700016,168	872000,000	200000,000	770000,000	430000,000	770000,000	430000,000
29	29	46.00000000	3.50000000	763340,612	4500000,000	350670,195	5043336,630	864000,000	400000,000	760000,000	450000,000	760000,000	450000,000
30	30	48.00000000	3.50000000	755937,046	4700000,000	350670,195	5313209,726	856000,000	600000,000	750000,000	480000,000	750000,000	480000,000
31	31	50.00000000	3.50000000	748279,070	4900000,000	350670,195	5593308,079	848000,000	800000,000	740000,000	490000,000	740000,000	490000,000
32	32	52.00000000	3.50000000	740376,524	5100000,000	350670,195	5870427,097	840000,000	1000000,000	730000,000	520000,000	730000,000	520000,000
33	33	54.00000000	3.50000000	732234,703	5300000,000	350670,195	6170299,330	832000,000	1200000,000	720000,000	540000,000	720000,000	540000,000
34	34	56.00000000	3.50000000	723862,350	5500000,000	350670,195	6480012,099	824000,000	1400000,000	710000,000	560000,000	710000,000	560000,000
35	35	58.00000000	3.50000000	715267,644	5700000,000	350670,195	6807008,947	816000,000	1600000,000	700000,000	580000,000	700000,000	580000,000
36	36	60.00000000	3.50000000	706450,999	5900000,000	350670,195	7135696,908	808000,000	1800000,000	690000,000	600000,000	690000,000	600000,000

le polynôme de Lagrange  $Z$  à partir des points  $Z_k, z_k$ ; sur le méridien commun ( $\phi, \lambda=0: x=0$ ). L'expérience numérique est facile à faire sur un ordinateur de bureau.

Ex: dans l'espace délimité par les parallèles  $44 \leq \phi \leq 60$  (grades) et les méridiens  $0 \leq \lambda \leq 3,5$  (grades) en opérant sur l'ellipsoïde de Hayford, utilisant sur le méridien origine 9 points espacés en latitude de 2 en 2 grades, on peut à partir des projections de Mercator, Lambert ( $\phi_0 = 52$  grades), Doppelprojektion, reconstituer à quelques millimètres près les coordonnées UTM telles que les donnent les formules classiques de l'Army Map Service. Il est nécessaire toutefois par une transformation linéaire homothétie rotation de ramener les coordonnées des deux systèmes à une même origine (centre de gravité des  $Y_i, y_i$ ) et une même échelle.

Tout cela se programme très facilement.

Le nombre  $p$  s'obtiendra en étudiant les différences d'ordres successifs des  $Y_k$  sur l'axe origine, c'est celui de la différence  $p^{\text{ième}}$  qui devient statistiquement nulle sur les décimales utiles, pour le pas choisi  $DY = Y_{k+1} - Y_k$ .

Il est vraisemblable que la transformation reste valable dans le cercle ayant le centre de gravité des points  $Y_k$  sur l'axe origine, et pour rayon  $Dy \cdot p/2$  mais ceci aurait besoin d'être précisé.

Il est par ailleurs à peu près évident qu'aux hautes latitudes la projection de Mercator serait très mal adaptée pour déduire la projection UTM et qu'à ces latitudes il vaudrait mieux utiliser une stéréographique polaire ou plutôt la Doppelprojektion: le fait amusant est que l'on puisse calculer dans un domaine limité, la projection UTM (par exemple) sans même connaître de formulation générale.

Dans l'exemple numérique résumé par le tableau 1 on a calculé, par leurs formules classiques, sur l'ellipsoïde de Hayford les coordonnées UTM, Mercator, Lambert, Doppelprojektion des points de latitudes et longitudes indiquées.

Dans le tableau 2, utilisant comme valeurs initiales les coordonnées UTM des points de longitude zéro (points 1 à 9 du tableau 1) auxquelles on a fait correspondre les valeurs homologues Mercator, Lambert, Doppelprojektion, on a reconstitué par polynômes de Lagrange (variables complexes) les

Tableau 2

Points 10 à 36			Coordonnées rectangulaires (polynôme de Lagrange)					
UTM			Mercator		Lambert		Doppelprojektion	
n°	xm°	ym°	xm2	ym2	xm2	ym2	xm2	ym2
10	615912.425	4384307.843	150287.188	4788816.135	716784.875	199362.849	616116.766	4388185.748
11	612854.369	4584122.131	150287.222	5043336.627	713333.054	400312.053	613865.113	4582362.863
12	609684.411	4783995.925	150287.235	5313289.719	709889.866	600756.269	609900.795	4780620.595
13	606485.680	4983929.611	150287.242	5591388.076	706452.145	800886.311	606626.787	4980959.468
14	603201.131	5183923.339	150287.241	5878427.698	703016.651	1000884.724	603246.186	5180379.676
15	599534.259	5383977.023	150287.237	6175299.333	699588.057	1200947.150	599752.204	5380881.173
16	595940.379	5584090.348	150287.238	6483812.062	696138.923	1401273.867	596178.165	5580463.472
17	592266.983	5784262.730	150287.225	6802708.948	692689.665	1602073.571	592497.508	5791125.843
18	588493.665	5984493.488	150287.224	7135696.969	689228.515	1803565.448	588723.788	5991867.228
19	693193.398	4385855.966	250478.699	4788816.110	794624.454	201145.775	693534.109	4389738.378
20	685094.558	4585685.855	250478.710	5043336.624	788871.913	402042.298	688445.937	4589923.557
21	682809.287	4785569.091	250478.719	5313289.716	783133.766	602435.938	683178.075	4790191.280
22	677342.720	4985505.991	250478.728	5591388.074	777404.733	802511.495	677711.499	4990533.792
23	671780.144	5185496.723	250478.727	5878427.899	771679.418	1002457.461	672875.388	5190951.527
24	665887.038	5385541.288	250478.722	6175299.335	765952.255	1202467.428	666267.084	5391444.381
25	659989.057	5585639.134	250478.715	6483812.064	760217.533	1402741.682	660292.164	5592011.714
26	653772.830	5785798.025	250478.708	6802708.948	754469.271	1603488.646	654156.368	5792653.068
27	647481.955	5985993.164	250478.709	7135696.973	748701.192	1804927.677	647865.682	5993367.371
28	778483.383	4388179.384	350670.232	4788816.188	872438.521	203819.878	778968.677	4392068.564
29	763340.612	4588032.595	350670.195	5043336.625	864386.888	404637.361	763832.863	4592265.758
30	755937.046	4787929.884	350670.204	5313289.718	856353.655	604952.166	756442.462	4792568.176
31	748279.878	4987871.541	350670.217	5591388.872	848334.862	804949.886	748796.472	4992896.259
32	740376.524	5187857.684	350670.214	5878427.182	840319.661	1004816.387	740982.158	5193318.161
33	732234.783	5387888.254	350670.207	6175299.336	832302.693	1204747.577	732767.859	5393789.784
34	723862.338	5587963.817	350670.208	6483812.068	824275.136	1404942.964	724398.974	5594334.773
35	715267.644	5788081.562	350670.191	6802708.949	816228.625	1605611.829	715885.959	5794944.586
36	706458.999	5988243.388	350670.203	7135696.973	808154.375	1806978.888	706996.332	5995618.182



coordonnées correspondantes; il est facile de s'assurer en comparant les tableaux 1 et 2 que la reconstitution est bonne, sauf évidemment pour la projection de Mercator.

Il va de soi que par un processus identique, on aurait pu reconstituer à partir des points 28 à 36 ( $\lambda=3,5$ ) les coordonnées correspondantes sur le méridien origine; le méridien rectiligne n'est pas une obligation, c'est une commodité, c'est la rigueur de la correspondance ponctuelle des points homologues qui compte.

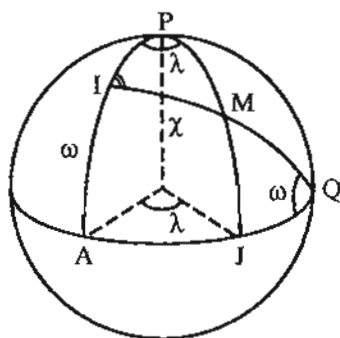
## II.

### La Doppelprojektion

Cette projection, parfois connue sous le nom de Gauss-Schreiber, fut longtemps en service à la Landesaufnahme; elle fut finalement supplantée par la projection de Mercator transverse (Gauss-Krüger).

1) *Cas sphérique*: soit une sphère; décidons de faire une représentation conforme de cette sphère identique à la projection de Mercator, mais en adoptant comme «équateur» le méridien PAP', de «pôle» Q.

Soient L,  $\lambda$  les coordonnées géographiques d'un point de la sphère; le triangle sphérique PIM a pour côtés  $PM = \pi/2 - L$ ;  $IM = \chi$ ;  $IP = \pi/2 - \omega$



L'angle  $I = (\pi/2)$ , l'angle en P est la longitude  $\lambda$  d'où les relations :

$$\sin \chi = \sin \lambda \cos L; \quad \text{tg PI} = \text{tg PM} \cos \lambda,$$

soit  $\text{tg } \omega = \text{tg } L / \cos \lambda$

Les coordonnées planes du point M de la sphère seront alors :

$$x = a/2 \text{Log} \frac{1 + \sin \chi}{1 - \sin \chi} = a/2 \text{Log} \frac{1 + \sin \lambda \cos L}{1 - \sin \lambda \cos L}$$

$$y = a \cdot \text{Atn}(\omega) \text{ avec } \text{tg}(\omega) = \text{tg}(L) / \cos(\lambda)$$

Cette projection est conforme, c'est une projection Mercator transverse de la sphère, et sauf au point Q; ces équations sont valables sur le fuseau  $0 < \phi < \pi/2$ ,  $0 \leq \lambda \leq \pi/2$ .

2) *Cas ellipsoïdique*: faisons une représentation conforme de l'ellipsoïde sur la sphère et pour cela considérons le système  $(\mathcal{L} + i\lambda)$  de l'ellipsoïde. Nous pouvons le transposer sur la sphère sous la forme  $(\mathcal{L} + i\lambda)_{\text{ell}} = (\mathcal{L} + i\lambda)_{\text{sph}}$ , soit

$$\mathcal{L}_{\text{ellipsoïde}} = \mathcal{L}_{\text{sphère}},$$

$$\lambda_{\text{ellipsoïde}} = \lambda_{\text{sphère}},$$

c'est-à-dire :

$$\text{Log} \left[ \left( \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)^{1/2} \left( \frac{1 - e \sin \phi}{1 + e \sin \phi} \right)^{e/2} \right] = \text{Log} \left( \frac{1 + \sin L}{1 - \sin L} \right)^{e/2}$$

Cette équation définit la variable L, dite latitude isométrique, en fonction de la latitude ellipsoïdique  $\phi$ . La Doppelprojektion revient donc en conservant les longitudes, à substituer à la latitude  $\phi$ , la latitude L. Les deux équations en x et y définissent le système et son réciproque. O. Adams [5] a donné les relations numériques exprimant  $\phi - L$  en fonction de  $\phi$  ou en fonction de L, (4<sup>e</sup> ordre en  $e^2$ ).

$$\phi - L = \left( \frac{e^2}{2} + 5e^4/24 + 3e^6/32 + 281e^8/5760 \right) \sin(2\phi) - \left( 5e^2/48 + 7e^6/80 + 697e^8/11520 \right) \sin(4\phi) + \left( 13e^6/480 + 461e^8/13440 \right) \sin(6\phi) - \left( 1237e^8/161280 \right) \sin(8\phi)$$

$$\phi - L = \left( \frac{e^2}{2} + 5e^4/24 + e^6/12 + 13e^8/360 \right) \sin(2L) + \left( 7e^4/48 + 29e^6/240 + 811e^8/11520 \right) \sin(4L) + \left( 7e^6/20 + 81e^8/1120 \right) \sin(6L) + \left( 4279e^8/161280 \right) \sin(8L)$$

$\phi - L$  est nulle au pôle et sur l'équateur, son maximum est de l'ordre de 0,20 grade vers  $\phi = 50$  grades ( $L < \phi$ ).

## III.

### Projection de Mercator transverse

Proposée par H. Krüger en 1912 [1] cette représentation s'impose les conditions suivantes :

— l'image du méridien origine sera l'axe des Y de la projection ( $\lambda=0$ )

— l'ordonnée Y d'un point de ce méridien sera égale — ou proportionnelle — à l'arc de méridien compris entre l'équateur et ce point :  $Y = \int_0^{\phi_0} \rho d\phi$

Ceci fixe donc la relation  $Y = f(\mathcal{L}_0)$ . Les coordonnées rectangulaires d'un point  $M(\phi, \lambda)$  seront données par  $Y + iX = f(\mathcal{L} + i\lambda)$ .

La méthode classique de calcul (1, 2, 3, 4), est un développement de Taylor

$$f(\mathcal{L} + i\lambda) = f(\mathcal{L}) + \frac{1}{1!} i\lambda \frac{\partial f}{\partial \mathcal{L}} - \frac{1}{2!} \lambda^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \mathcal{L}^2} - \frac{1}{3!} i\lambda^3 \frac{\partial^3 f}{\partial \mathcal{L}^3} +$$

$$\frac{1}{4!} \lambda^4 \frac{\partial^4 f}{\partial \mathcal{L}^4} + \dots$$

dans lequel on sépare parties réelles et imaginaires

$$y = f(\lambda) - \frac{\lambda^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial \lambda^2} + \frac{\lambda^4}{4!} \frac{\partial^4 f}{\partial \lambda^4}$$

$$x = \frac{\lambda \partial f}{\partial \lambda} - \frac{\lambda^3}{3!} \frac{\partial^3 f}{\partial \lambda^3}$$

Il faut donc calculer les dérivées successives de la longueur d'arc par rapport à  $\mathcal{L}$ . Un calcul sommaire montre que pour conserver la précision du millimètre, il faut pousser les calculs jusqu'aux dérivées d'ordre 6, la longitude restant inférieure à 0,1 radian, environ  $5^\circ$ .

Nous les reproduisons ci-dessous d'après [4] divisées par les factorielles (cf. formule de Taylor).

$$a_1 = N \cos \phi \quad Y + iX = f(\phi, \lambda)$$

$$a_2 = -1/2 N \cos^2 \phi \operatorname{tg} \phi$$

$$a_3 = -1/6 N \cos^3 \phi (1 - \operatorname{tg}^2 \phi + \eta^2) \quad \eta = e^2 \cos^2 \phi$$

$$a_4 = 1/24 N \cos^4 \phi \operatorname{tg} \phi (5 - \operatorname{tg}^2 \phi + 9\eta^2 + 4\eta^4)$$

$$a_5 = 1/120 N \cos^5 \phi (5 - 18 \operatorname{tg}^2 \phi + \operatorname{tg}^4 \phi + 14\eta^4 - 58 \operatorname{tg}^2 \phi \cdot \eta^2)$$

$$a_6 = 1/720 N \cos^6 \phi \operatorname{tg} \phi (61 - 58 \operatorname{tg}^2 \phi + \operatorname{tg}^4 \phi + 270\eta^2 + 330 \operatorname{tg}^2 \phi \cdot \eta^2)$$

En sens inverse:  $\mathcal{L} + i\lambda = f(y + ix)$

appelant  $\phi_0$ , la latitude correspondant à l'arc  $y$  reporté sur le méridien

$$b_1 = 1/N_0 \cos \phi_0$$

$$b_2 = \operatorname{tg}^2 \phi_0 / 2N_0^2 \cos \phi_0$$

$$b_3 = (1 + 2\operatorname{tg}^2 \phi_0 + \eta_0^2) / 6N_0^3 \cos \phi_0$$

$$b_4 = (\operatorname{tg} \phi_0 (5 + 6\operatorname{tg}^2 \phi_0 + \eta_0^2 - 4\eta_0^4) / 24N_0^4 \cos \phi_0$$

$$b_5 = (5 + 28 \operatorname{tg}^2 \phi_0 + 24 \operatorname{tg}^4 \phi_0 + 6\eta_0^2 + 8 \operatorname{tg}^2 \phi_0 \eta_0^2) / 120 N_0^5 \cos \phi_0$$

$$b_6 = \operatorname{tg} \phi_0 (61 + 180 \operatorname{tg}^2 \phi_0 + 120 \operatorname{tg}^4 \phi_0 + 56\eta_0^2 + 48 \operatorname{tg}^2 \phi_0 \eta_0^2) / 720 N_0^6 \cos \phi_0$$

On se représente assez bien les traïtrises d'un calcul aussi épineux.

C'est sous cette forme qu'est utilisée cette projection. Les fuseaux UTM enserrant un espace de  $\pm 3^\circ$  de part et d'autre du méridien central.

Les formules ne les définissent pas au-delà de  $80^\circ$  de latitude, où elles perdent toute précision numérique. Remarquons qu'en y remplaçant les quantités  $N$ ,  $\eta$ , etc. par leur valeur pour la sphère, on trouverait une bien étrange formulation de la Doppelprojektion.

Il y a là matière à réflexion. Il paraît difficile de croire que la projection UTM soit indéterminée au voisinage du pôle géographique: la Doppelprojektion qui en est la forme asymptotique pour  $e^2 \rightarrow 0$  est définie partout, et il est intuitif que la projection UTM dont l'échelle locale diffère très peu doit être continue partout, y compris sur le méridien  $\lambda = \pi/2$ .

La faute en incombe au développement de Taylor, localement efficace mais aveugle; il ne se prête à aucune généralisation mathématique et son rayon d'action est limité par la variable  $\lambda$  qui ne peut prendre que de petites valeurs si l'on veut se livrer à un développement limité, ce qui en interdit l'emploi au voisinage des pôles, et des longitudes assez étendues.

On peut au contraire rechercher une solution beaucoup plus générale en utilisant la Doppelprojektion comme première approximation à laquelle s'ajouteraient des termes complémentaires fonctions de l'excentricité  $e^2$ , tendant vers zéro avec  $e^2$  (polynômes en  $e^2$ ).

En voici le principe: raisonnant comme précédemment, soit un point  $(\phi, \lambda)$ , et soit  $Z = g(z)$  la correspondance ( $Z = \text{UTM}$ ), ( $z = \text{Dopp. proj.}$ ).

Procédons au calcul d'une Doppelprojektion de l'ellipsoïde sur la sphère de rayon  $a$ , nous obtenons les coordonnées ( $a = 1$ , arcs en radians)

$$x = \frac{1}{2} \operatorname{Log} \frac{1 + \sin \lambda \cos L}{1 - \sin \lambda \cos L} \quad \operatorname{tg} y = \operatorname{tg} L / \cos \lambda$$

Le nombre complexe  $z = y + ix$  définit une image conforme de l'ellipsoïde au voisinage du point  $(\phi, \lambda)$ , de coordonnées UTM:  $X, Y$ . Sur le méridien origine ( $\lambda = 0, x = 0, X = 0$ ), l'affixe  $(Y, 0)$  est l'image en Mercator transverse du point  $(y, 0)$  et la fonction holomorphe  $Z = g(z)$  est entièrement déterminée par cette correspondance (théorème classique). Le passage de la Doppelprojektion à UTM s'exprime donc par  $Y = g(y)$ ; or  $y = L$  ( $\cos \lambda = 1$ ): il faut donc développer l'expression de l'arc du méridien elliptique  $S$  en fonction de  $L$ , latitude isométrique:  $S/a = f(L)$ .

Le développement de  $S$  en fonction de  $\phi$  est de la forme:

$$S/a =$$

$$M_0 \phi + M_2 \sin 2\phi + M_4 \sin 4\phi + M_6 \sin 6\phi + M_8 \sin 8\phi$$

et la différence  $\phi - L$  (formules d'O. Adams) s'exprime également en fonction des  $\sin 2\phi, \sin 4\phi, \dots$  ou  $\sin 2L, \sin 4L, \dots$

Il doit donc exister un développement du méridien de la forme:

$$S/a = L + L_2 \sin 2L + L_4 \sin 4L + L_6 \sin 6L + L_8 \sin 8L$$

les coefficients  $L_i$  ne dépendant que des puissances paires de l'excentricité  $e^2$ .

La solution générale sera:

$$Z = L_0 z + L_2 \sin 2z + L_4 \sin 4z + L_6 \sin 6z + \dots$$

et finalement, séparant partie réelle et imaginaire:

$$Y/a = (L_0 y + L_2 \sin 2y \operatorname{ch} 2x + L_4 \sin 4y \operatorname{ch} 4x + \dots)$$

$$X/a = (L_0 x + L_2 \cos 2y \operatorname{sh} 2x + L_4 \cos 4y \operatorname{sh} 4x + \dots)$$

$$\text{avec } y = L \text{ et } x = \frac{1}{2} \operatorname{Log} \left( \frac{1 + \sin L \cos \phi}{1 - \sin L \cos \phi} \right)$$

$L$  = latitude isométrique de  $\phi$ .

$\lambda$  = longitude.

J'avais proposé cette solution dès 1968 (cf. [6] tome 2, pp. 194-197) mais pris par d'autres occupations je n'avais pas insisté me proposant d'y revenir ultérieurement.

Les coefficients  $M_0, M_2, M_4, M_6, \dots$  du développement méridien en fonction de la latitude vraie sont bien connus (nous les arrêtons aux termes en  $e^6$ ):

$$S/a = M_0 \phi + M_2 \sin 2\phi + M_4 \sin 4\phi + M_6 \sin 6\phi + \dots$$

$$M_0 = 1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256$$

$$M_2 = -3e^2/8 - 3e^4/32 - 45e^6/1024$$

$$M_4 = 15e^4/256 + 45e^6/1024$$

$$M_6 = -35e^6/3072$$

Pour obtenir un développement en fonction de la latitude isométrique  $L$ , on peut exprimer  $\phi$  en fonction de  $L$  par l'intermédiaire des formules d'O. Adams en écrivant  $\phi = (L + \phi - L)$ . Nous savons que  $\phi - L$  est d'ordre  $e^2$ , par conséquent pour la substitution dans les lignes trigonométriques :

$\sin p \phi = \sin p L \cos p (\phi - L) + \cos p L \sin p (\phi - L)$   
on pourra négliger les termes d'ordre supérieur à 2 des sinus et cosinus de  $\phi - L$ . Il est alors relativement facile de calculer un tableau de substitution représentant le développement méridien en fonction de  $\sin p L$ , où les coefficients  $B_2, B_4, B_6$  sont ceux du développement d'O. Adams :

$$\phi - L = B_2 \sin 2L + B_4 \sin 4L + B_6 \sin 6L$$

d'où le développement de  $S/a$  :

$$S/a = L_0 + L_2 \sin 2L + L_4 \sin 4L + L_6 \sin 6L + \dots$$

$$L_0 = M_0$$

$$L_2 = M_0 B_2 + M_2(1 - 3/2 B_2 + B_4) - 2 M_4 B_2$$

$$L_4 = M_0 B_4 + M_4(1 - 4 B_2)$$

$$L_6 = M_0 B_6 + M_2(1/2 B_2^2 + B_4) - 2 M_4 B_2 + M_6$$

### Problème inverse

On donne  $X, Y$ ; trouver les coordonnées géographiques  $\phi, \lambda$ . La forme

$$Y = S/a = L_0 y + L_2 \sin 2y + L_4 \sin 4y + L_6 \sin 6y$$

est réversible et peut servir à déterminer inversement  $y$  à partir de  $Y$ . Il suffit pour cela d'écrire  $y = Y - (Y - y)$  et de procéder comme précédemment, dans les mêmes conditions d'approximation. Il est toutefois commode de remplacer la variable  $S/a = Y$  par la variable proportionnelle  $Y = M_0 S/a$ . Ceci revient à adopter comme ellipsoïde l'ellipsoïde de même excentricité, homothétique de l'ellipsoïde de référence, ayant même longueur d'arc que la sphère des  $(x, y)$ . Les coefficients  $L_0, L_2, L_4, L_6$  sont alors divisés par  $L_0$  et on peut écrire :  $L'_0 = 1, L'_2 = L_2/L_0, L'_4 = L_4/L_0, L'_6 = L_6/L_0$ .

$$z = N_0 Z + N_2 \sin 2Z + N_4 \sin 4Z + N_6 \sin 6Z$$

On trouve ainsi

$$N_0 = L'_0 = 1$$

$$N_2 = L'_2 - L'_2 L'_4 - 5/2 L'_2{}^3$$

$$N_4 = L'_4 + L'_2{}^2$$

$$N_6 = L'_6 + 3 L'_2 L'_4 - 1/2 L'_2{}^3$$

Il en résulte :

$$y = Y + N_2 \sin 2Y \operatorname{ch} 2X + N_4 \sin 4Y \operatorname{ch} 4X + \dots \quad (\text{Les } N \text{ sont négatifs})$$

$$x = X + N_2 \cos 2Y \operatorname{sh} 2X + N_4 \cos 4Y \operatorname{sh} 4X + \dots$$

Au point de vue numérique à l'ordinateur, le plus simple est de procéder par approximations successives, en portant directement des valeurs de  $Z$  :

$$Z_1 \rightarrow z \rightarrow (x, y)_1 \rightarrow Z_2; \quad Z_2 - Z_1 = DZ;$$

$$Z_3 = Z_2 - DZ; \text{ etc.}$$

Les coordonnées géographiques se déduisent de :

$$x = 1/2 \operatorname{Log} \frac{1 + \sin \lambda \cos \phi}{1 - \sin \lambda \cos \phi}$$

$\sin \lambda \cos L = \operatorname{th} x$  (th : tangente hyperbolique)

$$\operatorname{tg} L / \cos \lambda = \operatorname{tg} y$$

$\operatorname{tg} \lambda = \operatorname{sh} x / \cos y$  [dédié des deux précédentes par élimination de  $L$ ]

On passe de  $L$  à  $\phi$  par la formule d'O. Adams :

$$\phi = L + B_2 \sin 2L + B_4 \sin 4L + B_6 \sin 6L$$

La concordance des résultats avec ceux de la méthode classique a été vérifiée.

### Travaux de M. H.M. Dufour

M. H.M. Dufour, ingénieur général géographe, a tout récemment repris l'étude de cette méthode dans un ouvrage à l'état de manuscrit qu'il a eu l'obligeance de me communiquer [7], mais dont il se réserve la publication ultérieure; je regrette de ne pouvoir le détailler.

Je résume en quatre tableaux ses résultats essentiels : il a calculé les termes de tous les polynômes définissant les coefficients des développements précédents en fonction directe du carré  $e^2$  de l'excentricité de l'ellipsoïde de référence jusqu'aux termes en  $e^6$  inclusivement, ce qui assure la précision du millimètre dans un très large domaine d'extension de la projection.

Ses formules doivent être préférées à celles que nous avons définies plus haut, ne serait-ce que parce que celles-ci ne sont poussées que jusqu'aux termes en  $e^6$  et ne sont pas exprimées directement en fonction de  $e^2$ , ce qui en complique le calcul initial.

— le 1<sup>er</sup> tableau définit le développement de la méridienne en fonction de la latitude géographique  $\phi$ , sur un ellipsoïde de demi-grand axe  $a$ .

— le 2<sup>e</sup> tableau définit le développement de la méridienne en fonction de la latitude isométrique  $L$  sur un ellipsoïde de demi-grand axe  $a$ .

— le 3<sup>e</sup> donne le développement de la méridienne en fonction de la latitude isométrique sur un ellipsoïde de demi-grand axe  $aL_0$ ; passage de  $(X, Y)$  à  $(x, y)$

— le 4<sup>e</sup> est le tableau inverse permettant de remonter de  $(x, y)$  à  $(X, Y)$ .

1)  $S/a =$

$$M_0 + M_2 \sin 2\phi + M_4 \sin 4\phi + M_6 \sin 6\phi + M_8 \sin 8\phi$$

$$M_0 = 1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256 - 175e^8/16384$$

$$M_2 = -3e^2/8 - 3e^4/32 - 45e^6/1024 - 105e^8/4096$$

$$M_4 = 15e^4/256 + 45e^6/1024 + 525e^8/16384$$

$$M_6 = -35e^6/3072 - 175e^8/12288$$

$$M_8 = 315e^8/131072$$

2)  $S/a = L_0 + L_2 \sin 2L + L_4 \sin 4L + L_6 \sin 6L + L_8 \sin 8L$

$$L_0 = 1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256 - 175e^8/16384$$



$$L_2 = e^2/8 - e^4/96 - 9e^6/1024 - 901e^8/184320$$

$$L_4 = 13e^4/768 + 17e^6/5120 - 311e^8/737280$$

$$L_6 = 61e^6/15360 + 899e^8/430080$$

$$L_8 = 49561 e^8/41287680$$

3) Développement méridien (réduit) en fonction de la latitude isométrique  $L$ :  $Z=Z(z)$

$$L'_0 = 1$$

$$L'_2 = e^2/8 + e^4/48 + 7e^6/3072 - 83e^8/92160$$

$$L'_4 = 13e^4/768 + 29e^6/3840 + 833e^8/368640$$

$$L'_6 = -61e^6/15360 + 221e^8/71680$$

$$L'_8 = 49561e^8/41287680$$

4) Développement inverse  $z=z(Z)$

$$N_0 = 1$$

$$N_2 = -(e^2/8 + e^4/48 + 7e^6/2048 + e^8/61440)$$

$$N_4 = -(e^4/768 + 3e^6/1280 + 571e^8/368640)$$

$$N_6 = -(17e^6/30720 + 107e^8/86016)$$

$$N_8 = -(4397e^8/41287680)$$

### Limites de validité

On l'a déjà vu, cette formulation reste valable dans les hautes latitudes y compris  $\phi = \pi/2$ . Il est d'autre part facile de déterminer l'ordre de grandeur de validité de la formulation selon l'axe des  $x$ ; les termes deviennent infinis non seulement à cause des termes sphériques de la Doppelprojektion mais également par les appoints contenant les fonctions hyperboliques.

Calculons par exemple jusqu'à quelle valeur de  $x/a$ , le terme  $L_8$  du développement en fonction de  $L$  reste inférieur à  $10^{-9}$  – ce qui est une limite très sévère – :

$$L_8 \cdot \cos 8L \cdot e^8 \cdot \text{sh } 8(x/a) < 10^{-9}; L_8 = 49561/41287680$$

Prenant les logarithmes népériens, et écrivant  $\text{sh } 8(x/a) = 1/2 \text{Exp}(8x)$ ,  $E=2.718$ , il vient :

$$\text{Log } 0,0006 + 4 \text{Log } (1/150) + 8x/a < -9 \text{Log}(10)$$

soit:  $x < 1,12 a$

Nous sommes loin des 4 ou 5 degrés d'extension en longitude et des 80 degrés en latitude de la formulation classique!

Tous ces calculs se programment avec la plus grande facilité sur ordinateurs individuels. L'avenir dira si cette nouvelle formulation supplantera l'ancienne; quoi qu'il en soit, il n'était pas inutile de montrer que ce qui fut obtenu par ce que M. Hotine appelait « brute force and algebra » pouvait revêtir une forme plus évidente, beaucoup plus générale et mathématiquement moins stérilisante.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. KRÜGER. – Konforme Abbildung des Erdsellipsoids in der Ebene. (Veröf. d.K. preuss. Geod. Institut, Leipzig, Teubner).
  - [2] P. TARDI. – Étude d'un système de projection de Gauss Africain. Rapports généraux de l'Association Internationale de Géodésie, t. 13, Paris 1939.
  - [3] W.L. HRISTOW. – Zeitschrift für Vermessungswesen (1937, 1938, 1939).
  - [4] Army Map Service. – Universal Transverse Mercator Grid
  - [5] O. ADAMS. – Special Publication n° 67. Dpt. of Commerce, U.S. Coast and Geodetic Survey.
  - [6] J.J. LEVALLOIS. – Géodésie générale. 12. (1969), Eyrolles, Paris.
  - [7] H.M. DUFOUR. – Note technique sur la projection UTM, Extension rigoureuse de la projection. Manuscrit (1992), IGN.
- H.M. DUFOUR. – Formules pour projections conformes usuelles. Manuscrit (1989), IGN.

# ESSAI D'APPROCHE STATISTIQUE PRÉVISIONNELLE DU COURANT CÔTIER EN FONCTION DU VENT

par

P. RÉVILLON\*

Capitaine de Vaisseau honoraire  
Ingénieur en génie atomique (Propulsion navale)  
de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (CEA)

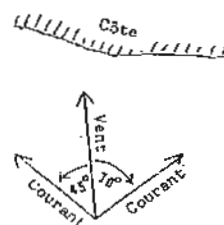
## RÉSUMÉ

1) L'analyse de plusieurs centaines de mesures simultanées du « courant de surface » (à une immersion de 0,5 m) et de vent d'au-moins 10 nœuds (5 m/s) près des côtes françaises méditerranéennes sans marées (latitude moyenne  $L = 43^\circ N$ ) a montré que, à l'intérieur d'une bande côtière d'environ 2,5 milles marins de large :

a) La fréquence  $f$  des courants à une immersion de 0,5 m dont la vitesse est inférieure ou au plus égale à un pourcentage  $C$  de la vitesse du vent (vitesses exprimées dans les mêmes unités) est très bien représentée par une courbe régulière qu'on peut résumer par le tableau A.

Tableau A

f%	11	47	63,5	76,5	87,5	90	93,5	94,5	95,5	97	97,5	99	100
C%	1	2	2,5	3	3,5	3,7	4	4,2	4,6	4,8	5	6	7



b) Dans 97 % des cas la direction du courant, lorsqu'elle porte à la côte, est comprise entre  $45^\circ$  à gauche et  $70^\circ$  à droite de celle vers laquelle porte le vent.

2) Une soixantaine de mesures analogues effectuées sur les côtes de la Martinique et de la Guadeloupe (latitude moyenne  $15,5^\circ$ ) semblent permettre d'étendre ces résultats, avec prudence et dans des limites raisonnables de latitude, à d'autres mers sans marées, directement pour la direction du courant (en inversant droite-gauche dans l'hémisphère sud) et, en ce qui concerne la vitesse au-dessus d'une fréquence  $f$  de 90 % en multipliant les chiffres de la 2<sup>e</sup> ligne (C %) du

tableau A par le facteur  $K = \left( \frac{\sin 43^\circ}{\sin Lat} \right)^{0,36}$ .

3) Plus d'une centaine de mesures de courant très inégalement réparties entre les immersions 5 m, 3 m, 2 m, 0,5 m (surface) et 0,01 m (extrême surface) sur les côtes provençales permettent, malgré une forte dispersion, de tracer une courbe approximative moyenne de la décroissance du courant, pour les premiers mètres sous la surface, en fonction de la seule immersion, courbe que l'on peut résumer par le tableau B du facteur R de décroissance en fonction de l'immersion  $i$  mètres, qui montre une très rapide décroissance dans les premiers décimètres.

Tableau B

$i$ (m)	0,01	0,25	0,5	1	2	3	4	5
R	1	2	2,3	2,7	3,2	3,5	3,7	3,9

\* Centre d'Études et de Recherches de Biologie et d'Océanographie Médicale (CERBOM) – 1, avenue Jean Lorrain – 06300 Nice – Téléphone : 93.89.32.92, 93.89.72.49 – Fax : 93.26.62.27.



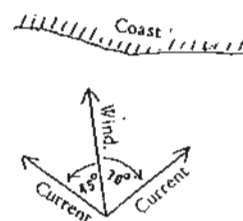
## ABSTRACT

1) The analysis of several hundreds of simultaneous measures of « surface current » (depth 0.5 m) and wind not less than 10 kn (5 m/s) near the tideless mediterranean coasts of France (mean latitude  $L=43^{\circ}N$ ) have shown that within approximately 2,5 nautical miles from the coast:

a) The frequency  $f$  of the currents (at 0,5m) the speed of which is less than or at the very most equal to  $C\%$  of the wind speed (current and wind being expressed in the same units) is very well represented by a smooth curve that we may express by table A:

Table A

$f\%$	11	47	63.5	76.5	87.5	90	93.5	94.5	95.5	97	97.5	99	100
$C\%$	1	2	2.5	3	3.5	3.7	4	4.2	4.6	4.8	5	6	7



b) In 97% of the cases the direction of coastal current, when it points on-shore, lies between  $45^{\circ}$  left and  $70^{\circ}$  right from the direction pointed by the wind.

2) Sixty similar measures on the coasts of the french West Indies (mean latitude  $15,5^{\circ}$ ) could possibly justify us in extending these results, with caution and within reasonable limits of latitude to other tideless seas: directly for the direction of the current (reversing left - right in the southern hemisphere), and for the speed above a frequency of 90% by multiplying the figures in line  $C\%$  (Table A) by  $K$ .

$$K = \left( \frac{\sin 43^{\circ}}{\sin Lat} \right)^{0,36}$$

3) More than hundred measures of current, very inequally distributed between the depths of 5 m, 3 m, 2 m, 0,5 m (surface) and 0,01 m (extreme surface) on the coasts of Provence, allow, in spite of a big scattering, to draw an approximate mean curve of the decrease of the current in the first meters under the surface that we may express by the factor  $R$  of decrease in terms of depth  $d$  meters (Table B, which shows a very fast decrease in the first decimeters).

Table B

$d$ (m)	0.01	0.25	0.5	1	2	3	4	5
$R$	1	2	2.3	2.7	3.2	3.5	3.7	3.9

## INTRODUCTION

L'auteur de cette étude est un marin des vieilles générations, Capitaine de Vaisseau en retraite (promotion 1933 de l'École navale) qui a toujours eu un vif intérêt pour les questions scientifiques.

Cet intérêt a trouvé à s'utiliser d'abord au cours d'une longue carrière dans la Marine Nationale lors d'affectations relatives à l'hydrographie, à la météorologie maritime, à l'enseignement de l'astronomie nautique et de la navigation, ainsi qu'à la propulsion nucléaire. Ensuite, atteint par la limite d'âge en septembre 1970, il a poursuivi pendant plus de sept ans une seconde carrière, civile, dans une section du Secrétariat Général de la Défense Nationale consacrée aux « Sciences de la Terre » et plus particulièrement à la pénétration de l'homme sous la mer et à l'« Océanologie » en général.

La limite d'âge de cette seconde carrière ayant sonné, il a, retiré à Nice, entrepris depuis quinze ans une troisième carrière, à temps complet, scientifique et maritime, comme collaborateur bénévole du Centre d'Étude et de Recherche de Biologie et d'Océanographie Médicale.

Au cours de ses travaux dans le domaine de l'océanographie physique où les fréquentes campagnes à la mer alternent avec leur exploitation rédactionnelle en vue de l'interprétation explicative des données recueillies, il a été amené à s'intéresser particulièrement à la diffusion des polluants en mer, diffusion étroitement liée aux courants côtiers.

Une étude fouillée de la littérature spécialisée dans les relations entre le vent et les courants marins menée pendant des années en remontant aux textes originaux en langues française, anglaise et russe, et d'autre part une longue expérience d'océanographe à la mer, l'ont finalement conduit à un point de vue, à la fois de chercheur scientifique et de ma-

rin, qui doute beaucoup du caractère réellement efficace au point de vue pratique des méthodes actuellement proposées pour la prévision du courant côtier en fonction du vent.

L'étude ci-après montre comment s'est peu à peu imposée à son esprit l'étude d'une prévision non pas déterministe mais probabiliste, uniquement basée sur l'expérience de plusieurs centaines de mesures à la mer dans des circonstances extrêmement diverses au long de plusieurs dizaines d'années.

Pour des applications pratiques, par exemple pour la détermination du point de rejet sous-marin d'émissaires urbains (eaux d'égout) en projet, cette approche statistique est apparue intéressante au moins dans le cadre régional des mesures effectuées (Méditerranée nord-occidentale d'une part, zone Guadeloupe - Martinique de l'autre). Une extension plus générale à d'autres « mers sans marées », compte tenu d'une certaine sensibilité du rapport courant côtier/vent apparemment inversement proportionnelle à la racine presque cubique du sinus de la latitude, méritait d'être vérifiée dans d'autres conditions de la-

titude, mais l'ampleur de campagnes à entreprendre dans ce but semble dissuasive.

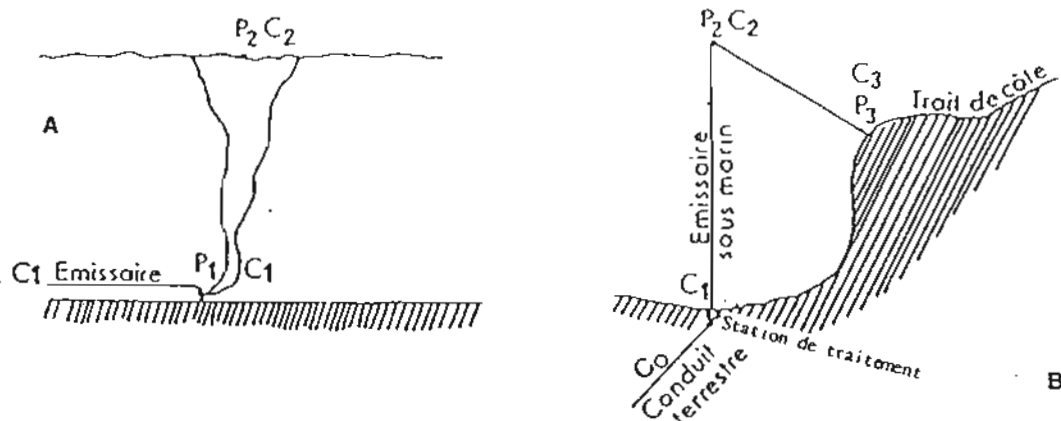
L'auteur exprime sa vive reconnaissance au professeur Maurice Aubert, directeur du CERBOM, homme de science et homme de mer passionné et accompli, qui est lui-même le capitaine du navire de recherches du Centre, sous la direction et l'impulsion duquel il travaille depuis quinze ans dans une approche essentiellement pratique des phénomènes marins, ainsi qu'à ceux dont les critiques, conseils et suggestions lui ont permis d'améliorer progressivement la rédaction de la présente étude, et en particulier (dans l'ordre chronologique): le professeur Jacques Labeyrie, ancien directeur du Centre des Faibles Radioactivités (Laboratoire mixte, Centre National de la Recherche Scientifique - Commissariat à l'Énergie Atomique); le professeur Joseph Gonella, professeur d'Océanographie Physique au Museum National d'Histoire Naturelle; et l'Ingénieur en Chef de l'Armement Le Gouic, chef du bureau « Études Générales » de la Direction du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

## PREMIÈRE PARTIE

### 1. POSITION DU PROBLÈME

Bien que ses résultats soient susceptibles d'une portée beaucoup plus générale, la présente étude est née de considérations purement pratiques liées au

choix du point de rejet sous-marin d'émissaires urbains en projet<sup>(1)</sup>. La décroissance bactérienne dans le mélange eau d'égout - eau de mer dépend en effet étroitement du temps de dérive, sous l'influence des courants, entre le point de rejet à la mer et le point le plus sensible de la côte à protéger (fig. 1A, 1B). La distance correspondante étant fixée par la



$C_0, C_1, C_2, C_3$  : valeurs successives d'une concentration bactérienne type à 4 étapes-clés de sa décroissance.

FIG. 1. Emissaire sous-marin : schéma sommaire des conditions géographiques de la décroissance bactérienne.

<sup>(1)</sup> Cf. *Revue Internationale Océanographique Médicale*, T 97-98. 1990 P. Révillon - Diffusion des eaux résiduaires en mer, Choix du point de rejet d'un émissaire sous marin, pp. 21-47.

géographie, le paramètre « courant moyen » sur ce parcours est le plus souvent celui à la valeur duquel les calculs sont le plus sensibles.

## 2. COMPOSANTES DU COURANT CÔTIER

Dans la bande littorale considérée, large de quelques km au maximum, on peut de façon simplifiée dire que, lorsque le phénomène « marée astronomique » n'entraîne que des courants négligeables<sup>(2)</sup>, ce qui est le cas général en Méditerranée sauf quelques exceptions (côte orientale de la Tunisie, détroit de Messine, canaux reliant des lagunes à la mer et leur voisinage immédiat), les courants côtiers résultent de la combinaison :

a) d'un **courant général** ou permanent, dit de densité ou de convection, existant en l'absence prolongée de vent local. Il est dû aux différences de température et de salinité, donc de densité, existant dans la masse marine locale considérée ainsi qu'aux répercussions des mouvements affectant les masses marines plus lointaines;

b) d'un **courant de dérive** engendré directement par le frottement du vent (vent actuel et vents antérieurs) sur la surface de la mer;

c) d'un **courant de pente**, effet secondaire, mais du même ordre que lui en surface, du courant de dérive : le flux d'eau vers ou à partir de la côte, résultant du courant de dérive en surface et en profondeur, crée un amoncellement ou un retrait qui se traduit par une pente, infime mais déterminante, de la surface de la mer;

d) d'un **courant de vagues** (vagues de la « mer du vent » dues au vent local, vagues de houle dues au vent soufflant ou ayant soufflé sur une aire génératrice plus ou moins éloignée, éventuellement combinaison des deux) résultant du fait que la progression des vagues n'est qu'en première approximation celle d'une ondulation qui ne soit qu'une simple figure géométrique sans transport de masse en moyenne. Il croît très rapidement avec la cambrure des vagues;

e) et même aussi d'un **courant barométrique**, directement dû au gradient horizontal de pression

<sup>(2)</sup> Rappelons que dans les « mers à marée » le caractère alternatif ou giratoire des courants de marée, en moyenne beaucoup plus forts que tout courant superposé d'origine météorologique ou autre, interdit en général le rejet en mer pendant toute la partie des phases de la marée où l'effluent risquerait d'être rapidement rabattu vers la côte à protéger. On peut alors par ex. le stocker dans des « bassins de marée » et ne le rejeter, en général après le début du jusant, que dans des conditions favorables à une dispersion en direction du large, moment prévisible et visible, ce qui peut simplifier le problème.

atmosphérique qui ne crée pas seulement le vent mais qui est transmis intégralement à la mer. Il est généralement passé à tort sous silence, parce que si cet effet a tendance à être contré par un effet inverse de pente dû à la même différence de pression atmosphérique, ceci se produit avec un certain retard rendant difficile à quantifier le mouvement d'eau horizontal résultant, qui peut par ailleurs être amplifié par des effets de « vidange hydraulique » côtière.

f) Les divers courants a à e ne sont pas en général en régime établi stable, et leurs régimes plus ou moins impulsifs se traduisent au total par une nouvelle composante du courant liée à l'oscillation propre du bassin étudié.

## 3. DÉTERMINATION DU COURANT CÔTIER, DANS LES MERS DITES « SANS MARÉES »

### 3.1. Campagnes océanographiques « in situ »

De toute façon cette donnée océanographique qu'est le courant côtier est étroitement sous la dépendance des conditions atmosphériques et a la versatilité des données météorologiques. Le meilleur tableau qu'on en puisse avoir sur un site donné jusqu'à la côte résulte de sa mesure « in situ » en divers points bien choisis d'un réseau suffisamment serré, lors de campagnes océanographiques qui devraient couvrir toutes les principales situations météorologiques sans en exclure les périodes de vent fort, c'est-à-dire de mauvaise mer.

L'exposé des méthodes et des matériels appropriés fait l'objet d'une documentation spécialisée. Qu'il suffise ici de dire que pour que le résultat soit convenable l'ensemble des opérations est lourd, contraignant et long puisqu'il devrait couvrir (quoique de façon discontinue) au moins une année entière.

### 3.2. Modèles mathématiques

C'est ce qui fait, pour les maîtres d'ouvrage, l'intérêt de modèles physico-mathématiques dont ils espèrent la réduction, sinon la suppression totale, des campagnes à la mer.

Les conceptions théoriques, dans le détail desquelles il n'est pas possible d'entrer ici, qui sont à la base des modèles analytiques issus d'équations intégrables avec un minimum de paramètres et de variabilité temporelle et/ou spatiale, se sont multipliées depuis l'œuvre initiale mémorable d'Ekman en 1905, dans le but de pallier les insuffisances de



celle-ci. Les résultats sont largement contradictoires et l'expérience n'a jamais pu trancher entre eux en raison, notamment, de l'impossibilité de trouver un courant de dérive « pur », même très loin des côtes et par grands fonds. Ces théories représentent en fait des facettes différentes, chacune idéalisée différemment, d'une réalité polymorphe, ce qui fait qu'il est toujours possible d'ajuster quelques paramètres pour obtenir certains accords quantitatifs partiels avec les résultats expérimentaux, alors que des vérifications générales conclusives n'ont jamais pu être réalisées que dans le domaine qualitatif.

La complexité des composantes du courant côtier (§2) ne peut être abordée par ces modèles analytiques qui ne peuvent envisager que l'ensemble «  $b+c$  » : courant de dérive + courant de pente engendré par lui, alors que le reste est loin d'être toujours négligeable en comparaison. Ils sont obligés aussi de n'envisager que des conditions météorologiques, bathymétriques et géographiques idéales extrêmement simplifiées et en général très éloignées de la réalité concrète, ce qui leur donne en théorie un domaine d'utilisation extrêmement étendu et paraît séduisant. On considère ainsi en général à la fois : un vent constant en force et en direction ayant soufflé depuis assez longtemps pour qu'on soit arrivé à une situation stable en négligeant des phénomènes transitoires plus ou moins considérables selon les théories, une profondeur constante bordant une côte rectiligne non limitée, une eau non stratifiée homogène dans toute son épaisseur, un courant nul au fond même faible,...

De plus on postule implicitement que la composante verticale de la force de Coriolis peut être négligée devant la poussée d'Archimède, ce qui

précisément n'est pas justifié, en dehors des mouvements méridiens, dans une mer comme la Méditerranée qui est homogène en régime d'hiver (travaux du Laboratoire d'Océanographie Physique du Museum d'Histoire Naturelle, *circa* 1970).

Certes les moyens de calcul modernes permettent l'intégration numérique d'équations non résolubles algébriquement et sont un outil puissant pour l'élaboration de modèles numériques. Mais il reste des problèmes ardues de « conditions aux limites » souvent mal définies, en particulier vers le large où nos connaissances sur la dynamique des eaux méditerranéennes manquent de la précision nécessaire pour aboutir à des modèles construits chacun pour un site précis dans une figuration proche de sa réalité géographique et bathymétrique, modèles échappant aux critiques formulées ci-dessus à l'égard des modèles « passe-partout ».

Et de toute façon tout modèle a besoin d'un calage à partir de mesures en mer dans des conditions météorologiques clés, ce qui ramène à la nécessité de campagnes à la mer adéquates qui ne sont pratiquement jamais réalisées.

En conclusion, le vent, s'il est un paramètre essentiel pour la détermination du courant côtier, est loin d'être le seul et une expérience de plus de 10 ans a finalement amené l'auteur de ces lignes à douter fortement que le calcul prévisionnel de la direction et de la vitesse du courant côtier à partir de la direction et de la vitesse du vent et d'hypothèses simples concernant la forme de la côte et la profondeur du fond, soit actuellement couramment praticable à l'aide de modèles déterministes. (Alors que lui aussi avait commencé par en mettre un au point, du type analytique).

## DEUXIÈME PARTIE

### 4. CONCEPTION GÉNÉRALE

C'est ainsi qu'a été peu à peu dégagé au CERBOM le concept d'une approche statistique du courant côtier défini, à l'immersion-type de 0,5 m, par sa probabilité de ne pas dépasser tels ou tels pourcentages de la vitesse du vent et, pour sa direction, par la probabilité de sa déflexion<sup>(3)</sup> par rapport au

vent en fonction de la valeur de celle-ci (et en distinguant déflexion à droite et déflexion à gauche).

Nous approcherons ces probabilités par les fréquences correspondantes constatées à partir de mesures simultanées du vent et du courant réalisées avec la meilleure précision possible, dans le plus grand nombre possible de cas différents : direction et vitesse du vent, fetch, saison de l'année, heure de la journée, eau stratifiée (thermocline marquée) ou non, profondeur du fond, distance à la côte voisine, configurations géographiques très variées de celle-ci etc. tout en évitant les courants parasites à proximité des embouchures des cours d'eau et des canaux reliant les lagunes à la mer, et les effets hydrauliques des passages resserrés. On intègre ainsi dans l'ensemble, si les cas différents sont assez nombreux, toutes les composantes du courant côtier évoquées au paragraphe 2, et même éventuellement

<sup>(3)</sup> La direction du vent étant universellement définie comme celle d'où il souffle, et celle du courant comme celle où il porte, « l'angle » entre vent et courant est une expression ambiguë. Nous appellerons déflexion l'angle entre une direction origine qui est celle vers laquelle porte le vent et la direction (à droite Dr, à gauche G) vers laquelle porte le courant.

des courants de marée faibles mais inconnus. La plus grande objection est que ce n'est pas tant le vent au moment de la mesure du courant qui compte que toute la série des vents antérieurs, les plus récents et les plus forts ayant le plus d'importance, et que de tels éléments manquent pratiquement toujours. Nous avons partiellement minimisé cet important problème en ne considérant que les cas où le vent est d'au moins 10 nœuds (5 m/s). Ce chiffre a été choisi pour deux raisons :

— la première est que c'est une valeur ronde correspondant, dans les conditions de l'échelle Beaufort, à un aspect de la mer bien connu par les marins expérimentés, celui où l'on va passer de « quelques moutons épars sans traînées visibles » (force 3) à des « moutons franchement nombreux à traînées visibles » (force 4). C'est un repère commode et assez précis, correspondant d'ailleurs à peu près à une « vitesse critique » du vent (supposée par de nombreux auteurs quelque part entre 4 et 6 m/s) qui ferait passer l'état hydrodynamique de la surface de la mer de « lisse » à « rugueux »;

— la seconde est qu'il est d'expérience courante, au moins sur nos côtes méditerranéennes, qu'au-dessous de 10 nœuds le vent a beaucoup plus de chances d'être inconstant et « volage ». Ainsi pour des vents sensiblement inférieurs à 10 nœuds le courant côtier a moins de chances d'être lié surtout au vent régnant, ce qui ne veut pas dire qu'une partie des vents mesurés supérieurs ou égaux à 10 nœuds n'étaient pas des vents en évolution. Mais au total la cohérence des résultats obtenus pour les fréquences définies au début de cette deuxième partie a justifié a posteriori ce choix : elle montre en effet que la réponse du « vecteur courant » au « vecteur vent » est en général assez rapide, quand le module du second est supérieur ou égal à 10 nœuds, pour que au moins *sous sa forme statistique* et avec les incertitudes qui y sont attachées (notamment en ce qui concerne la direction du courant), le degré de stabilité d'un tel vent en direction et/ou en vitesse n'entre pas en ligne de compte. Ceci est déjà, semble-t-il, un résultat nouveau.

## 5. RÉPARTITION DES MESURES. MÉTHODOLOGIE ET PRINCIPES

### 5.1. Mesures utilisées

Le dépouillement des archives du CERBOM a permis tout d'abord de relever des mesures simultanées de vent et de courant faites dans les conditions bien définies sur les côtes méditerranéennes françaises de la frontière italienne à la frontière espagnole et tout autour de la Corse de 1967 à 1991 sur 210 sites différents environ. Soit au total environ 450 mesures dont 218 seulement par vent de 10 à 38 nœuds, ces dernières étant réparties sur 110 sites (66 sites sur les côtes liguro-provençales avec 117 mesures, 31 sur les côtes corses avec 88 mesures, 13 sur celles du Languedoc-Roussillon avec 13 mesures seulement).

Bien entendu les vents de cette gamme les plus faibles sont la grande majorité (93 % inférieurs à 25 nœuds soit 13 m/s) comme le montre la répartition suivante des nombres de cas correspondant à des « classes » de vent de 2 m/s (1 nœud = 1,852 m/h, environ 0,514 m/s; 1 m/s = environ 1,944 nd).

Par ailleurs on n'a rencontré que 2 cas (par mistral de 38 nœuds dans le golfe de Fos) de courant supérieur ou égal à 1 nœud (1,0 et 1,5 nœud soit 0,51 et 0,77 m/s). L'ensemble a couvert toutes les saisons et toutes les heures du jour. Les distances à la côte se sont étagées d'environ 200 m à 4000-5000 m, par des fonds de environ 5 m à plus de 100 m<sup>(4)</sup>. On peut considérer que l'on a opéré dans une très grande diversité de circonstances d'environnement et que l'échantillonnage des 218 cas retenus correspond au mieux à l'ensemble des conditions du paragraphe 4, à la seule exception de l'absence de mesures de nuit et de mesures par mer peu maniable pour un petit navire de recherches. L'absence des premières ne semble pas constituer un défaut significatif. Celle des secondes pourrait biaiser quelque peu nos résultats par sous-évaluation de la composante « courant de vagues » par mer force 4 (agitée)

V (m/s)	5-<7	7-<9	9-<11	11-<13	13-<15	15-<17	17-<19	19-<21	Total
n	103	51	34	12	4	7	2	5	N = 215

(Le nombre total de cas est N = 215 et non 218, la vitesse du vent n'ayant pas été bien déterminée dans 3 cas).

<sup>(4)</sup> Il est bien connu qu'au-delà de cette bande côtière d'environ 2,5 milles marins de large la direction préférentielle du courant est beaucoup plus parallèle à la ligne générale de côte. Un phénomène analogue est d'ailleurs commun à beaucoup de mers du globe (voir par ex. nota 9 et 10, page 26) : il est lié aux sujétions de nature hydraulique de l'écoulement d'un liquide à proximité de la paroi plus ou moins rugueuse d'un bassin.



ou plus, c'est-à-dire par des vents de plus d'une quinzaine de nœuds (7 à 8 m/s) ayant soufflé assez longtemps sur un fetch assez long pour soulever des vagues locales d'environ 1,5 m et plus. En fin d'étude (paragraphe 12.d) on trouvera un complément sur l'absence de mesures très près de terre.

## 5.2. Méthodes de mesure

a) *Vent.* La vitesse du vent a été en principe à la fois estimée par observation de l'aspect de la mer (code Beaufort) et contrôlée par l'anémomètre de tête de mât vers 10 m d'altitude. Sa direction était déterminée, navire face au vent, par le cap au compas.

b) *Courant.* Dans la très grande majorité des cas il a été déterminé en suivant un « courantomètre de dérive », drogue immergée à la profondeur voulue, 0,5 m pour le « courant de surface », et reliée par un fil très fin à un flotteur plat sans prise au vent (fig. 2), avec un positionnement périodique par les moyens d'alors d'une navigation très précise en vue de terre : points par relèvements au compas et/ou distances radar de la navigation courante, avec affinage par segments capables au cercle hydrographique ou sex-

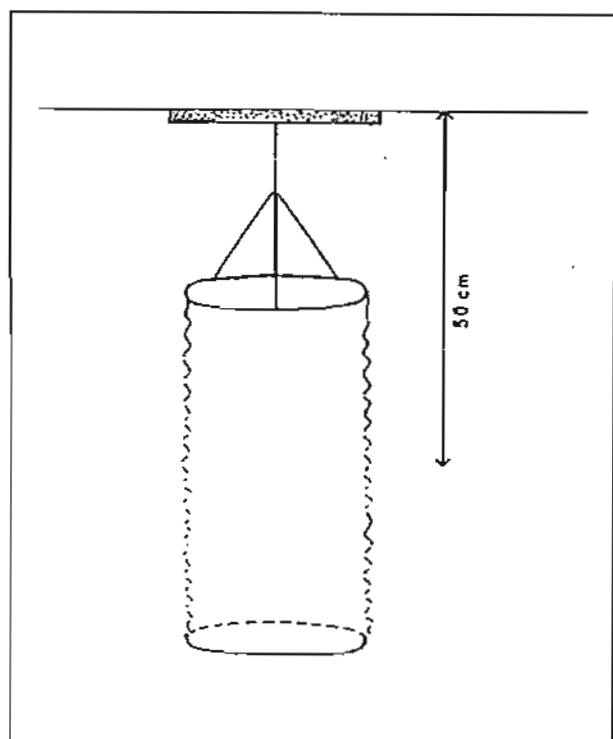


FIG. 2. Courantomètre de dérive type CERBOM à drogue en tissu entre deux cercles de fil métallique, immergé à 0,5 m.

tant horizontal avec une périodicité de 10 à 20 minutes.

Ce courantomètre type CERBOM diffère des courantomètres de dérive classiques par l'absence de fût-ce que d'une simple vergette à minipavillon sur le flotteur, appendice qui aide beaucoup à la visibilité de l'engin mais peut biaiser considérablement la mesure. Une grande attention visuelle doit être ainsi assurée lors des opérations, mais la précision des mesures est bien meilleure.

Dans une vingtaine de cas, par fond suffisamment faible, on a utilisé la méthode de la « bouée à trainard » (fig. 3A-3B) qui donne commodément un courant presque ponctuel (mesures quasi « eulériennes ») tandis que la précédente donne le déplacement moyen sur une distance de quelques centaines de mètres dans le plan horizontal, à l'immersion de la drogue (mesures « lagrangiennes »).

c) *Précision des mesures.* Une imprécision typique sur les directions du vent comme du courant était de l'ordre de plus ou moins  $10^0$  et (en valeur relative) de l'ordre de plus ou moins 10 % sur les vitesses respectives. On en déduit que l'erreur quadratique moyenne (qui a une probabilité d'environ 70 % de ne pas être dépassée) correspondante est d'environ plus ou moins  $14^0$  pour la déflexion, et pour le rapport  $C = \text{courant/vent}$  (exprimés dans les mêmes unités) d'environ plus ou moins  $0,14 C$  soit par ex. d'environ plus ou moins 0,35 % pour  $C = 2,5$  %.

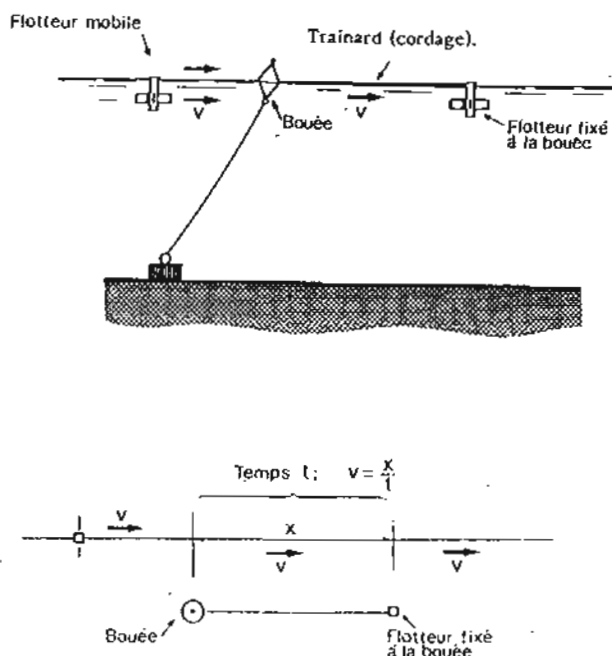


FIG. 3. Une façon simple d'évaluer la vitesse du courant superficiel.

D'après « Plan d'Action pour la Méditerranée : Principes et directives applicables au déversement de déchets dans le milieu marin (PNUE - OMS 1979) ».

## 6. RÉSULTATS POUR LES CÔTES MÉDITERRANÉENNES FRANÇAISES

### 6.1. Direction du courant

La répartition de la déflexion vent-courant dans les 218 cas étudiés est présentée par secteurs de  $20^\circ$  (valeur du maximum de cohérence<sup>(5)</sup>) aux figures 4A et 4D (traits pleins) de deux façons complémentaires. On note que la densité de répartition est maximale dans le secteur centré sur la direction du vent et diminue régulièrement vers la droite comme vers la gauche, plus rapidement dans ce dernier cas, jusqu'à  $70^\circ$  à droite et jusqu'à  $50^\circ$  (et même  $45^\circ$ ) à gauche, limites au-delà desquelles elle chute brusquement avec des variations irrégulières, qui sont peut-être liées à des vents particulièrement instables au moment de leur mesure. Il est intéressant de constater que 70,7 % des déflexions sont comprises entre  $45^\circ$  G et  $70^\circ$  Dr et que de plus les 29,3 % restant correspondent essentiellement à la proximité de

côtes à géographie locale particulièrement compliquée (pointes et caps très avancés, baies et échan-crures très marquées, îles, passes d'entrée de ports, etc.) seuls 1,5 % restant inexpliqués.

De plus, ce qui est très intéressant au point de vue pratique, le pourcentage 70,7 %, monte à 96,8 % si on ne considère que les cas où le courant n'est pas dirigé vers la côte voisine (fait difficile à expliquer mais que nous retrouvons exactement dans le cas des côtes de la Martinique et de la Guadeloupe : paragraphe 7.1.1. ci-après) et n'a pas à être pris en considération pour la pollution côtière. Par contre le fait que la déflexion moyenne soit d'environ  $15^\circ$  Dr semble sans intérêt pratique.

Par ailleurs aucune corrélation n'a été constatée entre l'ampleur de la déflexion et la vitesse du vent, non plus qu'entre le sens (droite, gauche) de cette déflexion et la direction du vent par rapport au Nord (ou à la ligne générale de côte). Tout au plus peut-on noter que les déflexions observées dans des conditions de vent peu différentes dans des zones d'étendue restreinte sont généralement (mais pas toujours) de même sens.

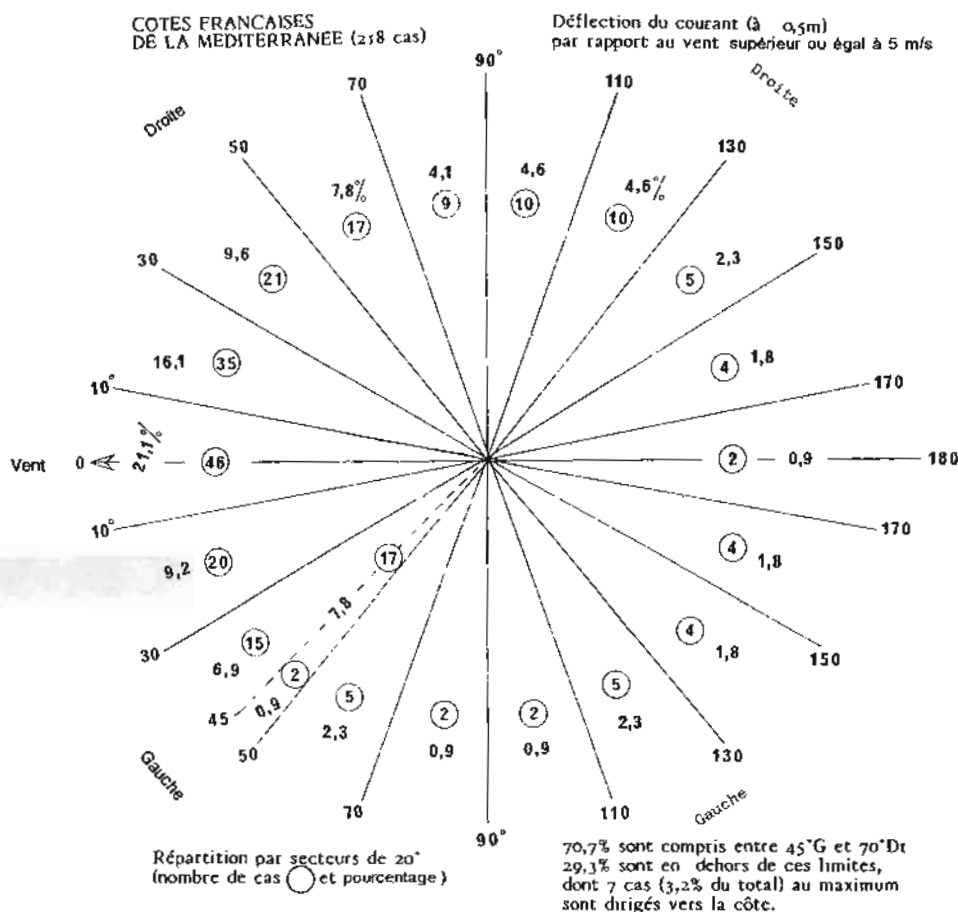


FIG. 4A.

<sup>(5)</sup> Pour les valeurs plus grandes, par ex.  $30^\circ$ , la description est moins précise ; pour des valeurs plus faibles par ex.  $10^\circ$ , on constate que l'inégale densité de répartition des mesures de vent et de courant autour de l'horizon et leur imprécision ont tendance à masquer dans le détail les phénomènes généraux.

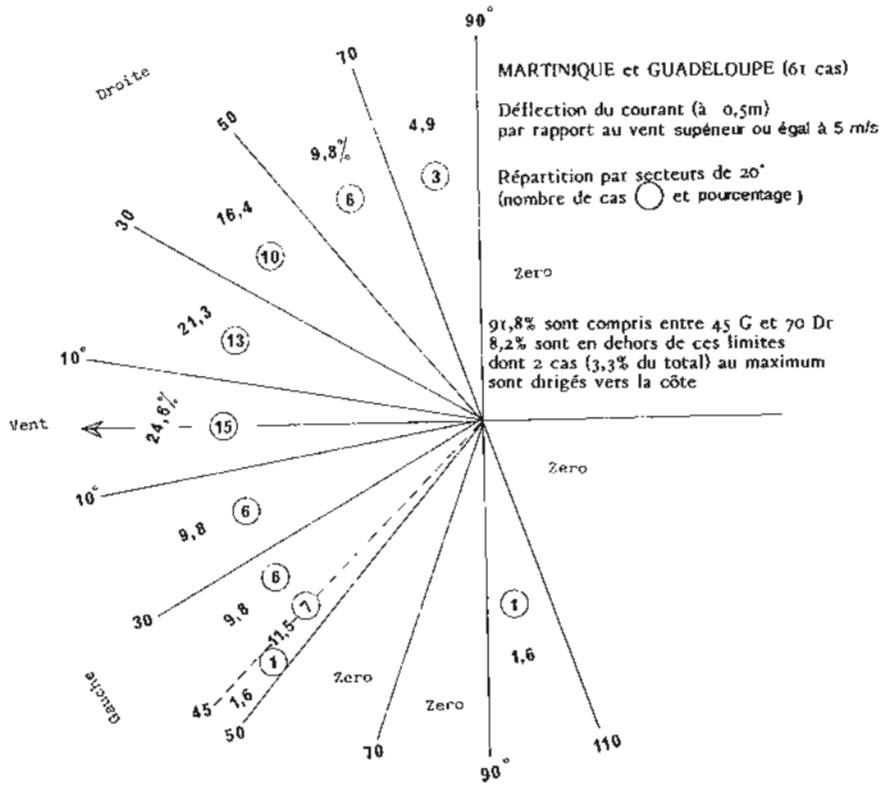


FIG. 4B.

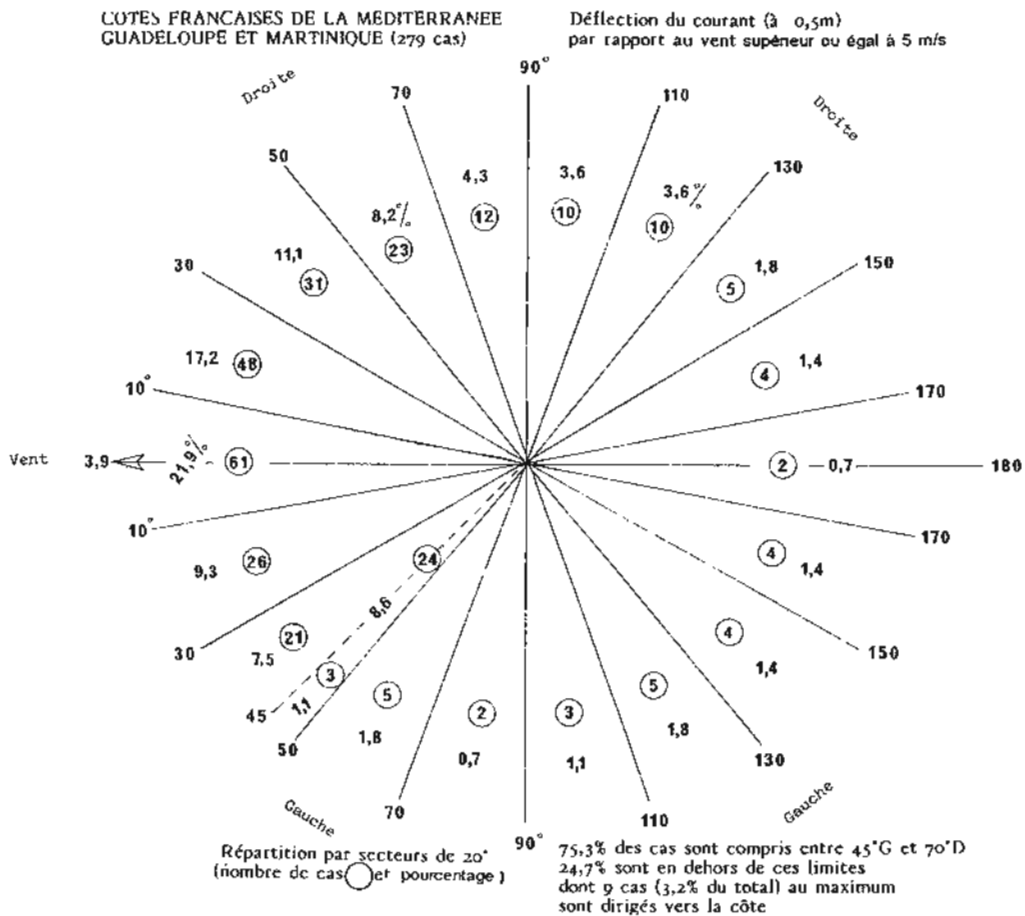


FIG. 4C.

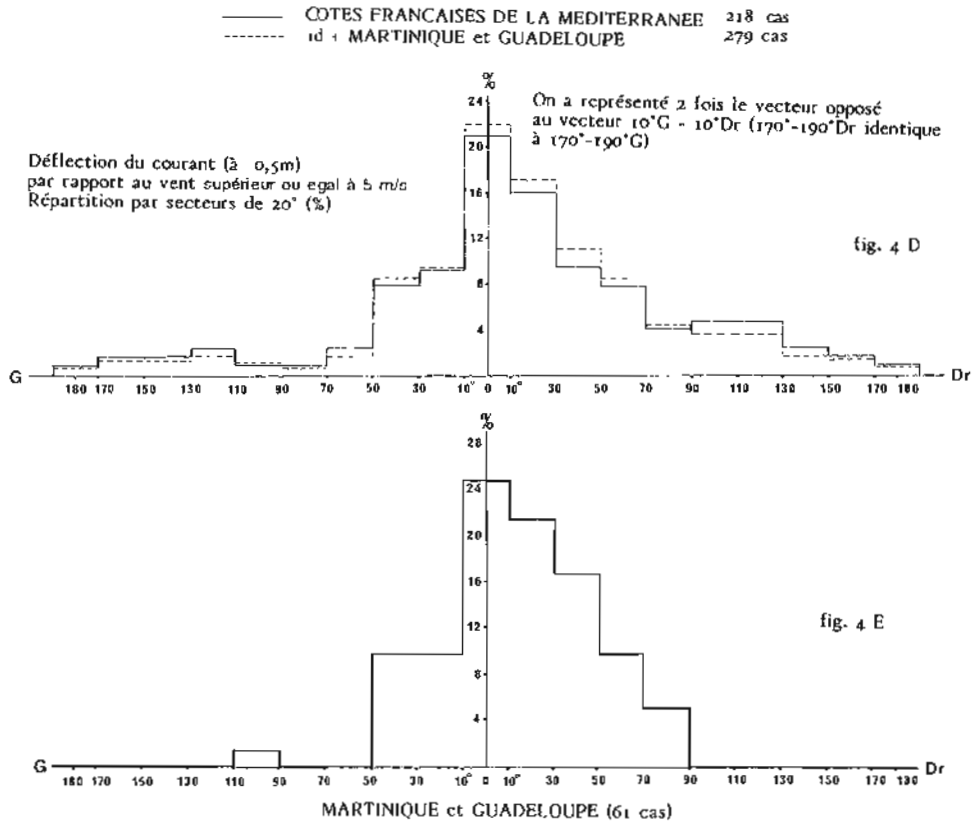


FIG. 4D et E.

6.2. Vitesse du courant

Fréquence des cas où le courant ne dépasse pas tel ou tel pourcentage de la vitesse du vent. (Vent et courant exprimés dans les mêmes unités).

6.2.1.

Le maximum de cohérence<sup>(6)</sup> a été obtenu avec des « classes » de pourcentage de 0,5%. On a ainsi le tableau 1 (pour 215 cas, la vitesse du courant ayant été mal déterminée dans 3 cas où la direction l'a été convenablement).

S : secteur des vents susceptibles d'engendrer un courant portant au point P avec une probabilité 97%

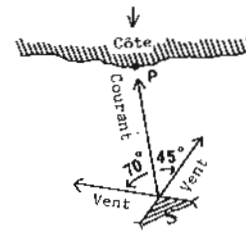


FIG. 4F.

Tableau 1

Classe	0+–0,5	0,5+–1	1+–1,5	1,5+–2	2+–2,5	2,5+–3	3+–3,5	3,5+–4	4+–4,5	4,5+–5	5+–5,5	5,5+–6	6+–6,5	6,5+–7	> 7	Total
n	7	18	35	53	23	28	24	13	6	1	3	2	1	1	zéro	215
N	7	25	60	113	136	164	188	201	207	208	211	213	214	215	215	
f(%)	3,26	11,63	27,91	52,56	63,26	76,28	87,44	93,49	96,28	96,74	98,14	99,07	99,53	100	100	

<sup>(6)</sup> Pour des valeurs plus grandes (par ex. 1%) ou plus petites (par ex. 0,25%) on constate les mêmes phénomènes qu'au nota 5 précédent : description moins fine, ou au contraire trop fine en raison de l'imprécision des mesures et de leur inégale densité de répartition dans la gamme de 0 à 7%.

La classe 2,5+ - 3, par exemple, comprend les cas où la vitesse du courant est supérieure 2,5 et inférieure ou égale à 3,0% de la vitesse du vent.

$n$ : nombre de cas par classe.  $N$ : nombre de cas cumulé.

La fréquence  $f$  représente, exprimée en %, le rapport  $N/215$ .

La classe de beaucoup la plus nombreuse est celle des courants dont la vitesse est comprise entre 1,5% et 2% de la vitesse du vent, quoique, fait qui semble sans intérêt pratique, la moyenne soit d'environ 2,2%. De même la vitesse moyenne des vents supérieurs ou égaux à 5 m/s, égale environ à 8,4 m/s, ainsi que la vitesse moyenne des courants correspondants (environ 0,18 m/s) sont des conceptions abstraites sans intérêt pratique semble-t-il.

Une idée sommaire de la distribution de  $C$  = courant/vent en fonction du vent supérieur ou égal à 5 m/s est donnée ci-après. Malgré des régularités partielles il n'y a pas de corrélation d'ensemble.

Les imprécisions sur la vitesse du vent et du courant, qui affectent leur rapport, se répercutent sur  $N$  surtout lorsque le nombre  $n$  de cas par classe est

faible, d'où une certaine irrégularité dans la progression de  $f$  au-dessus de  $C=4,5\%$  dans le tableau 1.

### 6.2.2.

Dans le tableau 1 nous nous intéressons surtout à la correspondance entre  $f$  et la borne supérieure de la classe correspondante des pourcentages.

*On aboutit finalement au résultat pratique suivant:*

Les points correspondant à une fréquence  $f$  des cas où la vitesse du courant n'est pas supérieure à un pourcentage  $C$  de la vitesse du vent sont représentés à la figure 5, et l'on peut faire passer au mieux entre eux une courbe lissée de façon pratiquement unique, alors qu'on ne peut pas trouver aisément d'expression mathématique simple par la méthode des moindres carrés pour l'ensemble de la courbe, du moins avec les moyens de calcul (calculatrice de poche du type « scientifique ») dont disposait l'auteur<sup>(7)</sup>. On a alors une correspondance continue entre  $C$  et  $f$  (courbes 1 et 2) que l'on peut résumer dans le tableau 2 (avec une précision nominale absolue supérieure à 0,5% pour  $C$  et 0,1% pour  $f$ , bien suffisante) entre les chiffres duquel on peut interpoler linéairement.

Nombres de cas par classe de vent de 2 m/s et par classe de  $C\%$  de 1%.

Vent m/s C %	5-<7	7-<9	9-<11	11-<13	13-<15	15-<17	17-<19	19-<21	Total
<1	11	4	8		1	1			25
1+ -2	40	19	13	6		6	2	2	88
2+ -3	19	14	12	4				2	51
3+ -4	20	13	1	2				1	37
4+ -5	6	1							7
5+ -6	5								5
6+ -7	2								2
Total	103	51	34	12	1	7	2	5	215

Tableau 2.

$f\%$	11	47	63,5	76,5	87,5	90	93,5	94,5	95,5	97	97,5	99	100
$C\%$	1	2	2,5	3	3,5	3,7	4	4,2	4,6	4,8	5	6	7

(7) Celui-ci a ultérieurement calculé l'expression de cette courbe dans l'approximation polynômiale, sur ordinateur de bureau Apple Macintosh Plus.

Équation:  $y = 7,1339 - 29,483x + 48,4246x^2 - 15,2543x^3 + 1,9393x^4 - 0,0891x^5$  ( $y=f\%$ ,  $x=C\%$ ) avec un coefficient de corrélation nominale égal à un.

A l'épaisseur près du trait de graphique les deux courbes sont indiscernables l'une de l'autre et pratiquement rien n'est à changer au tableau 2.



CÔTES FRANÇAISES DE LA MEDITERRANEE  
(215 cas)

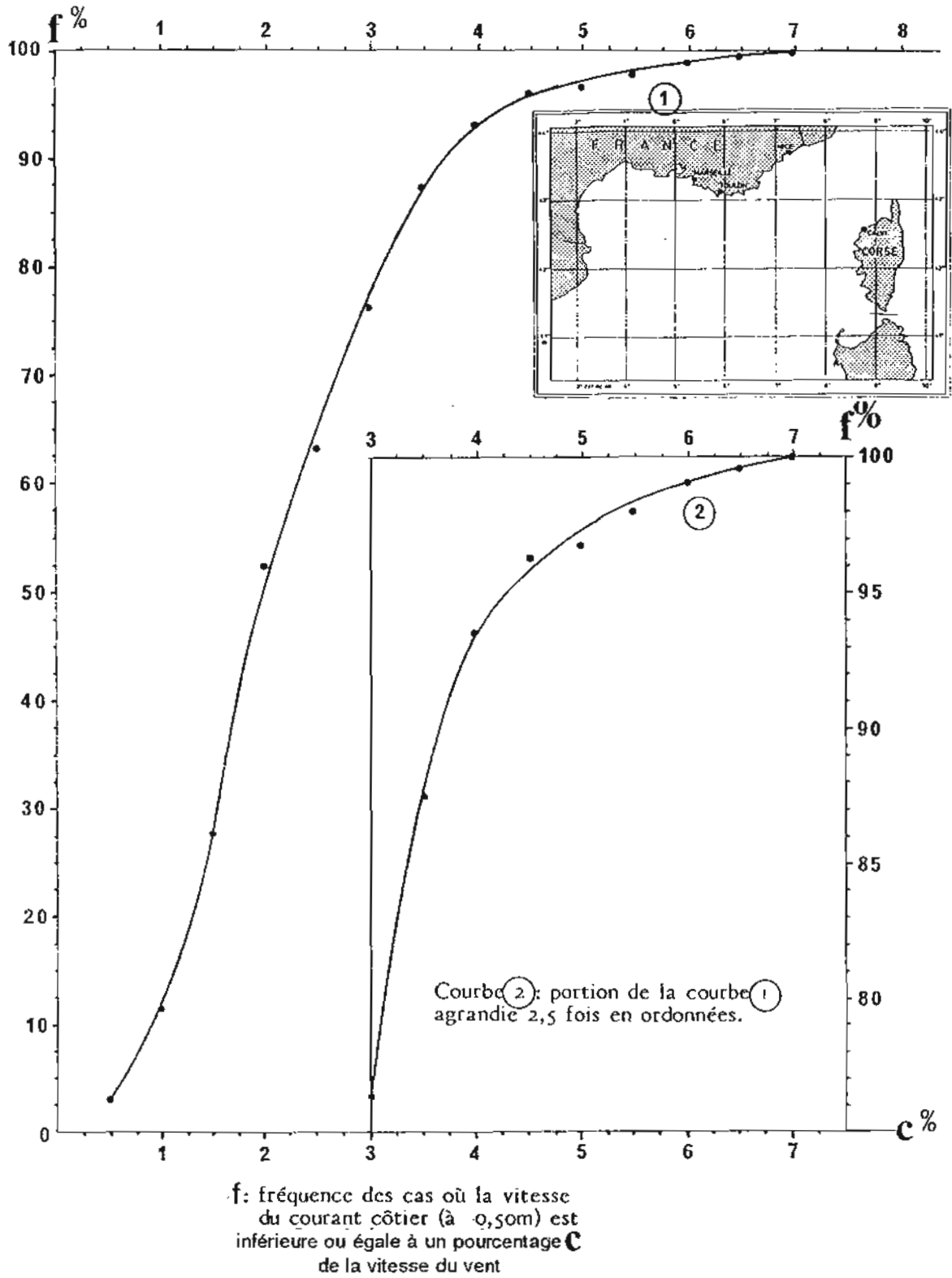


FIG. 5.

### 6.3. Conclusion provisoire – Détermination du courant maximal admissible sur les côtes françaises de la Méditerranée

#### 6.3.1. Par vents non inférieurs à 5 m/s

On conçoit que les résultats ci-dessus, qui ne dépendent d'aucune considération théorique et ne reposent que sur une longue expérience de mesures à la mer, puissent permettre, au moins dans les conditions géographiques de l'expérience, de déterminer dans un but prévisionnel le courant maximal admissible  $W$  sur le site d'un émissaire en projet.  $W$  est relié à un vent maximal admissible  $V$  par  $W = CV$ ,  $W$  et  $V$  étant exprimés dans les mêmes unités et  $C$  étant le rapport  $W/V$  correspondant à une valeur de  $f$  à définir.

En effet on ne pourrait pas, en général, avec des ouvrages d'ampleur raisonnable, obtenir une décroissance bactérienne totale suffisante pour que la concentration bactérienne finale soit suffisamment faible dans les conditions de courant les plus défavorables que l'on puisse rencontrer sur le site. Le « courant maximal admissible », de nature probabiliste, sera celui dont la vitesse moyenne sur le parcours de dérive dans la direction du point le plus sensible (fig. 1) soit telle que cette concentration finale ait une probabilité  $p$  suffisante de ne pas être dépassée (par ex. 95 %, 90 %, 85 %, 80 %, ...) selon ce qui apparaîtra raisonnable dans une optique « performances - prix ».

Sans entrer dans des détails qui n'ont pas leur place ici, disons en effet qu'on peut :

a) déterminer le secteur des vents tels que, d'après les résultats exposés au paragraphe 6.1, les courants côtiers correspondants puissent porter au point de la côte à protéger avec une fiabilité d'environ 97 % (fig. 4F);

b) calculer, à partir des statistiques météorologiques, les fréquences  $p_1$  des vents de ce secteur ne dépassant pas telles et telles vitesses  $v$ , et le tableau 2 donne les fréquences  $f$  des courants  $w = Cv$  correspondants, de probabilité totale  $p$  environ 0,97.  $p_1.f$ . En jouant sur  $p$  et  $f$ , que l'on recherche les plus élevés possibles, (pratiquement  $f$  ne sera pas inférieur à 0,90), on calcule  $p_1$  le plus faible possible correspondant au vent  $V$  et au courant  $W$  maximaux admissibles.

#### 6.3.2. Cas des vents inférieurs à 5 m/s

A défaut d'une étude aussi complète, des tests ont été effectués sur une centaine de mesures par vents de 2 à 4,5 m/s et une quarantaine par « vents calmes » de 0,5 à 1,5 m/s. Des valeurs de  $C$  supérieures à 7 % (allant jusqu'à 12 % dans la première série et jusqu'à nettement plus de 20 % dans la seconde) ont été rencontrées, mais l'on peut penser qu'une bonne partie d'entre elles sont incertaines, en raison des imprécisions accrues sur une faible vitesse du vent, qui, à la mer, est plutôt appréciée que mesurée. Il en va de même pour les déflexions, la direction d'un vent faible étant, à la mer bien plus

difficile à déterminer que celle d'un vent fort. Sur un petit navire les incertitudes pour des vents très faibles peuvent devenir énormes (de l'ordre de plus ou moins 45°). Dans ces conditions une certaine augmentation de la fréquence des déflexions au-delà de 45° G et 70° Dr n'est probablement guère significative.

Ces fortes valeurs de  $C$  sont néanmoins en général de moins en moins rares et de plus en plus élevées à mesure que le vent est plus faible : le courant a alors de plus en plus de chances de ne pas être surtout lié au vent actuel, mais à des vents antérieurs plus forts, ou d'être surtout un courant de densité.

Étant donné toutes ces incertitudes, et que dans  $w = Cv$  une certaine compensation existe en confrontant les deux groupes de vents entre une valeur accrue de  $C$  et une moindre valeur de  $V$ <sup>(8)</sup>, une approximation consistera à admettre que le courant maximal  $W$  du paragraphe précédent, relatif à des vents supérieurs ou égaux à 5 m/s, l'est également pour toute la gamme des vents en y comprenant les plus faibles.

#### 6.3.3. Remarque générale

Cette méthode dépend de l'existence de statistiques météo suffisamment précises et sûres couvrant le littoral de façon suffisamment dense, ce qui est le cas général sur les côtes méditerranéennes françaises en raison, en particulier, de l'abondance des stations météo de sémaphores. Elle devrait donner des résultats plus précis que la seule adoption – évidemment infiniment plus simple – d'un courant côtier dont la vitesse soit présumée comme plus ou moins rarement dépassée, quelle que soit sa direction.

Le document cité à la figure 3, préparé par l'Institut de Génie Sanitaire de l'École Polytechnique de Milan (Italie) propose, page 201, la vitesse de 0,20 m/s indiquée, sans plus de détails, comme « rarement dépassée au delà de 5 à 20 % du temps au moins sur les côtes italiennes par exemple ».

Un test sur 93 mesures effectuées sur les côtes provençales par vent supérieure ou égal à 5 m/s donne 69 cas de courant à l'immersion de 0,5 m ne dépassant pas 0,20 m/s (soit 74,2 %), et sur 208 mesures par vent quelconque de la frontière italienne à la frontière espagnole, on a 164 cas, soit 78,8 %, chiffre voisin de 80 %.

La comparaison apparaît ainsi relativement satisfaisante, du moins compte tenu de l'incertitude sur l'immersion, non précisée, du courant de 0,20 m/s sur les côtes italiennes, alors que, comme nous le verrons dans la 3<sup>e</sup> partie, le courant côtier diminue rapidement de vitesse avec l'immersion dans les premiers mètres, et surtout les premiers décimètres, sous la surface.

<sup>(8)</sup> Pour l'ensemble des mesures par vent de moins de 5 m/s (environ 250) on n'a pas rencontré, et de loin, de courant supérieur au courant le plus fort rencontré pour l'ensemble des 215 vents supérieurs ou égaux à 5 m/s (0,46 m/s avec vent de 4 m/s contre 0,77 m/s avec vent de 20 m/s).

En l'absence de statistiques météo convenables et si l'on recule devant de longues et contraignantes séries de mesures à la mer sur le site, le chiffre de 0,20 m/s comme courant maximal admissible pourra servir de repère pour se donner un simple ordre de grandeur en vue de fixer les idées, du moins dans des conditions analogues à celles des côtes italiennes et des côtes françaises de la Méditerranée<sup>(9)</sup>.

## 7. EXTENSION À D'AUTRES RÉGIONS

### 7.1. Martinique et Guadeloupe<sup>(10)</sup>

On a également analysé, selon les mêmes principes généraux qu'au paragraphe 6, les mesures effectuées par le CERBOM aux Antilles françaises de 1969 à 1976. L'existence d'une marée généralement très faible mais non entièrement négligeable n'a permis de retenir que 61 cas correspondant à la fois à l'absence pratique de courant de marée (périodes voisines de l'étales) et à un vent compris entre 10 et 17,5 nœuds (soit 5 et 9 m/s) pour 10 sites. Le courant maximal rencontré a été de 0,49 m/s (un peu moins d'un nœud) par vent de 7 m/s.

#### 7.1.1.

Les résultats concernant la direction du courant côtier sont représentés aux figures 4B et 4E. Par rapport aux côtes françaises de la Méditerranée on observe un assez net resserrement général autour de la direction du vent, ce qui est peut-être en relation avec les faibles variations de la direction de

celui-ci, soufflant (régime d'alizés) en général de l'ENE à l'ESE en passant par l'Est, plus rarement du NE. L'éventail 45°G-70°Dr est encore plus privilégié (91,8% au lieu de 70,7%), les cas en dehors correspondant encore à la proximité de portions de côte à la géographie particulièrement compliquée, cas dont ceux dirigés vers la côte voisine sont également rarissimes. On a ainsi dans l'éventail 45°G-70°Dr encore environ 97% des cas susceptibles de véhiculer la pollution à la côte proche.

La similitude des résultats permet de regrouper les 279 cas au total des côtes françaises de la Méditerranée et de Martinique-Guadeloupe (fig. 4C et 4D trait tireté) avec exactement le même résultat pratique pour la détermination, avec une fiabilité d'environ 97%, des secteurs de vents tels que les courants côtiers correspondants puissent porter au point de la côte à protéger.

#### 7.1.2. Vitesse du courant

a) Avec 61 cas au lieu de 215 le nombre de cas par classe est en général plus faible et plus irrégulier que pour les côtes méditerranéennes françaises. La répartition est représentée au tableau 3, construit comme le tableau 1.

On peut aussi tracer ici, de façon pratiquement unique au moins au-dessous de C=7%, une courbe lissée de la fréquence *f* des cas où le courant ne dépasse pas C% de la vitesse du vent (fig. 6). Elle est un peu plus incertaine au-dessus de C=7%, et un nombre de cas plus grand aurait probablement permis de la continuer jusqu'à ce qu'elle tende harmonieusement à l'horizontale vers C=8% ou un peu au-delà<sup>(11)</sup>.

Tableau 3

Classe	0+ 0,5	0,5+1	1+1,5	1,5+2	2+2,5	2,5+3	3+3,5	3,5+4	4+4,5	4,5+5	5+5,5	5,5+6	6+6,5	6,5+7	7+7,5	Total
<i>n</i>	3	13	9	9	10	3	3	2	2	1	2	zéro	2	1	1	61
<i>N</i>	3	16	25	34	44	47	50	52	54	55	57	57	59	60	61	
<i>f</i>	4,92	26,23	40,93	55,74	72,13	77,05	81,57	85,25	88,52	90,16	93,44	93,44	96,72	98,36	100	

La fréquence *f* représente en pourcentage le rapport *N*/61.

<sup>(9)</sup> Par ailleurs le même chiffre de 0,20 m/s, sans indication d'immersion, est donné, d'après les travaux de l'« Institut de Biologie des Mers du Sud » (Sébastopol) comme n'étant pas dépassé dans environ 80% des cas en mer Noire entre le Sud de la Crimée et Batoum dans une bande côtière de 1 à 2 milles marins de large. Dans cette bande le courant est de plus aussi bien perpendiculaire que parallèle au rivage, alors que plus au large il est généralement plus fort et préférentiellement parallèle à la ligne générale de côte (G.A. Goldberg, V.I. Zats *et al.* 1991. Ouvrage de 230 pages en russe : « Modélisation des processus d'autoépuration des eaux dans la zone du plateau continental » pp. 51-60, Édité par « Leningrad Gidrometeoizdat »).

<sup>(10)</sup> Là aussi le courant général, suffisamment au large, est préférentiellement parallèle à la ligne générale de côte.

<sup>(11)</sup> Sur ordinateur de bureau par la méthode des moindres carrés on a ultérieurement obtenu dans l'approximation polynômiale la courbe ( $y=f\%$ ,  $x=C\%$ ) d'équation :

$$y = -15,7799 + 41,0892x + 2,7806x^2 - 3,5591x^3 + 0,5957x^4 - 0,0309x^5$$

avec un coefficient de corrélation nominale égal à un.

Elle est pratiquement indiscernable de la courbe de la figure 6 jusqu'à  $c=7\%$  mais elle atteint un maximum inférieur à  $y=100$  pour  $x=7,49$  ce qui n'a pas de réalité physique. De leur côté les approximations logarithmiques et en fonction de puissance pour les derniers points conduisent toutes à  $y=100$  pour des valeurs de  $x$  à peine supérieures à 7,5 (par ex. pour les 8 derniers points, dans l'approximation logarithmique  $y=53,545 + 22,962 \ln x$  avec un coefficient de corrélation 0,993, on atteint  $y=100$  pour  $x=7,56$ ), avec des courbes pratiquement indiscernables de celle de la figure 6 jusqu'à  $c=7,5\%$ . Le tableau 4 reste ainsi pratiquement inchangé.

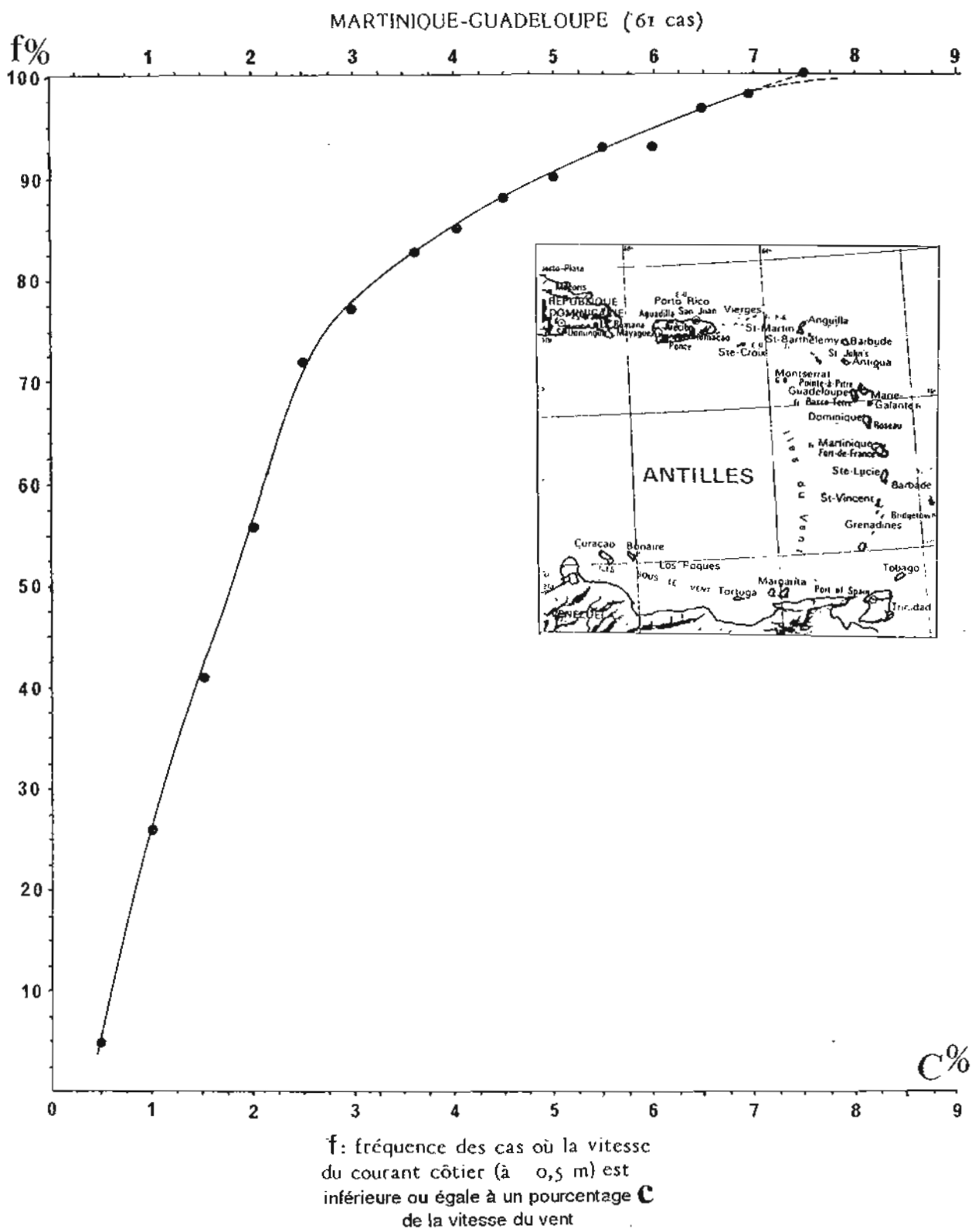


FIG. 6.



Tableau 4

C%	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6,5	6,5	7,5	7,5	8 à 8,5?
f%	72	77	81,5	85,5	88,2	90,2	92,5	94,8	96,7	98,3	(99-99,5)	100

Le tableau 4, analogue au tableau 2, en résumé la partie supérieure (courbe 1 de la figure 7) et en particulier celle utilisable pour des calculs prévisionnels de courant maximal admissible de façon analogue aux côtes françaises méditerranéennes (§ 6.3).

b) Mais on constate de plus, en comparant les tableaux 2 et 4 que, au-dessus de  $C=3\%$ , la fréquence  $f$  du tableau 2 est supérieure à celle du tableau 4, c'est-à-dire que pour une même vitesse  $V$  de vent la vitesse  $CV$  du courant en Martinique-Guadeloupe est supérieure à celle sur les côtes françaises de la Méditerranée. Ceci est qualitativement et en partie en accord avec la théorie d'Ekman (et diverses théories dérivées) pour laquelle le courant de dérive ainsi que le courant de pente côtier qui lui est proportionnel, donc la combinaison des deux qui est une approche du courant côtier total, est inversement proportionnel à  $\sqrt{\sin \text{Lat}}$  pour le même vent. Il est intéressant de tenter une vérification quantitative en tenant compte de ce facteur ou d'un facteur voisin. Si nous multiplions les abscisses des courbes de la figure 5 relative à la latitude  $43^\circ$  par

$\sqrt{\frac{\sin 43^\circ}{\sin 15,5^\circ}} = 1,60$  nous obtenons la courbe 2 de la figure 7 relative à la latitude  $15,5^\circ$ .

Dans sa partie intéressante pour un calcul d'émissaire, c'est-à-dire par exemple dans la gamme des fréquences de 90 à 97%, cette courbe 2 est assez proche de la courbe 1. Par tâtonnements on voit qu'elle serait encore plus proche (courbe 3) en

utilisant non pas le facteur  $\left(\frac{\sin 43^\circ}{\sin 15,5^\circ}\right)^{0,5} = 1,60$  mais  $\left(\frac{\sin 43^\circ}{\sin 15,5^\circ}\right)^{0,363} = 1,405$ .

En effet si dans le tableau 2 (latitude  $43^\circ$ ) nous multiplions  $C$  par 1,405 et comparons les fréquences  $f$  correspondant (courbe 3) à ceux de la courbe 2, nous obtenons le tableau 5 suivant pour la latitude  $15,5^\circ$ .

Les deux dernières lignes sont pratiquement identiques pour  $C$  de 5,25 à 7%, la différence augmentant assez rapidement au-dessous de  $C=5,5\%$ , mais dans une gamme de valeurs de  $f$  généralement trop faibles dans un calcul d'émissaire (§ 6.3).

Alors, l'utilisation de l'avant-dernière ligne risquerait de donner des valeurs de  $f$  légèrement plus faibles que la réalité, ce qui conduirait à un courant admissible un peu trop fort, en nous plaçant du côté de la sécurité.

Nota : On peut noter que les courants inférieurs à 0,20 m/s forment 82% des 61 cas de vent relevés, ce qui semble pouvoir étendre à la région cette valeur de vent parfois considérée comme « maximale admissible », faute de mieux, en diverses zones de la Méditerranée (§ 6.3.3.).

## 7.2. Autre régions

### 7.2.1.

On peut ainsi envisager pour un site de latitude comprise entre environ  $43^\circ$  et environ  $15^\circ$ , et un peu en dehors de ces limites, une généralisation qui doit être prudente puisque nous n'avons de séries de mesures que pour ces deux bornes. Elle consisterait, pour des latitudes différentes, dans des mers marées, à utiliser par exemple un tableau 6, issu du tableau 2 relatif à  $43^\circ$  en multipliant les coefficients  $C$  par un facteur  $k$  donné par le tableau 7.

Tableau 5

C%	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6	6,25	6,5	6,75	7	7,25
f% courbe 3	84	88	90,8	92,5	93,7	94,8	95,7	96,6	97	97,5	97,8
f% courbe 1 - tableau 4	89,1	90,2	91,7	92,5	93,7	94,8	95,7	96,7	97,5	98,3	environ 99,5

Tableau 6

C%	3,4 k	3,5 k	3,6 k	3,7 k	3,8 k	4,0 k	4,2 k	4,4 k	4,6 k	4,8 k	5,0 k	5,5 k	6,0 k	6,5 k	7,0 k
f%	85	87,5	89	90	91,5	93,5	94,5	95,5	96,5	97	97,5	98,5	99	99,5	100

Tableau 7

$k = \left(\frac{\sin 43^\circ}{\sin \text{Lat.}}\right)^{0,363}$	Lat	$50^\circ$	$45^\circ$	$43^\circ$	$40^\circ$	$35^\circ$	$30^\circ$	$25^\circ$	$20^\circ$	$15,5^\circ$	$15^\circ$	$10^\circ$
	k	0,96	0,99	1	1,02	1,06	1,12	1,19	1,28	1,4	1,42	1,64



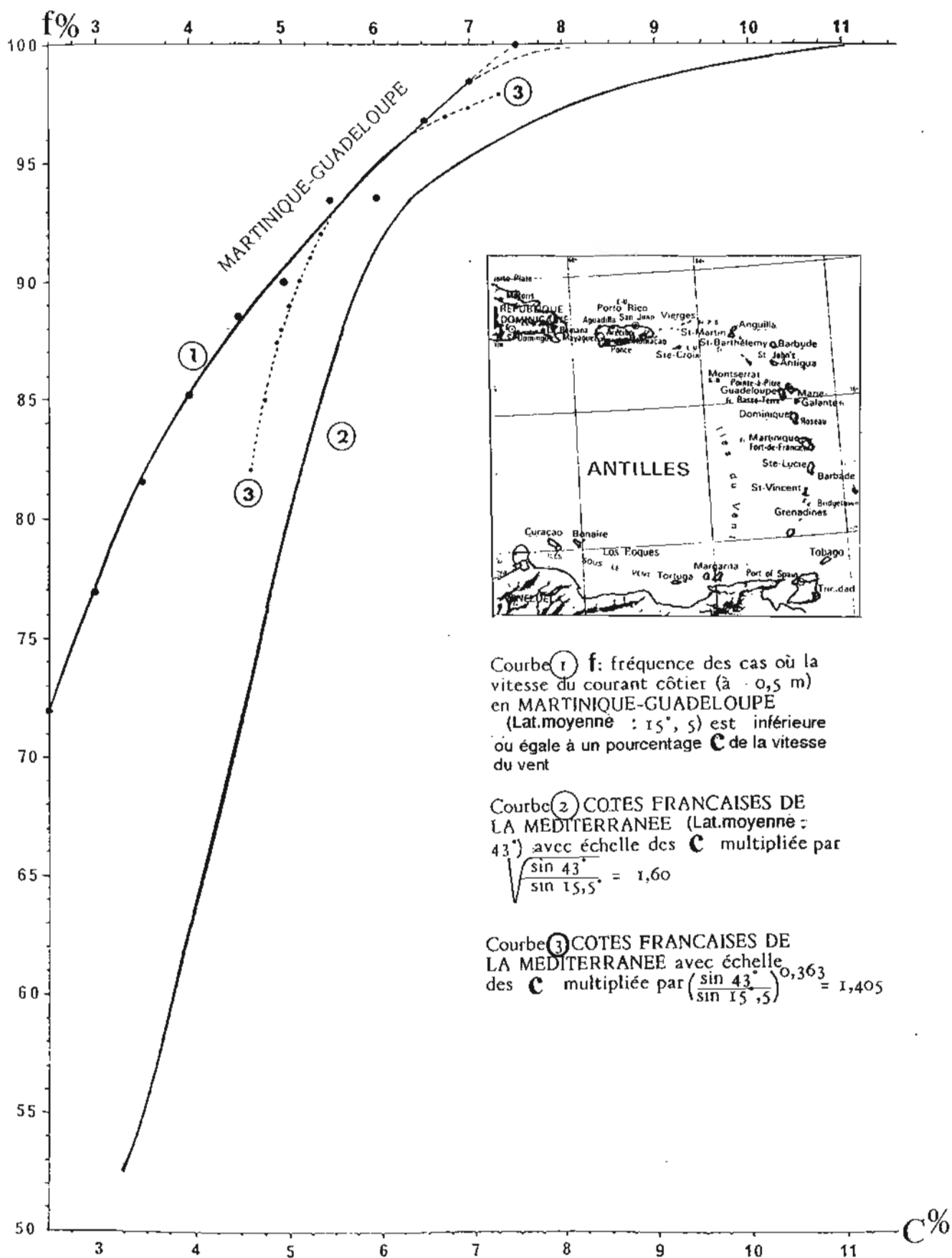


FIG. 7.

De son côté, et avec les mêmes restrictions, la déflexion vent – courant reste, avec une fiabilité environ 97 %, dans l'éventail 45° G-70° Dr (à inverser dans l'hémisphère sud) pour les courants portant à la côte voisine.

### 7.2.2.

A l'équateur et à proximité  $k$  perd toute signification et rien ne peut servir d'alternative à la campagne de mesures de courant « in situ » évoquée au § 3.1.

## 8.

Enfin il est bien clair que le courant côtier déterminé par la présente méthode comme ayant une certaine probabilité d'être au plus égal à tel ou tel pourcentage de la vitesse du vent vient, dans les mers à marées sensibles, se superposer au courant de marée.

## TROISIÈME PARTIE

### VARIATION DU COURANT CÔTIER AVEC L'IMMERSION DANS LES PREMIERS MÈTRES

#### 9. Position du problème

On constate de façon générale une diminution très rapide des taux bactériens sur une même verticale dans les premiers mètres à partir de la surface dans le panache de dérive du mélange eau d'égout – eau de mer issu d'un émissaire, et de plus le plancher de la courbe des ébats balnéaires les plus courants ne descend guère au dessous de 1 m. C'est ce qui a fait choisir au CERBOM l'immersion moyenne de 0,5 m pour la mesure du « courant de surface », immersion d'ailleurs commode pour le courantomètre de dérive (fig. 2). Or une variation de la vitesse du courant de dérive, dans les premiers mètres et même les premiers décimètres d'une « couche limite » sous la surface, beaucoup plus rapide que prévu par les théories classiques est plus que soupçonnée depuis au moins 1932<sup>(12)</sup>, mais à notre connaissance sans études expérimentales « in situ » rapportées par la littérature scientifique. Il est normal de penser que ce phénomène se répercute sur le courant côtier<sup>(13)</sup>.

Le problème prend une importance pratique accrue au moment où l'on envisage par exemple que l'utilisation de radars VHF, HF ou MF pour la mesure du courant côtier intégré sur de vastes étendues et dans une certaine tranche d'eau sous la surface, déjà réalisée avec succès de manière occasionnelle,

<sup>(12)</sup> Ref. C.G. Rossby – 1932 – A generalisation of the theory of the mixing length – Massachusetts Institute of Technology Meteorological Papers. Vol. I, n° 4.

<sup>(13)</sup> En fait une vérification expérimentale partielle, limitée à des immersions supérieures ou égales à 3 m, et restée apparemment unique, effectuée en 1934, concernait précisément un courant côtier (par fond de 17 m), compliqué d'un courant de marée sensible mais connu et qu'on pouvait retrancher, et par vent de 5 à 7,5 m/s dans l'axe de la baie de l'expérience. (Réf. C.G. Rossby and R.B. Montgomery : The layer of frictional in wind and ocean currents. *Papers in phys. ocean. and meteorology*. Vol III n° 3 – avril 1935, fig. 42, p. 89. Ed by M.I.T. and W.H.O.I.

puisse entrer à plus ou moins bref délai dans la pratique courante. L'épaisseur de la tranche d'eau en question varie en effet très sensiblement avec la fréquence radar utilisée (travaux du Laboratoire de Sondages Électromagnétiques de l'Environnement Terrestre – Université de Toulon – circa 1981-1988).

Il en est de même pour la mesure du courant par « courantomètre doppler » (Acoustic doppler current profiler) utilisant les échos diffusés par le plancton, méthode sur laquelle la revue *MET-MAR* publiée par la section Météorologie Maritime de la Météorologie Nationale a attiré l'attention dans son n° 152 (3<sup>e</sup> trimestre 1991) pages 7 à 9.

#### 10. MESURES DU CERBOM

##### 10.1. Conditions générales

Nous avons ainsi été amenés à analyser dans cette optique une soixantaine de mesures de courant côtier simultanées, au même endroit, effectuées, les unes à 0,5 m et d'autres soit à 5 m, soit à 2 m, soit à l'« extrême surface », par le CERBOM sur les côtes provençales de l'entrée du golfe de Saint-Tropez à la baie de Nice, presque toutes à l'occasion d'opérations de la détermination de la qualité bactérienne de l'eau de mer. On a opéré par fonds de 5 m à 45 m mais généralement voisins de 20 à 25 m, à des distances du rivage de l'ordre de 300 m à 1200 m seulement et de façon générale par beau temps, avec vent presque toujours inférieur à 10 nœuds.

Les mesures au moyen de courantomètre de dérive type CERBOM (fig. 2), réduit pour l'extrême surface à une plaque carrée de 30 cm côté en aggloméré entre deux minces feuilles de formica, le tout de 2 cm d'épaisseur, ont été effectuées à partir et à proximité de bouées mouillées (fig. 3) sauf pour les très anciennes mesures à 2 m, faites en suivant

Tableau 8

Immersion	Nombre de cas	$r$ varie entre	$r$ moyen	écart type
2 m	4	1,18 et 1,36	1,29	0,09
5 m	37	1,00 et 6,40	1,87	1,09
0,01 m	14	1,12 et 4,00	2,26	0,81

Pour l'immersion 0,5 m on a par définition  $r=1$ .

les 2 courantomètres fréquemment positionnés par une navigation très précise en vue de terre par segments capables pris au cercle hydrographique et en ne retenant que les portions de trajectoires très voisines l'une de l'autre, se trouvant dans des conditions géographiques, notamment de profondeur du fond, très voisines.

la vitesse à 0,01 m à la vitesse à 0,5 m nous trouvons les rapports  $r$  suivants, avec une forte dispersion absolument non gaussienne (tableau 8).

Il est probablement plus parlant de comparer la vitesse moyenne à 0,01 m, normalisée à la valeur 1, à la vitesse moyenne à l'immersion  $i$  (tableau 9).

Tableau 9

$i$ (m)	0,01	0,5	2	5
$R_i$	1	2,26	2,92	4,23
	par définition	résultats moyens expérimentaux		

$$R_i = \frac{\text{Vitesse à } 0,01 \text{ m}}{\text{Vitesse à } i \text{ m}}$$

Il est clair que les variations du courant côtier avec l'immersion, en vitesse et en direction, sont susceptibles de dépendre non seulement de cette immersion mais aussi de multiples autres facteurs dont, par exemple, la profondeur du fond, sa nature (rugosité), sa pente, la géographie du trait de côte, la direction du mouvement de l'eau par rapport à cette côte<sup>(14)</sup>, et peut-être aussi, dans une certaine mesure, de la vitesse du vent elle-même<sup>(15)</sup>. On peut ainsi s'attendre à une dispersion des résultats des mesures effectuées à une même immersion notablement supérieure à celle qu'on pourrait attendre de leur seule imprécision.

L'approximation linéaire par la méthode des moindres carrés ne rend pas compte de ce que la variation dans la première tranche de 0,5 m sous la surface est beaucoup plus rapide que dans les tranches plus profondes. Les approximations exponentielle et en fonction de puissance donnent des courbes plus réalistes très voisines avec un coefficient de corrélation très élevé, la meilleure étant la seconde. La courbe correspondante, très proche de celle qu'on pourrait tracer sans calculs, est donnée à la figure 8 avec son expression mathématique.

Elle peut être résumée par le tableau 10.

Tableau 10

$i$ (m)	0,01	0,25	0,5	1	2	3	4	5
R	1	2	2,3	2,7	3,2	3,5	3,7	3,9

Ce profil approximatif moyen n'a évidemment, étant donné les circonstances de son établissement, qu'un caractère indicatif, et il peut en particulier exister des « stratifications courantologiques » dans cette couche de 5 m toujours pourtant située nettement au dessus de la thermocline. Par exemple, à 5 m on n'a retenu que 37 cas sur 46 : à 4 d'entre eux le courant était nul mais à 5 autres il était plus fort qu'à 0,5 m<sup>(16)</sup>. Il montre en tout cas très bien une très

## 10.2. Résultats des mesures

### 10.2.1. Profil approximatif moyen de décroissance du courant dans les premiers mètres sous la surface

En faisant le rapport d'une part de la vitesse à 0,5 m aux vitesses à 2 m et 5 m, et d'autre part de

<sup>(14)</sup> On conçoit bien, par exemple, fait que nous avons parfois constaté in situ, qu'à un mouvement général de l'eau dirigé dans les premiers décimètres vers une digue proche puisse correspondre, un peu plus bas, un courant de retour en sens inverse. Mais de toute façon, malgré des régularités partielles, aucune corrélation d'ensemble n'a été par ex. trouvée entre les variations du courant côtier (direction ou vitesse) entre 0,01 m et 0,5 m et la direction du courant à 0,01 m par rapport à la côte.

<sup>(15)</sup> On verra plus loin (§ 11.2.) que par un procédé indirect un grand nombre d'autres mesures effectuées à 3 m viennent s'intégrer parfaitement à l'ensemble de nos mesures, sans montrer une influence sensible de la vitesse du vent.

<sup>(16)</sup> Deux cas analogues de courants plus forts qu'en surface ont même été constatés à des profondeurs plus faibles que 5 m. Une mesure occasionnelle à 3 m, la seule, y donnait un courant plus fort qu'à 0,5 m par un fond d'environ 5 m. Il en a été de même pour une mesure à 2 m par fond d'environ 20 m.

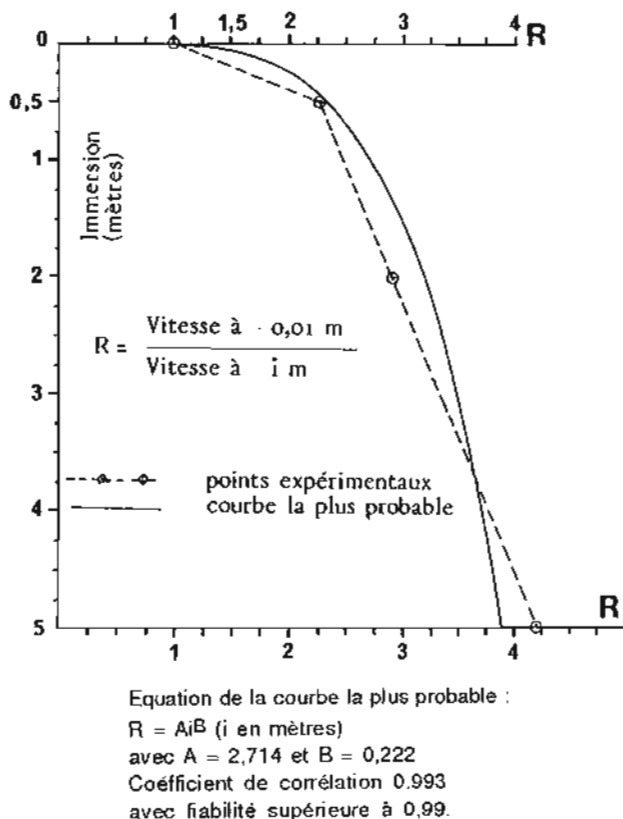


FIG. 8. Profil moyen approximatif de la décroissance du courant en fonction de l'immersion dans les premiers mètres sous la surface.

rapide décroissance dans les premiers décimètres sous la surface, qui correspond tout à fait aux observations qualitatives faites sur les côtes liguro-pro-

vençales lors de la « marée noire » (11-20 avril 1991) consécutive à l'incendie et au naufrage du pétrolier *Haven* devant Gênes: les simples taches irisées (quelques microns à quelques dizaines de microns d'épaisseur) se déplaçaient beaucoup plus vite (très grossièrement de 2 à 4 fois) que les nappes de résidus solides offrant pourtant une prise directe au vent mais présentant un tirant d'eau sensible (réf. Pollution consécutive à l'explosion du *Haven* le 8 avril 1991. Rapport établi par le CERBOM pour le Comité RAMOGE, Septembre 1991, 63 pages).

#### 10.2.2. Variations de la direction du courant

La déflexion du courant à 5 m et à 2 m par rapport au courant à 0,5 m ainsi que celle du courant à 0,5 m par rapport au courant d'extrême surface a pour chaque série été constatée comprise dans la gamme  $10^\circ G - 10^\circ Dr$  dans la moitié des cas et même un peu plus, les autres étant dispersées dans un éventail allant jusqu'à  $150^\circ G$  et  $175^\circ Dr$  sans orientations préférentielles significatives.

On constate ainsi de façon générale que dans les premiers 5 m sous la surface, la direction du courant côtier varie de façon pratiquement négligeable (plus ou moins  $10^\circ$ ) dans un peu plus de la moitié des cas, mais qu'elle varie à peu près aléatoirement sur presque tout l'horizon dans le reste. Ce dernier fait est peut être dû en partie, outre à l'influence de la topographie locale par petits fonds et faible distance de la côte, au fait que la direction des courants très faibles est plus difficile à déterminer avec précision que leur vitesse.

On n'a, de toute façon, dans ces premiers mètres, observé aucune rotation systématique dans un sens ou dans l'autre.

## QUATRIÈME PARTIE MESURES COMPLÉMENTAIRES À UNE IMMERSION DE 3 MÈTRES

### 11.

Dans la 3<sup>e</sup> partie nous n'avions pu, faute de mesures du courant correspondant en surface, exploiter les mesures du courant à 3 m par courantomètre enregistreur fixe immergé effectuées par le Centre de Recherches et d'Études Océanographique (CREO) en 1973 sur les côtes provençales<sup>(17)</sup>.

Or 85 d'entre elles sont particulièrement intéressantes pour avoir été faites par vent de 10 à 45 nœuds (5 à 23 m/s).

#### 11.1.

Au point de vue vitesse leur analyse conduit au tableau 11, établi sur le modèle du tableau 1, d'où l'on tire la courbe lissée n°2 de la figure 9.

Tableau 11

Classe	0+ -0,05	0,5+ -1	1+ -1,5	1,5+ -2	2+ -2,5	2,5+ -3	3+ -3,5	> 3,5	Total
n	5	19	23	22	9	6	1	zéro	85
N	5	24	47	69	78	84	85		
f%	5,8	28,2	55,3	81,2	91,8	98,2	100		

<sup>(17)</sup> Réf: SOGREAH Schéma d'amélioration des eaux littorales Méditerranée provençale. Annexe 2: Courantologie (éd. par le Ministère de l'Environnement mars 1978).



Or une approximation du facteur de réduction moyen entre le courant moyen à 0,5 m et le courant moyen à 3 m nous est fournie par le profil moyen de décroissance de la figure 8. On trouve 1,5<sup>(18)</sup> et en multipliant par ce facteur les abscisses de la courbe 2 de la figure 9 on trouve la courbe 3, qui est une approximation de la courbe de fréquence des cas où la vitesse du courant à 0,5 m pour l'ensemble des 85 cas où le courant n'a été mesuré qu'à 3 m est inférieur ou égal à C% de la vitesse du vent.

Elle est extrêmement proche dans l'ensemble de la courbe 1 relative aux 215 cas où la mesure du courant a été effectuée à 0,5 m sur l'ensemble des côtes françaises de la Méditerranée, et tout en haut, dans la zone des valeurs de  $f$  les plus utiles, supérieures à 0,90, la coïncidence est encore meilleure si nous ne prenons pas en compte pour la courbe 1 l'ensemble des 215 mesures pour toutes les côtes françaises de la Méditerranée, mais seulement une série de 93 mesures relatives aux seules côtes provençales objet des mesures du § 11 (courbe 4).

## 11.2.

On peut en déduire à la fois :

a) Le profil de décroissance du courant avec la profondeur (fig 8) est pratiquement indépendant de la vitesse du vent pour l'immersion de 3 m, ce qui permet de penser qu'il l'est approximativement pour toutes les immersions de l'extrême surface à 5 m.

b) Les 85 mesures à 3 m viennent renforcer les résultats du paragraphe 6.2.2. (tableau 2) ainsi que ceux du paragraphe 10.2.1. (fig. 8 et tableau 10).

## 11.3. Direction du courant

Nous n'avons pas la direction du vent pour les 85 mesures, mais seulement pour 49 d'entre elles effectuées de septembre à décembre 1973 dans le golfe de Giens et la baie de la Ciotat par fonds de 35 à 70 m et vents de 10 à 32 nœuds ne soufflant que des secteurs Est (du 080° au 120°) et Ouest (du 240° au 300°). L'analyse de la répartition par secteurs de la déflexion du courant à 3 m par rapport au vent est présentée par la figure 10. On voit que, par rapport à la représentation analogue de la figure 4D pour les côtes françaises de Méditerranée, Guadeloupe et Martinique, l'ensemble est grosso modo décalé d'environ 60° vers la droite avec

<sup>(18)</sup> Si nous extrapolons le profil de Ross et Montgomery (réalisé lors d'une expérience unique, cf. nota 13, § 9) jusqu'à 0,5 m nous trouvons encore 1,5 pour 3 m et 2,2 (au lieu de 1,9 d'après notre tableau 9) pour 5 m. Mais l'extrapolation au-dessus de 0,5 m ne semble guère possible.

cependant une importance un peu plus grande, difficile à expliquer, du secteur gauche. D'ailleurs si le sens de la rotation est bien, globalement, vers la droite (hémisphère Nord), comme on peut s'y attendre d'après les théories d'Ekman et dérivées (si du moins on estime que le courant de dérive directement dû au frottement du vent sur la surface constitue la partie principale du courant côtier complexe, ce qui n'est pas forcément exact, voir § 2), celles-ci n'expliquent pas une ampleur aussi considérable (60° en 3 m).

## 12. ENCORE QUELQUES MOTS

a) Rappelons encore, pour terminer, que l'ensemble des résultats et conclusions de la présente étude ne reposent que sur de longues séries de mesures à la mer pendant presque 30 ans, effectuées pour la plupart dans de tout autres buts (diffusion des polluants en mer, qualité des eaux marines, surveillance d'émissaires...). Ils ne dépendent d'aucune théorie physico-mathématique<sup>(19)</sup>, même si certaines d'entre elles ont pu servir de point de départ pour constater dans quelle mesure les données recueillies s'accordent qualitativement ou quantitativement avec elles (§ 7.1.2.b, § 9).

Le caractère probabiliste inhabituel des relations entre le vent et le courant à une immersion de 0,5 m ne nuit pas, au contraire, à leur utilité pratique dans les régions où ont été effectuées les mesures : Méditerranée Nord-occidentale d'une part, zone Guadeloupe – Martinique de l'autre.

b) La parenté des résultats relatifs à ces deux zones aux régimes météorologiques aussi différents a conduit apparemment à une certaine sensibilité du rapport courant côtier/vent inversement proportionnelle à la racine presque cubique de la latitude, et non à sa racine carrée comme prévu par exemple par la théorie d'Ekman quand il s'agit du courant de dérive ainsi qu'à une prééminence générale du secteur 45° G-70° Dr pour les déflexions vent-courant.

Il y manque une confirmation, ou une infirmation, sur des mesures à des latitudes franchement différentes, comme peut-être par exemple à l'île de la Réunion (latitude : 21° Sud). On peut en effet s'y affranchir comme en Guadeloupe-Martinique, d'une marée faible mais non entièrement négligeable, par des mesures à des heures suffisamment proche de l'équinoxe. Les mesures trop peu nombreuses effectuées

<sup>(19)</sup> Sauf en ce qui concerne le changement de sens de la déflexion du courant côtier en changeant d'hémisphère (§ 7.2.1. « in fine »), l'inversion droite-gauche non seulement du courant de dérive mais de toutes les composantes du courant côtier étant prévue par toutes les théories, et vérifiée en haute mer pour le courant de dérive.

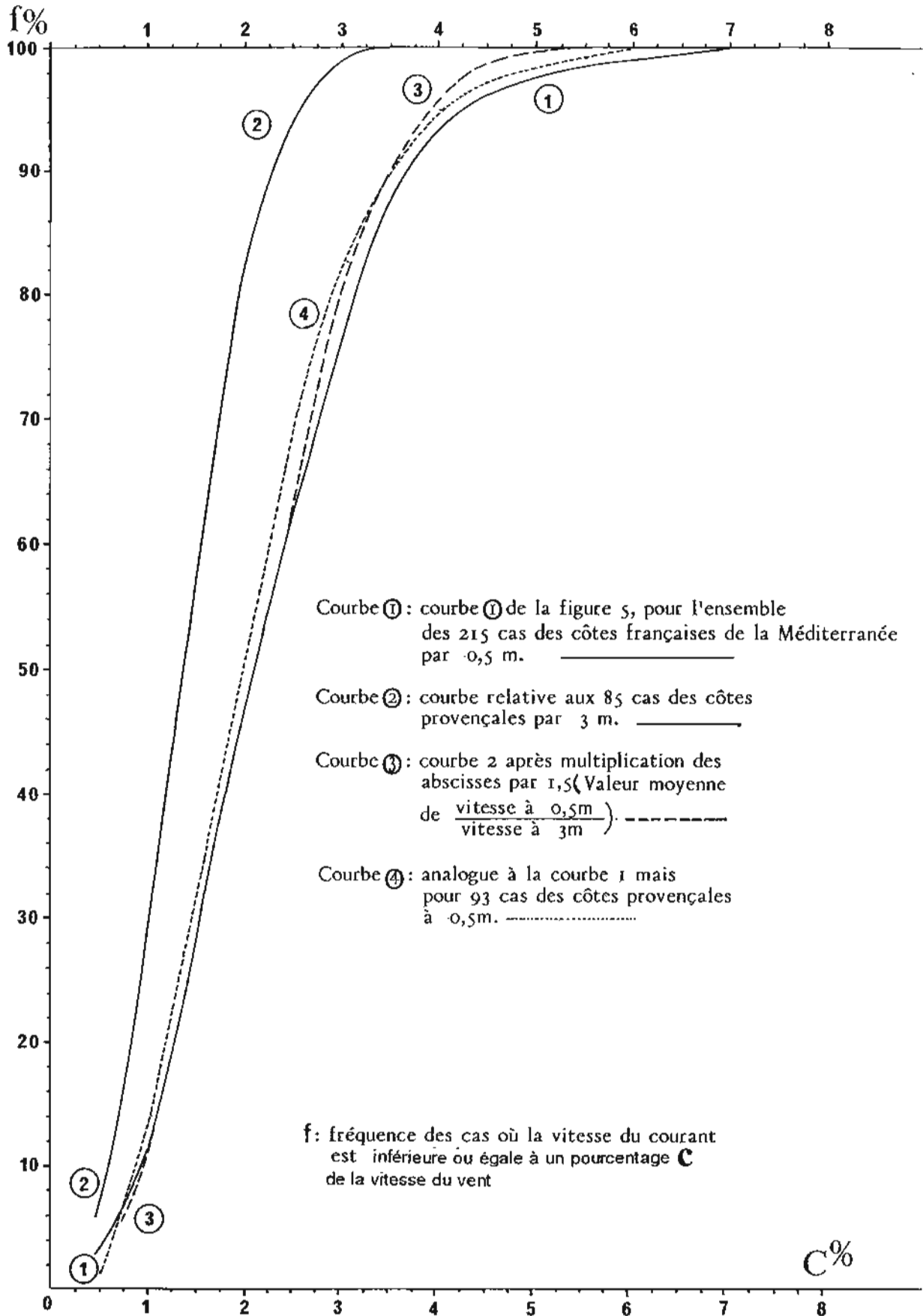


FIG. 9.

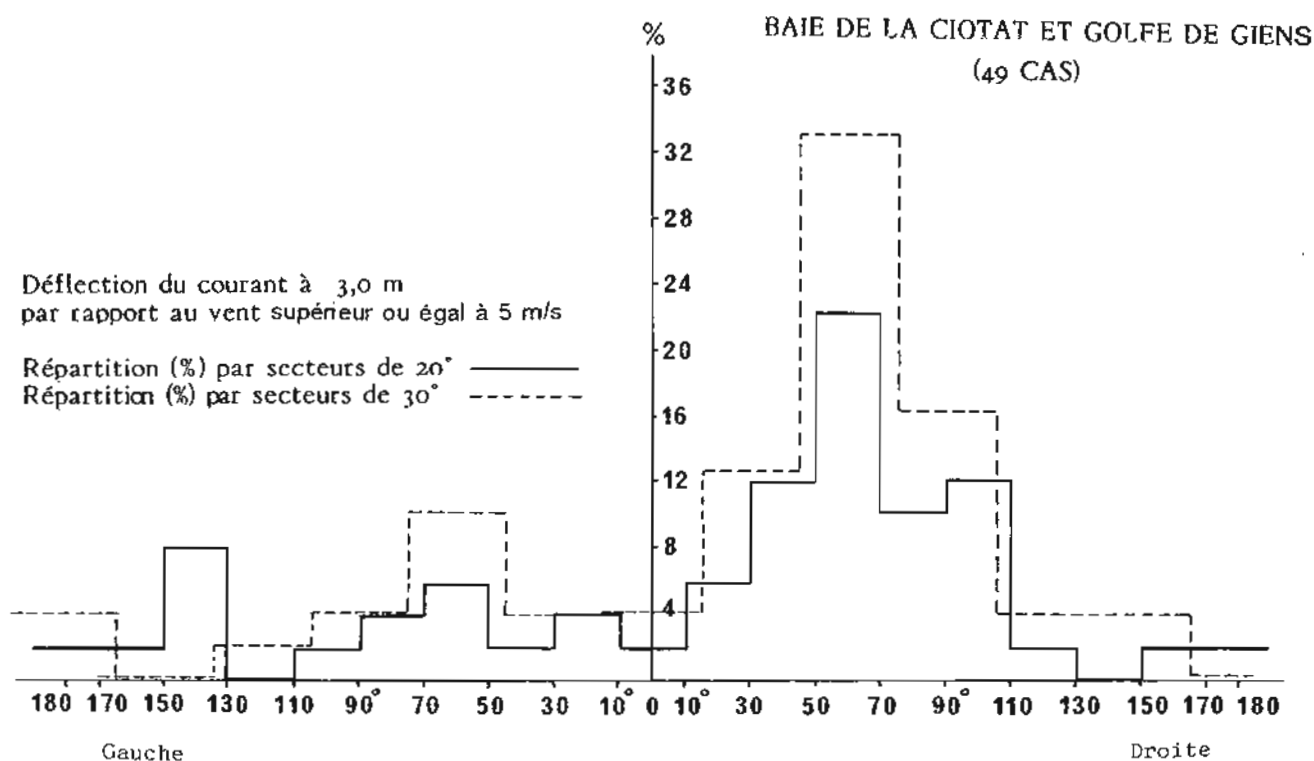


FIG. 10.

en 1970 par le CERBOM dans des conditions de marée quelconque et de vent généralement faible ne peuvent-être prises en compte. Et vu l'ampleur (nombre de mesures, diversité des sites et des conditions de vent, etc.) de campagnes à effectuer dans ce but précis, il y a peu d'espoir de les voir réaliser dans un avenir prévisible.

Dans l'état actuel des choses, l'application pratique de nos résultats et conclusions à d'autres mers que celles où ont été effectuées les mesures, suggérée au paragraphe 7.2.1, constitue la partie la plus hasardeuse de la présente étude.

c) Rappelons bien aussi que ces résultats et conclusions ne sont valables que dans des conditions de courants de marée négligeables, à l'intérieur d'une étroite bande littorale où la direction du vent par rapport à la côte et sa vitesse ont une influence très importante sur le courant, alors que plus au large c'est la direction générale de la ligne de côte qui impose le plus souvent, par suite de sujétions

hydrauliques, une circulation des eaux côtières qui lui soit préférentiellement parallèle.

d) Mais pour des raisons évidentes de sécurité nous n'avons opéré, en général, ni à moins de 200 m de terre, ni par fond de moins de 5 m environ. De plus le travail océanographique sur un petit navire n'était pas souhaitable par mer vraiment agitée (force 4 ou plus).

C'est peut-être en partie pour cela que nous n'avons pas rencontré, que ce soit par vent inférieur ou supérieur à 5 m/s, de tendance systématique du courant à devenir parallèle au rivage extrêmement proche.

Dans les cas où il existe, un tel « courant longitudinal » (« longshore current ») serait d'ailleurs un facteur de sécurité dans un calcul d'émissaire sous-marin, en retardant l'approche finale d'eaux polluées venant de plus au large.

mars 1992 – mars 1993

# ÉVALUATION ET PROCÉDURES D'EXPLOITATION DU SONDEUR MULTIFAISCEAUX LENNORMOR

par

L. KERLÉGUER, Ingénieur de l'Armement  
Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

## RÉSUMÉ

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine possède avec le sondeur multifaisceaux petits fonds Lennormor un outil efficace pour les levés hydrographiques sur le plateau continental.

La couverture latérale de ce sondeur est de 2,4 fois la profondeur.

La précision hydrographique est atteinte sur une couverture de 1,7 fois la profondeur.

La forte densité des mesures (fortes cadences et multiplication des voies de mesures) et le souci de respecter la sécurité de la navigation sont deux spécificités essentielles qui conditionnent le traitement des mesures de sondeurs multifaisceaux petits fonds. Elles ont imposé de nouvelles méthodes de rédaction avec en particulier l'établissement de modèles numériques de terrain.

De plus, la densité des mesures réalisées au moyen du sondeur multifaisceaux alourdit la vérification des levés. Le recours à des procédures de contrôle automatisées dans ce domaine devient indispensable.

## ABSTRACT

The Lennormor is the shallow water multibeam echosounder used by the french Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) for bathymetric surveys on the continental shelf.

The Lennormor has a coverage of 2.4 times the depth of water, while the hydrographic accuracy is reached over 1.7 times the depth.

The huge depth sampling density along with the necessity of ensuring the navigation safety are two major characteristics that have to be taken into account for the post processing of shallow water multibeam echosounders data. They have imposed the use of new methods for seafloor imaging, including numerical terrain modeling.

The measurements' quality control work has considerably increased due to the sampling density. Automatic processing procedures are absolutely necessary for this task.

## INTRODUCTION

Le sondeur multifaisceaux petits fonds Lennormor est un prototype développé par la société Thomson-Sintra Activités Sous-Marines.

Installé à bord du bâtiment hydrographique côtier (BH<sub>2</sub>) côtier *Borda* en juin 1988, il a fait l'objet d'évaluations et d'améliorations pendant une période de 21 mois jusqu'en avril 1990, date à laquelle la recette fut prononcée.

Après une brève description du matériel, ce rapport s'attarde un peu plus sur les chaînes de traitement nécessaires pour la validation et la rédaction des sondages. Deux difficultés spécifiques aux sondeurs multifaisceaux petits fonds sont mises en avant :

— le grand volume de données à traiter (15 millions de sondes pour 24 heures de sondage continu par 20 mètres de fond) ;

— la nécessité de détecter et retenir les points hauts pour la sécurité de la navigation.

On ne revient que très partiellement sur la précision du sondeur ; seuls les bénéfices des dernières améliorations sont indiqués. Un rapport plus complet a déjà été consacré à ce sujet (voir bibliographie).

## 1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT, COMPOSITION

### 1.1. Les caractéristiques essentielles

Le sondeur multifaisceaux Lennormor (SMF) forme 20 voies au pas de 5° par une technique de faisceaux croisés (cf. fig. 1).

Il émet des ondes acoustiques à la fréquence de 100 kHz, et analyse les signaux en retour pour la détermination des profondeurs par un algorithme de demi-énergie (cf. caractéristiques annexe 1).



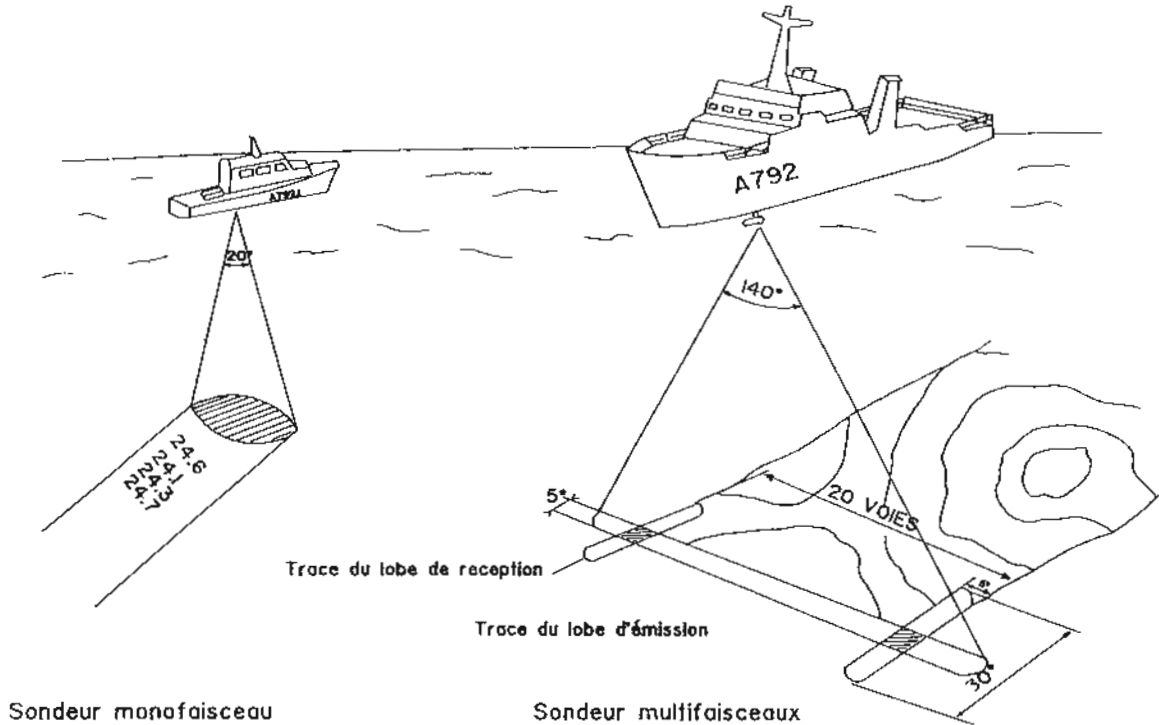


FIG. 1. Zones insonifiées par un sondeur monofaisceau et un sondeur multifaisceaux

La formation de voies électroniques permet la compensation du roulis et du tangage en temps réel. La gamme pratique d'utilisation du sondeur s'étend de 5 à 350 mètres.

## 1.2. Le matériel embarqué au 1<sup>er</sup> janvier 1992

Le sondeur installé à bord du BH2 *Borda* se compose de deux ensembles principaux, l'un pour l'acquisition de la mesure, l'autre pour son archivage (cf. fig. 2).

La partie mesure comprend :

- une antenne acoustique hissable pour l'émission et la réception ;
- un tiroir d'alimentation ;
- un tiroir d'émission pour la formation du lobe d'émission par composition des signaux émis sur 10 colonnes ;
- un tiroir de réception pour la formation des 20 voies de réception par composition des signaux reçus sur 35 capteurs ;
- un tiroir logique pour le dialogue avec les tiroirs émission et réception et les capteurs extérieurs (en particulier le compensateur de houle indispensable pour la formation de voie) ;
- deux écrans de contrôle ;
- une console de gestion (VT 220).

La partie exploitation comprend :

- un ordinateur Microvax 2 pour le dialogue avec le sondeur et l'archivage des données ;
- deux disques durs respectivement de 70 mégaoctets et 700 mégaoctets ;
- deux lecteurs de disquettes 5" 1/4 ;
- un lecteur de disques optiques numériques ;
- un lecteur de bandes magnétiques ;
- une imprimante à aiguilles pour le tracé en temps réel des isobathes ;
- deux terminaux de type VT 220 pour le dialogue opérateur.

Une console graphique monochrome de type VR260 a par ailleurs été installée au mois de février 1992.

## 1.3. Le logiciel temps réel

Le logiciel temps réel comprend deux parties bien distinctes :

- le logiciel-sondeur ;
- le logiciel d'archivage de la bathymétrie en temps réel.

### 1.3.1. Le logiciel sondeur

Le logiciel permet les réglages du fonctionnement du sondeur et assure le traitement de la mesure brute acoustique. Un dialogue avec l'opérateur est utilisé pour adopter manuellement certains paramètres de fonctionnement : durée d'impulsion, cadence

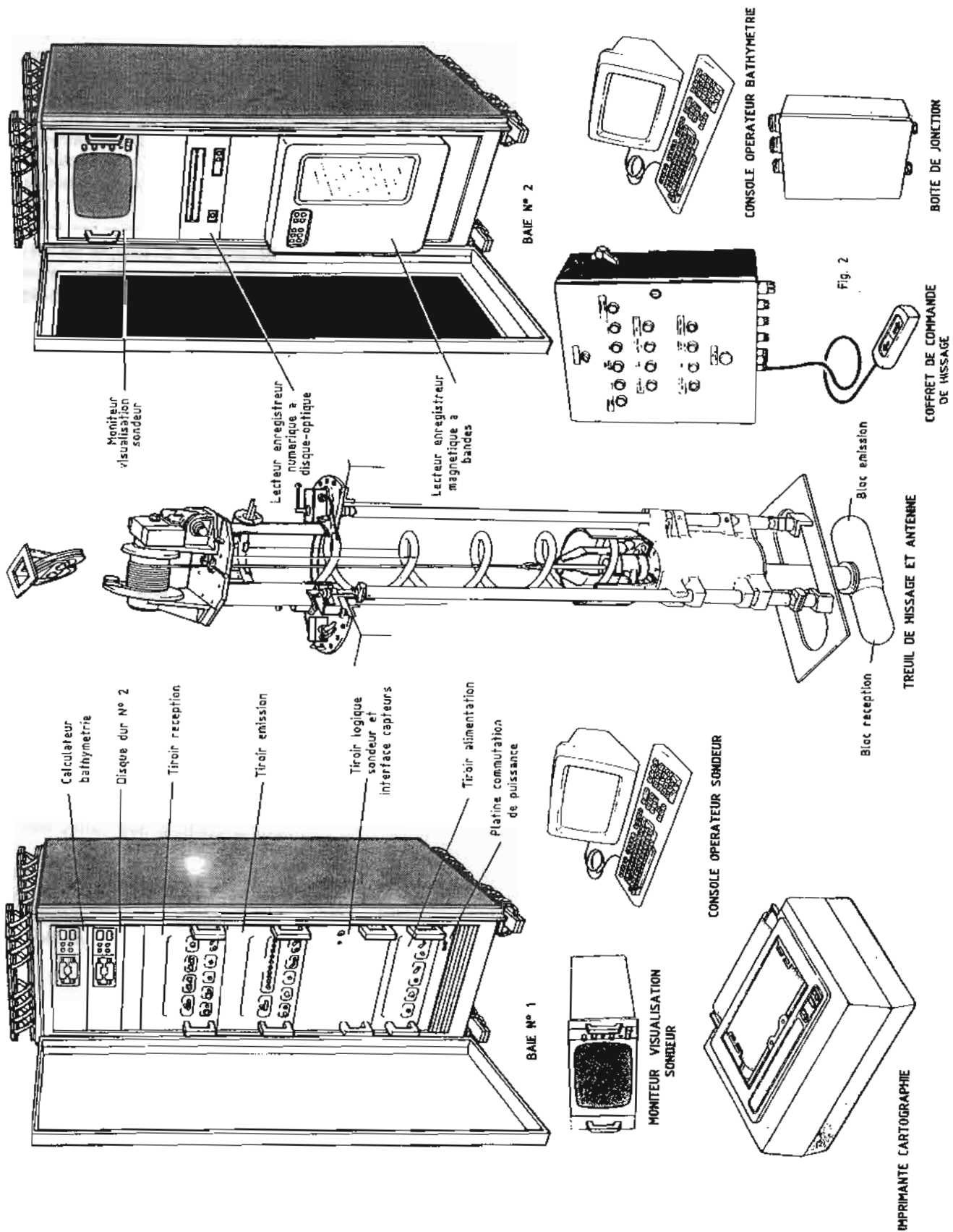


FIG. 2

de récurrence et puissance des émissions, mode de représentation sur les écrans de visualisation, choix du seuil d'énergie minimum pour l'exploitation d'un signal.

Il faut noter que l'ensemble des paramètres peut être adopté automatiquement par défaut.

Le logiciel a subi depuis la mise en service du sondeur et à la demande de la Mission Hydrographique de l'Atlantique (MHA) les évolutions suivantes :

- mise en place d'un mode d'émission en puissance réduite pour les petits fonds ;

- modification du pas de codage des paramètres d'attitude (roulis, tangage) : réduction du pas de  $0,6^\circ$  à  $0,3^\circ$  ;

- addition d'un filtrage adapté du signal d'énergie avant application de l'algorithme de demi-énergie ;

- intégration d'un mode épave mieux adapté à la poursuite de fond dans le cas d'accidents de terrain prononcés.

Cette dernière modification mise en service depuis la recette du sondeur est exposée en annexe 2.

### *1.3.2. Le logiciel d'archivage et de détermination de la bathymétrie en temps réel*

Le logiciel d'archivage assure la gestion des périphériques du calculateur. Le dialogue avec l'opérateur s'effectue par menus imbriqués sur une console VT 220.

- Dans sa partie archivage, il permet la sélection des périphériques à activer. On peut archiver deux types de données : des données réduites et des données étendues. Les données réduites sont constituées pour chaque récurrence et pour chaque voie des temps de demi-énergie ainsi que des paramètres d'attitude et de position ; ce sont les données archivées en fonctionnement courant. Les données étendues incluent les données réduites et contiennent également les signaux d'énergie de toutes les voies. Cette facilité a prouvé son utilité pour la mise au point de l'algorithme de choix d'écho (cf. annexe 2).

Il est à noter que l'information contenue dans les données réduites s'est un peu étoffée à la demande de la Mission Hydrographique de l'Atlantique. En particulier l'énergie totale reçue par voie est maintenant indiquée dans ces fichiers.

Les fichiers réduits peuvent être archivés indifféremment sur bande magnétique, sur disque optique numérique ou sur le disque dur « données ». Les fichiers étendus quant à eux ne peuvent l'être que sur disque optique numérique.

Les capacités en heures d'archivages sont de l'ordre de 250 mégaoctets par 24 heures de sondage continu (archivage des données réduites) soit la valeur d'une bande magnétique environ.

- Le logiciel de détermination de la bathymétrie en temps réel a pour but d'obtenir un tracé des iso-

bathes sur une imprimante à aiguilles. L'opérateur peut activer ou désactiver le tracé, choisir les isobathes à représenter, fixer l'échelle du tracé. Il doit introduire un profil bathycélérimétrique pour le calcul des profondeurs à partir des temps de demi-énergie. La profondeur est corrigée de la marée estimée. Toutefois le calcul définitif des profondeurs est repris en traitement différé à partir des mesures brutes, des modèles de marée « calés » au moyen des observations in situ, et des observations du profil bathycélérimétrique effectuées lors du levé. Le logiciel donne simplement une première représentation du sondage bathymétrique.

Ce logiciel gère également les alarmes de fonctionnement qui apparaissent sur la console de dialogue. Ces alarmes sont de différentes natures : elles peuvent indiquer des défauts sur les mesures, le mauvais fonctionnement de périphériques, la fin d'une bande magnétique d'archivage. Elles doivent être acquittées par l'opérateur après traitement. Les alarmes intervenant au cours d'un profil sont stockées dans des fichiers.

## **2. OPÉRATIONS EFFECTUÉES EN TEMPS RÉEL SUR LE SONDEUR MULTIFAISCEAUX**

Les opérations effectuées en temps réel sur le SMF se résument au contrôle du bon fonctionnement du sondeur. Le responsable du quart doit savoir utiliser les logiciels « sondeur » et « bathymétrie temps réel » et connaître la mise en œuvre des différents périphériques. Pour ce faire, la fourniture d'un guide opérateur ainsi qu'une formation courte ont paru suffisantes pour initier le personnel de la Mission Hydrographique de l'Atlantique.

La maintenance du sondeur relève de la Direction des Constructions Navales de Brest. Elle dispose d'un banc de test pour le contrôle des cartes électroniques du sondeur.

Un officier marinier de spécialité Détecteur Armes Sous-Marines (DEASM) affecté à bord réalise les opérations courantes de maintenance du 3<sup>e</sup> degré en utilisant un lot de cartes de rechange et une documentation technique.

## **3. LE MATÉRIEL DE TRAITEMENT À LA BASE DE LA MISSION HYDROGRAPHIQUE DE L'ATLANTIQUE AU 1<sup>er</sup> JANVIER 1992**

Pour le traitement en temps différé, la MHA dispose d'un calculateur Microvax 2 de système d'exploitation VMS identique à celui embarqué sur le BH2 Borda.



L'environnement périphérique se compose de :

- 3 consoles VT 220 ;
- 1 console graphique couleur VR 290 ;
- 1 disque dur logiciels de 70 mégaoctets ;
- 1 disque dur de données de 400 mégaoctets ;
- 1 disque dur de données de 600 mégaoctets ;
- 1 lecteur de cassettes 2,3 gigaoctets exabyte (outil de sauvegarde) ;
- 1 lecteur de disques magnéto-optiques double faces réinscriptibles de  $2 \times 300$  mégaoctets ;
- 2 lecteurs de disquettes 5" 1/4 ;
- 1 imprimante et des traceurs.

La MHA utilise également depuis le mois d'avril 1991 une station de travail Cyber Control Data de système d'exploitation Unix pour le développement de nouvelles applications graphiques destinées à la vérification des données. Ce calculateur, doté d'une imprimante laser, est relié au Microvax 2 par une liaison Ethernet.

Les données provenant du bâtiment sont fournies sur support de bandes magnétiques et sont exploitées à la base de la mission.

L'équipement en matériel informatique s'est sans cesse amélioré. L'installation d'un disque dur supplémentaire de 600 mégaoctets et d'un lecteur de disque magnéto-optique a ouvert de nouvelles possibilités de traitement (cf. chap. 6) en permettant entre autre la gestion souple de gros fichiers.

## 4. ANALYSE DES PERFORMANCES

### 4.1. Rappel des méthodes d'analyse

La qualité des mesures a été étudiée de façon statistique, par comparaison d'une part des informations du SMF avec celles d'un sondeur vertical Deso 20, et d'autre part de façon interne (comparaison de la mesure SMF avec un lissage de cette mesure pour en évaluer le niveau de bruit).

Les essais effectués ont permis de quantifier le bruit de la mesure et de mettre en évidence la présence d'un biais de mesure dépendant des voies et assez répétitif (cf. annexe 7). L'écart-type de la mesure dépend de la voie. Les voies les plus précises d'écart-type 0,2% de la profondeur sont les voies verticales. L'écart-type croît progressivement pour les voies latérales jusqu'à atteindre 0,6% pour les voies extrêmes. Les seize voies les plus centrales ont un écart-type inférieur à 0,5% de la profondeur. Un traitement adapté des mesures brutes corrige les mesures du biais et atténue le bruit à haute fréquence (cf. chap.5). Les mesures ainsi traitées conduisent à des mesures validées de précision hydrographique pour les 16 voies les plus centrales. Les 4 voies extrêmes (2 tribord et 2 bâbord) sont toutefois utilisables pour la détection.

Les essais effectués pour la recette du sondeur avaient par ailleurs permis d'établir la présence d'un bruit résiduel, de fréquence voisine de la fréquence du mouvement de plate-forme, par analyse des spectres des signaux bathymétriques et analyse visuelle.

Le phénomène a pu être observé de nouveau par des analyses en variogrammes (voir bibliographie). Il s'amplifie avec le site des voies. Une étude théorique détaille l'influence de différentes sources d'erreurs sur la précision de la mesure et sur sa localisation (cf. annexe 14). Elle montre en particulier qu'un délai entre la mesure des paramètres d'attitude et leur exploitation par le sondeur conduit à un résidu de mesure ayant ces caractéristiques.

Cependant, des essais effectués en 1989 ont montré que la prise en compte par le sondeur des paramètres d'attitude du bâtiment s'effectuait sans retard.

Deux hypothèses restent alors ouvertes pour l'explication de ce phénomène :

- ou le sondeur multifaisceaux traite mal les données bien recueillies auprès de la centrale d'attitude ;
- ou bien les mesures de la centrale d'acquisition sont de qualité insuffisante.

L'installation à bord du BH2 *Borda* d'une deuxième centrale d'acquisition TSS 335 en complément de la centrale gyroscopique Heco 10 a fait l'objet d'essais de comparaison actuellement en cours de dépouillement (ces essais intègrent une évaluation des retards de traitement des mesures de roulis, tangage, pilonnement par le sondeur multifaisceaux pour confirmer l'étude déjà menée en 1989).

Des résultats de comparaison entre la centrale TSS 335 et la centrale gyroscopique Hippy 120 communiqués par la société TSS (cf. annexe 3) mettent en évidence leur inquiétante disparité.

Si des résultats similaires sont obtenus pour la comparaison TSS 335 – Heco 10, cela indiquera que la dernière hypothèse est la plus probable et qu'une réflexion devra être menée sur le choix des centrales d'attitude pour le fonctionnement d'un sondeur multifaisceaux.

Rappelons qu'une erreur de pointage de  $0,1^\circ$  de la voie extrême (de site  $47,5^\circ$ ) induit une erreur de mesure de 0,2% de la profondeur. Il convient donc de souligner l'extrême importance d'une bonne mesure d'attitude. Le bruit résiduel ne peut être filtré par traitement du signal car la fréquence des mouvements de plate-forme est incluse dans les fréquences courantes de la bathymétrie.

### 4.2. Évolutions du sondeur

Depuis sa recette définitive, le SMF a subi quelques modifications :

- la cadence de récurrence des mesures est passée de 6,6 H en ms (où H représente la profondeur en mètres) à  $(2,5 H + 50)$  ms avec un minimum



de 115 ms. Cette augmentation permet un meilleur suréchantillonnage du sondeur et par conséquent une meilleure atténuation du bruit à haute fréquence (cf. § 5.5) ;

— une adaptation du logiciel de suivi de fenêtre avec introduction d'un mode épave a été mise en place pour les recherches d'obstruction (cf. annexe 2).

### 4.3. Performance en recherche d'épaves et de hauts-fonds

Une étude des performances théoriques (cf. annexe 4) permet de fixer les limites théoriques de résolution du sondeur et de précision en cotation. La théorie indique que la taille minimale d'un objet détectable n'est pas limitée pour peu que l'on prenne certaines précautions opératoires (cf. § 7.2). Dans des fonds de profondeur  $H$ , la cotation sans erreur est assurée pour les obstructions de largeur supérieure à  $4,3\% H$ . Pour les obstructions à faible embase ( $l$  inférieure à  $4,3\% H$ ) des défauts de cotation interviennent dès que la hauteur de l'obstruction dépasse ses dimensions horizontales. Les voies latérales sont les plus aptes à coter les obstructions fines. Mais les limites de résolution du sondeur multifaisceaux ne permettent pas de coter avec certitude les mâts et les antennes par exemple.

La comparaison de cotations d'épaves et de hauts fonds par le SMF et par le sondeur Deso 20 en vedette (profils serrés à 5 mètres et cote le plus souvent confirmée par plongeur) a montré la bonne précision du SMF. Sur 26 comparaisons effectuées sur des recherches en Bretagne Sud, on a constaté l'excellente cohérence (meilleure que 30 cm) entre les cotations. Seules quelques recherches présentent des écarts de cotation de l'ordre de 1 m corrélés à des écarts de positions de l'ordre de 5 à 10 m ; il s'agit alors d'un problème de non détection du point haut par le SMF (cf. annexe 5).

Pour conclure sur ce chapitre des performances du SMF, on peut rappeler que le sondeur est hydrographique sur ses seize voies centrales et apte à la cotation d'obstructions de dimensions caractéristiques supérieures à 4 % de la profondeur. Ces performances pourront encore être améliorées si l'on trouve une solution aux problèmes évoqués plus haut (résidu de mouvement de plate-forme en particulier).

## 5. LA VALIDATION DE LA SONDE

### 5.1. Le déroulement de la chaîne (cf. organigramme annexe 6)

Les traitements effectués en temps différé (généralement à terre) ont pour premier objectif la validation de la mesure. Deux étapes essentielles en sont

la correction du biais de la mesure puis « la détection et l'épuration » des données aberrantes.

### 5.2. Les réductions de la marée et de la célérité

Les données à traiter sont des temps issus des mesures brutes effectuées lors du levé.

Après validation classique de la localisation, on réduit la mesure de la célérité du son dans l'eau et de la marée adoptée. Il convient de souligner l'importance particulière que prend la bathycélérimétrie pour un sondeur multifaisceaux en raison de l'incidence des voies formées par rapport au gradient vertical de la célérité : la réduction est effectuée de manière continue en tenant compte du chemin acoustique réel de l'onde résultant des profils de célérité mesurés dans la zone de travail. A l'issue de ce traitement, on obtient des sondes brutes.

### 5.3. Détermination et correction du biais

L'examen des sondes brutes a permis de mettre en évidence la présence d'un biais systématique des mesures du SMF. Ce biais a un caractère répétitif et un niveau dépendant du numéro de la voie mais reste symétrique par rapport à la verticale (cf. annexe 7) [niveau compris entre  $-1\%$  et  $+0,7\%$  de la profondeur]. Des études théoriques ont mis en évidence l'influence de la réverbération sur la mesure par algorithme de demi-énergie. Aucune explication entièrement satisfaisante n'a cependant été apportée sur un plan quantitatif. L'état des connaissances sur les lois de la réverbération à 100 kHz (fréquence de fonctionnement du SMF) ne permet pas une meilleure approche du phénomène. Une autre hypothèse fondée sur la forme irrégulière des lobes d'antenne demande à être développée.

La répétitivité du phénomène expérimental n'est pas en contradiction avec ces hypothèses théoriques ; elle indique simplement que si la réverbération est mal connue à 100 KHz, elle est peu dépendante de la nature du fond puisque l'algorithme de demi-énergie sensible à la loi de réverbération ne donne pas des résultats expérimentaux très différents sur des fonds variés.

La détermination expérimentale du biais s'effectue de la manière suivante :

— on calcule la moyenne des mesures effectuées par chacune des voies du SMF sur le levé d'une zone peu accidentée ;

— on suppose alors que les écarts sur les moyennes s'expliquent par le biais de mesure des voies. Cette hypothèse est valide sur des fonds relativement plats pour lesquels les différences de lo-

calisation des mesures des voies n'ont que peu d'incidence sur leur valeur et en tout cas n'induisent pas de différence systématique.

La validité de cette méthode a été largement démontrée sur les levés déjà réalisés.

La courbe de biais déduite de cette procédure est positionnée en valeur absolue par comparaison entre les résultats fournis par les voies verticales du SMF et par le sondeur vertical Deso20. La courbe ainsi déterminée est utilisée pour la réduction des sondages.

Le contrôle systématique de la courbe de biais est effectué pour chaque levé de manière à adapter aux mieux la correction aux conditions réelles du sondage.

#### 5.4. Détection et épuration des données aberrantes

A ce stade du traitement, le fond brut est encore très bruité et contient un certain nombre de sondes erronées. L'application directe d'algorithmes de choix de sondes conduirait à ne retenir que les sondes constituant l'enveloppe supérieure du signal ainsi que les sondes erronées. Une étape préalable d'épuration est nécessaire.

Il faut toutefois remarquer que la quantité gigantesque de mesures effectuées lors d'un levé au SMF autorise l'épuration sans obérer la couverture.

Cette dernière caractéristique d'un levé au SMF est d'une très grande importance car c'est la grande densité du sondage et donc la nécessité de condenser les mesures qui a rendu indispensables les traitements spécifiques qui sont exposés dans la suite.

La densité surfacique moyenne sur la trace d'un profil effectué dans les fonds de 15 mètres à 10 nd et dont on valide les seize voies centrales vaut :

$$d \approx 1 \text{ sonde/m}^2$$

soit pour une rédaction à l'échelle 1:10 000, une densité :

$$d \approx 1 \cdot 10^8 \text{ sondes/m}^2 = 1 \cdot 10^4 \text{ sondes/cm}^2$$

Le tableau ci-dessous donne les densités surfaciques pour différentes profondeurs (influence sur la cadence de récurrence) et différentes échelles de rédaction (vitesse 10 nœuds).

*Remarque:* dans le tableau pour les échelles 1:5 000, 1:10 000 et 1:50 000, on donne les densités en sondes/cm<sup>2</sup>.

H \ E	Échelle 1 sondes/m <sup>2</sup>	Échelle 1:5 000 sondes/cm <sup>2</sup>	Échelle 1:10 000 sondes/cm <sup>2</sup>	Échelle 1:50 000 sondes/cm <sup>2</sup>
15	1	$3 \cdot 10^3$	$10^4$	$3 \cdot 10^5$
50	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$
100	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^4$
300	$7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^1$	$7 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^3$

L'épuration est basée sur deux critères :

- détection des sondes singulières de chaque profil par rapport à un fond de référence ;
- examen par profil de l'environnement immédiat de la sonde singulière pour juger si elle correspond à une réalité physique.

##### 5.4.1. Établissement d'un fond de référence

Afin de détecter les sondes singulières d'un profil (sondes se détachant du fond), chaque sonde brute est comparée aux profondeurs filtrées. Le filtre de lissage utilisé est détaillé en annexe 8 ; il s'agit d'un filtre passe-bas du premier ordre (récursif aller-retour) de fréquence de coupure voisine de 0,4 Hz.

La comparaison avec le fond de référence permet de calculer un écart-type (noté  $\sigma$  dans la suite) qui servira d'étalon pour la détection des sondes singulières (voir bibliographie). On distingue alors deux classes de sondes :

- les sondes inférieures de  $1,5$  à  $3\sigma$  au fond de référence (1<sup>re</sup> classe) ;
- les sondes inférieures de  $3\sigma$  et plus au fond de référence (2<sup>e</sup> classe).

Pour chaque sonde appartenant à l'une de ces classes, on recherche si elle est isolée dans son environnement immédiat, c'est-à-dire s'il existe d'autres sondes dans le même cas sur les voies adjacentes et dans les récurrences précédant et suivant la récurrence traitée (cf. annexe 9).

On supprime ensuite toutes les sondes isolées. Les sondes non isolées de la première classe sont conservées. Les sondes singulières non isolées de la seconde classe sont sauvegardées dans un fichier pour contrôle interactif ultérieur qui achèvera l'épuration (cf. § 5.6). C'est lors du contrôle interactif qu'interviennent les décisions majeures du Directeur de Mission.

#### 5.5. Moyenne glissante

Cette opération consiste à effectuer une moyenne mobile de la mesure par voie pour tirer parti de la grande cadence d'échantillonnage du sondeur. On remplace une mesure par la moyenne des mesures dont l'impact au sol se situe dans la pastille d'insonnification de la mesure traitée, c'est-à-dire dans la trace au sol du faisceau de  $5^\circ \times 5^\circ$  de la voie. Ce

nombre dépend de la voie, de la profondeur et de la vitesse du sondage (cf. tableaux en annexe 10).

Cette procédure a pour effet de lisser la mesure.

### 5.6. L'examen interactif

C'est à ce stade qu'on examine la validité des sondes singulières non isolées (classe  $3\sigma$  et plus) détectées comme indiqué au paragraphe 5.4.

Ces sondes sont représentées dans leur environnement sur écran graphique (cf. fig. 3). Les voies adjacentes apparaissent et on dispose également d'informations sur l'énergie des signaux de mesure. On peut visualiser de manière explicite, la situation des sondes singulières du voisinage : le Directeur de Mission peut juger de la réalité d'une mesure et choisir de la réintégrer ou non au fichier des sondes validées. Une sonde n'est jamais définitivement perdue et les traitements peuvent toujours être repris. No-

tons que les sondes réintégrées à ce stade n'ont pas subi la moyenne glissante décrite dans l'étape précédente, ce qui est nécessaire pour des sondes représentatives de singularités du fond.

### 5.7. Évaluation des temps de traitement

Le rapport entre le temps de sondage et le temps nécessaire à la rédaction est de l'ordre de l'unité.

## 6. ÉLABORATION DES DOCUMENTS DÉFINITIFS (cf. organigramme annexe 6)

La spécificité des levés réalisés au sondeur multifaisceaux, en particulier la grande densité des mesures (cf. tableau du § 5.4.), et les performances des traitements sur les machines évoluées rendent caducs dans une certaine mesure les choix de sondes classiques trop « destructeurs d'information ». Il ap-

Sur cette figure on observe l'information graphique qui permet de statuer sur la sonde singulière à 13,17 m de la voie 11.

Dans la partie supérieure de l'écran apparaissent les renseignements concernant la valeur de la sonde douteuse et son environnement.

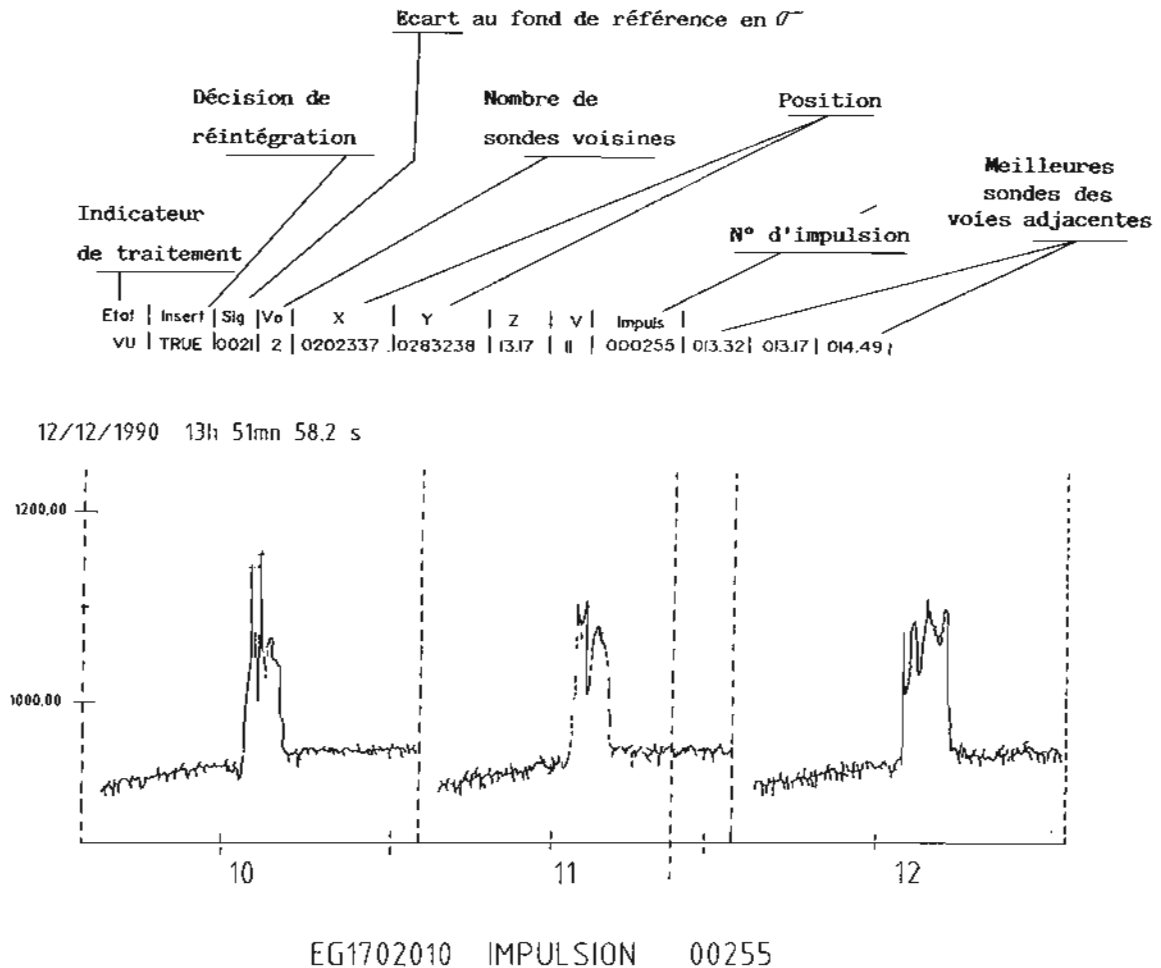


FIG. 3. Éléments de vérification interactive de sondes



paraît au contraire bien plus intéressant de tirer profit de l'extraordinaire quantité d'observations recueillies pour obtenir une image du fond fidèle et sûre pour la navigation.

On procède d'abord à l'établissement d'une banque de données réunissant l'ensemble des mesures validées. Cet ensemble est ensuite condensé sous forme de modèle numérique de terrain, de maille aussi serrée que permise par l'échelle de levé, puis les sondes importantes pour la sécurité de la navigation sont mises en évidence.

### 6.1. Création de la banque de données

Il s'agit d'un ensemble contenant toutes les mesures validées comprises dans une minute du levé et comprenant les informations permettant d'en retrouver l'origine. Cette banque de données peut aussi bien accueillir les sondes du SMF, celles des sondeurs Deso 20, des sondeurs latéraux, des cotations plongeurs, des cotes de levés topographiques, des sondes provenant de levés anciens..., c'est-à-dire l'ensemble des informations mettant à jour les documents en service à l'intérieur de la zone de levé.

Le fichier créé pour une mappe a une taille de l'ordre de 0,5 gigaoctet dont l'essentiel provient du sondeur multifaisceaux.

Cela rend indispensable une synthèse par modèle numérique de terrain.

### 6.2. Le modèle numérique de terrain

Un modèle numérique de terrain est établi à partir de la banque de données sur un maillage régulier.

Plusieurs options sont disponibles pour le calcul de la valeur de la sonde aux nœuds de la maille. Parmi celles-ci, on peut retenir :

- la sonde la plus faible de chaque maille ; le résultat est alors très proche d'un choix de sonde classique ;

- la sonde moyenne ;
- la sonde interpolée plane ;
- la sonde moyenne pondérée par l'éloignement au centre de la maille (cf. annexe 11).

Ces algorithmes sont appliqués sur toutes les mailles. Le nombre des sondes contenues dans une maille est variable. Le pas de grille a été adopté à ce jour à la valeur de 2 mm à l'échelle de rédaction du levé. Le tableau suivant donne le nombre moyen de sondes contenues dans une maille pour quelques exemples de profondeurs et d'échelles de rédaction. Hypothèses :  $V = 10$  nœuds, couverture exhaustive au sondeur multifaisceaux

H \ Échelle	20	50	100	150
1:5 000	$8 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$	6	3
1:10 000	$7 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$	$10^1$
1:50 000	$8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$

Il faut remarquer qu'un modèle numérique de terrain défini avec une maille de 2 mm à l'échelle E a une ressource intrinsèque suffisante pour être rédigé jusqu'à une échelle cinq fois supérieure.

L'algorithme ayant donné les meilleurs résultats est celui de la moyenne pondérée. C'est celui qui est adopté pour la rédaction de l'ensemble des levés effectués au moyen du SMF.

On détermine ensuite des sondes caractéristiques de la banque de données par comparaison avec le modèle numérique de terrain. Ces sondes sont celles qui forment des remontées de fond mal représentées par l'image régulière du modèle numérique.

Elles sont définies de la manière suivante : une sonde est classée caractéristique à  $n\%$  si sa valeur est inférieure à celle du modèle de plus de  $n\%$  de la profondeur (cf. annexe 12).

La valeur de  $n$  a été prise à 1% et 3% pour différents essais, elle est adoptée en tenant compte de la rugosité du terrain et de la gamme de profondeur.

La combinaison du modèle maillé et de l'ensemble des sondes caractéristiques représente l'information numérique validée du levé.

Elle constitue un fichier numérique transférable vers l'EPSHOM (la forme et le contenu de ces fichiers sont bien évidemment évolutifs) [cf. annexe 13].

Comme indiqué en 6.1., la banque de données peut recueillir les sondes du sondeur Deso 20. Il est donc possible d'établir des cartes d'écart entre les sondes Deso 20 et les sondes SMF par exemple.

Actuellement, seules des sondes Deso 20 choisies par les programmes de choix de sonde par profil en service peuvent être intégrées. Des études sont en cours pour l'introduction d'une donnée Deso 20 validée non choisie.

La structure en grille régulière se prête très bien au calcul d'isobathes par splines bicubiques. Cet algorithme a fait l'objet de quelques aménagements permettant :

- d'une part, de tenir compte des sondes caractéristiques pour le tracé en forçant les dérivées premières des fonctions splines au voisinage de ces sondes ;

- d'autre part, de lisser le tracé (dans le sens de la sécurité uniquement) en ignorant les sondes légèrement supérieures à l'isobathe tracée (dans une limite paramétrable) dès lors qu'elles sont entourées de sondes inférieures ou égales à la valeur de l'isobathe.

Sur les figures 4 à 6, on peut observer des tracés d'isobathes et des représentations de type 3-D.

L'acquisition récente d'un nouveau calculateur orienté vers le graphique doit permettre d'améliorer ce type de représentations et les possibilités d'exploitation du modèle.



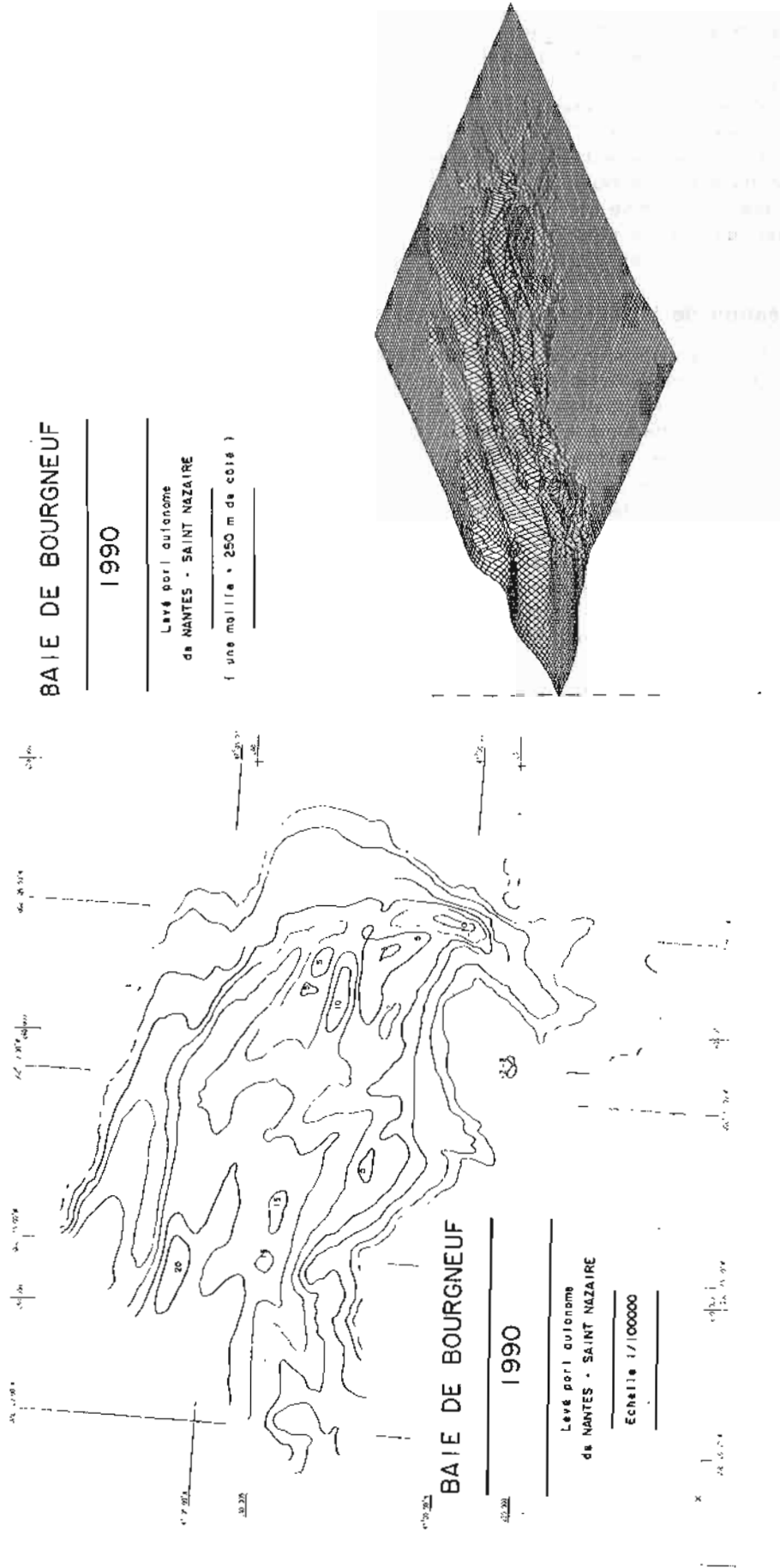


FIG. 4. Tracé d'isobathes et représentation en mode 3-D

# BASSE MOULLEC

Levé SMF 1991

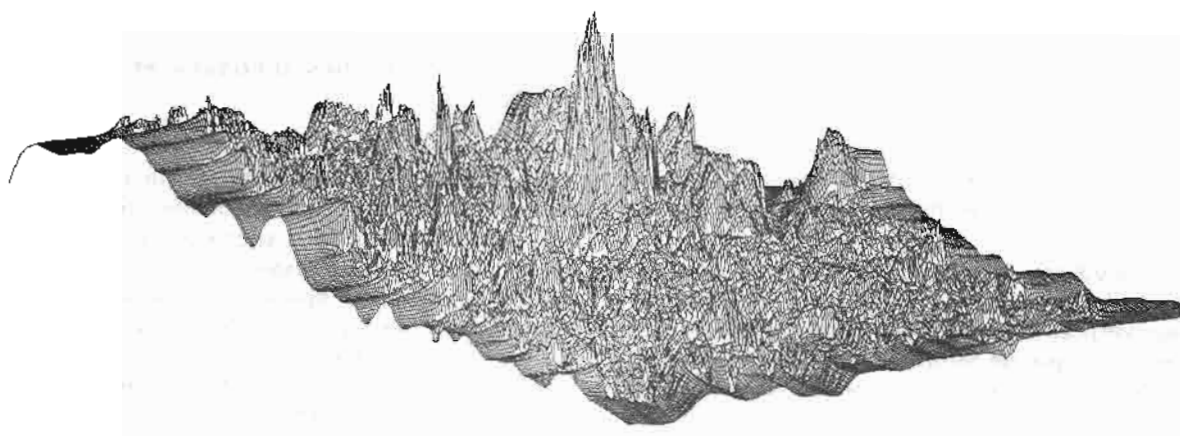


FIG. 5. Vue 3-D de la Basse Moulec (Bretagne Sud)



FIG. 6. Vue 3-D d'un mont sous-marin levé au sondeur multifaisceaux Lennermor

### 6.3. Documents rédigés – Documents archivés

Les minutes d'écriture de sondes sont établies par choix de sonde surfacique sur les fichiers du modèle numérique de terrain (MNT) et des sondes caractéristiques. On assure ainsi la sécurité de la navigation en tirant parti au mieux de l'information disponible. Pour les levés effectués au moyen du SMF et d'un sondeur vertical Deso20, on a établi trois types de documents : une minute  $B_{SMF}$  obtenue comme indiqué ci-dessus, une minute  $B_v$  de bathymétrie verticale (rédaction classique) et une minute B de synthèse des deux précédentes obtenue par choix surfacique sur l'ensemble des données du modèle numérique de terrain, des sondes caractéristiques et des mesures du sondeur vertical. La minute  $B_{SMF}$  comporte en outre la délimitation de la zone insonifiée.

Les procédures de rédaction peuvent évoluer, en particulier la possibilité d'intégrer les mesures du sondeur vertical Deso20 pour l'établissement d'un modèle numérique de terrain global (SMF + Deso20) et la détermination de sondes caractéristiques, peut être envisagée.

Outre les documents habituels, sont disponibles le tracé de la courbe de biais utilisée pour la rédaction du sondage ainsi que les fichiers numériques suivants : mesures brutes, mesures validées, mesures sélectionnées (MNT + sondes caractéristiques) auxquelles peuvent être fusionnées les sondes d'origines diverses (sondeur latéral, investigation par plongeur, résultats de levés photogrammétriques et topographiques, sondes provenant de levés anciens...).

## 7. LA RÉALISATION DU LEVÉ

### 7.1. Le levé régulier

Les levés au sondeur multifaisceaux doivent être effectués avec un espacement entre profils assurant, dans la mesure du possible, la couverture exhaustive du fond.

L'espacement entre profils doit être au maximum de 2,4 fois la profondeur pour assurer un recouvrement entre profils parallèles (la portée latérale est de  $2 \times 1,2$  fois la profondeur).

En fait, seules les seize voies les plus centrales sont exploitées en hydrographie (portée pratique de  $2 \times 0,84$  fois la profondeur). Toutefois, l'exploitation des quatre voies les plus latérales pour la détection garantit la sécurité du levé et suffit dans la majorité des cas (le levé en cours dans la partie Ouest de La Manche permettra de le vérifier).

Comme indiqué en 5.3., la détermination d'une courbe de biais expérimentale est effectuée à chaque levé. On doit, par conséquent, dans le cas où le levé s'effectue sur des fonds très accidentés ne pouvant donc pas servir à l'étalonnage du biais, opérer le levé annexe d'une zone plane (un levé d'une heure est suffisant en pratique).

Par ailleurs, le SMF impose la réalisation très régulière de sondages bathycétérimétriques pour les raisons indiquées au paragraphe 5.2.

### 7.2. Les recherches d'épaves et de hauts fonds

L'insonification totale à la vitesse de 12 nœuds permet la détection des anomalies de profondeur. Les relèvements de fond sont ensuite explorés plus précisément à une vitesse ne pouvant excéder 6 nœuds et en mode épave. On réalise une double insonification (passage en voie verticale puis latérale sur les têtes, espacement entre profils : 0.84 fois le fond), on termine par trois profils croisés sur le point haut ou la ligne de crête.

Cette procédure opératoire permet d'optimiser les capacités de détection du SMF conformément aux hypothèses développées en 4.3. et annexe 6.

## 8. CONCLUSION

Avec le sondeur multifaisceaux Lennermor, on dispose désormais d'un sondeur surfacique hydrographique sur des bandes de largeur 1,7 fois la profondeur apte à la détection et à la cotation d'obstruction (résolution pour la cotation : 4% de la profondeur). Une chaîne de traitement complète et opérationnelle représentant un gros investissement en études est en place.

Des améliorations sont encore à étudier afin d'étendre les zones insonifiées et d'améliorer la précision des mesures ainsi que les performances des traitements.

### 8.1. Amélioration des performances

L'analyse des résultats montre que des résidus de mouvements de plate-forme perturbent la mesure.

Aucune solution n'a pour l'instant pu être apportée. Des essais ont montré qu'aucun retard n'existait dans la prise en compte des corrections d'attitude par le SMF.

La très grande sensibilité de la précision des données à la correction du roulis en particulier, rend la



mesure exacte des paramètres d'attitude primordiale. Une erreur de 0,1° sur le roulis induit une erreur de mesure de la profondeur sur les voies les plus latérales de 0,2%.

Une étude en cours à la Mission Hydrographique de l'Atlantique doit permettre de faire l'évaluation relative de deux compensateurs de houle afin de connaître leur cohérence.

L'application de l'algorithme de « détection de la direction d'amplitude maximum » plus performant que l'algorithme de demi-énergie en théorie, a fait l'objet d'une étude (rapport Thomson-Sintra : étude de modification du sondeur Lennermor, formation de voies et détection des fonds). Des résultats intéressants ont été obtenus sur des simulations concernant le biais et le bruit de la mesure (moindre sensibilité du biais au diagramme de réverbération du fond en particulier). Les résultats sur les signaux réels sont également encourageants mais l'étude n'est pas tout à fait achevée.

On a également étudié les performances du SMF en mode sonar latéral. Une incidence maximale des rayons acoustiques de 70° ne paraît pas suffisante pour obtenir une image de qualité.

## 8.2. Amélioration des traitements

Les développements futurs de la chaîne de traitement en amélioreront la convivialité et la sûreté

afin que les hydrographes puissent l'utiliser sans difficultés et sans l'assistance de programmeurs.

L'utilisation d'une console couleur de type VR 290 sur le Microvax 2 constituera un progrès en particulier pour le logiciel de validation interactive.

L'intégration des mesures du sondeur vertical Deso 20 dans la banque de données doit pouvoir être étendue à l'ensemble des données validées et non plus seulement aux sondes choisies. A cet effet, des procédures de validation similaires à celles développées pour le SMF sont étudiées.

L'application des méthodes de krigeage pour la détermination des sondes du modèle numérique de terrain a déjà été envisagée. Des études complémentaires seront nécessaires si cette option est retenue.

L'acquisition de la station de travail Cyber Control Data plus performante, ouvre un nouveau champ de possibilités d'exploitations graphiques. Des procédures encore manuelles pourront y être transposées (vérification de sondes caractéristiques, zoomage de zones sensibles). Il est évident que tout contrôle nécessitant la ressource de la banque de données ne peut s'effectuer qu'avec une station de travail à grande capacité de mémoire et de calcul.

D'autre part, dans le but de mieux répartir les tâches réalisées sur les deux ordinateurs et afin d'éviter l'engorgement du Microvax, on envisage de transposer les étapes terminales de la chaîne de traitement (création de la banque de données et modélisation) sur la station de travail Control Data.

## ANNEXE 1

### CARACTÉRISTIQUES DU SONDEUR MULTIFAISCEAUX LENNORMOR

#### Émission :

Fréquence : 100 kHz  
Ouverture longitudinale du faisceau : 5°  
Ouverture transversale du faisceau : 140°

Portée supérieure à 350 m

#### Couverture transversale :

2,4 fois la hauteur d'eau

#### Réception :

20 faisceaux espacés de 5°  
Ouverture longitudinale d'un faisceau : 30°  
Ouverture transversale d'un faisceau : 5°

#### Conditions d'emploi :

État de la mer inférieur ou égal à 4  
Vitesse maximale 15 nœuds  
Roulis maximum  $\pm 20^\circ$  avec une période de 8 secondes  
Tangage maximum  $\pm 10^\circ$  avec une période de 6 secondes



## ANNEXE 2

### LOGICIEL DE POSITIONNEMENT DE FENÊTRE EN MODE NORMAL ET EN MODE ÉPAVE

La fenêtre de calcul est l'intervalle de temps sur lequel on applique l'algorithme de demi-énergie. Le système de fenêtrage permet d'éliminer pour le calcul les parasites précédant l'écho et succédant à son retour.

En mode normal, la fenêtre de chaque voie est définie comme suit :

#### Centrage

Sur le temps de demi-énergie des récurrences précédentes (filtrées pour éviter la propagation d'erreurs).

#### Longueur

Longueur correspondant à l'ouverture de 5° avec prise en compte de la pente du terrain évaluée sur les voies adjacentes + élargissement de 5% du temps en début et fin de fenêtre + élargissement d'une largeur d'impulsion d'émission en fin de fenêtre + élargissement de la traînée due au filtrage en fin de fenêtre (2 largeurs d'impulsion en pratique).

Dans le cas de passages sur épaves et hauts fonds avec présence de deux signaux (un sur l'épave, un sur le fond), le logiciel a montré ses difficultés à positionner la fenêtre sur l'écho le plus précoce. Une adaptation appelée « mode épave » a été mise en place.

Trois paramètres sont réglés par l'opérateur :

- une distance  $d$ ;
- un rapport  $r$ ;
- un coefficient de filtrage  $f$ .

Le principe de positionnement de la fenêtre est semblable au mode normal :

#### Centrage

Sur le temps de demi-énergie des récurrences précédentes filtrées par un filtre de coefficient  $f$  éven-

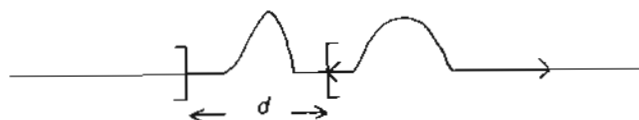
tuellement moins fort qu'en mode normal (réf. mode normal  $f=0,8$ ).

#### Longueur

Identique au mode normal sauf absence de prise en compte de la pente du terrain (gain de temps de calcul).

A chaque récurrence : calcul de l'énergie contenue dans la tranche d'épaisseur  $d$  avant l'ouverture de la fenêtre.

Si cette énergie est supérieure à un taux  $r$  de l'énergie dans la fenêtre, le calcul de la profondeur s'effectue sans tenir compte de la fenêtre. De plus, le centrage de la fenêtre de la récurrence suivante s'effectue sur le temps de demi-énergie non filtré.



] [ tranche d'épaisseur  $d$ , énergie  $E'$

< > fenêtre de calcul, énergie  $E$

si  $E' > rE$  élargissement du calcul à l'ensemble du signal.

Cet aménagement du logiciel de suivi de fenêtre permet un positionnement plus prompt sur l'écho résultant de la remontée du fond. Il donne par conséquent une meilleure cotation des remontées de fond brusques. Le mode épave doit être systématiquement utilisé dès lors que l'on effectue une recherche d'épave ou de haut fond.

Les paramètres par défaut sont :

- $d=20\%$  (de la profondeur moyenne)
- $r=50\%$
- $f=0,5$

Les réglages doivent être revus pour les recherches par fonds supérieurs à 50 m ; la distance  $d$  doit alors être augmentée.

## ANNEXE 3

## COMPARAISON DES DEUX CENTRALES D'ATTITUDE HIPPY 120 ET TSS 335

Les graphiques joints montrent la différence sur la mesure du roulis, du tangage et du pilonnement entre les deux centrales (cf. fig. 8 à 10) le long de la route représentée en figure 7. Sur la partie rectiligne de la route du bâtiment, on constate des dif-

férences importantes (jusqu'à  $2,5^\circ$  en roulis) non explicables par les accélérations horizontales du porteur figure 11. Des résultats plus complets sont disponibles à la Mission Hydrographique de l'Atlantique (résultats communiqués par la société anglaise TSS).

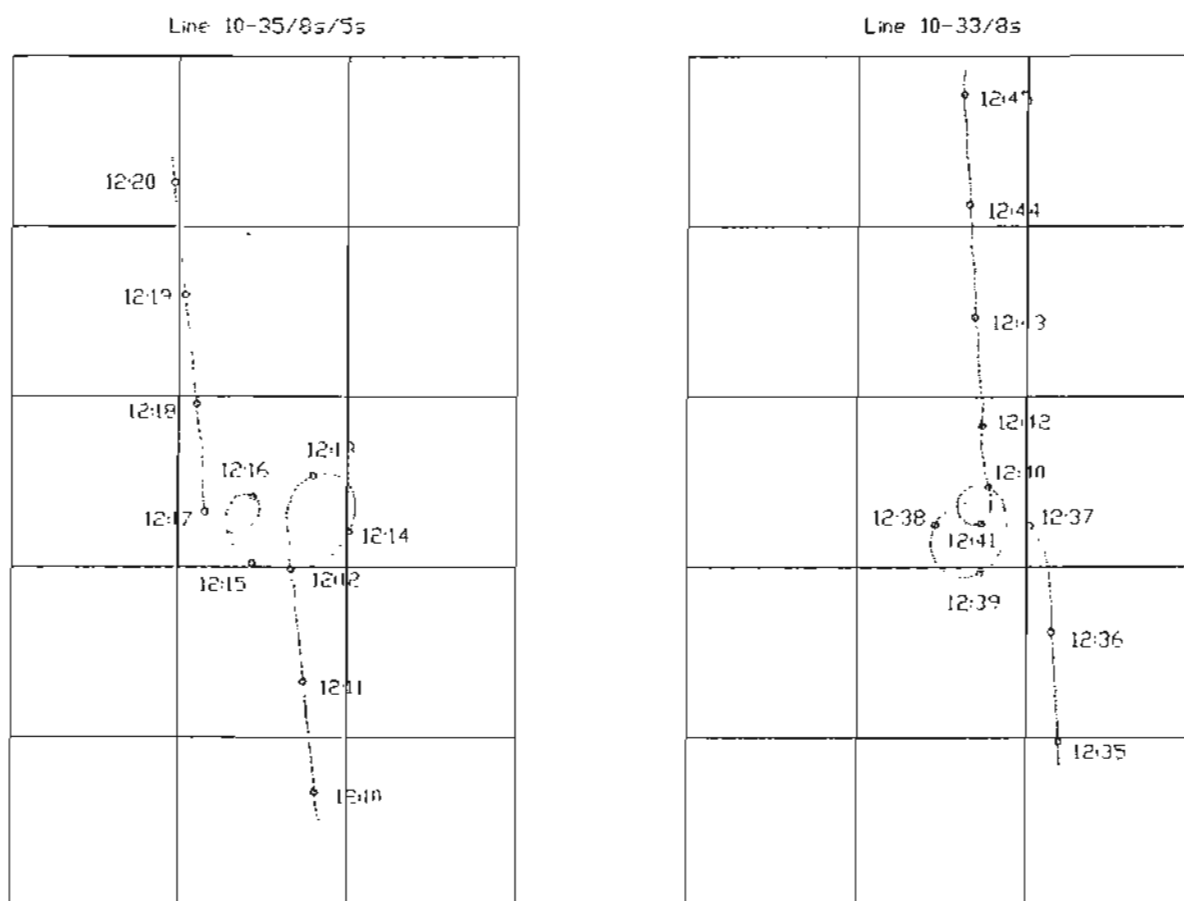


FIG. 7. Routes suivies par le bâtiment utilisé pour l'évaluation comparée des compensateurs de houle TSS 335 et Hippy 120

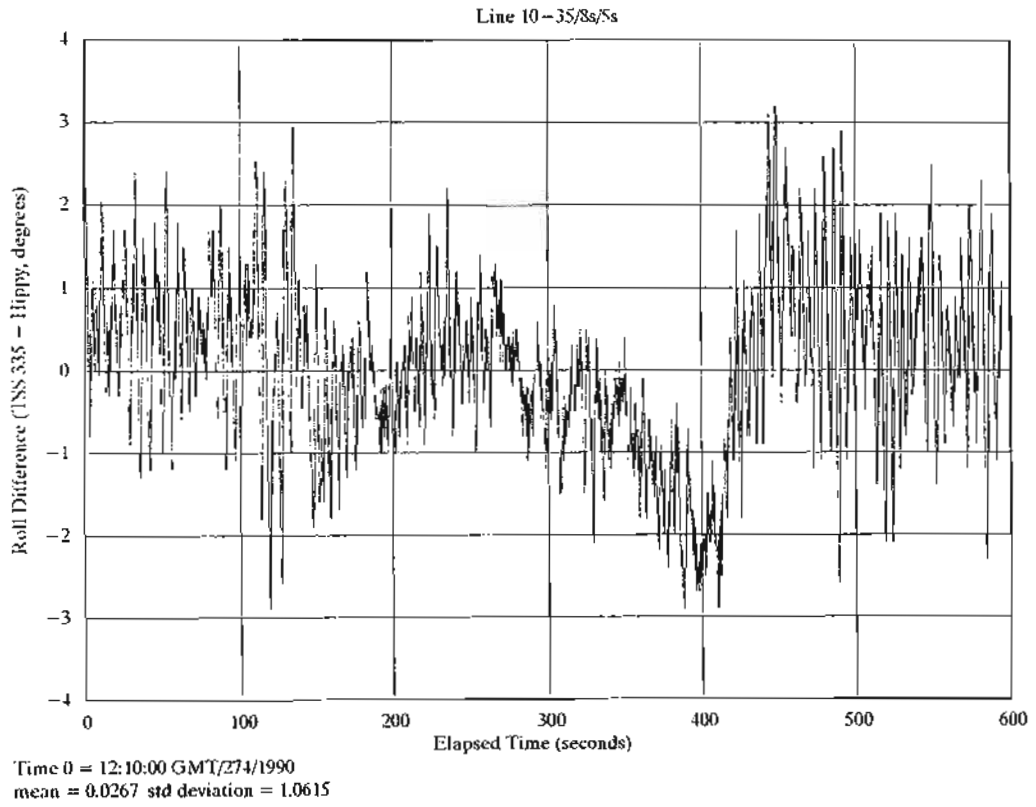


FIG. 8

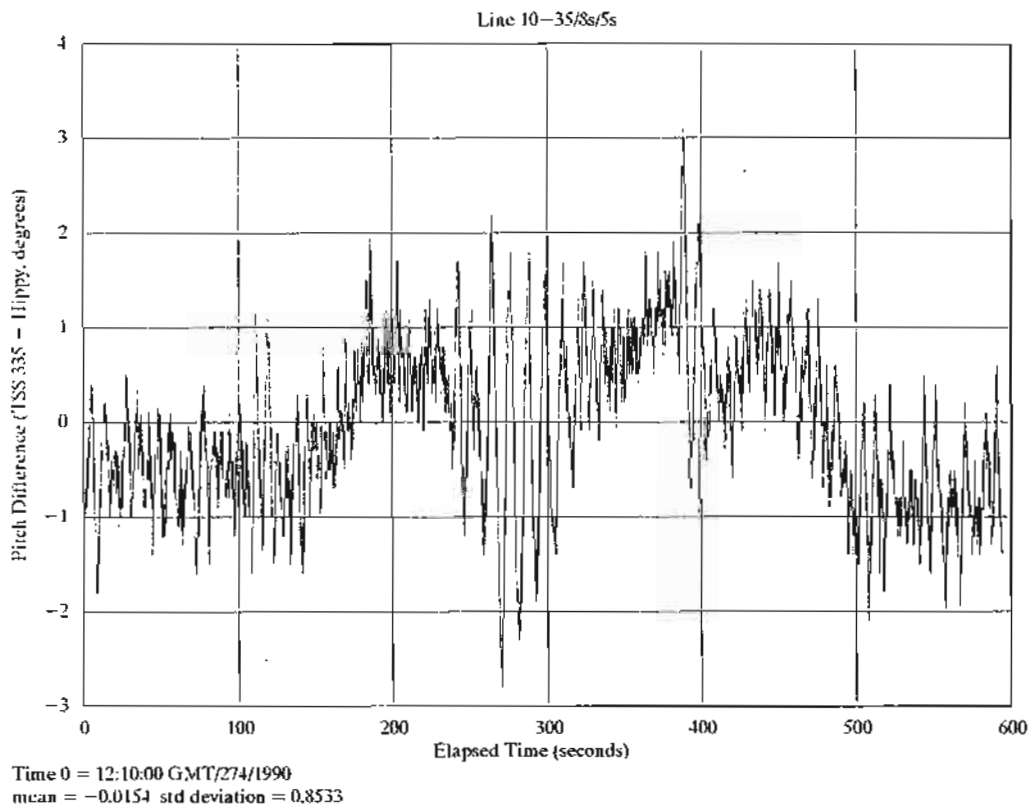


FIG. 9

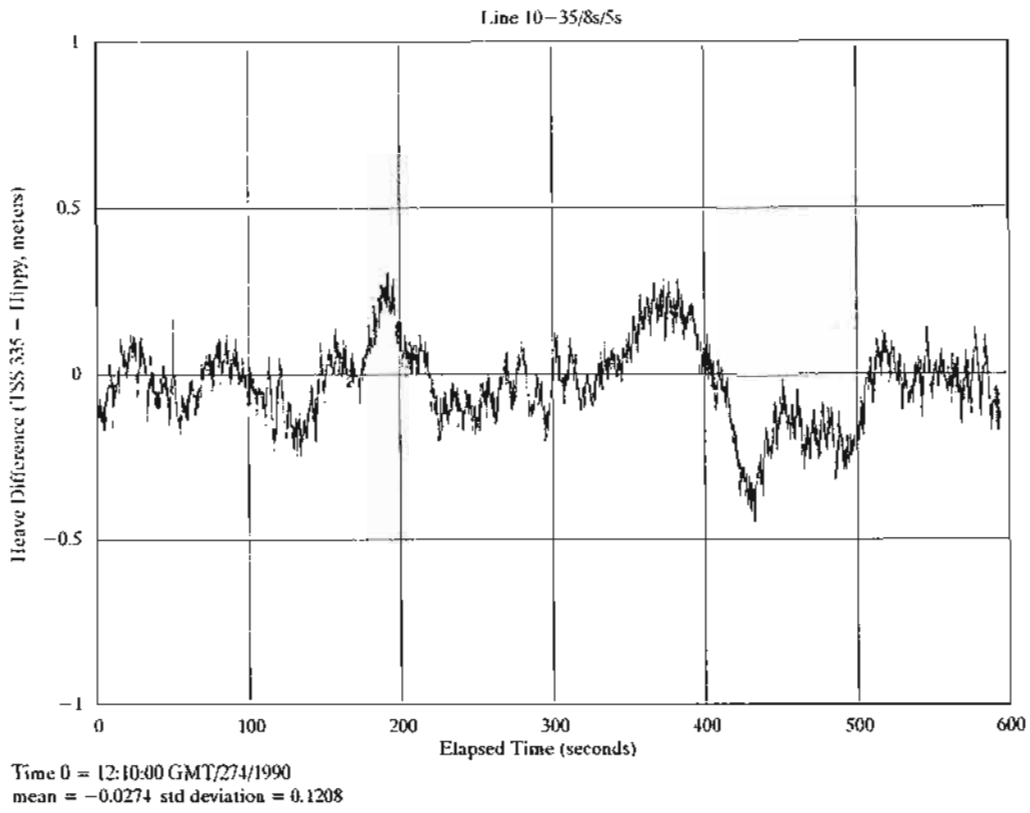


FIG. 10

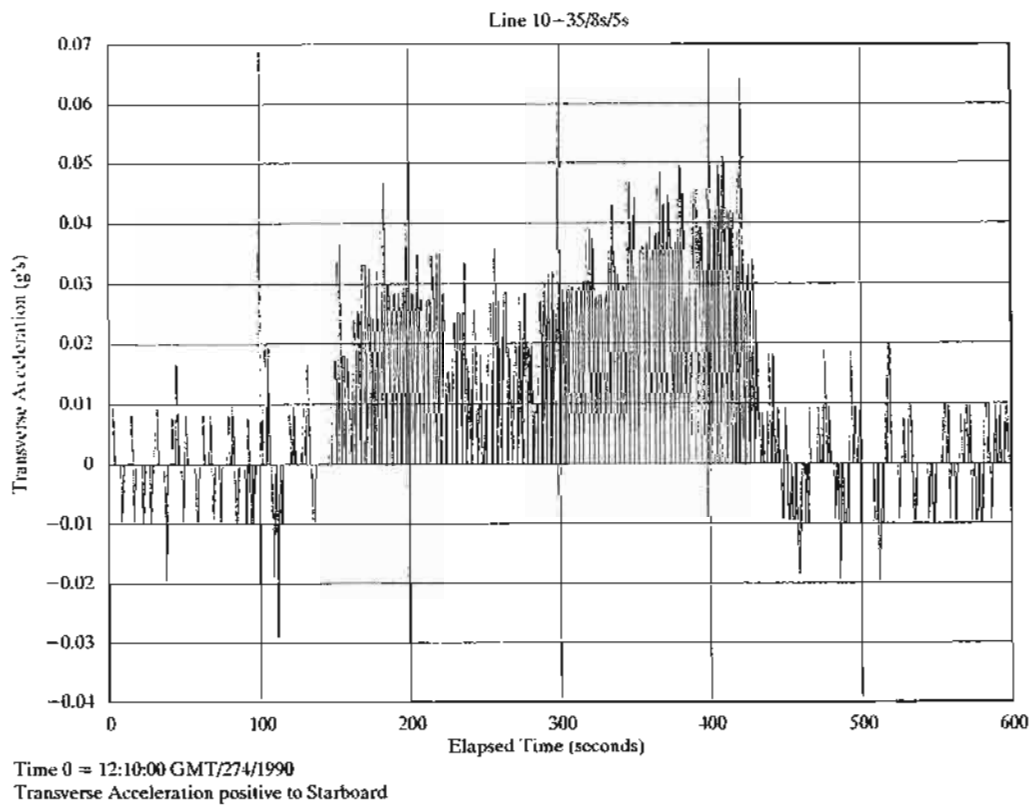


FIG. 11



## ANNEXE 4

CAPACITÉS THÉORIQUES DE DÉTECTION ET COTATION D'OBSTRUCTIONS  
PAR LE SMF LENNEMOR

## 1. POSITION DU PROBLÈME

On étudie en fonction du numéro de voie, la façon dont le sondeur perçoit une obstruction en fonction des dimensions de celle-ci.

On s'intéresse uniquement à des obstructions rectangulaires de hauteur  $H$  et de largeur  $l$ . Les raisonnements sont effectués en une seule dimension sur le fond.

La lecture de cette annexe peut apparaître assez fastidieuse dans la mesure où il est nécessaire à tout moment de se souvenir du principe de choix d'écho par l'algorithme de demi-énergie. Le paragraphe 3.3 reprend l'ensemble des conclusions essentielles concernant les capacités théoriques de détection et cotation par le SMF.

2. ÉTUDE À LA VERTICALE  
(VOIES 9 ET 10)

Sur la figure 12, on peut observer qu'une obstruction de largeur  $l$  inférieure à la moitié de la largeur de la zone insonifiée  $L$  ne sera pas détectée car elle renvoie une quantité d'énergie inférieure à la moitié de l'énergie totale rétrodiffusée.

Le temps de demi-énergie ne sera donc atteint qu'au moment où le complément nécessaire d'énergie aura été retourné par le fond environnant. Dans ce cas, l'erreur de cotation est proche des 100 % de la taille de l'obstruction. En toute rigueur, le faisceau étant légèrement décentré (de  $2,5^\circ$ ), on peut avoir une légère diminution de l'erreur pouvant atteindre au maximum :  $Z - Z \cos(2,5^\circ) = 9.10^{-4} Z$  où  $Z$  représente la profondeur moyenne.

Soit pour une impulsion de taille  $H$  une erreur totale en % de  $H$  :

$$E = 100\% - 9.10^{-2} \frac{Z}{H} \%$$

Soit si  $H > 1\% Z$ , une erreur relative dans tous les cas supérieure à  $E_{\min} = 90\%$ .

Inversement si l'obstruction est d'une largeur supérieure à  $\frac{l}{2} = \frac{Z \operatorname{tg} 5^\circ}{2}$  où  $Z$  est la profondeur

moyenne, on a une détection assurée et une cotation sans erreur.

En résumé, on a donc :

$$\begin{aligned} \text{si } l < \frac{l}{2} = \operatorname{tg} 2,5^\circ \times Z & \quad \text{Non détection à la verticale} \\ & \quad \text{Erreur de cotation ; } e = 100\% \\ & \quad = 4,3\% Z \\ \text{si } l > \frac{l}{2} = 4,3\% Z & \quad \text{Détection assurée} \\ & \quad e \approx 0\% \end{aligned}$$

## 3. VOIES LATÉRALES

## 3.1. Détection

On considère d'abord une obstruction de largeur  $l$  nulle et de hauteur  $H$ .

On observe sur la figure 13 qu'en fonction de sa situation à l'intérieur de la zone insonifiée, cette obstruction sera détectée ou non.

On peut ainsi déterminer en fonction de l'angle  $\theta$  d'incidence du faisceau la hauteur minimum d'une obstruction de largeur nulle dont on peut assurer la détection.

On a :

$$H_{\min}(\theta, 0) = \frac{1(\theta)}{2} \times \frac{1}{\operatorname{tg} \theta}$$

avec

$$1(\theta) = \left( \frac{Z}{\cos \theta} \times \operatorname{tg} 5^\circ \right) \times \frac{1}{\cos \theta}$$

soit

$$H_{\min}(\theta, 0) = \frac{\operatorname{tg} 5^\circ \times Z}{\sin 2\theta}$$

d'où le tableau :

Voie $\theta$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	47,5	42,5	37,5	32,5	27,5	22,5	17,5	12,5	7,5
H mini en % Z	9	9	9	10	11	12	15	21	34
L/2 en % Z	10	8	7	6	5,5	5	5	5	4

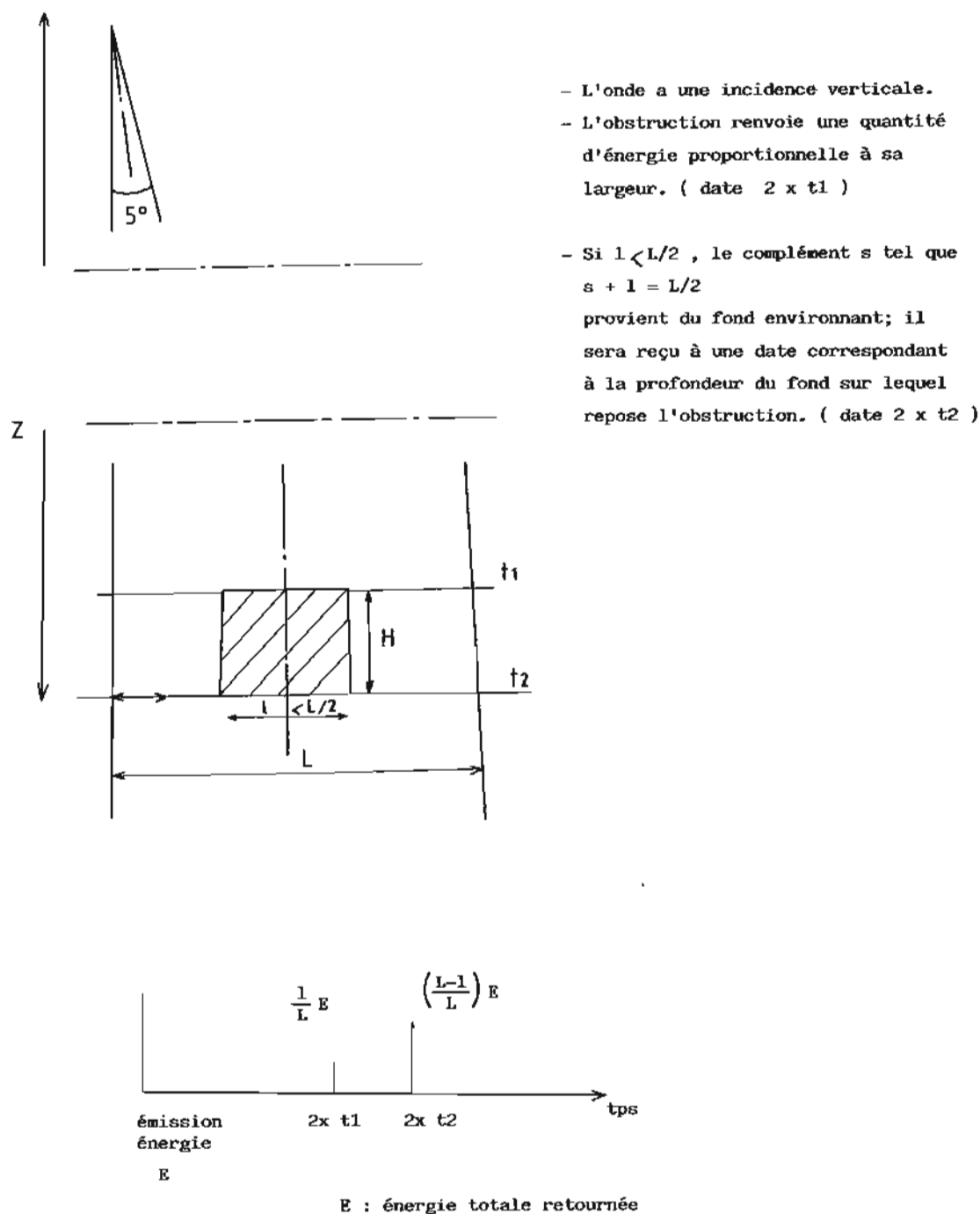


FIG. 12. Comportement du SMF à la verticale : énergie rétrodiffusée par une obstruction en fonction du temps

Si l'obstruction a une largeur  $l$  non nulle, on a l'assurance de la détecter si sa hauteur est supérieure à  $H_{\min}(\theta, l)$ :

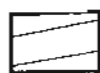
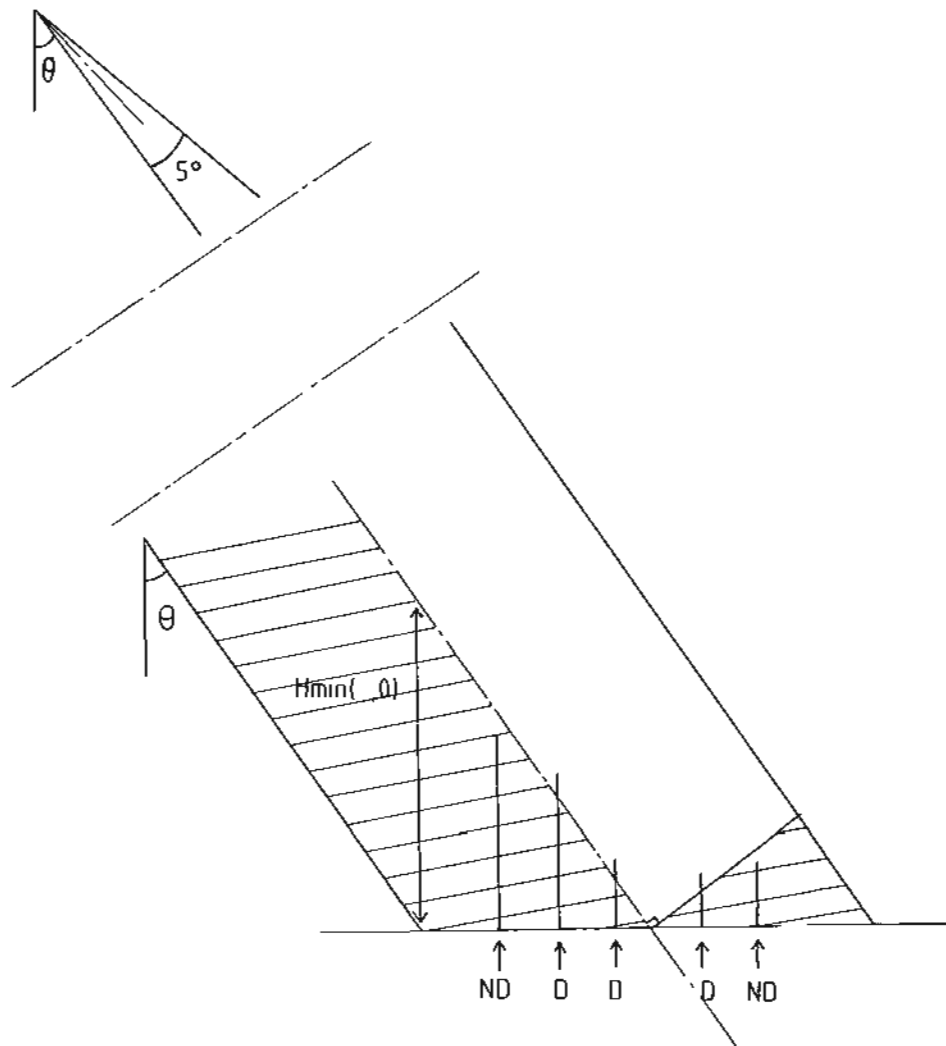
$$H_{\min}(\theta, l) = \text{Max}[(L/2 - l)/\text{tg } \theta, 0]$$

On remarque que :

—  $H_{\min} = 0$  si  $l > L/2$  signifie qu'une impulsion de largeur supérieure à la moitié du faisceau sera détectée quelle que soit sa hauteur. Le tableau précédent donne les valeurs de  $L/2$  en % de  $Z$ .

**N.B. :** Il convient d'insister sur le fait que les hauteurs indiquées ci-dessus sont les hauteurs qui permettent de certifier qu'une obstruction sera détectée. Des obstructions de taille inférieure peuvent être détectées si elles sont bien placées (cf. fig. 13).

Enfin on peut remarquer sur la figure 13 qu'une obstruction située au voisinage immédiat du milieu de la zone insonifiée sera détectée quelle que soit sa taille. En effet, elle ne peut alors être entièrement incluse dans la zone d'ombre représentée par des



Zones d'ombre du SMF

Si l'obstruction ne perce pas ces zones elle n'est pas détectée.

ND Non détecté

D Détecté

FIG 13. Zones de non détection d'un faisceau du SMF

hachures sur la figure. Une procédure opératoire constituant à réduire la vitesse pour les recherches d'obstruction permet d'assurer ce cas de figure en multipliant le nombre des insonifications du point haut étudié.

*Exemple :*

Pour une profondeur  $Z$ , on a un nombre de mesures sur un point particulier du fond dépendant de la vitesse  $V$  et de la cadence de récurrence.

$$n = \frac{Z \operatorname{tg} 5^\circ / \cos \alpha}{V \times \text{réc}}$$

Soit avec  $V = 8$  nœuds,  $Z = 30$  m

Réc = 125 ms

$n = 5$  à la verticale ;  $n = 7$  en voie extrême

### 3.2. Cotation

Dans cette partie, on suppose que la procédure opératoire décrite plus haut est appliquée. Cela revient à chercher la précision de la mesure pour une obstruction placée au mieux dans la pastille d'inso-

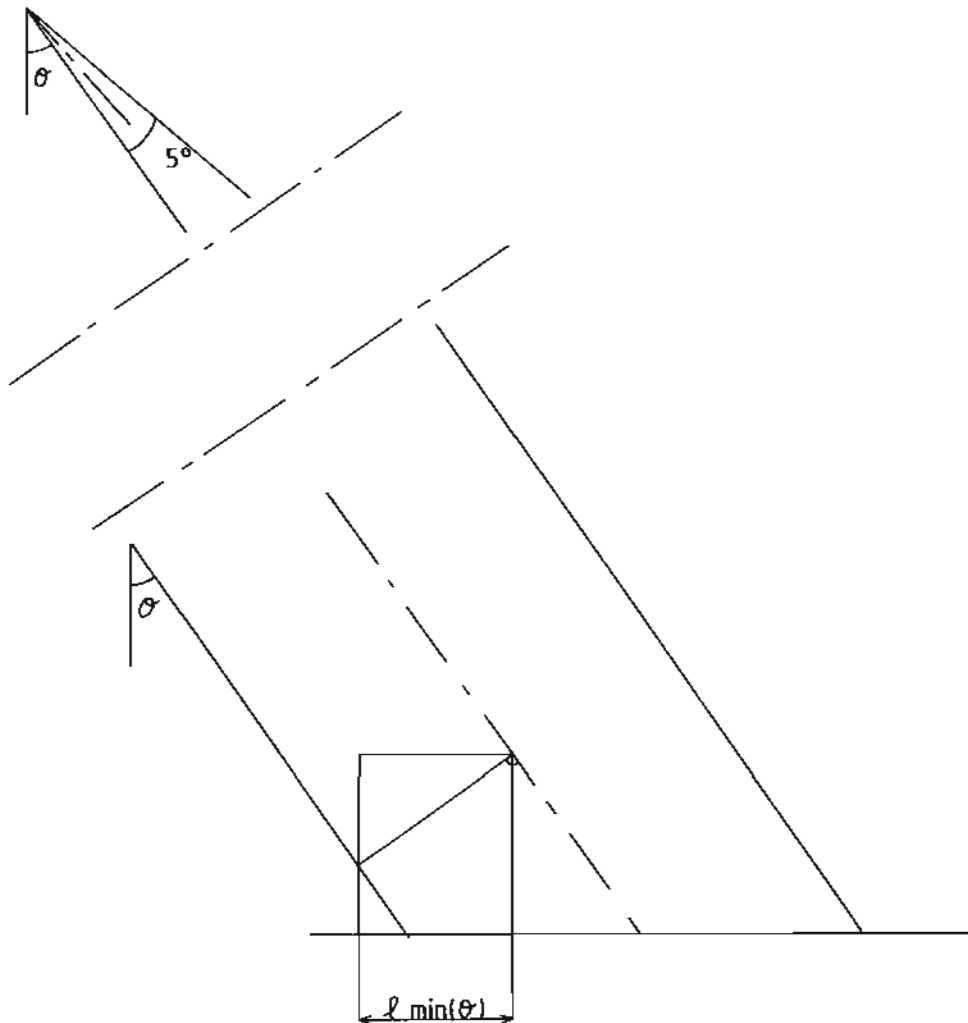


FIG. 14. Dimension horizontale minimum d'un objet de hauteur donnée, idéalement placée dans la pastille d'insonification, pour une cotation sans erreur

nification (hypothèse d'un grand nombre de mesures sur l'obstruction dont au moins une est idéalement placée).

Pour chaque site  $\theta$ , on peut définir une largeur minimum  $l_{\min}(\theta)$  de l'obstruction garantissant une cotation exacte indépendamment de la valeur de  $H$  (cf. fig. 14).

Quel que soit  $H$ , on a :

$$l_{\min}(\theta) = Z \operatorname{tg} 2,5^\circ / \cos \theta$$

$\theta$	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5
$l_{\min}$ en % Z	4,4	4,5	4,6	4,7	4,9	5,2	5,5	5,9	6,5

Dans le cas où les dimensions caractéristiques horizontales sont inférieures à  $l_{\min}(\theta)$ , on aura une cotation exacte uniquement si  $H < l / \operatorname{tg} \theta$  (cf. fig. 15), ce qui donne le tableau ci-après.

### 3.3. Conclusion

Cette étude démontre qu'au prix d'une réduction de la vitesse de sondage et éventuellement de l'augmentation du nombre de passages, on a une probabilité de détection sûre de toute obstruction par les voies latérales.

On peut noter que toute obstruction de dimensions horizontales supérieures à 5% Z sera bien cotée par les voies les plus centrales (cf. 3.1.). Elle le sera

$\theta$	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5
$H_{\max}$ en % Z par % de $l$ pour $l < l_{\min}$	0,13	0,22	0,32	0,41	0,52	0,64	0,77	0,92	1,1



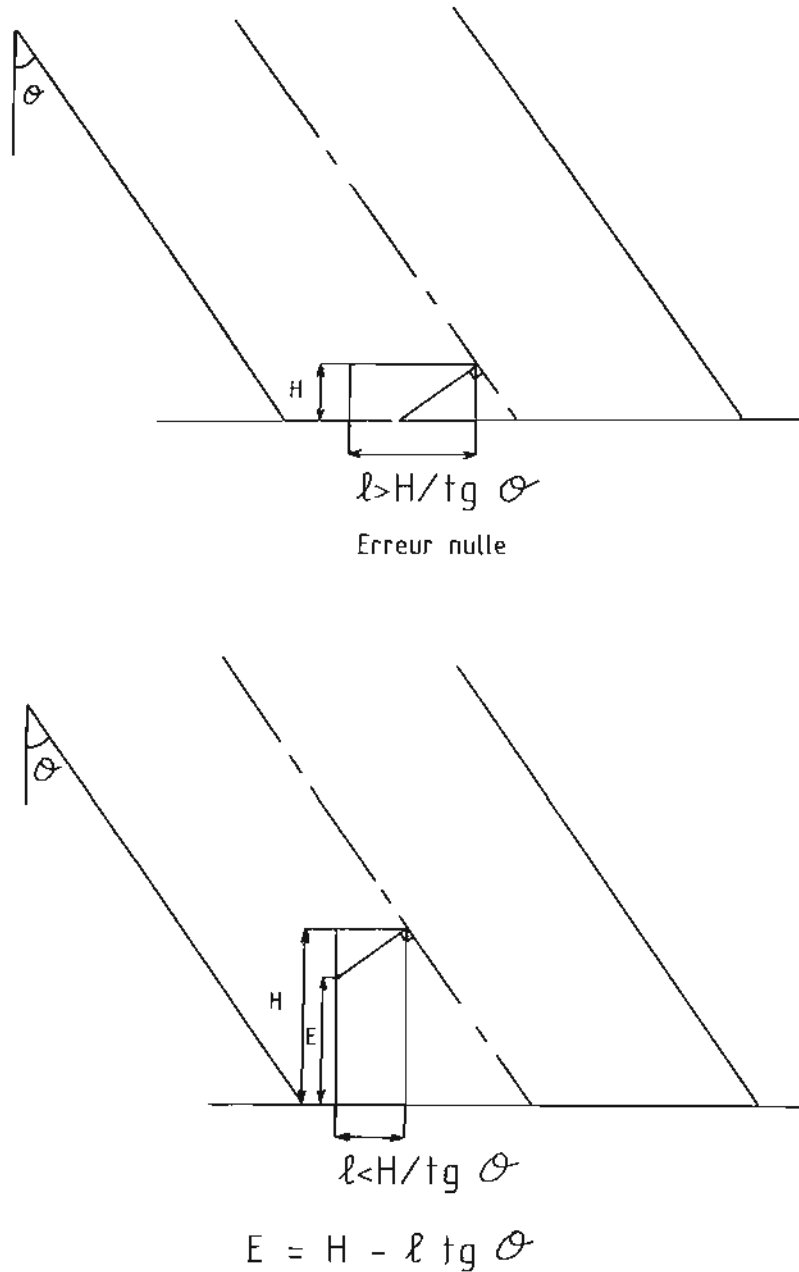


FIG. 15. Différence de comportement du SMF sur deux obstructions de proportions différentes

également par les huit voies extrêmes si sa hauteur est inférieure à 3,2% Z, 3,8% Z, 4,6% Z, 5,5% Z, respectivement pour les couples de voies symétriques (3,16), (2,17), (1,18), (0,19).

Pour les obstructions de faibles dimensions horizontales ( $l < 5\% Z$ ), on remarque que les voies latérales sont les plus aptes à la cotation, mais seulement jusqu'à une hauteur de l'ordre des dimensions horizontales.

Les obstructions de faible embase ( $< 5\% Z$ ) et de grande taille ( $> 5\% Z$ ) (antennes, mâts) seront détec-

tées mais incorrectement cotées. C'est une limite en résolution du sondeur multifaisceaux.

De cette étude, il découle qu'on doit mener les recherches d'obstructions à faible vitesse avec au moins un passage à la verticale (garantie de cotation pour les obstructions telles que  $l > 4,3\% Z$ ).

De plus, en adoptant un espacement entre profils tel que les voies verticales d'un profil soient recouvertes par les voies latérales du profil adjacent, on garantit la détection.

## ANNEXE 5

### RÉSULTAT DES COMPARAISONS DE COTATION D'OBSTRUCTIONS ET D'ÉPAVES PAR DIFFÉRENTS MOYENS DONT LE SMF

Le tableau suivant présente les résultats obtenus sur 26 recherches d'épaves ou d'obstructions effectuées lors d'un levé hydrographique réalisé dans le Sud de la Bretagne. Les investigations au sondeur Atlas Deso 20 ont été effectuées avec les vedettes des bâtiments hydrographiques *Borda* et *L'Espérance* suivant les règles habituelles de recherche au sondeur vertical (profils espacés de 5 mètres).

Les résultats obtenus montrent la bonne aptitude du SMF en un seul passage pour la recherche et la cotation d'obstructions. Des différences de cotation assez importantes peuvent toutefois exister en cas de non détection de la tête fine de l'obstruction.

La méthodologie adoptée depuis ces comparaisons consiste à effectuer pour la cotation une double insonification ainsi que la réalisation de profils croisés.

Hauteur de l'épave ou de l'obstruction au dessus du fond	Cote Deso 20 en vedette	Cote SMF	Écart SMF-Deso 20	Observations
4	16,0	16,3	+0,3	Épave
10,9	16,6	16,7	+0,1	
3,8	15,9	16,4	+0,5	
4,8	26,2	26,3	+0,1	
3,6	18,3	18,3	0	
4,0	13,0	13,0	0	
3,5	17,3	17,2	-0,1	
1,5	17,7	18	+0,3	
5,4	17,5	17,7	+0,2	
0,4	14,2	13,6	-0,6	
9	23,1	23,3	+0,2	Écart en localisation important. Mauvaise détection au SMF
7	16,9	17,8	+0,9	
10	35,9	36,6	+0,7	Écart important, pente ≈ 50 %
10	12,7	13,4	+0,7	
5,6	15,2	14,9	-0,3	
3,0	15,3	15,0	-0,3	
5	13,9	13,7	-0,2	
4,0	13	13	0	Écart en localisation important. Cotation d'une autre tête
4,5	22,3	21,3	-1,0	
1,5	23,0	23,0	0,0	
6	11,9	12,1	+0,2	Mauvaise cotation SMF, pente ≈ 50 %
6,4	23,8	23,4	-0,4	
5	12,1	12	-0,1	
12	7,6	9	+1,4	
6	9,3	10,9		Mauvaise cotation SMF, pente ≈ 50 %
3,5	24,4	25	+0,6	Épave : pente forte

## ANNEXE 6

### ORGANIGRAMMES DE LA CHAÎNE DE TRAITEMENT

Les deux organigrammes qui suivent détaillent les deux parties de la chaîne de traitement. Le premier porte sur la réduction (marée, célérité) et la validation de la mesure.

Le logiciel SMF-NET établit le fond de référence pour l'élimination des sondes aberrantes. Le logiciel SMF-EXT effectue une première épuration des mesures et met au fichier (BAD-) les sondes douteuses

pour examen ultérieur à l'aide du programme interactif SMF-BAD. L'opération de moyennage des sondes, également appelée suréchantillonnage, est effectuée par le programme SMF-EXT.

Le second organigramme présente les étapes conduisant à l'établissement du modèle numérique

de terrain. Le logiciel Rep-Mat réalise la répartition des mesures validées dans la matrice MAT- (banque de données). Le logiciel « modèle » effectue le calcul du modèle numérique de terrain et détermine les sondes caractéristiques du levé.

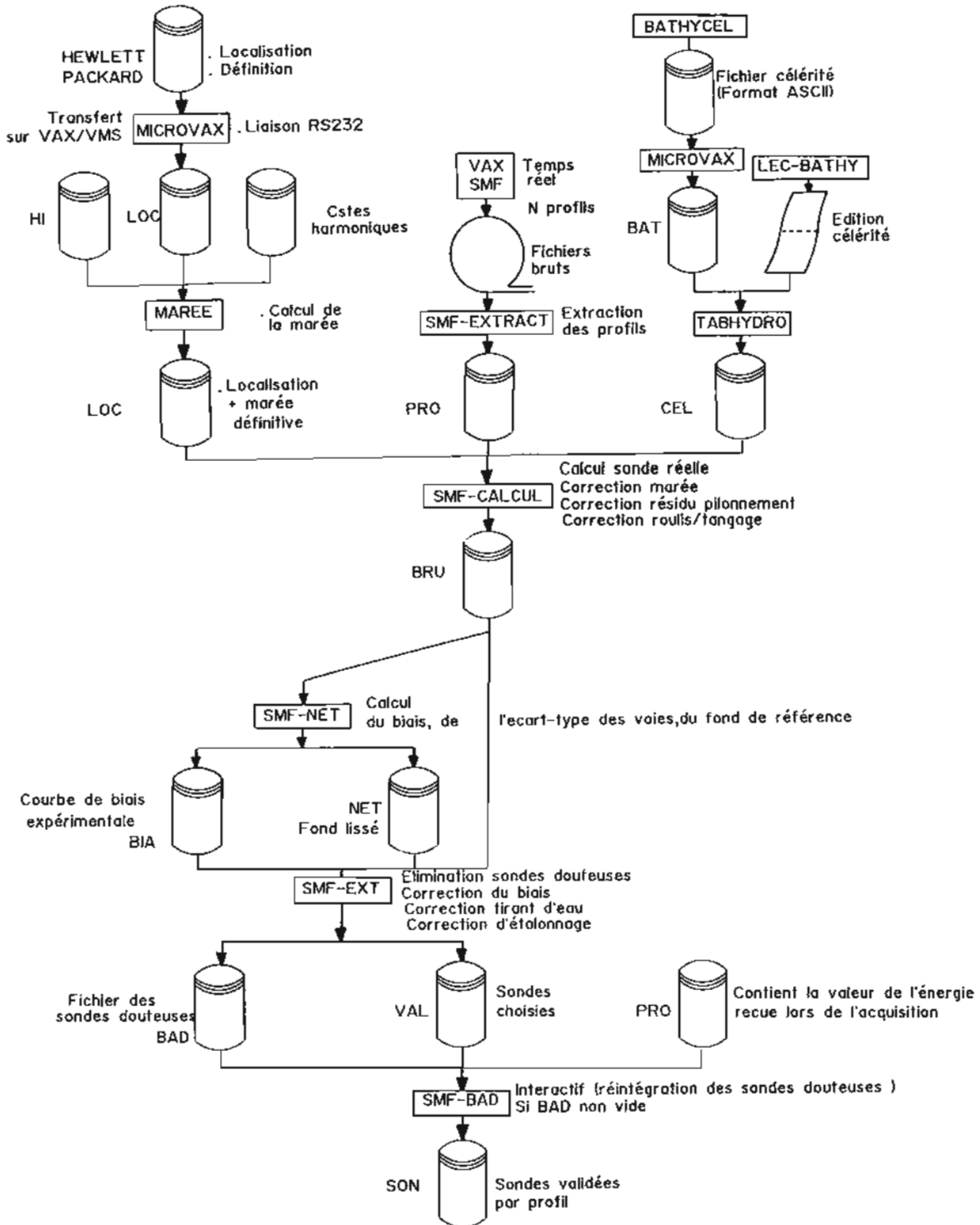


FIG. 16. Chaîne de traitement SMF Lennermor

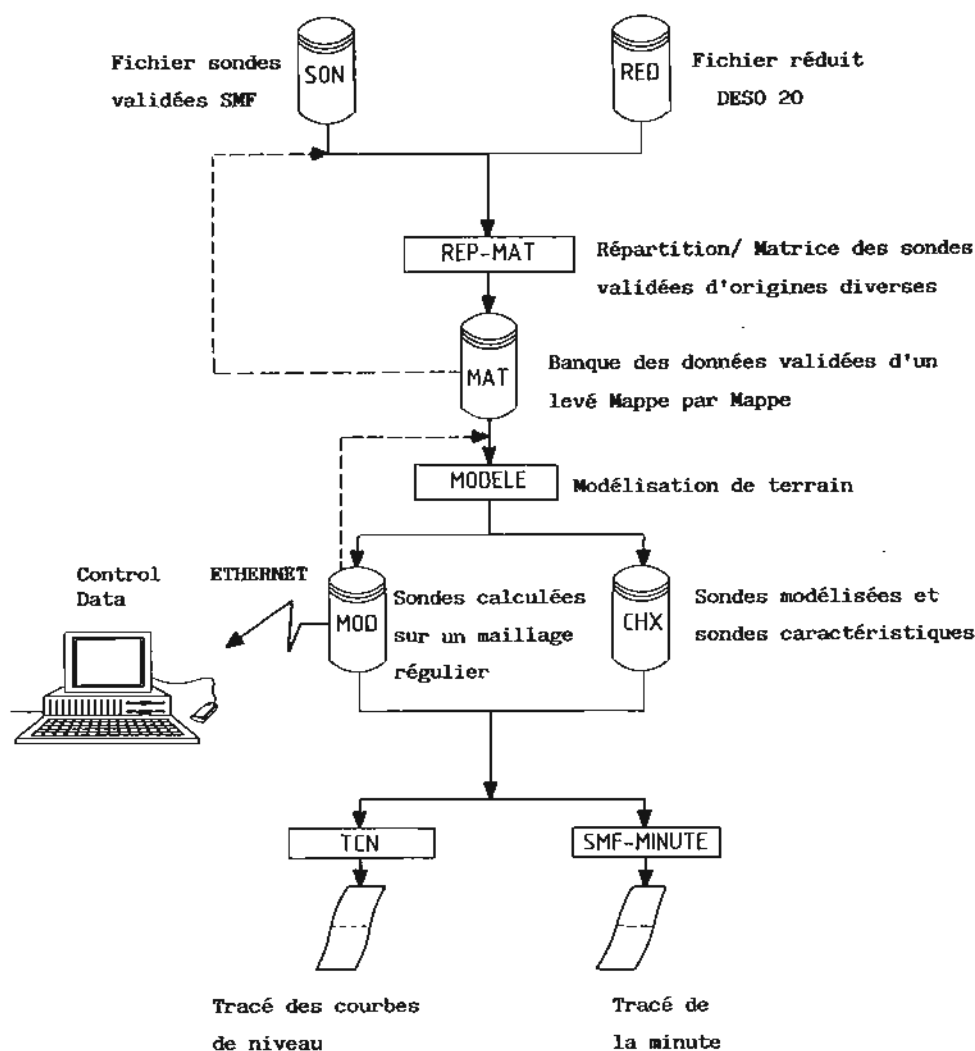


FIG. 17. Modélisation des données bathymétriques

## ANNEXE 7

### BIAIS DE MESURE DU SMF

Les courbes jointes sont des déterminations expérimentales du biais. On représente pour les voies 0 à 19 la valeur dont il faut corriger les mesures des différentes voies pour les ramener au niveau des voies verticales (9 et 10). Le calage absolu de cette courbe s'obtient par comparaison des mesures des voies 9 et 10 avec celles du sondeur vertical Deso

20. Les voies verticales donnent des mesures plus longues de 0,6% de la profondeur que le sondeur vertical.

Sur la figure, on peut noter la répétitivité du biais déterminé sur plusieurs profils différents effectués sur des fonds plats. On a constaté par ailleurs que le biais est proportionnel à la profondeur.



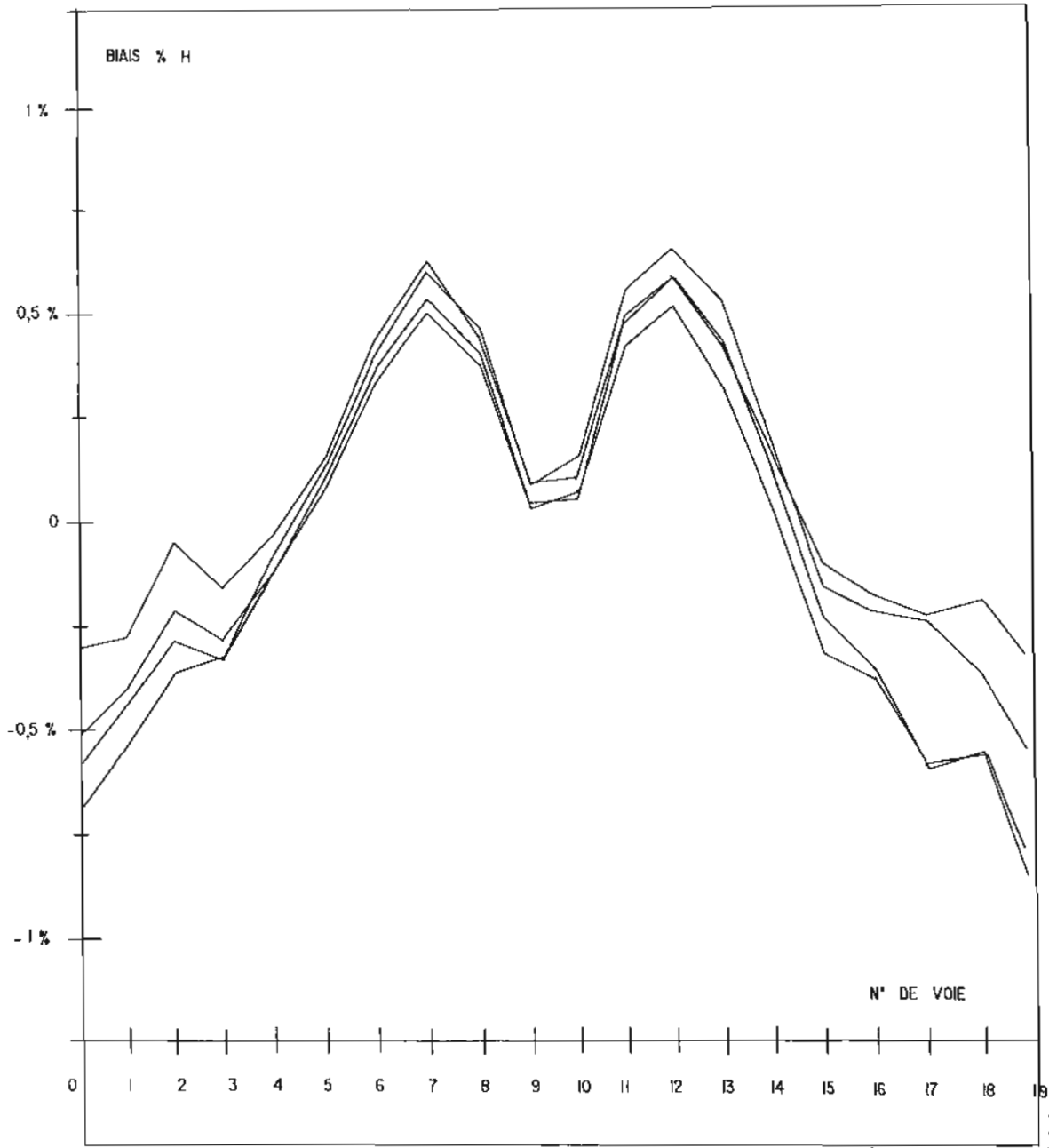


FIG. 18. Courbes de biais expérimentales exprimées en % de la profondeur. Les pourcentages > 0 correspondent à des mesures trop fortes

### ANNEXE 8

#### FILTRE RÉCURSIF ALLER-RETOUR DE COEFFICIENT $k$

C'est un filtre passe-bas du premier ordre.

Soit  $B_n$ ,  $1 \leq n \leq N$ , la série originale des valeurs brutes.

On obtient  $F_n$ ,  $1 \leq n \leq N$ , la série filtrée par :

$$\text{filtre aller} \left\{ \begin{array}{l} X_1 = B_1 \\ X_n = \frac{1}{k} B_n + \frac{k-1}{k} X_{n-1} \end{array} \right. \quad \text{pour } n \text{ allant de } 2 \text{ à } N$$

$$\begin{aligned} F_n &= X_n \\ \text{filtre retour } F_n &= \frac{1}{k} X_n + \frac{k-1}{k} F_{n+1} \end{aligned} \quad \text{pour } n \text{ allant de } N-1 \text{ à } 1$$

La fréquence de coupure à  $-3 \text{ dB}$   $f_c$  est donnée par :

$$f_c = \frac{1}{2 T_e} \arccos \left( \frac{k^2 + (k-1)^2 - \sqrt{2}}{2k(k-1)} \right)$$

où  $T_e$  représente la période d'échantillonnage.

On en déduit le tableau suivant des valeurs de  $f_c$  et des longueurs d'ondes correspondantes pour une vitesse de 10 nœuds du porteur.

$T_p$ ms $H$ m	115 0 à 26	175 50	250 80	350 120
$k$				
2	0,64 Hz 8 m	0,42 Hz 12 m	0,29 Hz 18 m	0,21 Hz 24 m
3	0,36 Hz 14 m	0,24 Hz 21 m	0,17 Hz 30 m	0,12 Hz 43 m

Pour les traitements, on adopte généralement  $k=2$ .

Le filtre laisse passer l'essentiel des fréquences bathymétriques qui se situent aux environs de 0 à 0,4 Hz (13 m à 10 nœuds).

Pour une étude plus complète, voir bibliographie.

#### Remarque :

L'algorithme de demi-énergie utilisé pour le choix d'échos réalise déjà un filtrage du signal. En effet, la méthode de demi-énergie est une intégration sur la pastille insonifiée de longueur  $l = \text{tg } 5^\circ \times H / \cos \alpha$  (où  $H$  représente la profondeur).

Par analogie avec le filtrage réalisé par une moyenne glissante, on en déduit la fréquence de coupure à  $-3$  dB pour la vitesse  $V$ :

$$f_c = \frac{2 \times V}{\text{tg } 5^\circ / H \cos \alpha}$$

soit une période spatiale

$$L_c = \frac{\text{tg } 5^\circ}{2} H / \cos \alpha$$

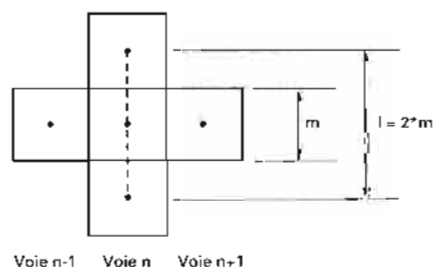
#### A.N.

$V = 10$ nd				
pour $H = 50$ m	on a	Voie 9	$f_c = 2,35$ Hz	
		Voie 0	$f_c = 1,59$ Hz	
pour $H = 100$ m	on a	Voie 9	$f_c = 1,18$ Hz	
		Voie 0	$f_c = 0,79$ Hz	

## ANNEXE 9

### DÉFINITION DE L'ENVIRONNEMENT DE LA SONDE POUR APPLICATION DU CRITÈRE D'ISOLEMENT

On considère que l'ensemble des mesures obtenues par insonification d'une pastille en recouvrement avec celle de la mesure traitée font partie de son voisinage.



$m$  : longueur de la pastille d'insonification

$l$  : limites axiales des impulsions contenues dans l'environnement de l'impulsion traitée

Le voisinage comprend donc les mesures des deux voies adjacentes (sauf voies 0 et 19) et un nombre variable de mesures de la voie avant et après l'impulsion traitée.

On a :

$$l = \frac{\text{tg } 5^\circ H}{2 \cos \alpha d}$$

$\alpha$  : site de la voie,

$5^\circ$  : ouverture du faisceau,

$H$  : profondeur,

$d$  : distance parcourue entre deux impulsions.

Le nombre de sondes contenues dans le voisinage dépend du numéro de la voie, de la profondeur  $H$  (influence sur la cadence de récurrence), et de la vitesse du porteur. Il n'est pas inférieur à huit sondes et n'est pas limité (cas de vitesse de sondage très faible).

Une sonde de la classe  $-1,5$  à  $-3\sigma$  (ou  $\sigma$  représente l'écart-type du signal) est non isolée si elle a un nombre de sondes voisines ( $< -1,5\sigma$ ) au moins égal à la moitié du nombre total de voisines.

Une sonde de la classe  $< -3\sigma$  est non isolée si elle a un nombre de sondes voisines de sa classe au moins égal au tiers du nombre total des voisines.

Il faut remarquer qu'une obstruction de longueur nulle est insonifiée par la moitié des sondes du voisinage. Les critères définis ci-dessus ne mettent donc pas en jeu la sécurité; on prend même une marge de sécurité pour les sondes de la classe  $< -3\sigma$ .

## ANNEXE 10 SURÉCHANTILLONNAGE

Le nombre de sondes sur lesquelles on réalise le suréchantillonnage est donné par la formule suivante.

**Valeurs de suréchantillonnage**

$$n = E \left( \frac{H / \cos \alpha \times \operatorname{tg} 5^\circ}{d} \right)$$

avec

E = partie entière

d = V × R

v = vitesse sondage

V = 6 nœuds

$\alpha \backslash H$	15	30	50	100
2,5	3	6	8	9
17,5	3	7	8	9
32,5	4	8	9	11
47,5	5	10	11	13

R = cadence de récurrence

H = profondeur

$\alpha$  = site de la voie

V = 8 nœuds

$\alpha \backslash H$	15	30	50	100
2,5	2	5	6	7
17,5	2	5	6	7
32,5	3	6	7	8
47,5	4	7	8	10

V = 10 nœuds

$\alpha \backslash H$	15	30	50	100
2,5	2	4	4	5
17,5	2	4	5	5
32,5	2	4	5	6
47,5	3	6	7	8

## ANNEXE 11

### CALCUL DES SONDES DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN PAR LA MÉTHODE DITE « PONDÉRÉE »

La méthode employée consiste à calculer la sonde au milieu du carreau en réalisant la moyenne pondérée de l'ensemble des sondes contenues dans la maille. Le poids de chaque sonde est l'inverse de son éloignement au centre avec comme borne supérieure:  $1 \text{ m}^{-1}$ .

On a :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n P_i Z_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

avec  $P_i$  :  $\operatorname{Max}\{1/D_i, 1\}$

où  $D_i$  représente la distance horizontale en mètres

$Z_i$  : valeur de la sonde

Une deuxième méthode permet de favoriser les sondes courtes dans la pondération. Les poids sont calculés de la manière suivante :

Soit  $\alpha$  la demi-largeur d'une maille, et  $Z_{\text{moy}}$  la profondeur moyenne dans la maille, on a en notant  $P_i$  le poids de la sonde  $Z_i$  à la distance  $D_i$  du centre du carreau :

$$P_i^2 = \frac{1}{\left(\frac{D_i}{a}\right)^2 + \alpha \left(\frac{Z_i}{Z_{\text{moy}}}\right)^2}$$

On choisit le coefficient  $\alpha$  de manière à ce qu'une remontée de fond de  $n\%$  située dans un angle de la maille ait un poids identique à celui d'une sonde  $Z_{\text{moy}}$  située au centre.

C'est à dire :

$$\frac{1}{\left(\frac{\sqrt{2} a}{a}\right)^2 + \alpha \left(\frac{n\% Z_{\text{moy}}}{Z_{\text{moy}}}\right)^2} = \frac{1}{\alpha}$$

Soit :

$$\alpha = \frac{2}{1 - (n\%)^2}$$

**A.N. :**

Remontée de 1% du fond

$$\frac{Z_i}{Z_{moy}} = 99\% ; \alpha = 100$$

Remontée de 5% du fond

$$\frac{Z_i}{Z_{moy}} = 95\% ; \alpha = 20$$

Plus on prend  $\alpha$  élevé, plus on favorise la forte pondération des sondes courtes.

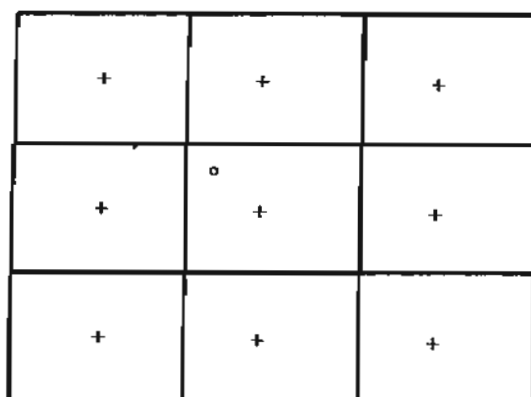
## ANNEXE 12 SONDES CARACTÉRISTIQUES

On détermine des sondes caractéristiques par rapport au modèle numérique de terrain obtenu par application de la méthode de pondération (ou une autre méthode) de la manière suivante :

Une sonde quelconque est dite caractéristique à  $n\%$  si elle est plus courte de plus de  $n\%$ , que la sonde modèle de la maille considérée et des huit mailles l'entourant.

La sonde  $Z_o$  est caractéristique si  $Z_o(1 - n\%) < \text{Min}(Z_+)$  où les  $Z_+$  sont les sondes du modèle numérique de terrain.

On choisit  $n$  en fonction de la rugosité du fond. Si le fond est rocheux par exemple, on aura tendance à choisir un coefficient  $n$  élevé (3%) afin d'éviter la multiplication de sondes non réellement caractéristiques.



+ = sondes modèles

° = sonde étudiée

## ANNEXE 13 FORMAT DES FICHIERS

Le format des fichiers numériques transférés vers l'Établissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (EPSHOM) n'est pas encore définitivement arrêté. Les grandes caractéristiques en sont toutefois établies et l'expérience permettra de les ajuster.

Ces fichiers, de type ASCII, contiendront les sondes du modèle numérique de terrain, les sondes caractéristiques, les sondes des sondeurs verticaux, les côtes plongeurs, les sondes interprétées sonal ou sonar, et d'une manière générale toutes les in-

formations permettant la mise à jour bathymétrique à l'intérieur de la zone du levé.

Les sondes de la minute bathymétrie définitive (si toutefois ce type de document est maintenu) proviennent d'une extraction du fichier des informations validées communiquées à l'EPSHOM.

Pour chaque sonde, on dispose d'un certain nombre de champs qui seront plus ou moins renseignés selon que la sonde provient directement d'une mesure (sonde Deso 20 ou caractéristique) ou d'un calcul (sonde pondérée du modèle numérique de terrain par exemple).



Les champs sont les suivants :

X :	Position en X ou en G.	Nature :	Nature de la sonde (épave, caractéristique).
Y :	Position en Y ou en $\varphi$ .	GDA :	Groupe date-heure. Simplement la date du levé pour les sondes calculées.
Porteur :	Code du porteur	Profil :	Numéro du profil auquel appartient la sonde.
	SMF voies 0 à 19.		
	Deso 20.		
	Raythéon.		
	Plongeur.		
	Modèle et méthode (pondérée, plane, moyenne...)		

Les sondes du Deso 20 intégrées à ce fichier seront les sondes choisies par profil, c'est à dire celles contenues dans le fichier avant choix surfacique.

## ANNEXE 14

### LES ERREURS SUR LES PROFONDEURS

Cette annexe a été rédigée par Jean-Luc Déniel, Ingénieur Principal des Études et Techniques d'Armement au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Deux sources d'erreurs sont analysées, celles affectant la détermination de la profondeur, ainsi que celles intervenant sur la précision de la localisation.

#### 1. LES ERREURS SUR LES PROFONDEURS

Les erreurs dans le calcul des sondes proviennent d'erreurs en temps réel (asservissement en roulis et tangage, horloge interne du sondeur, largeur du faisceau, numérisation de la sonde) et temps différé (roulis, tangage, pilonnement, célérité, marée, immersion de la base).

##### 1.1. Pilonnement

Le pilonnement, ainsi que le roulis et le tangage, est mesuré par le compensateur Atlas Heco 10 de Krupp Atlas.

La précision annoncée pour la mesure du pilonnement est de 5% avec un minimum de  $\pm 5$  cm.

Cette erreur se retrouve intégralement sur la sonde.

##### 1.2. Immersion de la base

L'immersion de la base est contrôlée à la sonde lumineuse à partir du pont passerelle. Un tirant d'air

mesuré de 7,0 m correspond à une immersion de la base de 4,60 m.

Cette mesure est faite avec une précision de  $\pm 5$  cm, l'erreur se retrouve intégralement sur les sondes, où elle introduit un biais systématique au cours d'une séance.

##### 1.3. Marée

La marée, utilisée pour ramener toutes les sondes à un même niveau de référence (zéro de réduction des sondes), peut être mesurée sur zone, ou calculée par un modèle numérique calé sur des observations à la côte.

La précision que l'on peut attendre de ces méthodes est de  $\pm 20$  cm en absolu. La précision relative entre deux sondes successives est nettement meilleure, l'erreur ayant une période du même ordre de grandeur que la marée, soit 12 h.

##### 1.4. Célérité

Pour passer des temps de parcours mesurés aux profondeurs on utilise une célérité mesurée par un bathycélérimètre Suber SLS 12.

La précision de cet appareil est estimée à 0,2 m/s.

La variation en cours de journée à l'intérieur d'une zone de sondage peut être estimée à 0,2 m/s.

L'erreur totale est donc d'environ 0,4 m/s.

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta c}{c}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta c = 0,4 \text{ m/s} \\ c = 1500 \text{ m/s} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta z}{z} = 2,7 \cdot 10^{-4}$$

Pour un fond de 100 m, cette erreur est donc de 2,7 cm.

### 1.5. Largeur du faisceau

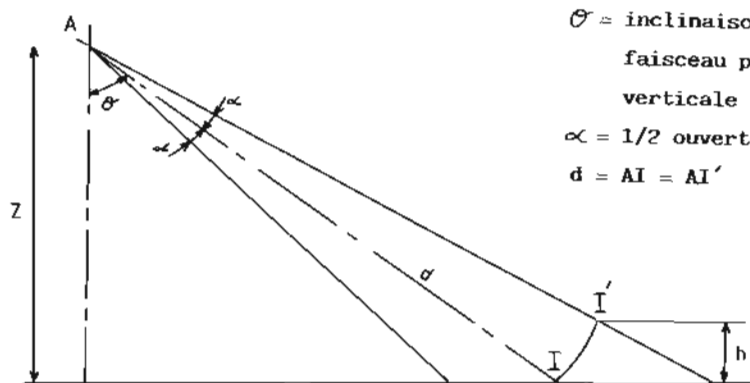
Dans le calcul de la sonde, on considère qu'elle se trouve sur l'axe du faisceau. Or, suivant les qualités de réflexion du fond, la réponse provient de l'ensemble des points situés dans le faisceau. Si l'un de ces points réfléchit plus que les autres, la réponse peut provenir d'un point se déplaçant d'une extrémité à l'autre du faisceau.

Or  $z = d \cos \theta$  donc :  $h = z \operatorname{tg} \theta \sin \alpha$

Dans le cas du sondeur Lennermor,  $\alpha$  vaut  $2,5^\circ$  et  $\theta$  varie de  $0$  à  $47,5^\circ$ .

La valeur maximale de  $h$  est donc :

$$h = 4,9 \cdot 10^{-2} z$$



$\theta$  = inclinaison de l'axe du faisceau par rapport à la verticale

$\alpha$  = 1/2 ouverture du faisceau

$d = AI = AI'$

FIG. 19

L'erreur sur la profondeur est représentée par  $h$  dans le schéma ci-dessus.

$$h = d \cos \theta - d \cos (\theta + \alpha)$$

$$h = d \cos \theta - d \cos \theta \cos \alpha + d \sin \theta \sin \alpha$$

$$h = d \sin \theta \sin \alpha$$

Pour une profondeur de 100 m, l'erreur maximale est de  $\pm 4,9$  m.

Le tableau suivant donne les erreurs maximales pour chacune des voies, en pourcentage de la profondeur.

N° de voie	0 19	1 18	2 17	3 16	4 15	5 14	6 13	7 12	8 11	9 10
$\theta^\circ$	47,5	42,5	37,5	32,5	27,5	22,5	17,5	12,5	7,5	2,5
$\frac{h}{z} \%$	4,9	4,1	3,4	2,9	2,4	1,9	1,5	1,1	0,7	0,3

### 1.6. Discrétisation du roulis

A la réception, le roulis est pris en compte dans la formation des voies. Cette correction n'est pas continue mais se fait avec un pas  $\alpha$  égal à  $0,3^\circ$  ( $0,6^\circ$  avant octobre 1988).

On peut évaluer l'erreur maximale entraînée par cette discrétisation :

Le calcul est le même que précédemment :

$$h = z \operatorname{tg} \theta \sin \alpha$$

$$\alpha = 0,3^\circ$$

La valeur maximale de  $\theta$  est  $47,5^\circ$ , donc l'erreur maximale est :

$$h = 5,8 \cdot 10^{-3} z$$

Le tableau suivant donne les erreurs maximales pour chacune des voies en pourcentage de la profondeur.

Cette erreur est 10 fois plus faible que l'erreur précédente.

L'erreur a une forme en « dents de scie » dont la fréquence moyenne varie avec la fréquence et l'amplitude du roulis.

Si  $R_0$  est l'amplitude du roulis, et  $\delta$  le pas de discrétisation, il y a  $\frac{2R_0}{\delta}$  pas dans une période de roulis.

En appelant  $f_r$  la fréquence du roulis et  $f_e$  la fréquence de l'erreur d'échantillonnage on a :

$$f_e = \frac{2R_0}{\delta} f_r$$

Pour un roulis de  $\pm 3^\circ$  ( $R_0 = 6^\circ$ ), un pas de  $0,15^\circ$  et une période de roulis de 5 s on a :

$$f_e = 13,3 \text{ Hz}$$

Le roulis étant enregistré en même temps que la sonde, il est possible de calculer, en temps différé,

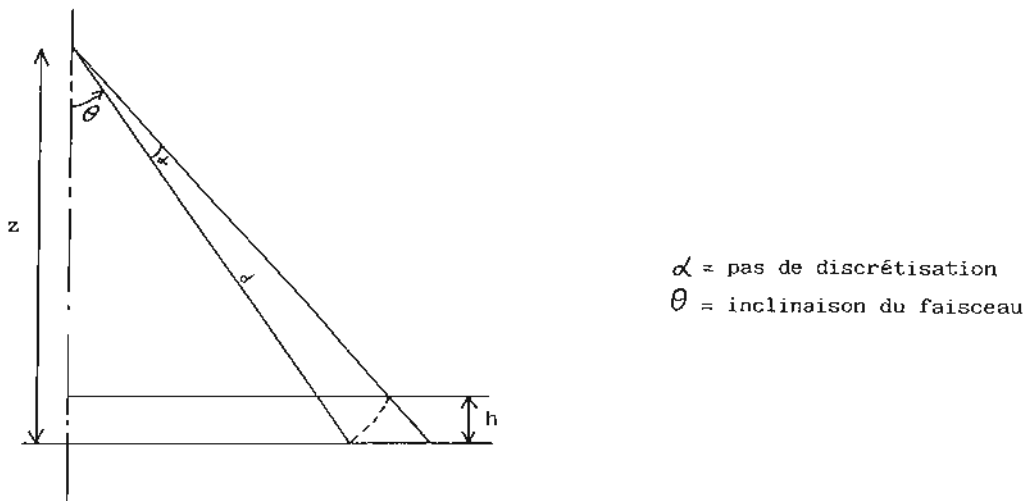


FIG. 20

N° de voie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
$\theta^\circ$	47,5	42,5	37,5	32,5	27,5	22,5	17,5	12,5	7,5	2,5
$\frac{h}{z} \%$	0,58	0,48	0,40	0,34	0,28	0,22	0,16	0,12	0,06	0,02

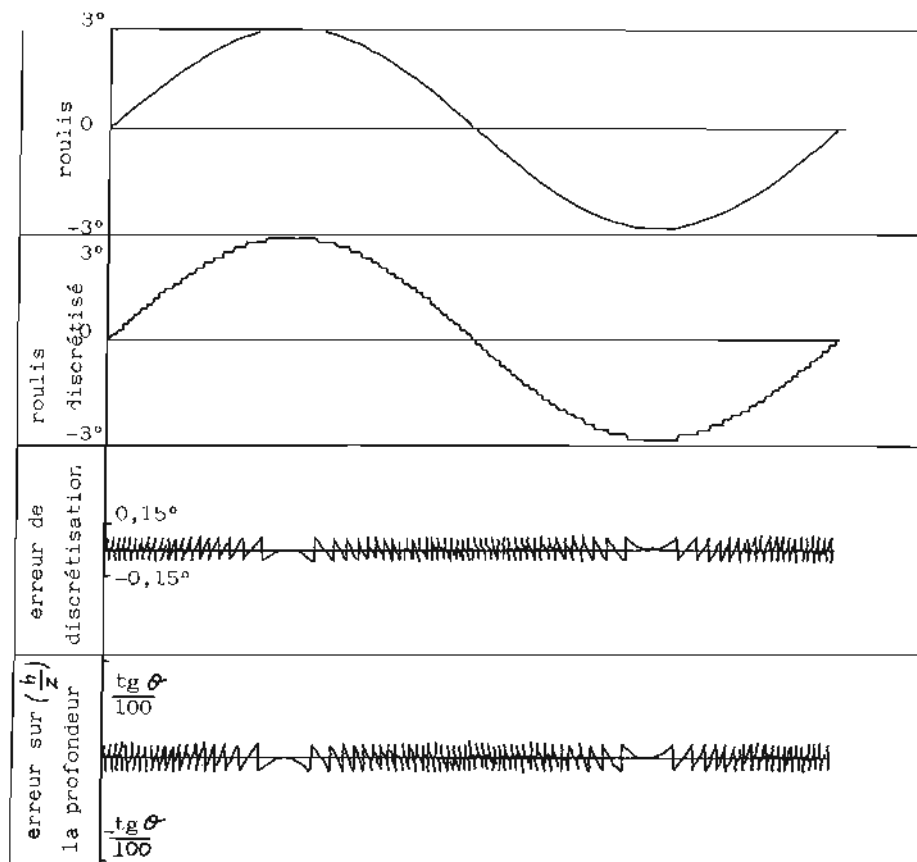


FIG. 21

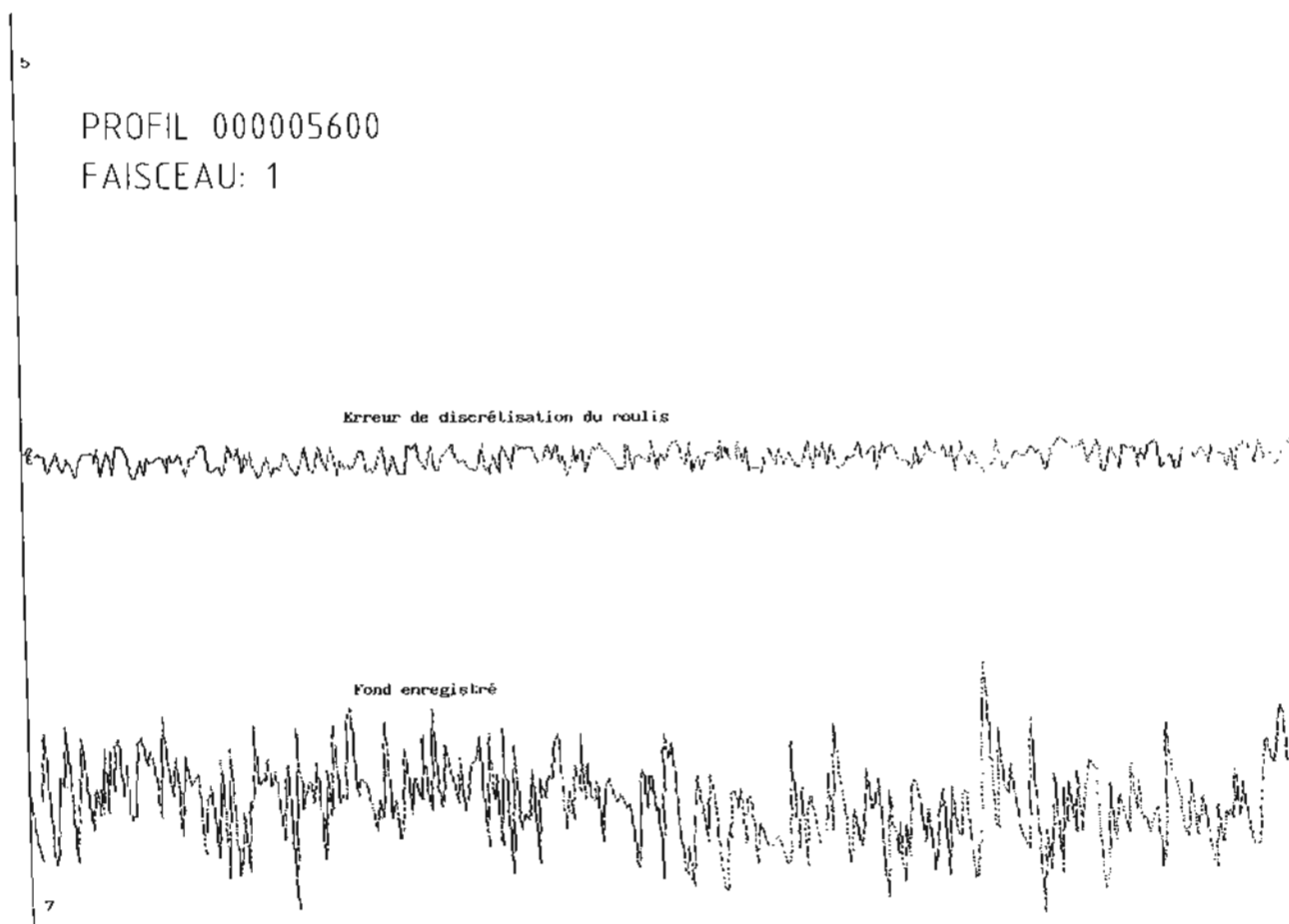


FIG. 22

une correction. Des tracés de cette correction et du fond enregistré ont été effectués à l'EPSHOM :

On voit que cette erreur a une fréquence voisine du bruit enregistré sur les sondes mais que l'ordre de grandeur est bien plus petit.

Une erreur du même type se produit à l'émission pour la prise en compte du tangage, mais l'émission se faisant près de la verticale, l'erreur est négligeable.

### 1.7. Mesure du roulis

Une erreur sur la mesure du roulis a deux influences :

— l'une en temps réel sur le pointage des voies en réception ;

— l'autre sur le calcul de la correction de pilonnement.

• L'erreur de pointage a la même forme que les deux erreurs précédentes :

$$h = z \operatorname{tg} \theta \sin \alpha$$

où  $h$  = erreur

$z$  = profondeur

$\theta$  = inclinaison du faisceau par rapport à la verticale

$\alpha$  = erreur de roulis

La précision de la mesure annoncée par le constructeur du capteur d'attitude est de  $\pm 1,5'$  avec une erreur de centrage de  $\pm 2'$ . Une erreur d'orientation de l'antenne du sondeur s'ajouterait à cette erreur de centrage.

Dans le cas le plus défavorable :

$$\alpha = 1,5 + 2,0 = 3,5'$$

$$\theta = 47,5^\circ$$

$$\text{donc } \frac{h}{z} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ (10 cm pour 100 m)}$$

• L'erreur sur la correction de pilonnement est due au bras de levier entre le capteur d'attitude et l'antenne. En appelant  $d$  ce bras de levier, la correction est de :  $P_r = d \sin(r)$  ( $r$  = roulis).

L'erreur est donc :  $\Delta P_r = d \cos(r) \Delta r = d \Delta r$

dans le cas du Borda  $d = 1,65$  m

si  $\Delta r = 1,5'$ , on a :  $\Delta P_r = 0,7 \cdot 10^{-3}$  m

Cette erreur est donc négligeable.

### 1.8. Tangage

De la même façon que pour le roulis, une erreur de mesure sur le tangage entraîne deux erreurs sur les sondes :



- une erreur de pointage à l'émission qui est négligeable car on se trouve près de la verticale ;
- une erreur sur la correction de pilonnement.

La correction de pilonnement due au bras de levier  $d$  pour un tangage  $t$  est:  $P_t = d \sin(t) \Rightarrow \Delta P_t = d t \cos(t) \approx d \Delta t$

Dans le cas du *Borda*  $d = 6,3$  m.

Pour  $\Delta t = 1,5'$  on a:  $\Delta P_t = 2,7 \cdot 10^{-3}$  m

## 1.9. Mesures

Les mesures de roulis, tangage et temps de parcours ne sont pas parfaitement simultanées. Les décalages proviennent de retards propres aux capteurs et des temps de conversion analogique/numérique.

Si le roulis (ou le tangage) est de la forme:

$$R = R_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$\text{On mesure } R' = R_0 \sin\left[\frac{2\pi(t - \Delta t)}{T}\right]$$

L'erreur est donc:

$$\Delta R = R - R' = R_0 \left[ \sin\frac{2\pi t}{T} - \sin\frac{2\pi(t - \Delta t)}{T} \right]$$

$$\Leftrightarrow \Delta R = 2R_0 \sin\left(\frac{\pi \Delta t}{T}\right) \cos\left[\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)\right]$$

L'erreur a la même fréquence que le roulis (ou le tangage). Son amplitude est:

$$2R_0 \sin\left(\frac{\pi \Delta t}{T}\right)$$

Cette erreur s'ajoute à l'erreur de mesure de  $1,5'$  étudiée précédemment.

Pour un roulis d'amplitude maximale de  $20^\circ$ , de période 8 s et un retard de  $10^{-3}$  s on a une erreur dont l'amplitude vaut:

$$2 \times 20 \sin\left(\frac{\pi \cdot 10^{-3}}{8}\right) = 1,57 \cdot 10^{-2} \text{ degré}$$

$$\approx 1'$$

Mais un retard de 0,1 s entraîne une erreur de  $1^\circ$ .

Ce retard et la précision du capteur doivent être étudiés lors d'essais sur le *Borda*.

## 1.10. Numérisation de la sonde

La méthode utilisée pour choisir la sonde dans le signal reçu sur chaque voie est la suivante:

- on échantillonne la puissance reçue à une cadence de  $580 \mu\text{s}$ ;
- on calcule, à l'intérieur d'une fenêtre de poursuite, l'instant correspondant à la réception de la moitié de l'énergie totale;
- cet instant est avancé d'une demi-durée d'impulsion, et d'une correction tenant compte de la bande passante.

Il donne le temps de parcours aller-retour. Le niveau de puissance reçu varie beaucoup en fonction du temps et d'une voie à l'autre. Un signal reçu faible peut être du même ordre de niveau que les bruits parasites, ce qui perturbe évidemment la mesure.

D'autre part, l'énergie réverbérée par le fond dépend de l'angle d'incidence. Elle est d'autant plus forte que l'on se trouve près de la verticale. Une loi d'approximation de cette réverbération est fonction de  $\cos \theta$ . Le temps choisi par la méthode de demi-énergie ne correspond donc pas à l'axe du faisceau mais à une direction plus proche de la verticale.

## 2. LES ERREURS SUR LES POSITIONS

La position d'une sonde est entachée d'erreurs provenant du système de localisation, de la mesure du cap, de la célérité, de la largeur du faisceau, du roulis et du tangage.

### 2.1. Système de localisation

Toute erreur sur la position de l'antenne de radio-localisation se retrouve sur la position de la sonde. Ordre de grandeur: de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

### 2.2. Le cap

L'angle  $C$  est mesuré par un compas gyroscopique (à la convergence des méridiens près). L'erreur sur  $C$  provient de:

- calage initial du compas;
- réglage de l'axe de l'antenne par rapport à l'axe du bateau
- erreurs de mesure (dérive...)

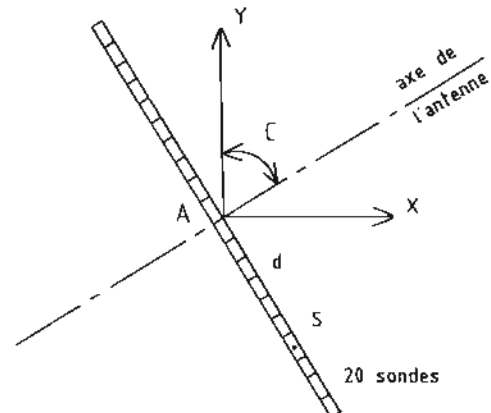


FIG. 23

La sonde S a pour coordonnées  $X = X_A + d \cos C$

$$Y = Y_A - d \sin C$$

où  $d$  est la distance horizontale de l'antenne A à la sonde S. Si S correspond à la voie d'inclinaison  $\theta$  par rapport à la verticale :

$$d = z \operatorname{tg} \theta \quad (z = \text{profondeur sous l'antenne})$$

Une erreur  $\Delta C$  sur le cap se traduit donc par une erreur  $z \operatorname{tg} \theta \Delta C$  sur la position.

Exemple numérique :

Voie extrême :  $\theta = 47,5^\circ$

Si le cap est mesuré à  $0,5^\circ$  près, pour un fond de 100 m on a une erreur sur la position de 0,95 m.

Une erreur sur le cap intervient également dans la correction de position entre la base et l'antenne.

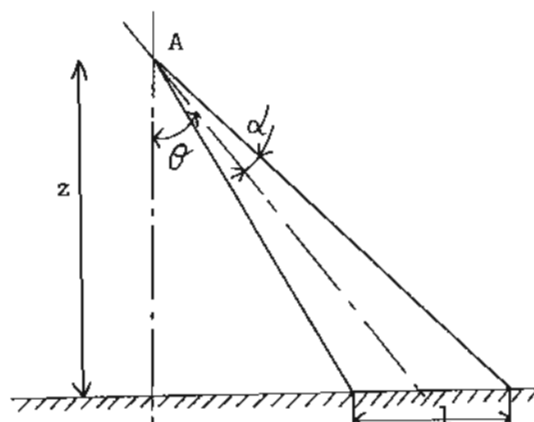


FIG. 25

Pour chaque voie,  $l$  représente le pourcentage suivant de la longueur :

N° de voie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\theta$	47,5	42,5	37,5	32,5	27,5	22,5	17,5	12,5	7,5	2,5
$l/z\%$	19,2	16,1	13,9	12,3	11,1	10,2	9,6	9,2	8,9	8,7

### 2.3. Largeur du faisceau

Les intersections des lobes d'émission et de réception forment des faisceaux de  $5^\circ$  dans le sens longitudinal et le sens transversal.

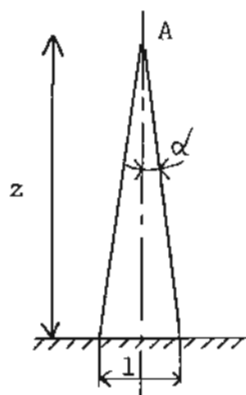


FIG. 24

Dans le sens longitudinal, la largeur insonifiée est :

$$L = 2z \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \theta} \quad \text{avec } \alpha = 2,5^\circ$$

$$\Rightarrow \frac{L}{z} = \frac{8,7 \cdot 10^{-2}}{13,6 \cdot 10^{-2}} \quad \begin{array}{l} \text{à la verticale} (\theta = 0^\circ) \\ \text{à l'extrémité} (\theta = 50^\circ) \end{array}$$

soit 8,7 m à 13,6 m pour un fond de 100 m.

Dans le sens transversal, pour la voie d'inclinaison  $\theta$ , la largeur insonifiée est :

$$l = z \operatorname{tg} (\theta + \alpha) - z \operatorname{tg} (\theta - \alpha)$$

la valeur maximale est obtenue pour  $\theta = 47,5^\circ$  :

$$\frac{l}{z} = 0,19$$

soit 19 m pour une profondeur de 100 m.

### 2.4. Roulis et tangage

Les erreurs sur le roulis et le tangage interviennent de trois façons :

- discrétisation des angles pour la formation des voies d'émission et de réception ;
- pointage des voies ;
- correction base/antenne.

Les erreurs de discrétisation et de mesure du roulis se calculent de la même façon :

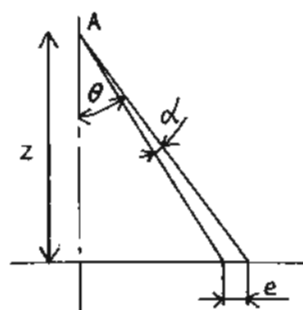


FIG. 26

$\theta$  = angle de l'axe du faisceau par rapport à la verticale

$\alpha$  = erreur sur la mesure de  $\theta$

$$e = z [\operatorname{tg} (\theta + \alpha) - \operatorname{tg} \theta]$$

- La discrétisation des angles se fait à  $0,15^\circ$  près.  
Erreur due au tangage :

$$\theta = 0^\circ \Rightarrow \frac{\theta}{z} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ (26 cm pour } z = 100 \text{ m)}$$

$$\alpha = 0,15^\circ$$

Erreur due au roulis :

Sur les faisceaux extrêmes  $\theta = 47,5^\circ \Rightarrow \frac{\theta}{z} = 5,8 \cdot 10^{-3}$   
 $\alpha = 0,15^\circ$

- La mesure du roulis et du tangage se fait à  $3,5'$  près ( $0,06^\circ$ ), elle entraîne donc une erreur de pointage trois fois plus petite que celle due à la discrétisation.

- Correction base/antenne :

Les erreurs dues aux mesures sur  $r$  et  $t$  sont donc :

$$l_1 = (h \cos r - d_1 \sin r) r$$

$$l_2 = (h \cos t - d_2 \sin t) t$$

Dans le cas du *Borda* :

$$h = 23,4 \text{ m (antenne trident)}$$

$$d_1 = 0 \text{ m}$$

$$d_2 = 6,0 \text{ m}$$

$$r = t = 3,5'$$

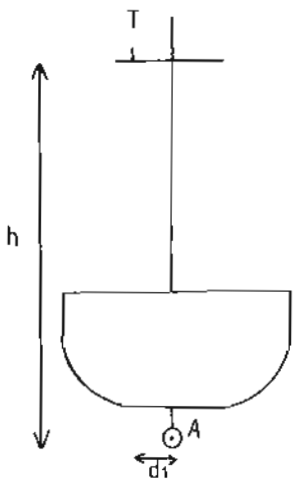


FIG. 27

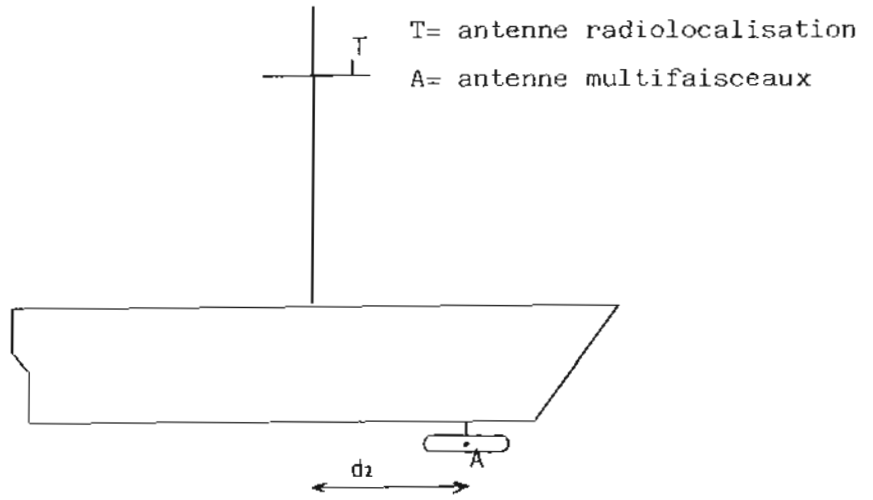


FIG. 28

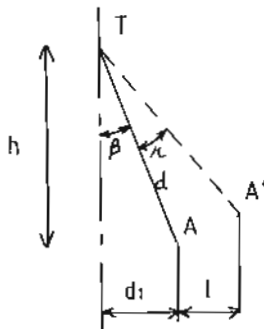


FIG. 29

Le roulis  $r$  entraîne un déplacement latéral  $l_1$  tel que :  $l_1 = AT \sin(\beta + r) - AT \sin \beta$

$$\Leftrightarrow l_1 = AT \sin \beta \cos r + AT \cos \beta \sin r - AT \sin \beta$$

$$\Leftrightarrow l_1 = d_1 (\cos r - 1) + h \sin r$$

De même le tangage entraîne un déplacement

$$l_2 = d_2 (\cos t - 1) + h \sin t$$

$r^\circ$	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$h$ (m)	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2

$t^\circ$	-10	-5	0	5	10
$h$ (m)	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2

## 2.5. Célérité

L'erreur relative sur la célérité se retrouve sur la position :

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta c}{c}$$

Pour  $\Delta c = 0,4 \text{ m/s}$ , on a  $\frac{\Delta x}{x} = 2,7 \cdot 10^{-4}$

et  $c = 1500 \text{ m/s}$

	Profondeur		Position	
	Valeur (m)	Période	Valeur (m)	Période
Pilonnement	0,05	4 à 10 s	0	
Immersion de la base	0,05	∞	0	
Marée	0,20	Plusieurs heures	0	
Célérité	0,03	Plusieurs heures	0,03	Plusieurs heures
Largeur du faisceau	4,90	Cadence de sondage (0,2 s)	19	Cadence de sondage (0,2 s)
Discrétisation du roulis	0,03	≈ 0,1 s	0,58	≈ 0,1 s
Discrétisation du tangage	0,01	≈ 0,1 s	0,26	≈ 0,1 s
Pointage (roulis)	0,10	4 à 10 s	0,20	4 à 10 s
Pointage (tangage)	≈ 0		0,09	4 à 10 s
Corr. de pilonnement (roulis)	≈ 0		0	
Corr. de pilonnement (tangage)	≈ 0		0	
Corr. base/antenne (roulis)	0		0,02	4 à 10 s
Corr. base/antenne	0		0,02	4 à 10 s
Simultanéité	?			
Cap	0		0,95	
Localisation	0		5	

### 3. CONCLUSIONS SUR LES ERREURS

Les erreurs étudiées précédemment ne concernent que les aspects géométriques. Elles ne font pas intervenir les erreurs dues à l'électronique du sondeur et de l'antenne :

- orientation des voies ;
- largeur des lobes ;
- mesure du temps.

Le tableau ci-dessus récapitule les erreurs pour une profondeur de 100 m.

### BIBLIOGRAPHIE

- KERLÉGUER L. – Essais du sondeur multifaisceaux Lennormor. – Brest : Mission Hydrographique de l'Atlantique, 1990. pag. mult. ; 30 cm (n<sup>os</sup> 134 et 135 MHA).
- KERLÉGUER L, NALEWAJK W. – Le sondeur multifaisceaux petits fonds Lennormor – In : Actes du Congrès OSATES (Ocean Space Advanced Technologies European Show) – Brest : 24-27 septembre 1991 – Brest : Communauté Urbaine de Brest, 1991 – Paper n<sup>o</sup> B.12, 10 p.
- CASTELLIER E. – L'erreur de mesure des différentes voies du sondeur multifaisceaux Lennormor. Brest : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 1991 – 49 p. ; 30 cm



## *DEUXIÈME PARTIE*

---

# MISSION OCÉANOGRAPHIQUE DU PACIFIQUE ÉCHELON DE POLYNÉSIE (décembre 1988 - juillet 1990)

par

**M. LE GOUIC**  
Ingénieur Principal de l'Armement (hydrographe)

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

### I. HISTORIQUE SUCCINCT

### II. ORGANISATION DE L'ÉCHELON POLYNÉSIE DE LA MOP

1. Structures
2. Personnel
  - 2.1. Le plan d'armement de l'unité hydrographique
  - 2.2. Ingénieurs
  - 2.3. Le plan d'armement de *L'Estafette*
3. Relations extérieures

### III. MOYENS

1. À la mer
2. Locaux à terre
3. Matériel spécifique
4. Véhicules
5. Méthodes
  - 5.1. Généralités
  - 5.2. Méthodes nouvelles
  - 5.3. Chaîne d'exploitation numérique des données

### IV. TRAVAUX RÉALISÉS

1. Généralités
2. Travaux dans l'Archipel des Marquises
  - 2.1. Levés de baies
  - 2.2. Travaux de grande sonde
3. Travaux dans l'Archipel des Tuamotu
  - 3.1. Makatea
  - 3.2. Tikehau
  - 3.3. Ahe
  - 3.4. Rangiroa
  - 3.5. Takaroa

- 3.6. Takapoto
- 3.7. Apataki
- 3.8. Fakarava
- 3.9. Tetiaroa
- 3.10. Manihi
- 3.11. Makemo-Aratika-Rangiroa
- 3.12. Levé large
4. Travaux dans l'Archipel des Australes
  - 4.1. Rimatara
  - 4.2. Raivavae
  - 4.3. Tubuai
5. Travaux dans l'Archipel de la Société
  - 5.1. Levé au large de la côte sud-est de Tahiti.
  - 5.2. Levé hydrographique dans le chenal compris entre la passe de Taapuna et Papeete.
  - 5.3. Travaux à Bora Bora
  - 5.4. Travaux à Moorea
  - 5.5. Tahaa
  - 5.6. Travaux au profit du port de Papeete
  - 5.7. Divers
  - 5.8. Raiatea et Huahine

### V. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

1. Utilisation de SPOT
  - 1.1. Recueil de données de base sur les atolls des Tuamotu
  - 1.2. Associations avec la SPT
2. Utilisation de GPS
  - 2.1. Aspects relatifs au matériel
  - 2.2. Précision des mesures géodésiques
  - 2.3. Précision des mesures en mode navigation
  - 2.4. Conclusions
3. Divers

### VI. CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

En décembre 1988, la Mission Océanographique du Pacifique (MOP) était constituée de deux pôles situés à Tahiti et à Nouméa, distants de 5 000 km. Bien qu'une certaine unité dans l'organisation et

l'emploi des moyens ait été conservée dans les deux échelons de la MOP, les zones de travaux, les techniques de levé et de rédaction, et l'environnement opérationnel étaient très différents en Polynésie fran-

çaise et en Nouvelle-Calédonie. C'est pourquoi l'Ingénieur Principal de l'Armement Champagne, Directeur de la mission lorsque je dirigeai l'échelon de Polynésie française, l'IPA Fourgassié chef de l'échelon de Nouvelle-Calédonie lorsque je dirigeai l'ensemble de la MOP et moi-même sommes convenus d'établir des rapports différents pour présenter les travaux en Mélanésie et en Polynésie.

Le présent rapport décrit les travaux qui ont été effectués par l'échelon de Polynésie de la Mission Océanographique du Pacifique, entre le 3 décembre 1988 et le 17 juillet 1990, sous ma direction technique.

J'ai également occupé les fonctions de chef de l'échelon de Polynésie jusqu'au 18 avril 1990, date à laquelle je fus nommé Directeur de la Mission Océanographique du Pacifique.

## I. HISTORIQUE SUCCINCT

En 1986, constatant que les travaux d'hydrographie systématique étaient en voie d'achèvement dans les zones prioritaires du lagon de Nouvelle-Calédonie d'une part, l'expression de besoins de plus en plus fréquente en Polynésie française d'autre part, le SHOM avait créé à Papeete un échelon permanent. Cet échelon était dirigé d'un point de vue opérationnel par un « chef d'échelon » qui recevait à ce titre diverses délégations de la part du Directeur de la mission, et d'un point de vue technique par un ingénieur délégué du Directeur Technique de la mission. L'étendue des délégations était définie en fonction des programmes et des chantiers par le Directeur de la MOP qui maintenait une présence personnelle importante en Polynésie française.

Avec le temps et le rodage des structures en place, une autonomie croissante a été constatée et le Directeur de la MOP en place en novembre 1988, l'Ingénieur Principal de l'Armement Champagne, me donnait dès le début de mon affectation délégation pour achever la rédaction des travaux en cours, organiser et exploiter les travaux nouveaux et le représenter en tant que chef d'unité rattachée auprès des services techniques et administratifs de Polynésie française.

La visite de l'échelon de Polynésie par le Directeur du SHOM, en juin 1989, lui permit de constater l'autonomie largement consacrée de l'échelon. Ce constat conduisait logiquement en mars 1990 à la publication d'un nouveau texte constitutif de la MOP, bien plus symétrique dans les rôles des deux pôles de Nouvelle-Calédonie et de Polynésie française.

Cette symétrie me permit enfin d'exercer depuis Papeete, du 18 avril au 18 juillet 1990 les fonctions de Directeur de la MOP à la suite de l'IPA Champagne.

## II. ORGANISATION DE L'ÉCHELON DE POLYNÉSIE DE LA MOP

### 1. Structures

Le texte constitutif de la MOP place celle-ci sous l'autorité organique de l'Amiral Commandant les Forces Maritimes dans le Pacifique.

La MOP est dirigée par un directeur qui exerce un rôle particulier de représentant du directeur du SHOM dans la zone Pacifique. Deux échelons existent en Nouvelle-Calédonie et en Polynésie française. Chacun d'eux est dirigé par délégation du Directeur de la MOP par un chef d'échelon et pour les parties techniques par un directeur technique en titre: ils sont placés sous l'autorité organique des commandants de la marine locaux.

Le seul ingénieur électronicien de la mission contrôle, entretient et supervise le matériel des deux échelons. Bien que le suivi administratif soit assuré par des organismes distincts, les procédures d'échange de matériel entre la Nouvelle-Calédonie et la Polynésie française sont restées très souples.

### 2. Personnel

#### 2.1. Le plan d'armement de l'unité hydrographique

Le plan d'armement de l'unité hydrographique de l'échelon de Polynésie est de 16 personnes sans compter les officiers, mais par le jeu des stages et des fréquentes prolongations d'affectation du personnel appelé, l'effectif réel a oscillé entre 18 et 22.

J'ai été assisté pendant mon affectation par l'Enseigne de Vaisseau Kervizic, ancien hydrographe, qui assurait les tâches de Chef des Services Généraux.

Chaque année, en supplément au plan d'armement, un ingénieur sorti de l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA) effectuait en tant qu'Aspirant son service national à Papeete. Le concours apporté à ce titre par MM. Loubrieu et Carnus fut précieux.

L'effectif de l'unité hydrographique est donc relativement restreint, mais en contrepartie, la motivation de chacun est forte et le rendement fut excellent. J'ai seulement regretté que l'effectif des officiers marins hydrographes (OMH) ne permette pas de dégager complètement un chef de salle de dessin qui aurait pu superviser les travaux de rédaction et mieux préparer les levés nouveaux: ce manque s'est traduit par une structure de contrôle des dossiers allégée et donc par une qualité de présentation des données un peu dégradée dans la forme, le contrôle

du fond étant resté prioritaire. Pour maintenir un rendement satisfaisant de l'activité de l'échelon et obtenir un contrôle approfondi des documents rédigés, il est essentiel d'augmenter le nombre des OMH affectés à Tahiti.

## 2.2. Ingénieurs

A partir du 18 avril 1990, je fus assisté dans mon rôle de Directeur de la MOP par l'IPA Fourgassié chef et directeur technique de l'échelon de Nouvelle-Calédonie.

La direction de la MOP depuis Papeete n'a pas posé de problème particulier.

## 2.3. Le plan d'armement de L'Estafette

Le plan d'armement de *L'Estafette*, bâtiment de l'échelon polynésien, comprenait 33 personnes et s'est révélé satisfaisant pour assurer le bon fonctionnement du bâtiment, son entretien, les services de garde et occasionnellement le soutien des équipes opérant à terre.

Les commandants de *L'Estafette* furent le Capitaine de Corvette Charles jusqu'en février 1990, puis le Lieutenant de Vaisseau Barrère. Tous deux ont fait preuve d'une forte motivation pour obtenir une excellente disponibilité de leur bâtiment (matériel et équipage) et développer avec succès un esprit de groupe au sein de l'échelon (personnels de l'unité hydrographique et de *L'Estafette*).

## 3. Relations extérieures

Les relations déjà bien établies avec les services techniques ou scientifiques présents sur le territoire furent poursuivies : Station Polynésienne de Télédétection, Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme, ORSTOM, Cadastre, Port Autonome de Papeete, Laboratoire de Géophysique du CEA...

Un effort sensible a été fait en direction de la presse locale afin de présenter aussi souvent que possible (au moins une fois tous les deux mois) les activités de l'échelon de Polynésie. Il n'est cependant jamais apparu que cette volonté d'information soit à l'origine des relations extrêmement cordiales et coopératives que nous avons nouées dans les îles

avec les particuliers ou les administrations civiles locales.

Les rapports avec le milieu militaire (Marine Nationale, Direction des Constructions et Armes Navales, Gendarmerie) ont été réguliers et toujours empreints d'une forte volonté de coopération et de participation. La présence assidue des gendarmes dans les îles (et de la Légion Étrangère à Hiva Oa) fut en particulier une aide précieuse.

## III. MOYENS

### 1. À la mer

A l'arrivée à Papeete de *L'Estafette* en 1986, la DCAN locale a apporté un soutien continu pour l'entretien du bâtiment et progressivement, avec le concours actif des services techniques de la marine à Papeete, la disponibilité du bâtiment est redevenue satisfaisante comme l'illustre le tableau suivant récapitulant le nombre de jours de mer et d'activité hydrographique de *L'Estafette*.

Bien que le bâtiment soit en fin de vie, son adéquation aux travaux polynésiens mérite encore quelques commentaires :

A son crédit :

- les volumes et les aires de stockage;
- une excellente tenue à la mer, qui est très utile pour les levés au large des Marquises en particulier;
- la rusticité des matériels qui permet une maintenance satisfaisante pendant les missions longues;
- la fiabilité retrouvée;
- la bonne qualité du courant électrique;
- l'autonomie en gazole.

A son débit :

- l'important tirant d'eau qui interdit l'accès à presque tous les quais polynésiens;
- la faible autonomie en eau et l'absence de climatisation générale qui nuisent à la fois au confort et donc à la résistance du personnel, ainsi qu'au fonctionnement et à l'entretien du matériel;
- l'autonomie limitée en vivres.

La drome de l'échelon de Polynésie de la MOP comprenait :

- à bord de *L'Estafette* : deux vedettes VH9, une plate métallique et deux zodiacs de 10 places à coque rigide;

	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Nombre de jours en mer pour travaux hydrographiques	133	117	111	147	126	164	83(*)

(\*) Six premiers mois seulement



— pour l'unité hydrographique : deux plates métalliques (corallines) et un zodiac de 10 places à coque rigide.

Cette drome a été décrite dans le rapport de l'ICA Cailliau (*Annales Hydrographiques* n° 761 de 1988). Lorsqu'elle est entièrement disponible elle suffit aux besoins de l'échelon. Mais il est arrivé régulièrement que les deux vedettes, les deux corallines et deux des zodiacs travaillent simultanément, tandis qu'une embarcation restait parée à bord pour une intervention urgente.

## 2. Locaux à terre

L'échelon de Polynésie dispose :

— de locaux principaux situés dans l'immeuble Bir Hakeim sur le boulevard Pomaré à Papeete (bureaux, salle de dessin, laboratoire électronique, magasin du matériel scientifique). Un programme de réhabilitation a été entrepris avec le ravalement extérieur de l'immeuble et la réfection complète de la salle de dessin. Les locaux, quoique devenant un peu exigus avec l'augmentation inévitable du volume des archives et du parc informatique, sont sains et permettent de travailler dans des conditions satisfaisantes;

— d'un atelier situé dans l'arsenal où est stocké le matériel lourd (mouillages, bois, drome spécifique...) et qui permet en outre l'entretien courant des moteurs hors-bord et des groupes électrogènes.

## 3. Matériel spécifique

Les moyens de l'échelon sont suffisants pour les missions en Polynésie. Cependant, du fait des conditions particulières de leur mise en œuvre (cf. para-

graphe 5), de l'éloignement de l'ingénieur électronicien de la mission et des délais importants lors des mouvements avec la métropole (transits, formalités, douane...), des efforts particuliers ont porté en 1989 et 1990 sur :

— la maintenance préventive; en particulier le parc de moteurs hors-bord (sept pour l'unité hydrographique et deux pour *L'Estafette*) et les moyens de transmission (VHF avec douze TRPP32 et HF avec un TRMM3A et un TRC340) ont fait l'objet de soins attentifs;

— la gestion des stocks de matières consommables et des lots de rechange;

— l'augmentation du parc informatique qui comprenait en juillet 1990, quatre ensemble Hewlett-Packard (HP) 9816 avec lecteur double disquettes, imprimante et disque dur (dont deux installés à l'occasion des missions à bord de *L'Estafette*), un traceur HP, une table à numériser Altek (qui devenait capricieuse à bord de *L'Estafette*), une table traçante Schlumberger 1665 et deux tables Benson 1313 (dont une embarquée en permanence), divers compatibles IBM PC (Bull Micral 45, Grid).

Le matériel spécifique est bien adapté aux travaux en Polynésie. On pourra noter :

— la mise en œuvre systématique de récepteurs GPS en localisation et géodésie. Un rapport particulier a été rédigé à ce sujet, dont quelques éléments sont rappelés dans le chapitre V;

— l'abandon progressif des marégraphes OTT R 16 au profit de marégraphes plongeurs Suber;

— l'impossibilité d'utiliser pour des travaux hydrographiques les nouveaux récepteurs VHF de la Marine Nationale (TRPP36) dont la fragilité, la portée réduite et la faible autonomie sont rédhibitoires;

— l'excellent fonctionnement des chaînes d'acquisition numérique en vedette et surtout sur *L'Estafette*;

— le soutien efficace, malgré les distances, de l'échelon de Nouvelle-Calédonie de la MOP et de l'Établissement Principal du SHOM (EPSHOM);



Locaux à terre de la MOP à Papeete.

— les difficultés importantes rencontrées avec les sondeurs latéraux EG&G (qui étaient à bout de souffle), tant pour leur mise en œuvre que pour l'exploitation correcte de leurs enregistrements.

Quarante neuf fiches d'avarie de matériel ont été rédigées, soit une moyenne mensuelle de deux et demie; ces fiches concernèrent les matériels suivants :

Trident	17
Sondeurs	5 (Deso 20, Raythéon, EG&G)
Hydrac	10
Géodésie	6 (théodolites, distancemètres...)
Récepteurs GPS	3
Divers	7 (informatique, instruments de mesure, panneaux solaires...)

#### 4. Véhicules

L'échelon de la MOP à Papeete disposait de deux véhicules 4×4 de type Peugeot 504 Dangel. Ces véhicules sont fragiles en terrain difficile (transmission) et un peu lourds à conduire en ville (visibilité, manœuvre, 4×4 permanent).

L'un d'entre eux a séjourné aux Marquises et en revint assez fatigué. Le travail continu du centre automobile de la marine à Papeete a néanmoins permis de maintenir ces deux véhicules dans un bon état.

En dehors de ses véhicules propres, l'échelon a pu utiliser régulièrement des Renault 4L prêtées par la marine à Papeete. En outre, dans les îles, il fut toujours aisé de se faire assister par les gendarmes, les particuliers ou les administrations et collectivités locales.

#### 5. Méthodes

##### 5.1. Généralités

Du fait des distances importantes entre les diverses îles des archipels polynésiens (Tuamotu, Société, Marquises, Gambiers) il est vite apparu nécessaire de regrouper les différents travaux dans des missions de trois à cinq semaines. Cette durée relativement longue a posé divers problèmes :

— pour le personnel qui a pu souffrir de l'inconfort de *L'Estafette* et de l'éloignement des proches;

— pour l'organisation générale de l'activité. Les possibilités de soutien local sont limitées et il fallut embarquer à chaque sortie plus des trois-quarts du personnel de l'unité hydrographique, ne laissant à Papeete qu'une équipe réduite ne pouvant guère qu'assumer la gestion du quotidien. L'activité fut donc conduite par à-coups, en particulier celle relative à la rédaction définitive des travaux;

— pour le matériel très souvent embarqué avec des possibilités de réparation et de maintenance dégradées;

— pour l'utilisation de concours extérieurs, aussi bien nautiques (plusieurs missions d'une semaine ont été réalisées avec le concours de patrouilleurs de la Marine Nationale), qu'aériens (des moyens hélicoptères auraient sans doute permis d'alléger les campagnes aux Marquises).

##### 5.2. Méthodes nouvelles

La zone d'action de l'échelon de Polynésie est vaste et relativement mal connue. Les travaux cartographiques aussi bien pour le domaine maritime que terrestre sont souvent de base et diverses techniques modernes ont été systématiquement employées :

— utilisation de l'imagerie du satellite SPOT en association avec la Station Polynésienne de Télédétection dans les atolls des Tuamotu;

— préparation des travaux par des restitutions du Bureau Photogrammétrique de l'EPSHOM;

— positionnement géodésique absolu et mise en place des bases géodésiques avec l'aide du système GPS;

— exploitation des interprétations géophysiques des données de l'altimétrie satellitale.

##### 5.3. Chaîne d'exploitation numérique des données

Toute la chaîne d'exploitation des données (acquisition, traitement, validation et archivage) est numérique. En particulier pour les levés rédigés, les fichiers intermédiaires (TRAVAL) contenant l'ensemble des mesures significatives sont entièrement validés, et non pas seulement les fichiers permettant le tracé automatique des minutes graphiques de facture traditionnelle (FIMAPE).

Dans la mesure du possible, l'échelon de Polynésie de la MOP s'efforça d'utiliser les programmes de traitement de données mis au point par l'EPSHOM et la Mission Océanographique de l'Atlantique (MOA). Les adaptations réalisées par le programmeur de la mission furent légères et, à de rares exceptions, ont toutes concerné la présentation et la manipulation interactive des fonctionnalités du logiciel.

## IV. TRAVAUX RÉALISÉS

### 1. Généralités

L'activité en Polynésie est caractérisée par :

— un nombre important de petits levés indépendants et donc une charge de rédaction importante;

— une grande diversité dans les moyens et méthodes mis en œuvre;

— un nombre important de travaux réalisés à la demande des services techniques civils locaux; ces travaux sont soit intégrés dans les programmes généraux de l'échelon (Marquises par exemple), et effectués gracieusement en considérant qu'ils ne correspondent qu'à un changement de priorité dans le calendrier de l'hydrographie générale, soit traités dans le cadre de conventions onéreuses permanentes ou circonstancielles s'ils correspondent à une activité qui dépasse les attributions du SHOM dans le domaine de l'hydrographie générale (levés portuaires à très grande échelle, études sédimentologiques...);

— un éloignement des zones de travail et donc un soutien difficile depuis la base de l'échelon;

— des travaux de courte durée (typiquement une semaine pour lever une baie aux Marquises ou quatre jours pour les travaux géodésiques de base dans un atoll des Tuamotu). L'organisation des levés doit donc être particulièrement soignée pour tenir compte des inévitables incidents dans le déroulement (conditions météorologiques, pannes du matériel, difficultés liées au relief...) et éviter autant que possible la nécessité d'un retour pour compléter le levé.

L'ensemble des travaux effectués par l'échelon de Polynésie entre décembre 1988 et juillet 1990 est présenté dans le tableau de l'annexe 1 où sont indiqués le lieu, le rapport particulier correspondant et le type des travaux effectués (travaux de terrain et/ou rédaction, type d'activité...).

Ces travaux ont représenté un total de :

— 247 jours de mer pour *L'Estafette*, qui ne fut pas employée en dehors de sa vocation hydrographique, hormis deux escales de détente de trois jours chacune, trois opérations d'assistance à des personnes en danger, et la participation au stage

d'hydrographie du Groupe École d'Application des Officiers de Marine;

— 20 jours de concours de bâtiments de la marine à Papeete; dans un tel concours l'ensemble du personnel et du matériel nécessaires au levé hydrographique est fourni par l'échelon, le patrouilleur assurant le soutien logistique;

— une mission de 11 jours avec un hélicoptère Super Puma de l'ETOM 82 embarqué sur le *Bougainville*.

## 2. Travaux dans l'Archipel des Marquises

En 1987 l'échelon Polynésie de la Mission Océanographique du Pacifique débutait une série de levés hydrographiques dans l'Archipel des Marquises. La définition des travaux et les priorités avaient fait l'objet d'une concertation préalable avec les services techniques territoriaux et la Marine Nationale.

L'objectif étant de favoriser le désenclavement de l'archipel, le programme assigné à l'échelon comportait :

— la réalisation de levés originaux ou d'actualisation des baies habitées afin d'étudier les possibilités d'implantations portuaires même rustiques;

— un levé de reconnaissance des abords des îles de l'archipel, encore très mal connus.

Afin de rentabiliser les longs transits entre Papeete et l'archipel des Marquises, les missions durent quatre semaines et sont organisées suivant le calendrier de principe suivant :

— transit aller (deux jours et demi),

— mise en place des marégraphes et courantomètres,

— grande sonde et complètement éventuel des travaux précédents,



Mise à l'eau des vedettes de *L'Estafette*.



- levé d'une baie,
- grande sonde,
- préparation géodésique d'un levé de baie,
- relevage des marégraphes et courantomètres,
- transit retour (deux jours et demi).

### 2.1. Levés de baies

Les dix îles principales de l'archipel sont d'origine volcanique récente; le relief reste particulièrement brutal et les déplacements internes sont donc difficiles. En outre l'absence de récif barrière rend la côte elle-même d'accès peu commode avec un ressac important qui bat le pied des falaises, et des rouleaux au fond de presque toutes les baies.

Les premiers travaux réalisés dans l'archipel en 1987 et 1988 avaient apporté de nombreuses surprises aux équipes de la MOP. mais l'expérience acquise, et le concours des Marquisiens qui avaient pris l'habitude de voir *L'Estafette* sillonner leurs eaux, alliés à une modernisation des moyens (mise en œuvre de récepteurs GPS, de marégraphes immergés...) et une adaptation des méthodes (fractionnement des travaux, indépendance des infrastructures, organisation des tâches...), ont rendu ces surprises exceptionnelles et la planification des travaux de levé en fut facilitée.

Le déroulement ordinaire d'un levé de baie aux Marquises est décrit dans l'annexe 2 et un index figurant les travaux réalisés ou achevés entre novembre 1988 et juillet 1990 est donné dans les planches 1 et 2.

Quelques remarques particulières peuvent être formulées :

#### 2.1.1. Nuku Hiva

— Tai O Hae est la ville la plus importante des Marquises. La baie est calme, bien abritée; un projet de stockage de produits pétroliers y est à l'étude.

Comme dans toutes les baies marquisiennes, le courant observé à 5 mètres de profondeur est faible.

Tai O Hae est le port de référence des Marquises pour la marée. L'Université de Hawaï y dispose d'un observatoire permanent (les données sont transmises via satellite). La MOP y a installé un marégraphe OTT R16 semi-permanent; cependant l'impossibilité d'obtenir sur place un concours efficace pour l'entretien de l'enregistrement analogique a conduit progressivement à réaliser les observations de référence avec un marégraphe plongeur Suber. Les repères des deux observatoires (Université de Hawaï et MOP) ont été rassemblés dans une même fiche.

— Hatiheu et Anaho sont deux larges baies du nord de l'île pour lesquelles seul le prééquipement géodésique a été réalisé.

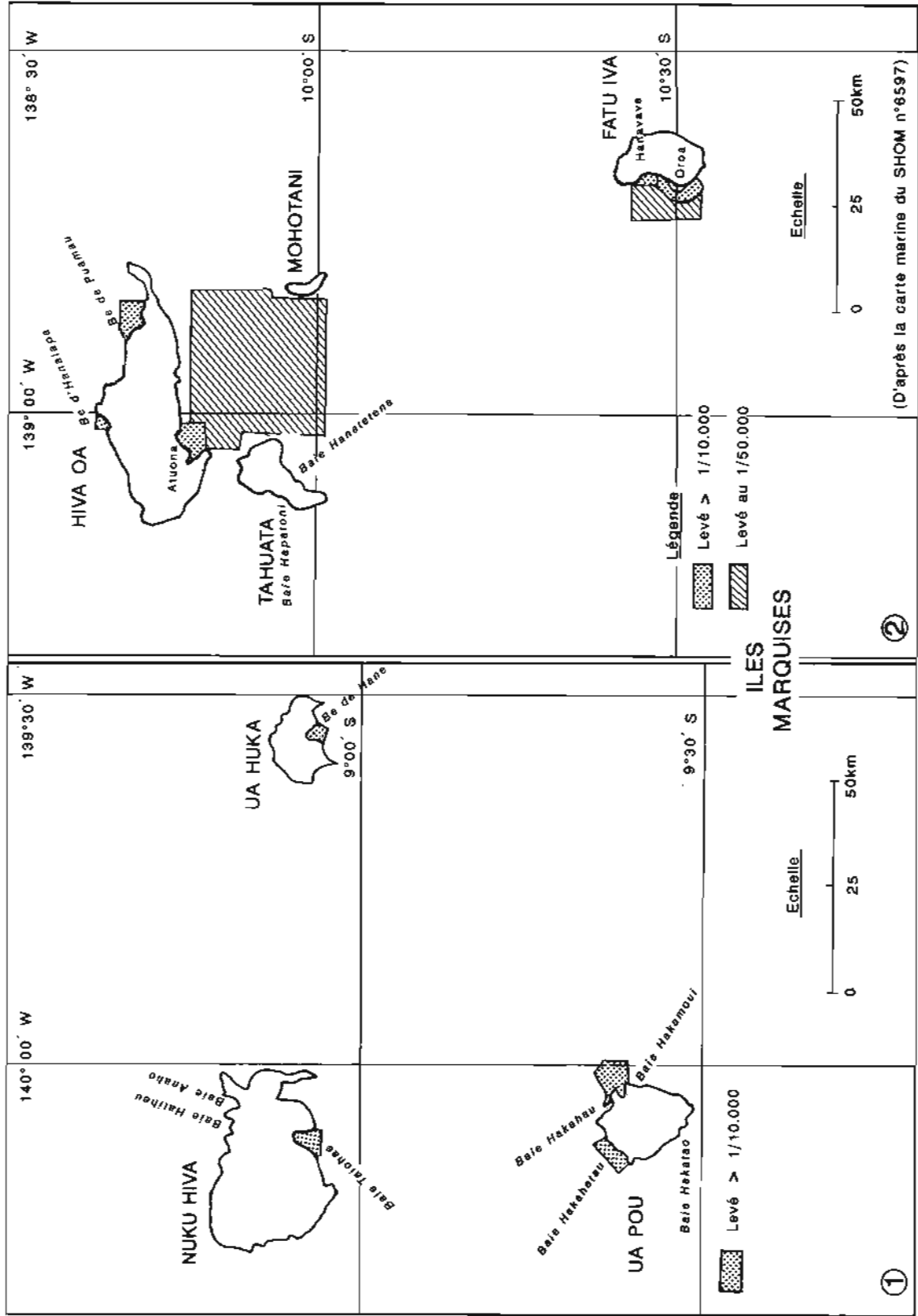
#### 2.1.2. Hiva Oa

Hiva Oa est l'île principale du groupe sud de l'archipel et sa ville principale, Atuona, est le deuxième centre important des Marquises. La baie qui donne accès à Atuona est la baie de Taaoa et le port d'Atuona s'appelle Hakahau. La baie de Taaoa est très agitée et le levé hydrographique en fut rendu



Archipel des Marquises : « ... avec un ressac important qui bat le pied des falaises... ».





Pl. 1 et 2.

difficile. La digue protégeant le port de Hakahau (où relâchent de nombreux plaisanciers) semble avoir introduit des modifications à la distribution des courants et provoquée par conséquence un envasement du port. C'est pourquoi dès 1990 un levé de contrôle a été réalisé à la demande du Service des Ports de Polynésie française dans ce port; par rapport au précédent levé de 1987, l'évolution de l'envasement n'est pas significative mais des levés périodiques sont à prévoir.

La marée à Atuona a été rattachée à celle de Tai O Hae, et son observatoire a ensuite été souvent utilisé pour effectuer les concordances avec les autres baies du groupe sud des Marquises.

Les deux autres baies habitées de Hiva Oa, Hanaiapa et Puamau ont été entièrement levées.

### 2.1.3. Ua Pou

La plus importante des 6 baies habitées de Ua Pou est celle de Hakahau où une digue implantée en 1987 s'est effondrée en 1988 (la baie est peu abritée!) avant d'être reconstruite dans la foulée. A l'occasion d'un relevé topographique de cette digue nouvelle en 1989, l'échelon a effectué un contrôle sommaire de ses abords, initiative intéressante puisque pour Hakahau également, le Service des Ports craignant une évolution sédimentologique néfaste, a demandé à la MOP un suivi bathymétrique régulier.

En continuité avec le levé de la baie de Hakahau effectué en 1987/1988, l'échelon a réalisé celui des deux baies d'Anahoa et Hakamoui dans des conditions techniques très difficiles (les baies sont ouvertes à la houle dominante aux Marquises).

Le levé de la baie d'Hakahetau a été conduit en 1989 et 1990. Celui de la baie de Hakatao a été commencé (prééquipement géodésique et stéréopréparation).

Les levés des deux autres baies habitées de Ua Pou (Hakamai à l'ouest bien abritée, et Hohai à l'est d'accès extrêmement périlleux) ne sont pas prévus.

### 2.1.4. Fatu Iva

En complément aux levés réalisés en 1987 et 1988 en baies d'Hanavave et d'Omoa (village principal) l'échelon de Polynésie de la MOP a sondé un secteur circulaire de 3 km de rayon centré sur le fond de la baie d'Omoa. Ce levé a été réalisé pour une étude de plan de vagues préalable à l'édification possible d'une digue.

A Fatu Iva les travaux de sondage côtier sont terminés.

### 2.1.5. Tahuata

La rédaction du levé de la baie d'Hapatonu réalisé en juin 1990 n'était pas achevée en juillet 1990.

Le levé de la baie de Hana Tetena figure encore au programme de l'échelon. Un prééquipement géodésique a été réalisé en juin 1989. Mais les condi-

tions d'accès à cette baie sont dangereuses par la mer et inexistantes par voie de terre. A moins de profiter de conditions météorologiques exceptionnellement favorables, il est douteux que ce levé puisse être réalisé dans des conditions de sécurité acceptables.

On peut donc également considérer pour Tahuata que les travaux de sondages côtiers dans les baies sont terminés.

### 2.1.6. Autres îles

À Ua Huka le levé de la baie de Hane a été achevé: pour la première fois, le système géodésique WGS 84 a été directement utilisé pour la conduite et la rédaction des travaux.

À Eiao un prééquipement géodésique de la baie de Vaitahu a été réalisé en juin 1990 en vue de son éventuel sondage.

Sur les trois autres îles importantes de l'archipel, Fatu Huku, Mohotani et Motu Iti, toutes trois inhabitées et d'accès difficile depuis la mer, une mission héliportée de géodésie a eu lieu en janvier 1989 avec les concours du *Bougainville* et d'un hélicoptère Super Puma de l'ETOM 82. Sur ces îles une base géodésique référencée au WGS 84 (mesures GPS différentielles avec Tai O Hae à Nuku Hiva) a été implantée et une stéréopréparation sommaire des clichés du Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme du Territoire a été réalisée.

### 2.1.7.

Dans chaque baie des travaux géodésiques de rattachement au système géodésique local et à un des systèmes mondiaux WGS, et des mesures de contrôle de la cohérence de ce système local ont eu lieu: une synthèse des résultats géodésiques observés a en outre été présentée dans un rapport particulier dont un résumé est donné en annexe 3.

La liste des points géodésiques implantés dans les Marquises au cours des travaux rédigés par l'échelon de Polynésie de décembre 1988 à juillet 1990 est donnée en annexe 4.

## 2.2. Travaux de grande sonde

### 2.2.1.

Le levé à petite échelle des approches des Marquises a débuté en septembre 1989. Il n'est pas possible de consacrer plus de dix journées au sondage large lors d'une mission de quatre semaines; le rythme de progression de ce levé est donc d'environ 5% de la zone totale à chaque sortie.

Les conditions météorologiques rencontrées le plus souvent sont un vent d'est ou de sud-est de 20 à 30 nœuds et une mer variant de force 3 à force 5 (en général 4).

*L'Estafette*, dont les qualités par mer formées sont à souligner, s'accommode bien de ces conditions.

Les fonds sont d'origine volcanique récente et sont donc heurtés et de nombreux hauts-fonds mal connus représentent des dangers réels isolés (profondeurs probables inférieures à 10 mètres), dont le relevé détaillé est compliqué par la difficulté de mettre en œuvre au large une localisation précise à mieux que 20 mètres.

Le sondage au voisinage des îles doit être conduit avec beaucoup de prudence, et les falaises sont souvent des masques pour la localisation radioélectrique à base terrestre ou spatiale.

## 2.2.2.

En juillet 1990 cinq missions avaient été réalisées, avec les spécifications techniques communes explicites ci-dessous :

— La profondeur a été acquise avec un sondeur Raythéon; les valeurs ont été réduites avec un profil de célérité observé par sondage Sippican jusqu'à 750 mètres ou par un bathycélérimètre Suber jusqu'à 1 000 mètres et complété au-delà par les données des « Echo-soundings Correction Tables » troisième édition (1980).

— La densité des profils respecte les normes suivantes :

Zone de sondage	Échelle
Cas général	
— à l'intérieur de l'isobathe 1 000 m entourant une île	1:100 000
— au delà de cette isobathe	1:200 000
Cas d'un haut fond isolé	
— profondeur > 1 000 m	1:200 000
— profondeur ∈ [250-1 000 m]	1: 40 000
— profondeur < 250 m	1: 20 000

Les minutes du levé de base sont rédigées à l'échelle du 1:200 000; cependant la précision de localisation est compatible avec l'échelle du 1:100 000, et le choix de sonde initial (fichiers TRAVAL) a été fait à l'échelle du 1:100 000. Si ultérieurement un levé d'échelle 1:100 000 apparaissait souhaitable, il suffirait donc de rendre plus denses les levés de 1989 et 1990.

— Tous les travaux ont été conduits et rédigés dans le système WGS 84, directement lorsque la localisation était assurée par le système GPS, indirectement après transformation des coordonnées des émetteurs lorsque la localisation s'appuyait sur un réseau Trident; dans ce cas les paramètres de la transformation système géodésique local → WGS 84 avaient été préalablement observés par mesures satellitaires au point fixe (Transit ou GPS).

## 2.2.3.

Les cinq missions réalisées sont les suivantes :

### Sondage du 7 au 16 septembre 1989

En l'absence de récepteur GPS, la zone des travaux (repérée 1989/3 sur la planche 3) a été choisie en fonction des possibilités d'installation et des portées Trident. Trois balises ont été mises en place à Hiva Oa [point Ootua ( $z = 645$  m)] et Fatu Iva [points Teamotua ( $z = 804$  m) et « cote 44 » ( $z = 44$  m)], leur fonctionnement étant contrôlé par une équipe d'entretien de deux personnes.

Pendant toute la durée du sondage, la localisation était précise à mieux que 20 mètres.

Aucune correction de marée n'a été faite, bien que localement des sondes de moins de 200 mètres aient été trouvées: ces sondes étaient en effet proches de la limite de 200 m.

### Sondage du 19 au 23 septembre 1989

Pendant le sondage en baie de Puamau à Hiva Oa, un sondage large a été réalisé au nord de cette île (zone nord du levé 1989/3 repéré sur la planche 3). La localisation était assurée par deux lieux Trident installés sur les points Kakai 2 ( $z = 83$  m) de la baie de Puamau et Vague ( $z = 10$  m) de la baie de Hanaiaa.

Pendant toute la durée du sondage, la localisation était précise à mieux que 40 mètres (contrôle du point à deux lieux par l'estime de *L'Estafette*).

Les sondes inférieures à 200 mètres ont été réduites de la marée observée en baie de Puamau.

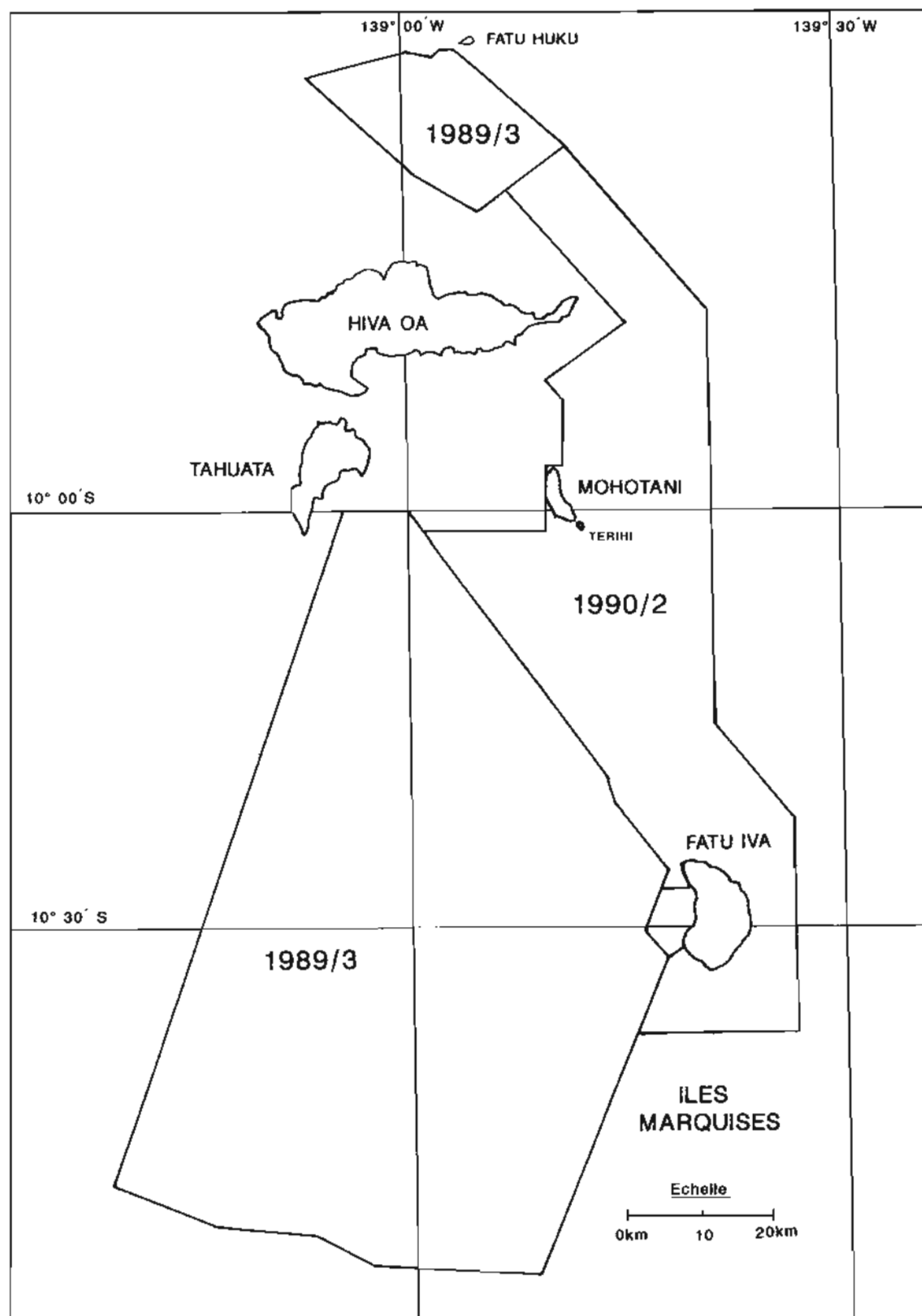
### Sondage du 20 au 28 octobre 1989

Un récepteur GPS Sercel TR5S ayant été livré à l'échelon au début du mois d'octobre, la zone de sondage a été choisie pour tirer le meilleur parti des possibilités de la constellation disponible à l'époque. Le créneau de réception des satellites GPS utilisable (c'est-à-dire avec un facteur de dilution géométrique de précision inférieur à 6 en mode 2D + T) était localement nocturne (de 7 h UT à 21 h UT); pour pouvoir travailler de jour, deux balises Trident ont été installées à Ua Pou [point IGN 26 ( $z = 214$  m)] et Nuku Hiva [relais hertzien ( $z = 870$  m)] de telle sorte qu'elles assurent une localisation satisfaisante dans la moitié sud de la zone repérée 1989/4 sur la planche 4. Leur fonctionnement était contrôlé par une équipe d'entretien de deux personnes.

Les écarts entre le point Trident et le point GPS ont été faibles dans toute la zone de réception des deux balises: toujours inférieurs à 30 mètres, la plupart du temps inférieurs à 20 mètres, dans près de 35% des cas inférieurs à 5 mètres; la validité des transformations de systèmes géodésiques effectuées peut être ainsi confortée.

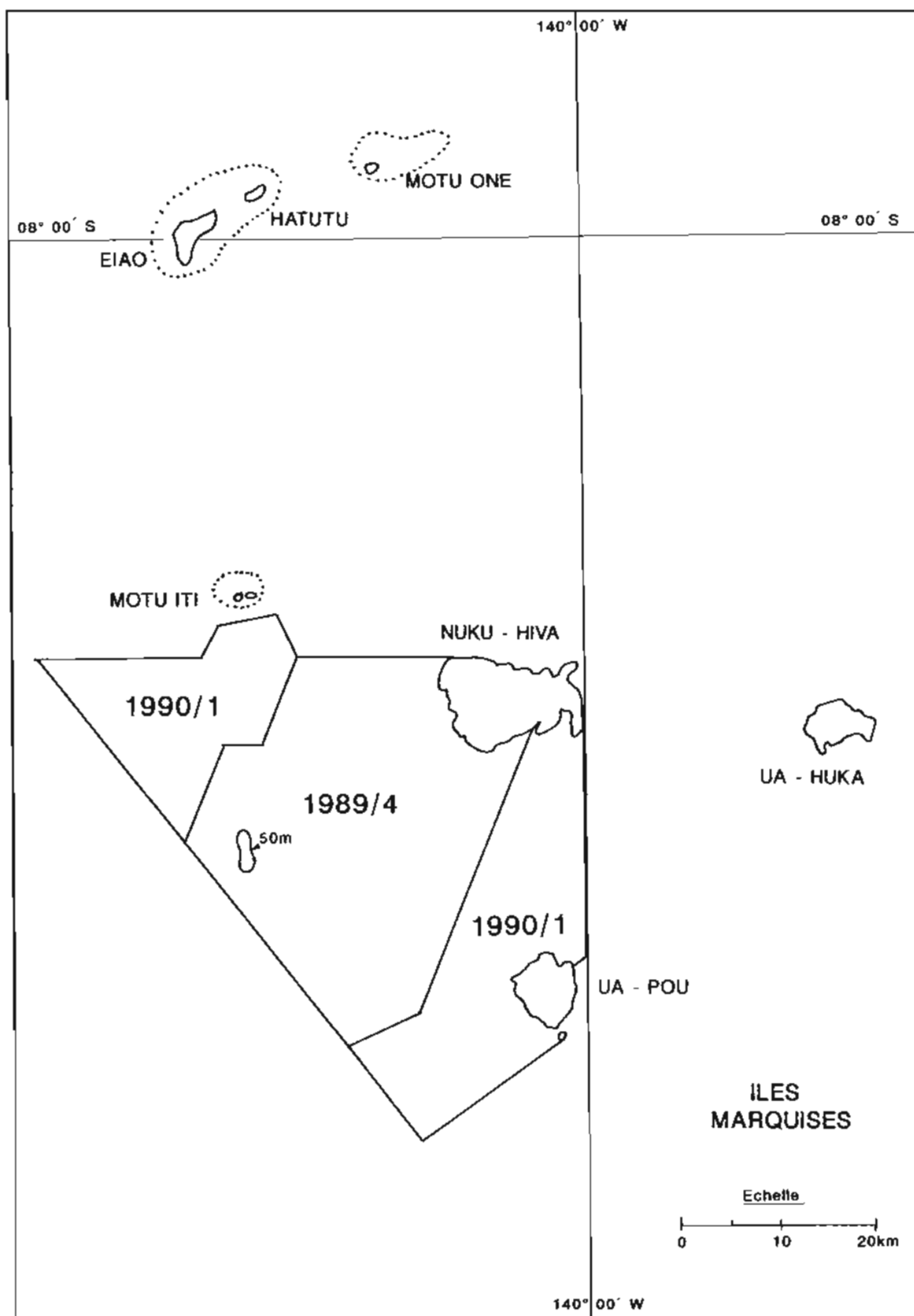
Pendant toute la durée du sondage; la localisation est estimée précise à mieux que 30 mètres.

Un ancien volcan à deux cratères, dont les flancs culminent à une profondeur régulière de 50 mètres a été sondé de façon détaillée. Les caldeira sont



Pl. 3.





Pl. 4.

remplies; les prélèvements à la benne ont montré que le fond y est composé de roche basaltique; un peu de sable noir et des débris coquilliers ont été également remontés en surface.

Situé au milieu de fonds importants, ce guyot accélère les courants (on a observé en dérive localisée par GPS, sans vent, un courant de 0,9 m/s portant dans le 315 le 27 octobre) et favorise la concentration de poissons pélagiques de taille moyenne (thons, bonites, tazaras...).

Le toponyme « Guyot Marchand » a été proposé.

La marée utilisée pour la réduction des sondages par profondeurs inférieures à 200 mètres a été observée à Hakahetau.

#### Sondage du 23 mars au 10 avril 1990

La constellation de satellites GPS s'étant étoffée depuis le levé d'octobre 1989, l'ensemble de la localisation a pu être assuré par GPS au cours de cette sortie. Plus de 20 heures de localisation étaient disponibles chaque jour.

Le levé débutait par les abords de l'île de Ua Pou avec une précision de localisation équivalente à celle observée en octobre 1989, mais au début du mois d'avril, le ministère de la défense des États-Unis d'Amérique activait la procédure SA de dégradation des paramètres éphémérides et horloge transmis par les satellites, et la précision fut limitée à une centaine de mètres.

La zone sondée est repérée 1990/1 sur la planche 4.

La marée utilisée pour la réduction des sondages par profondeurs inférieures à 200 mètres a été observée à Hane.

#### Sondage du 11 au 29 mai 1990

Depuis le levé de mars-avril 1990, le ministère de la défense des États-Unis d'Amérique avait réorganisé son segment spatial en modifiant l'orbite de divers satellites. Le résultat en mai fut que la durée de disponibilité des satellites GPS était réduite à 17 heures par jour; l'intérêt de mettre en place des balises Trident pour compléter le créneau d'utilisation GPS, comme ce fut le cas en octobre 1989 lorsque seulement 12 à 13 heures GPS quotidiennes étaient disponibles, n'est qu'apparent. Il ne fut donc pas installé de localisation complémentaire.

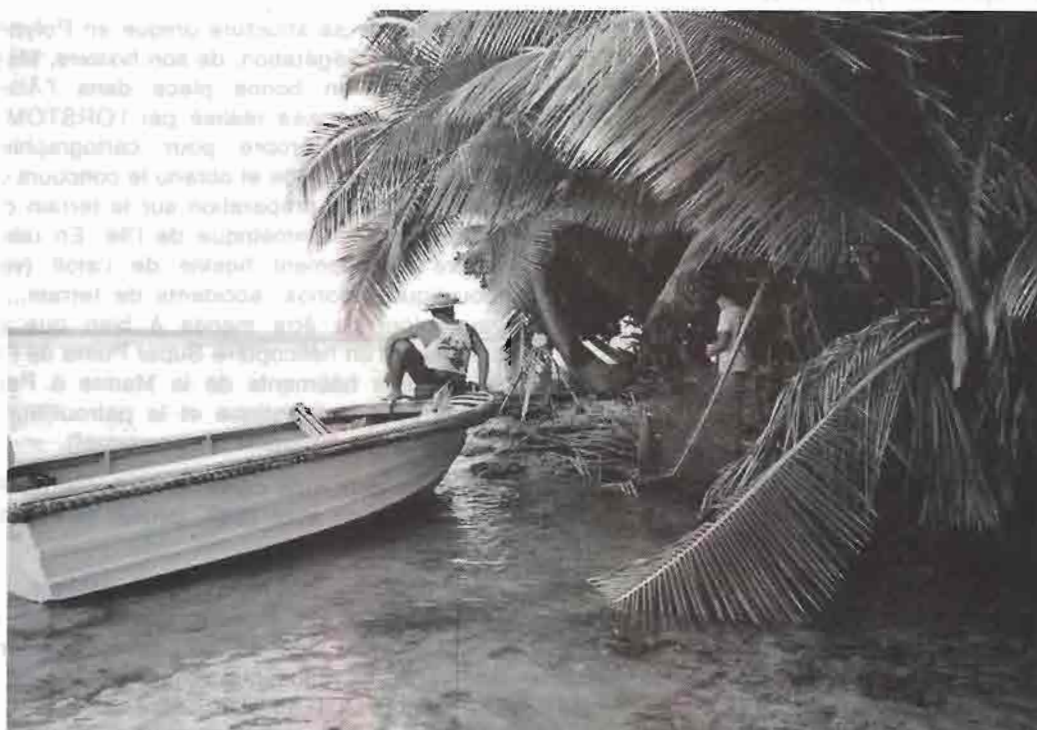
Le SA était activé dans les mêmes conditions que lors du levé de mars-avril 1990 et la précision de localisation estimée est la même.

La zone sondée est repérée 1990/2 sur la planche 3.

La marée utilisée pour la réduction des sondages par profondeurs inférieures à 200 mètres a été observée à Tahuata.

### 3. Travaux dans l'Archipel des Tuamotu

L'Archipel des Tuamotu s'étend sur plus de 1 000 km d'ouest en est et représente plus de 80 îles du type atoll. La cartographie des atolls est une



Travaux géodésiques dans les Tuamotu

tâche difficile et longue aussi bien pour la partie terrestre (faibles altitudes, durabilité incertaine des bornes, programmation de prises de vues aériennes délicate et restitution demandant un nombre important de points d'appui...), que pour la partie maritime (faibles profondeurs, nombreux pinacles coralliens isolés, possibilités d'implantation de stations de radiolocalisation limitées,...).

Avant d'envisager une programmation de levés de base systématiques destinés soit à réactualiser les travaux des années 1950-70, soit le plus souvent à établir une cartographie originale, des missions géodésiques de reconnaissance ont été assignées à l'échelon Polynésie de la MOP. Ces travaux concernent dans un premier temps 25 atolls répartis en trois groupes; la liste des priorités avait été établie en liaison avec les autorités maritimes locales et le Service des Phares et Balises territorial qui a programmé une réfection (ou installation) générale d'un balisage dans les Tuamotu.

Les objectifs communs pour chaque atoll étaient :

- de rechercher les bornes des réseaux géodésiques mis en place antérieurement par des missions du SHOM;

- de mettre en place un réseau moderne rattaché à un système mondial (WGS 72 ou 84) et d'établir le lien entre ce réseau et les réseaux anciens. Ce réseau moderne a été soit un système baptisé MOPxx (xx étant les derniers chiffres du millésime) si la base avait été établie à partir d'un point absolu observé par mesures Transit ou GPS, d'une orientation astronomique et d'une longueur de base, soit une matérialisation du système WGS 84 lorsque la base fut observée par mesures GPS différentielles (cas le plus fréquent lors des travaux les plus récents). Les autres points du réseau sont placés par mesures d'angles et de distances observées avec des précisions standard;

- de contrôler, compléter et remettre en état les repères de nivellement en place;

- de réaliser une revue d'amers et de balisage;
- d'établir un dossier de « spatopréparation » à partir d'images SPOT.

Ce néologisme désigne l'ensemble des observations qui permettront une exploitation ultérieure de l'imagerie satellitale: repérage et positionnement de points de calage, description de l'environnement de zones d'apprentissage, transects bathymétriques dans les eaux peu profondes... La préparation des documents de terrain nécessaires a été réalisée en étroite coopération avec la Station Polynésienne de Télédétection (cf. chapitre V).

La localisation des pixels est effectuée sommairement par un relèvement et une distance avec une précision de l'ordre du mètre. Le dossier de préparation (extrait d'images, zooms...) et la description de l'environnement des pixels triangulés (croquis et photographies), font partie des documents établis lors des missions aux Tuamotu.

A ces objectifs généraux venaient parfois s'ajouter des travaux d'étendue restreinte de bathymétrie ou de topographie, et des sondages de reconnaissance à petite échelle autour des atolls.

La conduite des travaux requérait comme dans le cas des Marquises la participation de plus des trois-quarts du personnel de l'unité hydrographique avec :

- une équipe opérant au voisinage des villages et ayant en particulier en charge les mesures GPS de référence, les observations astronomiques et de magnétisme, le nivellement;

- une équipe itinérante effectuant les mesures GPS des stations rattachées et les travaux sur le reste de l'atoll;

- une équipe à bord de *L'Estafette* pour la conduite du levé large et l'organisation du soutien logistique des équipes à terre.

La liste des points géodésiques positionnés est donnée en annexe 5 et les paragraphes suivants indiquent pour chaque atoll quelques aspects particuliers des travaux.

### 3.1. Makatea

Seul atoll rehaussé des Tuamotu, Makatea a fait l'objet d'une exploitation minière intense (phosphates); il compta plus de 4 000 habitants avant de sombrer dans l'oubli. Makatea n'est plus aujourd'hui qu'une île fantôme, où 58 personnes résident au milieu des installations minières laissées à l'abandon et en partie disloquées par les derniers cyclones.

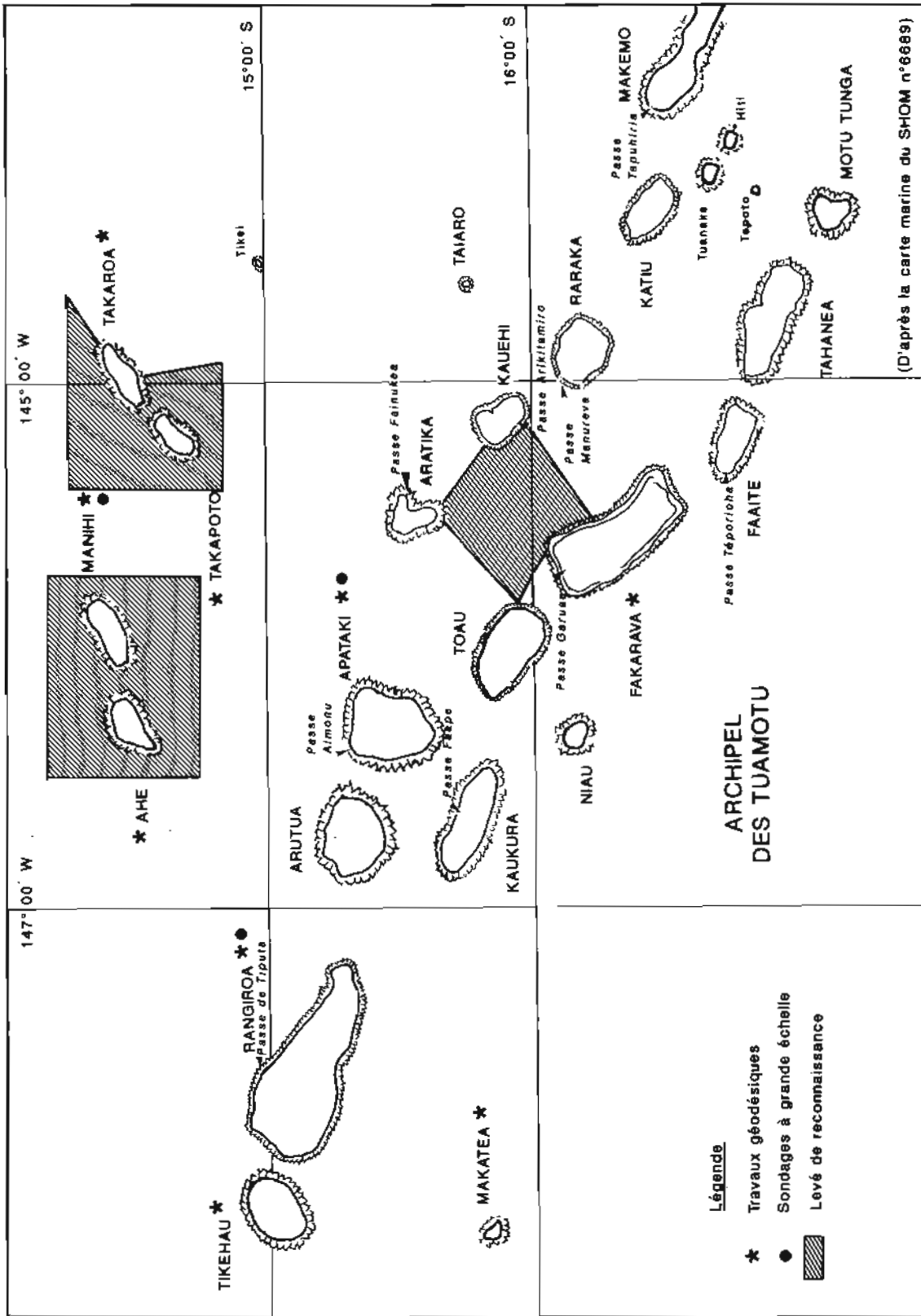
Du fait de sa structure unique en Polynésie française, de sa végétation, de son histoire, Makatea devait figurer en bonne place dans l'*Atlas de la Polynésie française* réalisé par l'ORSTOM. N'ayant aucun moyen propre pour cartographier l'atoll, l'ORSTOM a sollicité et obtenu le concours du SHOM pour réaliser la préparation sur le terrain d'une restitution photogrammétrique de l'île. En raison de la nature franchement hostile de l'atoll (végétation, moustiques, nonos, accidents de terrain...) les travaux n'ont pu être menés à bien que grâce au concours d'un hélicoptère Super Puma de l'ETOM 82 et de deux bâtiments de la Marine à Papeete (le *Trioux* pour la logistique et la patrouilleur *La Rajieuse* pour le transport du personnel).

Les travaux qu'a conduits l'échelon de Polynésie de la MOP en avril 1987, janvier et mai 1988, ont consisté à :

- établir un réseau géodésique nouveau (MOP 88) de six stations construit sur un point Doppler (Astro MOP 88, 63 passagers retenus), une orientation astronomique et une mesure de longueur entre Astro MOP 88 et Puutiare;

- positionner, relativement à ce réseau, 8 points de stéréopréparation repérés par un observateur depuis le Super Puma;





Pl. 5.



— rattacher l'ancien réseau cadastral au système MOP 88. Ce système géodésique du cadastre est un système de coordonnées planes locales. Sur le jeu de 4 points où les coordonnées sont également connues dans le système MOP 88, on a ajusté, par moindres carrés, la similitude suivante (du système du cadastre vers le système MOP 88) :

Translation X = 361 763,75	Y = 8 243 736,66
Rotation (autour de Vigie)	+ 0,076°
Homothétie (depuis Vigie)	0,99865

L'écart quadratique moyen des résidus est de 10 mètres.

Par ailleurs le LV Bonnafont avait observé en 1958 un point astronomique à la station Astro Marine (coordonnées cadastre : 1 387,32 – 6 288,36). On peut établir la correspondance entre les coordonnées géocentriques de ce point pour les deux systèmes Bonnafont et MOP 88, par un vecteur de translation du centre de l'ellipsoïde du système Bonnafont (International) vers le centre de l'ellipsoïde du système MOP 88 (WGS 72) :

X = + 351,74 m
Y = + 12,13 m
Z = - 175,23 m

### 3.2. Tikehau

Les travaux géodésiques concernant l'atoll de Tikehau, se sont déroulés en octobre 1988. Un réseau géodésique MOP 88 a été mis en place et 18 points remarquables de la scène SPOT 524-380 du 16/07/1986 ont été repérés sur le terrain et positionnés.

Le point fondamental du système MOP 88 (Tuherahera) a été positionné à partir de 48 mesures Doppler sur satellites Transit. La base Tuherahera – Tavania a été mesurée à l'aide du telluromètre MRA5 et son orientation a été déduite d'une observation d'azimut astronomique au théodolite Wild T3.

Le réseau MOP 88 comprend 15 bornes. En outre onze balises bâbord et deux balises tribord marquant le chenal d'accès au village Tuherahera à partir de la passe Tuheiava ainsi que le seul amer visible depuis l'extérieur de l'atoll (toit de la mairie) ont été positionnés.

En 1960, la Mission Hydrographique de Polynésie Française établissait un réseau géodésique, baptisé MHPF 60, dont le point fondamental avait été observé par mesures astronomiques. Ce réseau comprenait 9 points, mais il est aujourd'hui détruit à près de 50% : les bornes Astro, Terme nord et Minable n'ont pas été retrouvées, la station Hangar a été détruite puis reconstruite et il y a ainsi doute sur son emplacement exact, les balises Tamara et Jetée ont été retrouvées mais leur partie supérieure est détruite et enfin la borne supposée être Carré est par-

tiellement détruite et ne comporte plus d'inscription d'identification.

Le rattachement des deux systèmes MHPF 60 et MOP 88 a été établi à partir des coordonnées communes des balises Tamara, Castel et Jetée. On obtient pour vecteur de translation du centre de l'ellipsoïde du système MHPF 60 (International) vers le centre de l'ellipsoïde du système MOP 88 (WGS 72) :

X = + 266,6 m
Y = + 79,1 m
Z = - 47,2 m

La précision des trois composantes de cette translation est de un mètre.

Les repères de nivellement installés par la MHPF en 1960 au voisinage de l'observatoire de Tuherahera, ont été recherchés : seul le repère A1 existe toujours. Quatre repères nouveaux ont été scellés et nivelés relativement à A1. Comme aucune observation de la marée n'a été faite lors de la mission de 1988, la validité du zéro adopté par la MHPF après une observation du 15 mai au 15 juin 1960, n'a pas été contrôlée.

### 3.3. Ahe

Les travaux géodésiques sur l'atoll de Ahe se sont déroulés en novembre 1988. Un réseau géodésique MOP 88 a été mis en place et 12 points remarquables de la scène SPOT 0088728D du 06/07/1986 ont été repérés sur le terrain et positionnés.

Le point fondamental du système MOP 88 (Fondamental) a été positionné à partir de 63 mesures Doppler sur satellites Transit (25 en 1987 et 38 en 1988). La longueur de la base Fondamental – Terme nord a été mesurée à l'aide du telluromètre MRA5 et l'orientation a été déduite d'une observation d'azimut astronomique au théodolite Wild T3 entre les points Fondamental et Tigris.

Le réseau MOP 88 comprend 11 bornes. En outre neuf balises et cinq espars ont été positionnés.

Deux missions hydrographiques ont déjà implanté un réseau géodésique à Ahe en 1949 (Mission Géodésique des Tuamotu) et 1962 (Mission Hydrographique de Polynésie Française). Les réseaux mis en place sont presque entièrement détruits et le seul point retrouvé sans ambiguïté est le coin nord-ouest du hangar positionné en 1962. On peut estimer à partir des coordonnées de ce seul point le vecteur de translation du centre de l'ellipsoïde du système MHPF 62 (International) vers le centre de l'ellipsoïde du système MOP 88 (WGS 72) :

X = + 217,79 m
Y = + 86,92 m
Z = + 100,10 m

### 3.4. Rangiroa

#### 3.4.1. Reconnaissance géodésique

La mission géodésique qui s'est déroulée en novembre 1988 n'était pas inscrite au programme de l'échelon; elle fut néanmoins décidée pour profiter des moyens mis en place lors des travaux sur l'île voisine de Tikehau.

Cependant Rangiroa est le plus grand atoll de Polynésie française et il convenait de conserver à cette mission non programmée son caractère d'opportunité; les travaux ont donc été limités à un contrôle du réseau géodésique existant et à une spatioréparation.

Le réseau géodésique en place en 1988 a été construit à partir des travaux de la Mission Géodésique des Tuamotu en 1949, de la Mission Hydrographique de Polynésie Française en 1962 et de la MHPF à nouveau en 1966 puis 1968.

Une recherche systématique des bornes du réseau MHPF 66 a été faite en 1988 dans la partie ouest de l'atoll :

- ont disparu les bornes Tereia, Tehaaré, Mata-tahi, Pirau-Pirau, Astro Tiputa et le mât de pavillon;
- ont été retrouvées les bornes Tivaru, Tiarari, Fenuarua, Paio, Faurumai et Kaveo.

Une série de 62 mesures Doppler sur satellites Transit a été acquise sur un point situé à proximité du port de Tiputa et baptisé Tiputa/JMR. Ce point qui n'était pas un point du réseau MHPF 66 a été rattaché à ce réseau par triangulation et on peut estimer le vecteur de translation du centre de l'ellipsoïde du système MHPF 66 (International) vers le centre de l'ellipsoïde du système WGS 72 :

$$X = + 263,6 \text{ m}$$

$$Y = - 117,0 \text{ m}$$

$$Z = + 357,2 \text{ m}$$

Cette hypothèse de translation simple résulte des résultats satisfaisants du contrôle de l'échelle [la mesure directe de la distance Tiputa/JMR-Kaveo (9 355,85 m) diffère de 10 cm de celle calculée à partir des coordonnées MHPF 66 des deux bornes] et de l'orientation (l'azimut observé par mesures astronomiques de la direction Tiputa/JMR-feu postérieur de l'alignement de la passe d'Avatoru diffère de celui calculé d'après les coordonnées MHPF 66 des deux points de 5,3'') du réseau MHPF 66.

Toute la triangulation secondaire réalisée en 1988 (positionnement de quatre bornes géodésiques nouvelles, de cinq amers et de neuf pixels de l'image SPOT 504/380 du 16/07/1986) a été effectuée relativement au réseau MHPF 66.

#### 3.4.2. Sondage à Tiputa

Le sondage des abords du quai de Tiputa à Rangiroa avait été demandé en 1988 par le Service des Ports de Polynésie française et a été réalisé

avec le concours du *Dumont d'Urville* entre le 13 et le 17 mars 1989.

Le sondage a été réalisé à l'aide d'une coralline équipée d'un sondeur Atlas Deso 10 avec une base hors-bord. La localisation était optique : deux des points stationnés étaient des bornes implantées par la MHPF en 1966 (balise antérieure sur le motu Nuhi Nuhi et borne fondamentale du quai de Tiputa), le troisième a été mis en place et positionné relativement au réseau MHPF 66 (station Reporepo).

Les travaux sont rédigés en projection UTM, fuseau n° 6, sur l'ellipsoïde international dans le système MHPF 66. La zone sondée est représentée sur la planche 6. Si la densité des profils est satisfaisante pour un levé au 1:500, la localisation et le suivi de ces profils étaient insuffisamment précis pour une exploitation à cette échelle (la principale difficulté d'exploitation fut de prendre correctement en compte l'accélération de la coralline au voisinage du quai), et l'ensemble des travaux fut rédigé au 1:1 000.

La régularité des fonds et la densité des profils du sondage régulier n'ont rendu nécessaire aucune recherche de roche.

La marée a été observée régulièrement par mesures de tirant d'air depuis le repère R2 de la fiche d'observatoire MHPF (datée du 31 août 1967), scellée dans le quai.

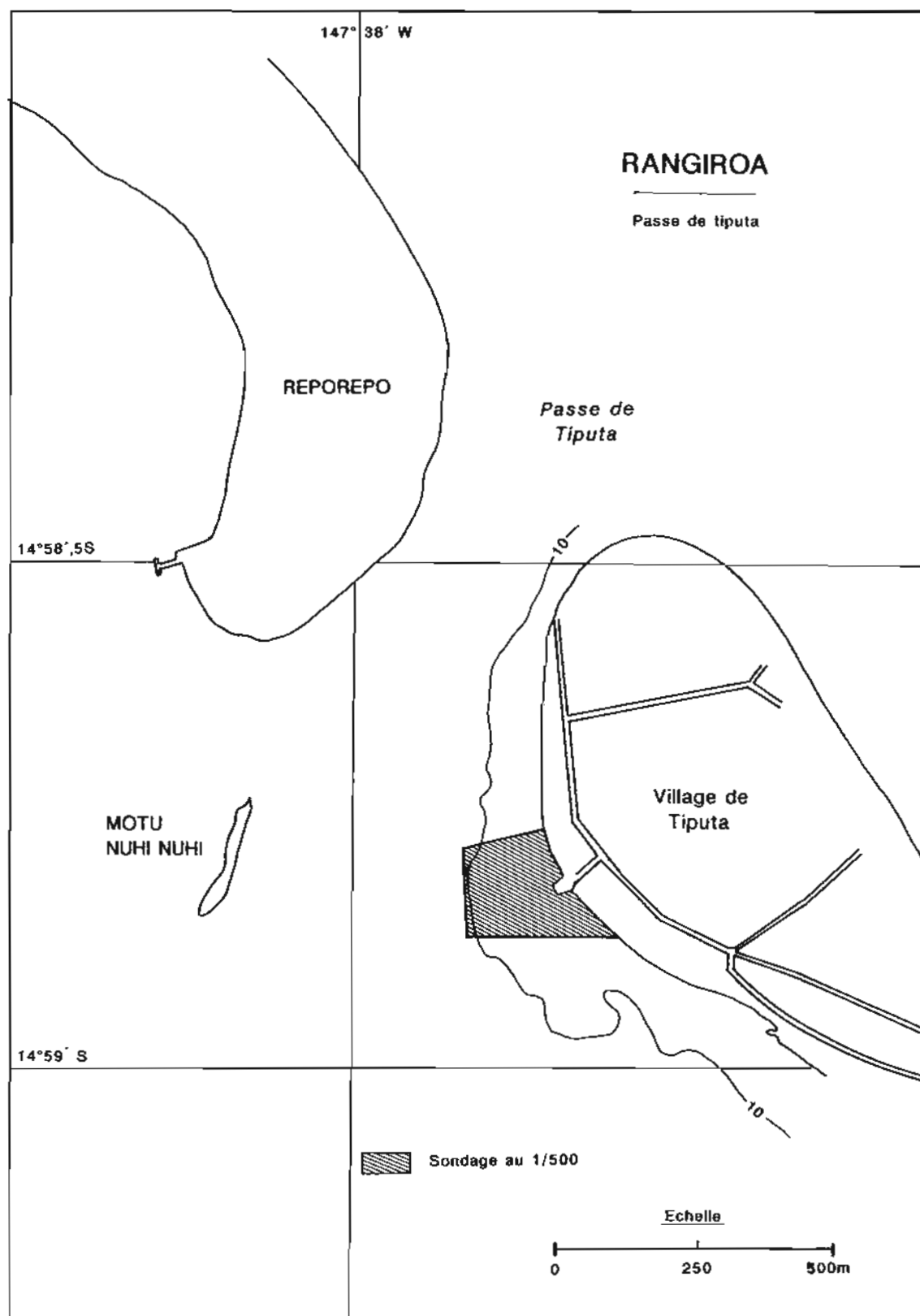
### 3.5. Takaroa

Sur l'atoll de Takaroa deux missions ont été nécessaires, en janvier et mars 1989, pour la mise en place d'un réseau géodésique MOP 89 rattaché à la fois à l'ancien système de la MHPF et au système mondial WGS 72 et pour la réalisation d'une spatioréparation de la scène SPOT 0144953M du 01/09/1986 (positionnement et description de l'environnement de huit pixels, transect bathymétrique). La mission réalisée sur l'atoll voisin de Takapoto en février 1990 permit en outre de peaufiner les liens du réseau MOP 89 avec les systèmes géodésiques mondiaux WGS.

Le réseau MOP 89 est établi classiquement sur un point fondamental Terme sud positionné par 28 observations Doppler sur satellites Transit, et une base Terme sud - Terme nord dont la longueur a été mesurée au telluromètre MRA5 et l'orientation déduite de mesures astronomiques.

Douze bornes du réseau MOP 89, cinq tourelles et treize espars marquant le chenal d'accès au village Teavaroa à partir de la passe Teauonae et matérialisant les voies de circulation nautique à l'intérieur du lagon ainsi que cinq amers visibles de l'extérieur de l'atoll ont été positionnés dans le système MOP 89.

En 1969 un réseau de 21 stations bornées avait été mis en place par la Mission Hydrographique de Polynésie Française. 13 sont aujourd'hui détruites, et 6 ont été retrouvées en bon état (Astro 69, Xavier,



Pl. 6.



Alfa, Olaf, Willy et Vanaa). Les deux restantes (Tintin et Moana) n'ont pas été recherchées en janvier 1989.

Le rattachement des deux systèmes MHPF 69 et MOP 89 a été établi comme suit.

— A partir des coordonnées communes des stations Xavier, Alfa, Olaf, Willy, Vanaa et Astro 69 et des deux amers Clocher du temple et Mât de pavillon.

La translation à apporter aux coordonnées rectangulaires de la MHPF 69 (projection UTM, fuseau n° 6 sur ellipsoïde international) pour obtenir les coordonnées rectangulaires MOP 89 (projection UTM, fuseau n° 6 sur ellipsoïde WGS 72) sont de :

$$X = -157,5 \text{ m}$$

$$Y = +264,8 \text{ m}$$

La dispersion autour de ces valeurs moyennes est faible (inférieure à 0,3 m).

— En calculant au point Terme Sud, le vecteur de translation du centre de l'ellipsoïde du système MHPF 69 (International) vers le centre de l'ellipsoïde du système MOP 88 (WGS 72) :

$$X = +68,63 \text{ m}$$

$$Y = +232,25 \text{ m}$$

$$Z = +255,89 \text{ m}$$

En outre, lors des travaux de février 1990 sur l'atoll de Takapoto, les triangulations de Takaraoa et Takapoto ont été rattachées. On a alors pu considérer que le réseau mis en place en 1990 à Takapoto est plus solidement rattaché au système WGS 84 (17 sessions d'environ 1 heure sur cinq satellites GPS) que ne l'est le système MOP 89 de Takaraoa au WGS 72 (seulement 28 passages Transit utilisés) et proposer une transformation des coordonnées MOP 89 de Takaraoa vers WGS 84 obtenue en ajoutant aux coordonnées UTM sur l'ellipsoïde WGS 72 du réseau MOP 89 le vecteur de translation :

$$x = 8,5 \text{ m} \quad y = -17,6 \text{ m}$$

Deux stations de magnétisme ont été observées sur les points Terme nord 2 et Quai est. La première sta-

tion a permis de contrôler la validité des valeurs fournies par les modèles mondiaux (WC 85) au voisinage de la passe; la deuxième a été retenue parce que les observations MHPF 69 semblaient y montrer une légère anomalie.

L'azimut du méridien magnétique y est de  $11^{\circ} 31,3' \text{ E}$  (Terme est 2) et de  $11^{\circ} 32,6' \text{ E}$  (Quai est).

L'anomalie que l'on pouvait suspecter au voisinage de Quai est d'après les mesures de 1969 n'est donc pas confirmée. La valeur du champ magnétique issue du modèle WC 85 à proximité de Terme nord 2 est de  $11^{\circ} 18,9' \text{ E}$ : elle est en accord avec les observations de 1989, compte tenu de la médiocre résolution de WC 85 (ordre 12).

Les repères de nivellement installés par la MHPF en 1969 au voisinage de l'observatoire de Teavaroa, ont été recherchés: deux repères (A2 et B2) ont résisté au temps. Leur cote relative a été contrôlée et confirmée. Trois repères nouveaux ont été scellés et nivelés relativement à A2 et B2. Comme aucune observation continue de la marée n'a été faite lors de la mission de 1989, la validité du zéro adopté par la MHPF après une observation du 28 mars au 27 avril 1969 (1,15 m sous B2 dans le lagon et 1,58 m sous B2 dans la passe), n'a pas été contrôlée.

Enfin deux profils de contrôle réalisés au sondeur latéral dans la passe n'ont pas révélé de relèvement du fond suspect.

### 3.6. Takapoto

Takapoto est un atoll fermé et donc sans intérêt hydrographique particulier. Cependant, l'échelon de Polynésie de la MOP y a réalisé en février 1990 des travaux géodésiques de base, d'une part afin de respecter une continuité géographique avec les atolls voisins de Ahe, Manihi et Takaraoa, et d'autre part apporter une assistance aux équipes techniques du



Équipe itinérante dans l'atoll de Takapoto.



territoire chargées du développement de la periculture (EVAAM: Établissement pour la Valorisation des Activités Aquacoles et Maritimes, en particulier).

Un réseau géodésique directement rattaché au système mondial WGS 84 par mesures GPS a été mis en place. Le point fondamental peut être considéré comme étant Matra 90 GPS; ce point situé sur le wharf du village de Fakatopatera sert de référence pour toutes les mesures GPS différentielles et ses coordonnées dans le système WGS 84 sont déduites de 17 sessions programmées sur cinq satellites et durant plus d'une heure chacune, observées en quatre jours. La position moyenne de ces 17 sessions a été retenue comme position de Matra 90 GPS dans le système WGS 84. La précision absolue est estimée meilleure que 5 mètres en  $x$  et  $y$ , meilleure que 0,5 m en  $z$  (mesures de tirant d'air).

A cette station ont été rattachées par mesures GPS différentielles (au moins 4 sessions sur cinq satellites pour chaque borne): Harley, Alpine, Guzzy et Eva MOP 90; la précision relative des rattachements à Matra 90 GPS est respectivement de 20, 35, 40 et 20 cm.

La triangulation secondaire de 1990 comprend 3 bornes (Ax, Mairie, et Chorus) et 3 détails topographiques (église de Fakatopatera, phare de Fakatopatera, et manche à air de l'aéroport).

Il n'y a pas de balisage durable dans le lagon de Takapoto.

En avril 1969 la MHPF étendait à Takapoto la triangulation qu'elle avait mise en place à Takaroa par une mesure d'azimut/distance entre les côtes sud et nord des deux atolls. La précision de ce rattachement est standard. Par contre tout le réseau de Takapoto a ensuite été positionné par rapport à une base très courte (400 m), permettant de « passer » du bord extérieur du récif nord au bord intérieur de ce récif. Deux mesures de contrôle d'orientation (azimut astronomique) et d'échelle (mesure directe d'une distance) faites au sud de Takapoto laissaient prévoir une distorsion du réseau, mais les erreurs étaient faibles et le réseau de la MHPF était adopté sans tenir compte de ces observations indépendantes. Seulement deux des treize points principaux matérialisant le système MHPF 69 existent toujours: Taravana (pas de positionnement en 1990) et Alpine.

Pour effectuer un rattachement des deux systèmes MHPF 69 et WGS 84 de Takapoto, on dispose, en plus des mesures communes à Alpine, des coordonnées du phare Fakatopatera (précision métrique en 1969) et de la position présumée de l'ancienne borne Matra de 1969 (cette borne a en fait disparu lors de la réfection du wharf, mais on peut estimer sa position probable d'après les photos jointes à sa fiche géodésique).

Le décalage entre les systèmes WGS 84 et MHPF 69 diffère de plus de trois mètres au nord de l'île (Alpine) et au sud (Matra, phare). La transformation suivante des coordonnées MHPF 69 vers WGS 84 a été adoptée en tenant compte des me-

sure d'azimut et de distance observées en 1969 et non intégrées dans les calculs de triangulation faits à cette époque:

- rotation de + 14" autour du point Alpine (coordonnées MHPF 69  $x = 699\,011,69$ ;  $y = 8\,389\,643,84$ );
- homothétie de facteur 0,99994 depuis le point Alpine;
- translation de - 125,5 m en  $x$  et de + 249,8 m en  $y$ .

Cette transformation peut être estimée précise à une cinquantaine de centimètres près, ce qui devrait être acceptable étant donné l'état de délabrement du réseau de 1969 et le peu de travaux hydrographiques qui reposent sur ce réseau.

Les valeurs de rotation et de facteur d'échelle correspondent à une erreur de pointé de 3 cm (la distance Alpine-Alice n'est que de 400 m) et de 20 cm sur la longueur de la base Alpine-Taravana de 1969 (3500 m); elles sont donc raisonnables.

Un azimut astronomique a été mesuré entre la station Matra 90 et la station Harley et une station de magnétisme a été observée pendant 24 heures sur un point non matérialisé situé sur la plage, à proximité des locaux de l'EVAAM, loin de masses métalliques apparentes.

La valeur du champ magnétique issue du modèle WC 85 à proximité du village Fakatopatera est de 11° 30' E. Les mesures faites en 1990 donnent un azimut du méridien magnétique de 12° 04' E: il est probable que la proximité du village crée la plus grande part de l'anomalie constatée.

Six pixels de l'image SPOT 0144953M acquise le 01/09/1986 en mode radiométrique, ont été identifiés sur des préparations réalisées par l'échelon à la Station Polynésienne de Télédétection. Leur environnement a été décrit dans un cahier de spatiopréparation. En outre cinq transects bathymétriques pouvant être utilisés pour le calage d'un modèle de profondeurs lors de l'exploitation de l'image SPOT de Takapoto, ont été sondés.

Le lagon de Takapoto est fermé et les évolutions du niveau de l'eau à l'intérieur sont indépendantes des effets de la marée (pendant les quatre journées de mesures géodésiques de février 1990 ce niveau n'a par exemple pas varié). Cependant, afin de faciliter les contrôles de la variation à moyen et long termes du niveau du lagon faits par l'EVAAM, une cotation relative de deux repères a été déterminée par nivellement: un repère A scellé dans le quai du village Fakatopatera à proximité de la station Matra 90 GPS et un repère B sur le quai extérieur de l'atoll.

La cote du repère A a été définie par mesures de tirant d'air par rapport au niveau du lagon.

Les mesures GPS effectuées entre la station Matra 90 GPS et la station Alpine sur la côte nord d'une part, et des mesures de tirant d'air effectuées toute la journée du 25 février sur la station Alpine ont permis en outre de coter la douille Alpine par rapport au niveau du lagon.

### 3.7. Apataki

Un levé d'envergure avait été réalisé à Apataki en 1986 et 1987 par l'échelon permanent de la MOP en Polynésie; ce levé concernait notamment :

- le sondage des deux passes de l'atoll;
- le contrôle du mouillage de Roto Ava.

L'analyse des documents de rédaction avait montré que diverses imprécisions, lacunes ou omissions ne permettaient pas d'envisager une exploitation cartographique, sans un complément de levé. Ce complément a été réalisé pour l'essentiel en juin 1989.

#### 3.7.1. Géodésie

Les mesures d'azimut aux deux extrémités du cheminement de 1986 montraient un défaut d'orientation de 43" (soit au maximum 6 mètres en incertitude de position des bornes géodésiques), inexplicable par une source d'erreur extérieure aux mesures (par exemple une forte déviation de la verticale).

Deux nouvelles mesures astronomiques aux deux extrémités du cheminement de 1986 ont donc été observées en 1989: elles confirment un défaut d'orientation du réseau MOP 1986 de  $-26,8''$  autour de la borne Niutahi. Ce réseau MOP 86 (cheminement principal et triangulation de rattachement), a donc été recalculé à partir des observations angulaires et de distance observées en 1986-87, en utilisant la nouvelle valeur de l'azimut de départ (Niutahi).

L'erreur de fermeture à Pitate (15,3") ne fut pas répartie. Cette décision résulte des résultats des mesures GPS différentielles effectuées entre les bornes Niutahi et Pitate.

Dans l'état de la constellation GPS en juin 1989, et du fait des limitations imposées par le matériel disponible (Sercel NR 52, sans PROM adaptée aux satellites du bloc II), un seul créneau de mesure sur 5 satellites, avec un critère de recoupement des lieux satisfaisant (GDOP < 5), était utilisable pour effectuer les observations différentielles: sa durée était de 50 min. Quatre journées d'observations étaient prévues. Des défauts matériels ont largement écourté les séances. La qualité de la mesure GPS est donc incertaine a priori, du fait à la fois de l'écourtement de la durée d'observation, et du recours à une constellation unique avec des conditions d'élévation limites (5°).

La solution différentielle adoptée est la moyenne des séries des mesures acquises et malgré les incertitudes sur sa précision (probablement mieux que 0,6 m), elle est en accord avec la solution géodésique retenue; ceci justifie a posteriori la non répartition de l'erreur de fermeture constatée à Pitate.

Notons enfin que du fait de l'importance des différences, et afin de limiter les risques d'erreurs d'interprétation, il a été jugé préférable de considérer

que le système recalculé en 1989 était différent du système MOP 86 et le baptême MOP 89 lui fut donné: le réseau associé comprend en outre un point supplémentaire, la station Jonque.

#### 3.7.2. Bathymétrie

La zone de mouillage de Roto Ava avait été levée au 1:2500 sans sondeur latéral. L'accès au mouillage se fait à cap constant depuis la passe de Tehere, et la route ainsi définie passe très près d'une roche profonde de 1,2 m d'une part, et à travers une zone entourant cette roche délimitée sur la minute de 1986 par une limite de danger d'autre part. Cette incertitude sur la fiabilité de la voie d'accès a été levée par :

- un levé complémentaire autour de la roche 1,2 m.

Ce levé a été localisé par trois lieux optiques et un lieu Trident et a été rédigé dans le système MOP 86 afin de permettre une comparaison rapide avec les documents existants et à l'échelle du 1:5000, malgré une densité de profils compatible avec le 1:2500. Les sondes ont été réduites de la marée observée à Tehere. Six recherches de roches faites le 17 octobre par plongeurs, en complément de celles déjà réalisées en 1987 achevaient ces travaux.

La comparaison avec le levé de 1986-87 montre que, lorsqu'elles occupent une même position, les sondes sont cohérentes entre les deux levés avec une précision meilleure que 0,5 m. Il faut cependant remarquer la présence de plusieurs aiguilles coralliennes fines qui ne peuvent être détectées que par un passage à la verticale, ou une investigation au sondeur latéral. L'orientation des profils de 86-87 et de 89 a néanmoins permis de quadriller la zone, et la probabilité qu'un pinacle ait échappé aux sondages est extrêmement faible.

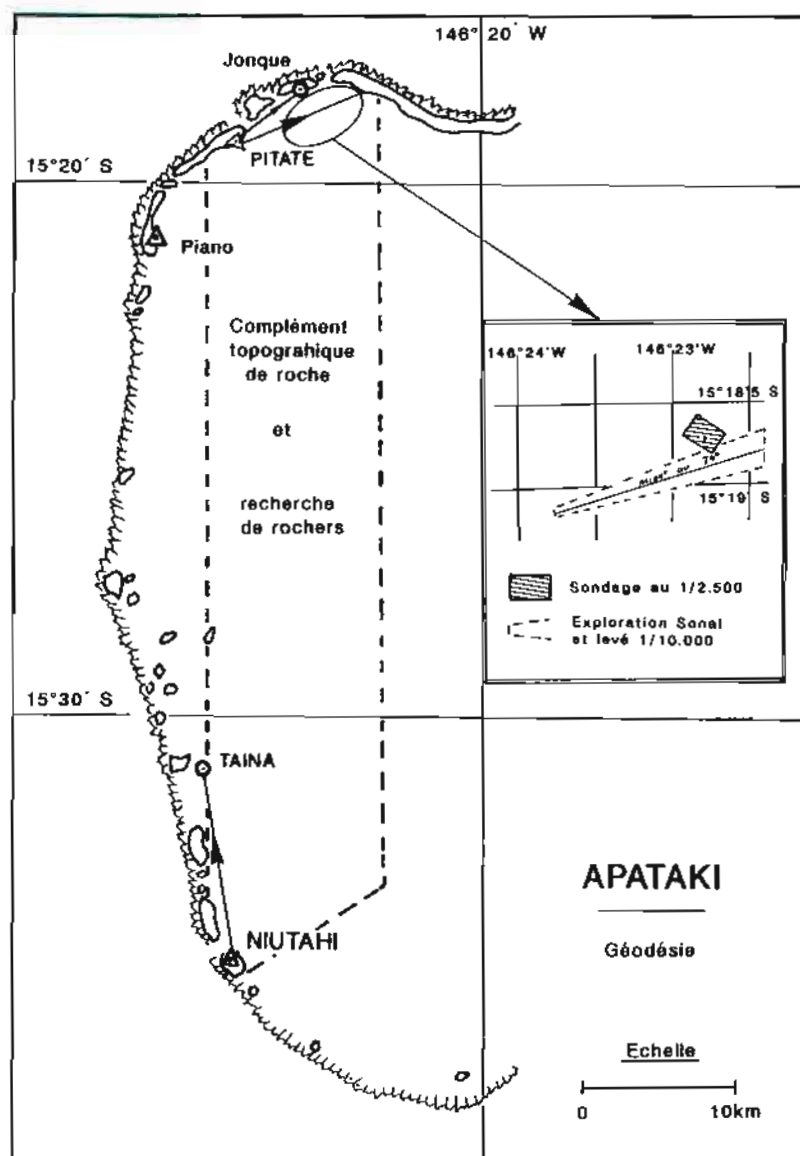
Le levé de 1989 montre que les abords de la roche 1,2 m sont francs et que s'il n'est pas confortable d'accéder à un mouillage en passant à moins de 80 mètres d'une tête rocheuse faiblement immergée, cette manœuvre est peu dangereuse.

Il est probable que le choix de la route de mouillage figurant sur la carte marine 6364 avait été fait à une époque où la roche 1,2 m était balisée. Il ne restait en juin 1989 que l'embase immergée de cette balise; en octobre elle était reconstruite mais pendant plus de trois ans elle fut absente et le Service des Phares et Balises s'est gardé d'affirmer que ce ne sera plus le cas à l'avenir.

L'intérêt de conserver la route de mouillage traditionnelle est en outre diminué par les considérations développées ci-dessous :

- la recherche et le contrôle par sondeur latéral d'une route plus éloignée de cette roche 1,2 m, mais contenue dans la minute au 1:5000 de 1986.

Le contrôle a consisté à balayer le fond au sondeur latéral, de part et d'autre d'une route moyenne



Pl. 7.

au  $74^\circ$  (azimut) par rapport à la station Pitate, de telle sorte que chaque parcelle du fond ait été doublement insonifiée. La localisation était mixte (deux lieux optiques dont le guide de Pitate et deux lieux Trident). Le système géodésique de rédaction est encore le MOP 86.

Trois remontées de fond ont été détectées, pour lesquelles une recherche de roche complète a été réalisée : ces remontées ne dépassent pas la cote 18 m sous le zéro et ne constituent pas des dangers pour la navigation.

La comparaison avec le levé de 1986-87 montre que les sondes sont cohérentes entre les deux levés au 1:10 000 avec une précision généralement meilleure que 0,5 m. Dans les cas où la différence excède 0,5 m, la comparaison des bandes de sonde montre que la morphologie des fonds est bien retrouvée et que l'écart est le plus souvent dû à une

différence dans la localisation (à dix mètres près on observe une remontée de fond différente).

Une nouvelle route d'accès au mouillage de Roto Ava est proposée, à cap constant à  $074^\circ$  depuis l'îlot supportant la station de Pitate (nettement visible tout le long de la route), et qui s'éloigne à plus de 300 mètres de la roche 1,2 m. Le nouveau mouillage est situé en  $x = 566\,520$   $y = 8\,306\,920$ . Le fond est de 29 m en moyenne et est composé de sable et corail.

Le patrouilleur *La Railleuse* s'est présenté sur la route définie ci-dessus et a mouillé au nouveau point de mouillage. Le compte rendu de son commandant indique que l'accès de jour est aisé, que le fond est de bonne tenue et que le mouillage est exposé de la même façon que l'ancien mouillage aux vents de Sud à Sud-Est.



### 3.7.3. Recherches de roche

Dix relèvements de fonds notables apparaissent sur les minutes du chenal entre les deux passes rédigées en 1986, qui n'ont pas fait l'objet d'une recherche : ces 10 relèvements ont été contrôlés.

### 3.7.4. Marée

Pour permettre une analyse harmonique (impossible avec les enregistrements discontinus de 1986-87), la marée a été observée sur un marégraphe plongeur Suber SLS 13 du 17 mai au 04 juillet 1989, immergé à proximité de l'observatoire de Tehere, par 5 mètres de profondeur environ.

Pendant la durée des sondages complémentaires à Roto Ava, des mesures de tirant d'air; relativement au repère R1 de l'observatoire établi en 1986-87, ont permis d'obtenir un calage de l'instrument Suber par rapport au zéro adopté en 1986-87. Les données de cette période ont servi à réduire les sondages de 1989, pour les deux zones de travail.

Le nivellement des repères d'altitude mis en place en 1986-87 a été contrôlé : le repère R3 ayant disparu, un nouveau repère D a été implanté et coté.

### 3.7.5.

Divers compléments concernant la topographie, la bathymétrie de reconnaissance et la sédimentologie, qui n'auraient pas été programmés spécifiquement, ont été réalisés à l'occasion des travaux de juin 1989.

Les données sédimentologiques ont été recueillies sur un transect et sur 6 pinacles et des mesures bathymétriques ont été enregistrées lors des transit de la vedette pour pouvoir être utilisées lors de l'exploitation de scènes SPOT.

## 3.8. Fakarava

Les travaux se sont déroulés du 5 au 14 décembre 1989. Du fait de la taille de l'atoll (55 km de long, 24 km de large, 1221 km<sup>2</sup> de surface totale dont 16 km<sup>2</sup> de terres émergées et 52 km<sup>2</sup> de récif couvert d'eau), deux équipes ont été constituées opérant de façon indépendante.

### 3.8.1. Travaux en zone nord

Un réseau géodésique directement rattaché au système mondial WGS 84 par mesures GPS a été mis en place. Le point fondamental peut être considéré comme étant Paimpolaise. Ce point situé près du quai du village de Rotoava sert de référence pour toutes les mesures GPS différentielles et ses coordonnées dans le système WGS 84 sont déduites de :

— 19 sessions programmées sur cinq satellites et durant plus d'une heure chacune, observées en cinq journées. Les coordonnées absolues de la sta-

tion Paimpolaise sont obtenues en supprimant des calculs les satellites dégradés du bloc II (activation par le ministère de la défense des États-Unis d'Amérique d'un SA particulièrement vigoureux, probablement pour tester ses possibilités limites);

— de 41 mesures Doppler sur satellites Transit, observées en janvier 1987.

La solution retenue est, compte tenu des perturbations sur le système GPS, la moyenne des coordonnées GPS et Doppler. Sa précision absolue est estimée meilleure que 5 mètres en x et y, meilleure que 0,5 m en z (mesures de tirant d'air).

A cette station Paimpolaise ont été rattachées par mesures GPS différentielles (au moins 4 sessions sur cinq satellites pour chaque borne) : Hermine, Noé et Bouton (précision relative des rattachements estimée à 20 cm).

La triangulation secondaire comprend 5 bornes (Altaïr, Aéroport, Caillou, Paradis et Cat) et 4 amers (mât de pavillon, monument aux morts, église de Rotoava et phare de Rotoava). Les coordonnées de ces points sont déduites directement de celles des trois stations principales et de la station de référence; on peut considérer qu'elles aussi sont référencées au système WGS 84.

Deux balises et deux espars marquant le chenal d'accès au mouillage de Rotoava à partir de la passe Garuae et 13 pixels de l'image SPOT 510/382 acquise le 06/05/1989 en mode radiométrique ont été positionnés.

Une station de magnétisme a été observée pendant 24 heures sur le point Cat. L'azimut du méridien magnétique y est de 12° 37,1' E, présentant une anomalie par rapport au modèle mondial WC 85 probablement due à la structure du quai (béton armé).

Deux des repères de nivellement mis en place par la MHPF en 1969 au voisinage de l'observatoire de Rotoava (église 1959 et mur d'enceinte de l'église 1965) ont résisté au temps; leur cote relative a été contrôlée et confirmée. Trois repères nouveaux ont été scellés et nivelés relativement aux anciens repères retrouvés. Aucune observation continue de la marée n'a été faite.

### 3.8.2. Travaux en zone sud

Une station GPS différentielle entre la station Paimpolaise au nord et la station Motu Aito au sud a été acquise le 10 décembre 1989 (quatre sessions à cinq satellites). Les coordonnées ainsi obtenues dans le système géodésique WGS 84 sont cohérentes avec les mesures sur satellites Transit effectuées en 1987 par l'échelon (28 passages validés); l'écart entre les deux jeux de coordonnées est en effet de 1 m en longitude et de 10 m en latitude.

Le réseau géodésique implanté au sud de Fakarava a ensuite été construit à partir du point Motu Aito, à l'aide de mesures d'azimut astronomique et de la longueur d'une base entre les points Motu Aito et Kuokuo. Ainsi le réseau géodésique implanté en



1989 est-il référencé à un système géodésique proche du WGS 84, mais dont l'orientation et l'échelle lui sont indépendantes; il a donc reçu le baptême MOP 89.

La triangulation secondaire comprend 8 stations (Petit Motu, Quasimodo, Henriette, Fa, Miksou, Momet, Popet, Tom). Il n'y a ni balises ni amers sur la côte sud de Fakarava.

Neuf pixels de l'image SPOT 510/383 acquise le 19/07/1988 en mode radiométrique ont été positionnés.

Des repères de nivellement installés par la MHPF en 1959 au voisinage de l'observatoire de Tetamanu, seule la douille scellée dans le bâtiment de l'ancienne prison a résisté au temps et deux repères nouveaux ont été implantés et nivelés relativement à cette douille. Neuf mesures de tirant d'air ont été acquises simultanément entre les observatoires nord et sud. La concordance a permis de confirmer le rattachement effectué par la MHPF sur les séries de 1969 et 1970.

Du fait de la taille de l'atoll, de la durée réduite des travaux et des mauvaises conditions météorologiques, il ne fut pas possible de travailler dans la partie centrale de Fakarava et les bornes du réseau de la MHPF 69 situées dans cette zone (Lumbago, Hoquet, Goitre, Ictère, Fièvre, Entérite, Dengue, Piapia, Nay, KO, Hakono, Hora Hora et Bernard) n'ont pas été recherchées.

### 3.8.3. Rattachement du système MHPF 69 au système WGS 84

Malgré plusieurs missions géodésiques sommaires (Nay de la Mission Géodésique des Tuamotu en 1948, Bonzon de la Mission des Établissements Français d'Océanie en 1954 et 1955, d'Anglejan Chatillon de la Mission Hydrographique en Polynésie Française en 1959, Martin de la Mission Hydrographique de Nouvelle-Calédonie en 1965 et 1966), ce n'est qu'en 1969-70 qu'un véritable système géodésique fut enfin mis en place (Boulard MHPF 69).

Des quatre bornes du réseau MHPF 69 recherchées dans la zone nord : O'Havana, Angine, Bouton et Crise, seule Bouton fut retrouvée. Les autres points non bornés n'ont pu être identifiés par leur seul environnement (Muriel, Passe et François). Enfin les deux amers, phare en construction et église de Rotoava, ont été retrouvés; le mât de pavillon du village de Rotoava de 1989 est situé environ 20 mètres plus au nord que celui origine des triangulations antérieures.

Cinq bornes ont été recherchées dans la zone sud (Quasimodo, Ceinture, Méningite, Azur et Henriette). Seules Quasimodo et Henriette furent retrouvées. Les points Otite et Névrite n'ont pu être formellement identifiés par leur environnement.

Le rattachement des systèmes MHPF et WGS suivant ne tient pas compte du point Henriette, très décalé.

Pour passer des coordonnées MHPF 69 en coordonnées WGS 84 (zone nord de Fakarava) ou MOP 89 (zone sud), il convient d'appliquer aux coordonnées rectangulaires UTM de 1969 :

— une rotation de +6" autour du point Mât de pavillon (coordonnées MHPF 69  $x = 647\,921,89$   $y = 8\,224\,244,56$ );

— une homothétie de facteur 0,999975 depuis le point Mât de pavillon;

— une translation de -302,6 m en  $x$  et de +161,35 m en  $y$ .

La cohérence du rattachement est estimée d'après les résidus observés sur les quatre points communs meilleure que 50 cm.

### 3.9. Tetiaroa

La priorité donnée aux travaux géodésiques prescrits dans l'atoll de Tetiaroa était la plus faible et l'échelon de Polynésie de la MOP ne les aurait inscrits à son programme qu'ultérieurement si son concours n'avait été sollicité par la Station Polynésienne de Télédétection et le CEA (Laboratoire de Géophysique de Pamatai) en vue de recueillir des données de vérité terrain nécessaires à l'exploitation de l'image SPOT 502-384 acquise le 21/07/1986. Les moyens mis en œuvre étaient limités puisqu'à la même période, l'échelon assurait une mission aux Marquises.

Pour réaliser le positionnement absolu de l'atoll, le transit de *L'Estafette* en route pour sa mission aux Marquises était légèrement modifié afin qu'elle soit au voisinage de Tetiaroa le 20 mars 1990. Depuis le point Aito à terre, quatorze relèvements inverses étaient observés sur *L'Estafette* qui suivait la route rectiligne et disposait d'une localisation GPS dans une configuration non dégradée. La précision de la position absolue dans le système WGS 84 de la borne Aito peut être estimée à une quinzaine de mètres.

La longueur de la base Aito-Tiare (cette dernière constituant le terme sud du réseau) a été mesurée indirectement par amplification d'une distance de 42,74 m observée à la stadia suivant une direction à peu près perpendiculaire à la direction des deux bornes et l'orientation du réseau MOP 90 a été déduite d'une observation d'azimut astronomique au théodolite Wild T2, entre les bornes Aito et Tiare.

La triangulation secondaire comprend quatre stations : Dahlia, Camélia, Yucca, David. Neuf pixels de l'image SPOT 502-384 acquise le 21/07/1986 en mode radiométrique ont été positionnés. Il n'y a pas de balise durable à l'intérieur de l'atoll de Tetiaroa et aucun amer visible du large.

En 1953 un réseau géodésique de 10 bornes était implanté par la MHEFO (Mission Hydrographique des Établissements Français d'Océanie). Huit de ces dix bornes ont été recherchées en 1990 et seule David

fut retrouvée. Les bornes Chaussée et Épave n'ont pas été recherchées.

Le rattachement des deux systèmes MHEFO 53 et MOP 90 ne peut donc être réalisé qu'à l'aide du point David sans possibilité de contrôle d'échelle et d'orientation et comme le système MHEFO 53 est un système de coordonnées planes locales, la transformation des coordonnées MHEFO 53 vers MOP 90 est une simple translation de 230 692,5 en  $x$  et de 8 116 669,4 en  $y$ .

La marée a été observée par mesures de tirant d'air relativement à un détail topographique naturel. Une concordance avec la marée observée simultanément à Matavai (Tahiti, observatoire de référence pour les îles du Vent) a montré l'identité des variations de hauteur d'eau à Tahiti et Tetiaroa et a permis de coter le détail topographique origine des tirants d'air.

Quatre profils, destinés à être utilisés pour le calage d'un modèle bathymétrique lors de l'exploitation de l'image SPOT de Tetiaroa, ont été sondés suivant des relèvements constants depuis les stations du réseau MOP 90 et deux d'entre eux ont été entièrement contrôlés par plongeurs. La précision de la localisation optique (deux traversiers) est meilleure que 5 mètres (les observateurs étaient inexpérimentés). Ces données relatives à la topographie et la nature des fonds doivent être utilisées lors des études de modélisation bathymétrique menées par la SPT en collaboration avec la MOP.

### 3.10. Manihi

Les travaux sur l'atoll se sont déroulés en mai 1988 : deux recherches de roches ont été effectuées en complément le 10 avril 1989.

#### 3.10.1. Géodésie

Les travaux géodésiques concernant l'atoll de Manihi se sont déroulés en mai 1988. Un réseau géodésique MOP 88 a été mis en place et 11 points remarquables de la scène SPOT 508-379 du 06/07/1986 ont été repérés sur le terrain, d'après des documents préparés par l'EPSHOM, et positionnés.

Le point fondamental du système MOP 88 (Terme sud) a été positionné à partir de 39 mesures Doppler sur satellites Transit observées en février 1987 par le patrouilleur *La Paimpolaise*. La base Terme sud – Terme nord a été mesurée à l'aide du telluromètre MRA5 et son orientation a été déduite d'une observation d'azimut astronomique au théodolite Wild T3.

Une borne nouvelle (Aéroport MOP 88) et une ancienne borne du cadastre ont été triangulées dans le système MOP 88. En outre quatre balises et quatre amers ont été positionnés.

En 1963, le cadastre avait mis en place un réseau géodésique s'appuyant sur le point astronomique observé par la Mission Géodésique des Tuamotu en

1947. Ce système était le seul en vigueur sur l'île en 1988 et le rattachement géocentrique suivant des systèmes MOP 88 et Cadastre 1963 ne repose que sur un seul point commun. Le vecteur de translation du centre de l'ellipsoïde du système cadastral de 1963 (International) vers le centre de l'ellipsoïde du système MOP 88 (WGS 72) et, dans l'hypothèse d'une translation simple :

$$X = + 133,9 \text{ m}$$

$$Y = + 183,7 \text{ m}$$

$$Z = + 162,4 \text{ m}$$

Le seul repère encore existant de l'observatoire mis en place en 1962 par la MHPF (repère C1) a servi de référence pour la réduction des sondages à Manihi et lors du nivellement des trois nouveaux repères implantés par la MOP en 1988.

#### 3.10.2 Bathymétrie

La planche 8 indique les limites des levés effectués dans la passe de Tairapa (échelle 1:2 500 resserrée à 1:500 aux abords du quai de la passe), à l'ouvert de cette passe (échelle 1:5 000) et dans la marina (1:500). Les sondages dans la marina ont été réalisés en coralline, les autres en vedette.

Une topographie des quais et des platiers coralliens aux abords de la passe a été réalisée à la perche topographique.

La marée a été observée sur un marégraphe Suber SLS 13. Le zéro de réduction des sondes utilisé est le zéro historique de la MHPF en 1962, ce afin de garder une certaine homogénéité aux travaux sur Manihi. Cependant la concordance faite avec les observations du marégraphe Suber SLS 13 immergé sur l'atoll voisin de Ahe indiquait un zéro à Manihi qui se situerait 124 mm sous celui de la MHPF.

### 3.11. Makemo-Aratika-Rangiroa

A Makemo des travaux géodésiques de base et un sondage des abords du quai du village ont été réalisés en juillet 1990.

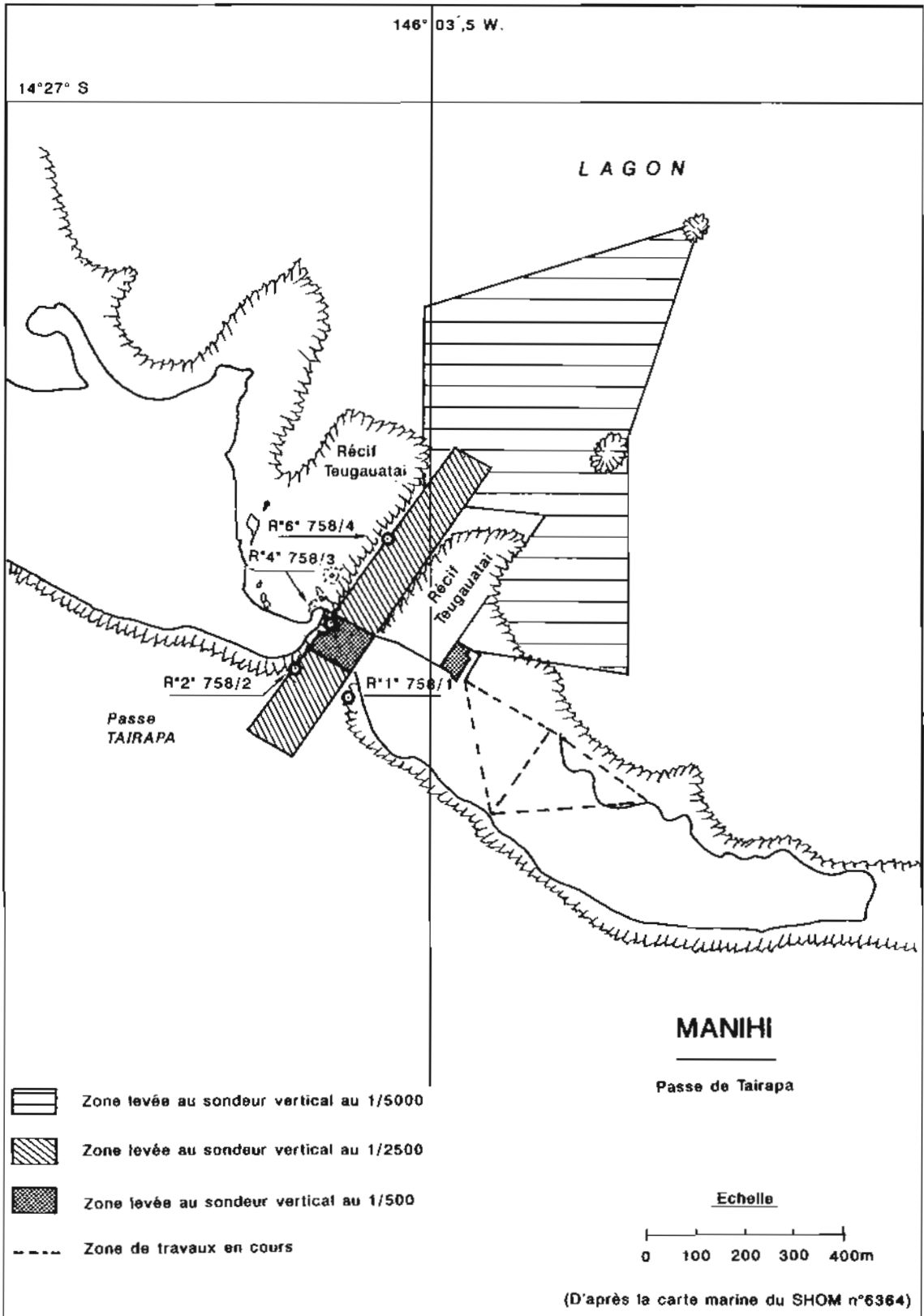
A Aratika les travaux de géodésie de base ont été commencés en mars 1990.

A Rangiroa le sondage des abords du quai d'Uturoa était réalisé en juin 1990.

Ces travaux seront achevés par mon successeur et décrits dans son rapport de mission.

#### 3.12. Levé large

Un levé de reconnaissance autour des atolls des Tuamotu est inscrit au programme de l'échelon de Polynésie de la MOP. Du fait de la surface concernée il est difficile de commencer ce travail systématique indépendamment des autres travaux réalisés. C'est pourquoi à l'occasion des missions géodésiques dé-



Pl. 8.



crites précédemment, un levé de grande sonde a été programmé chaque fois que possible.

L'échelle de base de ce levé est 1:175 000.

Les profondeurs (acquises sur sondeur grands fonds Raythéon) ont été réduites de la célérité observée sur un bathycélérimètre Suber jusqu'à une profondeur de 450 à 1 000 mètres, puis de celle issue des tables « Echo-soundings Correction Tables » troisième édition (1980) au-delà.

Sauf dans le cas de Ahe et Manihi, la direction des profils est sensiblement perpendiculaire à la côte et le retournement de *L'Estafette* se fait à environ 1 000 mètres de celle-ci.

Les quatre zones levées en juillet 1990 sont figurées sur la planche 5.

Les abords de Ahe et Manihi ont été sondés en octobre et novembre 1988. La localisation était faite à l'estime (récepteur Transit et cap/vitesse fournis par les capteurs de *L'Estafette*). La rédaction de la construction et de la minute de sonde fut manuelle et bien que ni la précision de localisation, ni la densité des profils ne le justifient, l'échelle d'écriture fut de 1:175 000 par commodité pour l'exploitation ultérieure.

Les abords de Takaroa ont été sondés en janvier 1989. La localisation était assurée par deux ou trois balises Trident montées sur des mâts de 12 mètres et sommairement rattachées au système MHPF 69 (précision de cinq à dix mètres).

Les abords de Takapoto ont été sondés en février 1990. La localisation était assurée par mesures sur une constellation de satellites GPS où la dégradation SA n'était pas activée.

Le levé de la zone située entre Fakarava, Aratika, Kauhei et Toau a été exécuté en décembre 1989. En l'absence d'une couverture GPS continue (les essais de dégradation menés par le ministère de la défense des États-Unis d'Amérique interdisent d'utiliser les satellites du bloc II), cinq balises Trident ont été installées par groupes de trois sur les côtes nord et nord-est de Fakarava et le levé fut organisé de telle sorte que pendant les créneaux GPS *L'Estafette* sondait en zone large (de nuit) et que de jour elle opérait au voisinage de la côte en localisation Trident.

#### 4. Travaux dans l'Archipel des Australes

Aucun programme d'envergure n'était prescrit à l'échelon dans l'Archipel des Australes, depuis le levé de 1986 à Rapa. Cependant diverses demandes de concours émanant des services techniques territoriaux ont conduit des équipes de la MOP dans les eaux des Australes, avec le concours de bâtiments de la Marine Nationale.

##### 4.1. Rimatara

A la demande du Territoire, l'échelon de Polynésie de la MOP a effectué en juin 1988, avec le concours du patrouilleur *La Railleuse*, des travaux de stéréopréparation.

Pour cela un réseau MOP 88 a été mis en place sur l'ellipsoïde WGS 72, à partir de la base suivante :

- point fondamental Citerne dont la position est déduite de 50 mesures Doppler sur satellites Transit;
- base Citerne-Relais TV observée au distancemètre Wild Distomat DI 1000;
- orientation Citerne-Relais TV déduite d'un azimut astronomique au théodolite Wild T3.

Sept points ont été placés en s'appuyant sur cette base par des mesures avec un appareil Wild T1000/DI1000, dont trois temples utilisés par la Direction de l'Assistance Technique du Territoire pour ses restitutions photogrammétriques.

Le système géodésique de Rimatara était un système de coordonnées planes locales rattachées au point astronomique observé en 1952 par la Mission Géodésique des Tuamotu. La transformation suivante du réseau du cadastre vers le système MOP 88 a été obtenue sur un jeu de 6 points dont les coordonnées sont connues dans les deux systèmes.

- Translation :  $X = 518\,067,60$   
 $Y = 7\,493\,171,97$
- Rotation autour du point Base A :  $-0,14^\circ$
- Homothétie depuis le point Vigie : 0,9996

##### 4.2. Raivavae

Le sondage des abords du quai de Rairua à Raivavae avait été demandé en 1988 par le Service des Ports de Polynésie française et il fut mené à bien, avec le concours du patrouilleur *La Gracieuse*, entre le 20 et le 23 juillet 1989.

Le levé a été conduit à partir d'une coralline équipée d'un sondeur Deso 20, d'une base hors-bord bifréquence Deso 10, localisée par trois théodolites. Deux bornes durables ont été implantées en complément de celles mises en place par la MHPF en 1969 et intégrées dans l'actuel réseau du Service des Phares et Balises.

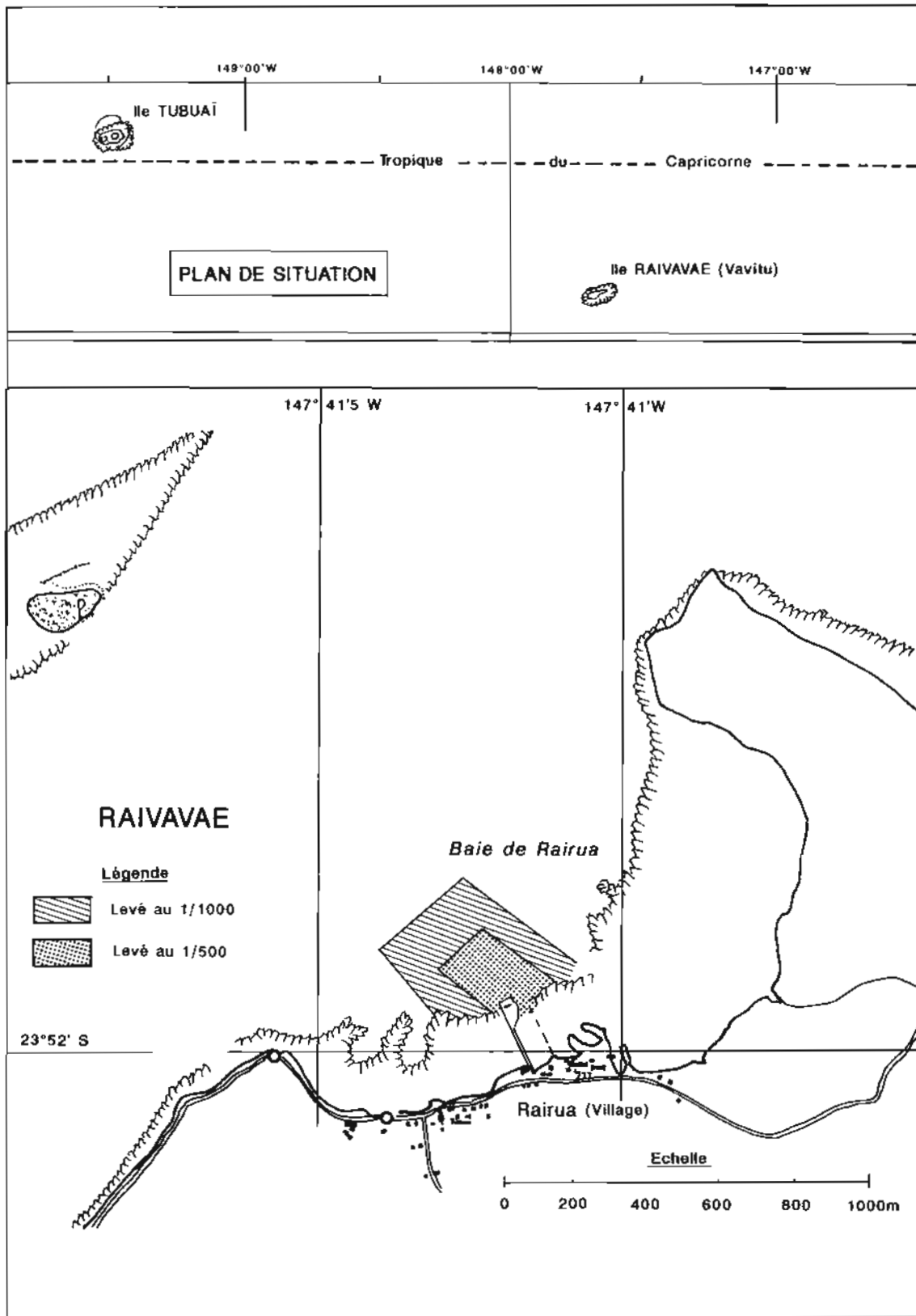
Les travaux sont rédigés en projection UTM, fuseau n° 6, sur l'ellipsoïde international dans le système MHPF 66.

Le levé a été réalisé à l'échelle 1:500 au voisinage du quai et au 1:1 000 pour les fonds plus importants (pl. 9).

Six remontées de fond ont été contrôlées par plongeurs.

La marée fut observée sur un marégraphe Suber SLS 13, immergé à l'aplomb du quai. Le calage du zéro instrumental a été déduit de mesures de tirant d'air relativement au repère R3 implanté en 1967 par





Pl. 9

la MHPF. Ce repère étant le seul retrouvé de l'observatoire de février 1967, quatre repères complémentaires ont été scellés et nivelés. Le zéro de réduction des sondes adopté est le zéro historique, déterminé en 1954 par le LV Bonzon.

La topographie des abords du quai a été levée avec des moyens classiques (perche et optique) et complétée avec une restitution de photographies aériennes; la nature des fonds a été déterminée soit à vue, soit par plongeurs.

#### 4.3. Tubuai

Le sondage des abords du quai de Mataura à Tubuai avait également été demandé en 1988 par le Service des Ports de Polynésie française afin de pouvoir contrôler son ensablement. Il fut réalisé à la suite de celui de Raivavae, avec le concours du

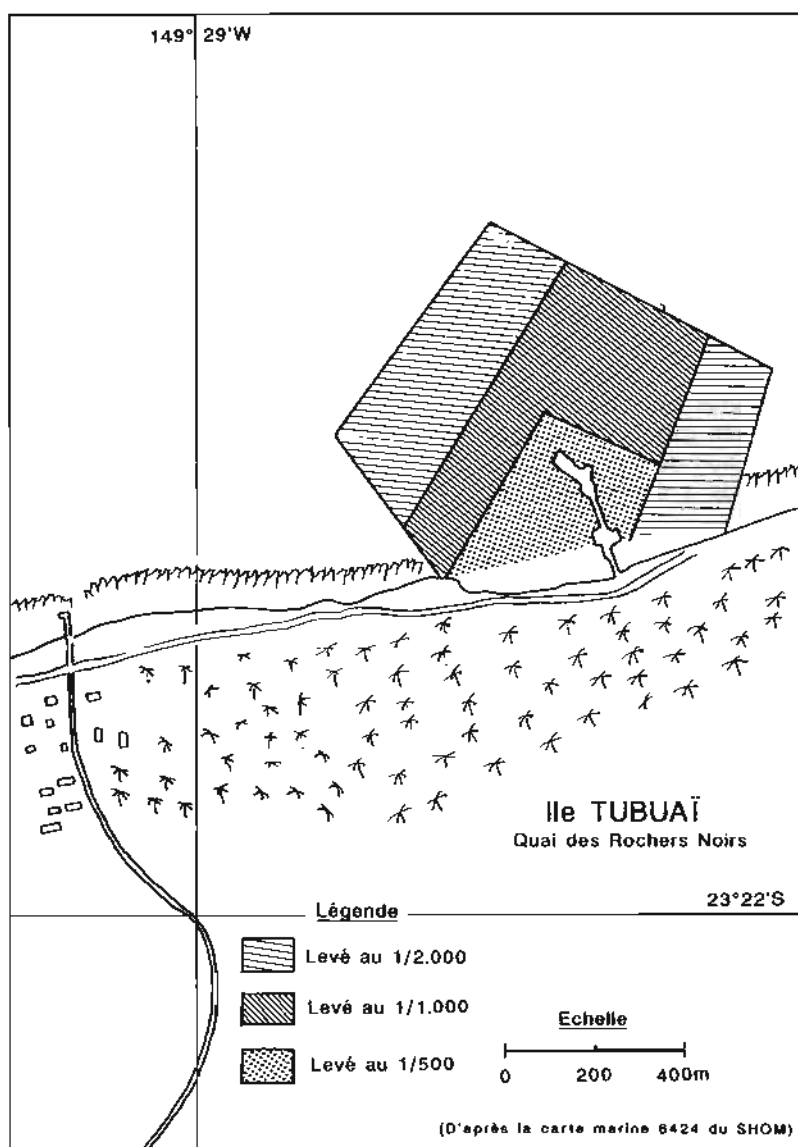
patrouilleur *La Gracieuse*, entre le 24 et le 27 juillet 1989.

Les moyens de localisation et de sondage utilisés sont les mêmes qu'à Raivavae.

Une borne durable a été implantée en complément de celles mises en place par la MHPF en 1969 et intégrée dans l'actuel réseau du Service des Phares et Balises, et un amer figurant déjà sur la carte marine repositionné.

Les travaux sont rédigés en projection UTM, fuseau n° 6, sur l'ellipsoïde international dans le système MHPF 69.

L'ensemble du levé n'a pu être réalisé conformément à la demande du Service des Ports à l'échelle 1:500. Priorité a été donnée au levé du quai (1:500) puis à ses abords immédiats (1:1 000), les zones extérieures étant sondées au 1:2 000 (cf. pl. 10).



Pl. 10.

Cette densité de profils permet une détection des relèvements de fonds satisfaisante pour les abords du quai, mais seulement une représentation fine de la morphologie des fonds dans la zone levée au 1:2 000.

Une prospection à vue à travers l'eau très claire a permis de repérer quinze remontées de fond qui ont ensuite été contrôlées par plongeurs.

Outre les quinze recherches effectuées par plongeurs, 21 relèvements de fond ont été observés sur les bandes de sonde qui auraient pu faire l'objet d'une recherche particulière (remontées supérieures à 10% de la profondeur).

La profondeur moyenne de la zone de sondage est de 4 m, partout inférieure à 5 mètres, et le fond sablonneux est parsemé de blocs coralliens; le nombre important de recherches potentielles est donc logique. Il ne fut pas matériellement possible de les mener à bien pendant les journées de sondage de juillet 1989 (concours extérieur de durée limitée, exploitation partielle en temps réel des données acquises...).

La marée a été observée sur un marégraphe Suiber SLS 13, immergé à l'aplomb du quai. Le calage du zéro instrumental a été déduit de mesures de tirant d'air relativement au repère R implanté en 1969 par la MHPF. Ce repère étant le seul retrouvé de l'observatoire utilisé en 1969, deux repères complémentaires ont été scellés et nivelés. Le zéro de réduction des sondes adopté est le zéro historique, déterminé en 1969 (cf. *Annales Hydrographiques*, n° 739 - 1972).

La topographie des abords du quai a été levée avec des moyens classiques (perche et optique) et complétée avec une restitution de photographies aériennes; la nature des fonds a été déterminée soit à vue, soit par plongeurs.

## 5. Travaux dans l'Archipel de la Société

Dans cet archipel comme pour celui des Australes, il n'y a pas de programme systématique prescrit à l'échelon. Les travaux qui ont été achevés entre novembre 1988 et juillet 1990 sont le plus souvent des concours accordés à des services techniques territoriaux, et en particulier au Port Autonome de Papeete avec lequel une convention permanente d'exécution de petits travaux a été signée.

### 5.1. Levé au large de la côte sud-est de Tahiti

Des instructions techniques datant de mars 1972 prescrivait la réalisation de levés au large de Tahiti, destinés à fournir les éléments nécessaires à l'établissement des cartes au 1:25 000 des ap-

proches de l'île. Les travaux avaient débuté en 1974 et s'étaient poursuivis en 1976, 1977 et 1978. Seule la coupure indiquée sur la planche 11 restait à lever, ce qui fut fait en février et mars 1989 par l'échelon Polynésie de la MOP.

Cette interruption de dix années peut probablement s'expliquer par l'absence d'une structure hydrographique permanente en Polynésie jusqu'en 1986. La côte sud de la presqu'île de Tairapu est en effet dépourvue de toute infrastructure terrestre (route, piste, ou même sentier) et d'accès malaisé depuis la mer (la côte très exposée à une mer généralement forte n'est pas partout abritée par une barrière corallienne). L'expérience de la MHPF qui avait mis plus de cinq mois en 1973 pour effectuer le levé côtier jouxtant le levé large présenté ici, a probablement conduit à différer l'achèvement des travaux prévus.

De fait, les conditions de travail furent souvent difficiles lors des travaux de géodésie préliminaires, pour l'installation et la maintenance d'un réseau Trident et pour la manœuvre de *L'Estafette* au voisinage d'un récif souvent immergé.

#### 5.1.1. Géodésie (cf. pl. 12)

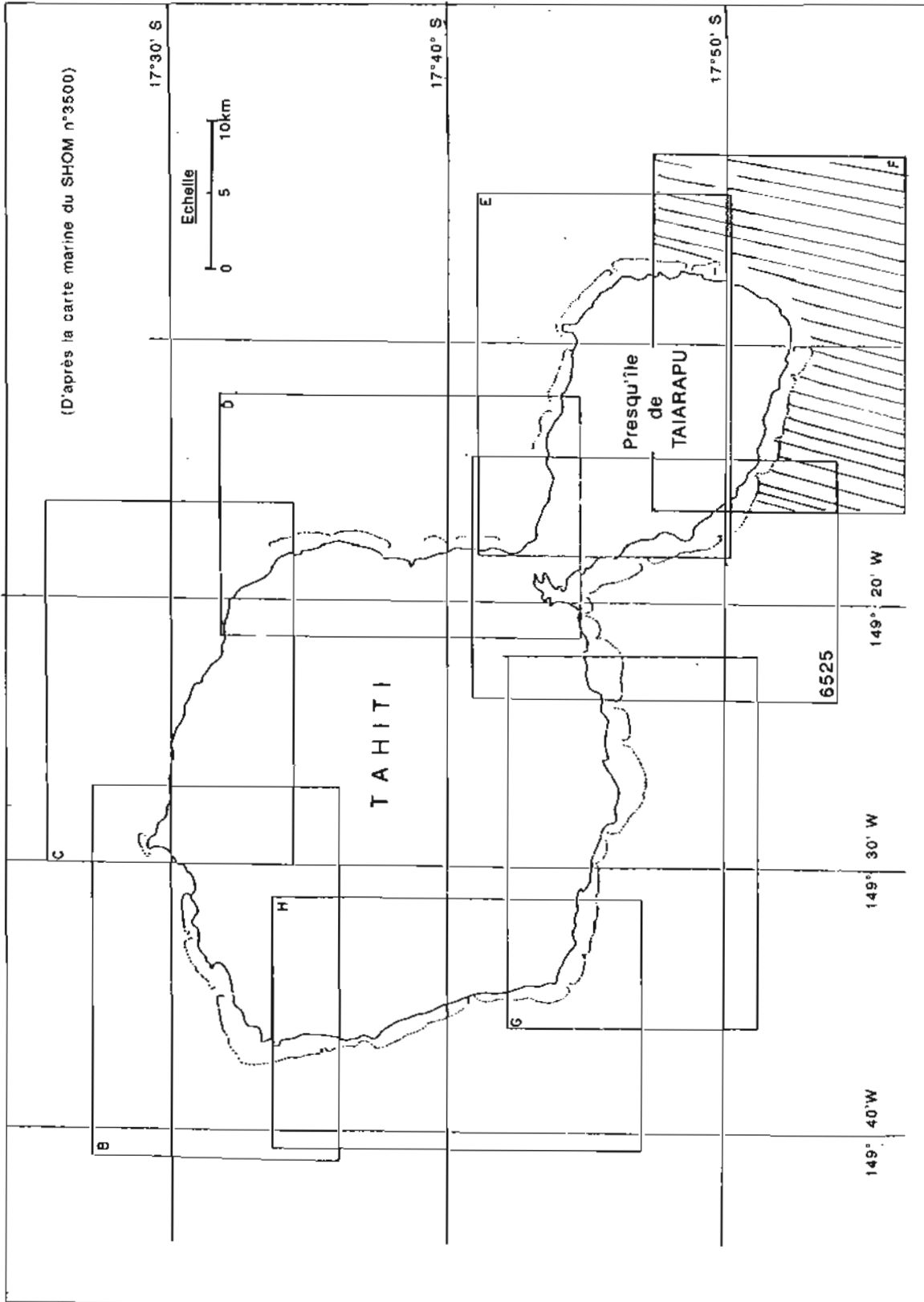
##### 5.1.1.1. Historique succinct

Pour réaliser en 1973 son levé côtier, la MHPF avait construit un réseau de points géodésiques rattachés au système IGN en vigueur (baptisé IGN 51-54, parfois IGN 52-54, ou encore IGN 52). Ce réseau avait été établi par mesures au théodolite Wild T3 et au telluromètre MRA5, en deux cheminements. L'un partait du nord depuis le point Aline (MHPF 1966, rattaché au réseau IGN 51-54), l'autre de l'ouest depuis le point IGN 106; un cheminement unique entre les deux extrémités était impossible, une portée très courte entre Azen et Terurua étant imposée par le relief. La comparaison au point Azen des deux cheminements mettait en évidence une erreur de plus de deux mètres, mais considérant la mauvaise homogénéité du réseau IGN de Tahiti, cette erreur ne fut pas répartie.

Cette mauvaise homogénéité du réseau IGN a été de nouveau observée en 1979 par la MOP, puisque la fermeture d'une polygonale ceinturant l'île principale de Tahiti était de deux mètres et, à la demande du Territoire, l'IGN compensait en 1979 le réseau géodésique attaché à Tahiti définissant ainsi un nouveau système de coordonnées (baptisé ici IGN 79).

En 1982 le Service de l'Aménagement du Territoire étendait la compensation de 1979 à divers points situés sur la presqu'île de Tairapu, mais sans y inclure les bornes installées par la MHPF en 1973 dans sa partie sud; le réseau fut baptisé IGN 82.

On disposait donc en 1989 d'un ensemble disparate de coordonnées où des points IGN 51-54, IGN 79, IGN 82, MHPF 66 et MHPF 73 voisinaient dans la presqu'île de Tairapu.



Pl. 11.





### 5.1.1.2. Déroulement des travaux géodésiques de 1989

Les travaux géodésiques de 1989 se sont déroulés en deux temps :

- du 6 février au 1<sup>er</sup> mars pour déterminer les implantations et les coordonnées des stations Trident nécessaires au levé bathymétrique;

- du 4 au 30 août, des mesures complémentaires (contrôles d'azimuts, GPS) ont permis d'adopter un ensemble de coordonnées cohérent.

La quasi totalité des bornes MHPF 1973 avait été balayée par les cyclones de 1982 et seules les bornes Dupont et Fenuaino ont été retrouvées en assez mauvais état. Un réseau entièrement nouveau a donc été bâti. Un cheminement analogue à celui de 1973 a été réalisé et comme en 1973, une importante erreur de fermeture fut constatée à la station charnière de Terurua (plus de deux mètres), alors qu'un calcul d'erreur montrait que la qualité des observations aurait dû apporter un résultat de meilleure qualité.

L'erreur observée à Terurua a conduit à mettre en doute la cohérence des coordonnées des deux extrémités du cheminement : Aline et Balise de Matahihae (cette balise avait été rattachée en 1977 à la borne Matahihae de 1973, et contrairement à cette dernière, avait résisté aux cyclones).

Une série d'observations GPS différentielles a été réalisée en août 1989 entre deux stations proches d'Aline et Matahihae afin de lever le doute existant. L'ensemble des mesures a alors été rejoué avec les nouvelles coordonnées de la station de départ à l'ouest et la fermeture à Terurua a été réduite à 0,6 m en  $x$  et 0,2 m en  $y$ . Cette erreur a été répartie.

Il convient de remarquer que le réseau IGN de Tahiti Nui compensé en 1982, intégrait la borne Aline mais aucune station de la côte ouest. La mesure GPS différentielle a permis de rétablir la cohérence entre les deux côtes et on peut considérer désormais que Tahiti est couvert par un réseau cohérent de points géodésiques bornés.

Néanmoins, et afin de ne pas apporter de confusion supplémentaire dans les réseaux géodésiques de Tahiti, l'ensemble des points positionnés en 1989 et l'ensemble des documents rédigés sont référencés à un système baptisé MOP 89.

### 5.1.1.3. Résultats

Les coordonnées adoptées en 1989 sont données en annexe 6. Entre les coordonnées provisoires des émetteurs Trident arrêtés en mars 89 et utilisées pour le levé bathymétrique, et leurs coordonnées définitives MOP 89, l'écart maximal est de 3 m. La localisation temps réel du sondage n'a donc pas été rejouée.

Les bornes principales mises en place en 1989 sont des blocs de fibrociment scellés dans le platier par des tiges en métal torsadé s'y enfonçant à plus de 50 cm. Elles méritent l'appellation de durable,

mais les conditions météorologiques rencontrées dans la presqu'île sont redoutables et il est difficile d'affirmer qu'elles résisteront davantage que les blocs de ciment de 0,2 m<sup>3</sup> installés en 1973 par la MHPF.

Pendant la période des travaux de février, une équipe du Service des Phares et Balises du Territoire était en mission dans le sud de la presqu'île. Les deux équipes MOP et Phares et Balises ont uni leurs efforts et leurs mesures et 74 balises implantées en novembre 1988 ont été positionnées. Leurs coordonnées sont fournies dans les répertoires des établissements de la signalisation maritime (ESM) établis par le Service des Phares et Balises du Territoire, dans un système géodésique qui ne prend pas en compte les mesures GPS effectuées : pour obtenir avec une précision d'environ 50 cm leurs coordonnées dans le nouveau référentiel MOP 89 il faut leur appliquer une translation de  $-1,75$  m en  $x$  et de  $+1,60$  m en  $y$ .

Il n'y a pas d'amers visibles du large, sur la côte sud de la presqu'île de Taiarapu.

### 5.1.2. Levé bathymétrique

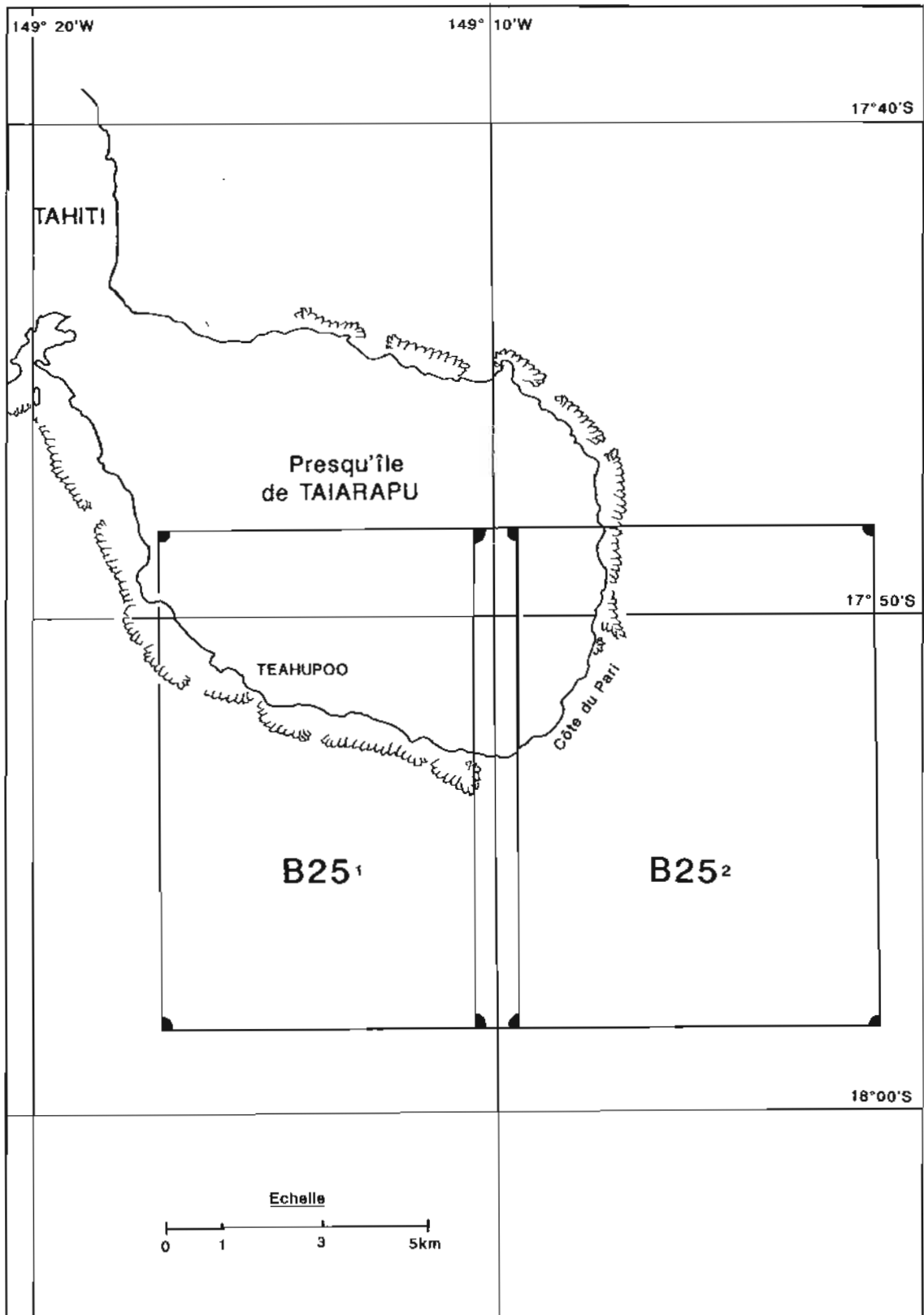
La localisation de *L'Estafette* et de la vedette en sondage a été déterminée à partir d'au moins 3 et le plus souvent 4 balises Trident implantées régulièrement le long de la côte; les aériens de ces balises, toutes implantées à faible altitude, étaient montés sur des mâts de 12 mètres afin d'une part d'augmenter la portée radioélectrique, d'autre part de limiter les risques de réflexion sur les falaises proches.

Le levé bathymétrique a été réalisé du 20 au 24 février, puis du 27 février au 3 mars; son emprise est figurée sur la planche 13. Les profils réguliers étaient orientés à peu près perpendiculairement aux isobathes, sauf dans la zone la plus sud du levé; ils approchent la barrière corallienne à environ 750 mètres et sont espacés de 250 mètres.

En plus du levé régulier, dix profils parallèles à la côte réalisés par *L'Estafette* et quatre par vedette dans la bande de 750 mètres au large de la barrière, ont permis de recueillir des sondes dans la zone la plus côtière et donc d'établir la continuité avec les travaux de 1973.

A bord de *L'Estafette*, les profondeurs ont été observées sur un sondeur grands fonds Raythéon et réduites des corrections de célérité observées sur bathycélérimètre Suber SLS 21 jusqu'à une profondeur de 900 mètres, puis de celles issues des tables « Echo-soundings Correction Tables » troisième édition (1980) au-delà. En vedette, les sondes ont été observées sur sondeur Atlas Deso 20. Elles sont réduites des corrections de célérité observées sur bathycélérimètre Suber SLS 21.

Comme au cours des précédents sondages, aucune sonde n'a été réduite de la marée : l'erreur en résultant est inférieure à 0,4 mètre (période de M.E.).



Pl. 13.

Outre les deux bornes Dupont et Fenuaino, quatre points anciennement positionnés par le SHOM ont été retrouvés.

## 5.2. Levé hydrographique dans le chenal compris entre la passe de Taapuna et Papeete

Ce levé répond à une demande du Port Autonome de Papeete (PAP), mais considérant l'intérêt pour la navigation en général que représente la zone à hydrographier, il n'a pas été réalisé dans le cadre de la convention onéreuse liant le SHOM et le PAP.

Les travaux ont été échelonnés sur un an. La partie principale a été conduite du 27 juin au 4 août 1988, mais l'analyse des documents au cours de la rédaction a montré que quelques compléments étaient nécessaires, compléments qui furent menés à bien le 23 juin 1989. Le contrôle et le complètement des minutes de topographie établies par le Bureau Photogrammétrie de l'EPSHOM ont été faits les 23 juin, 27 juillet et 3 août 1989.

Au cours de la première partie de ce levé une nouvelle chaîne de traitement (avec en particulier acquisition de la sonde numérique) a été mise en œuvre, ce qui explique la durée importante du levé.

Les travaux de géodésie nécessaires au positionnement des embarcations porte-sondeur ont été limités à une simple triangulation complémentaire dans le système IGN 51-54, sans implantation de borne durable.

A la réception des documents de restitution du Bureau Photogrammétrie de l'EPSHOM, en juin 1989, les données relatives à l'existence, à la description et au classement de dix-sept amers repérés sur les photographies aériennes ont été recueillies sur le terrain en même temps que le contenu thématique des documents était contrôlé, complété et validé.

Quatre balises Trident ont été implantées sur la côte ouest de Tahiti entre Punaauia et Papeete, et une sur la côte nord-est de Moorea. Un étalonnage optique a été réalisé, dont les résultats médiocres ont conduit à mettre en place une localisation à trois lieux optiques dans les zones levées à une échelle supérieure à 1:5 000.

La marée a été observée pendant toute la période des sondages sur deux marégraphes Suber SLS 13 immergés le long des quais l'un de la marina la Orana Villa (pour la réduction des sondes dans le lagon de Punaauia) et l'autre de la base marine de Fare Ute (pour la réduction des sondes dans le chenal de Faaa).

La zone sondée est représentée sur la planche 14. Elle peut être découpée en plusieurs sous-zones :

*Chenal entre la passe de Taapuna et le port de Papeete (englobe le chenal de Faaa et le lagon de Punaauia)*

Le chenal a été levé en vedette à l'échelle 1:5 000 et exploré intégralement au sondeur latéral suivant des profils axiaux.

Les nombreux relèvements de fond détectés ont été contrôlés par recherches au sondeur vertical (30) ou par plongeurs (4).

### *Baie de Vai Tupa*

Malgré les nombreux voiliers mouillés, la baie a été sondée entièrement en vedette à l'échelle 1:2 000.

### *Baie au sud de la pointe Tataa à Outu Maoro*

Connue aussi sous le nom de baie du Maeva, cette zone de mouillage pour voiliers de plaisance a été sondée en coralline équipée d'un sondeur Atlas Deso 10, à l'échelle 1:2 000.

De nombreux pâtés de corail avaient été déroctés ou arasés par le Service de l'Équipement du Territoire (Phares et Balises) et le levé réalisé a permis de contrôler les résultats de ce travail.

### *Passe de Taapuna*

La passe de Taapuna a été levée avec des profils espacés de 10 mètres, resserrés au niveau du seuil. Malgré cette densité, l'échelle de rédaction retenue est 1:2 000 pour rester en accord avec la précision de localisation et la qualité du suivi des profils.

La nature superficielle du fond a été déterminée par prélèvements à la benne légère ou à vue par plongeurs.

## 5.3. Travaux à Bora Bora

### 5.3.1. Levé en baie de Faanui

La baie de Faanui est vaste, bien abritée et dispose déjà de deux infrastructures portuaires :

- le quai de Farepiti qui est le terminal des ferries assurant les liaisons maritimes régulières avec les îles Sous-le-Vent;

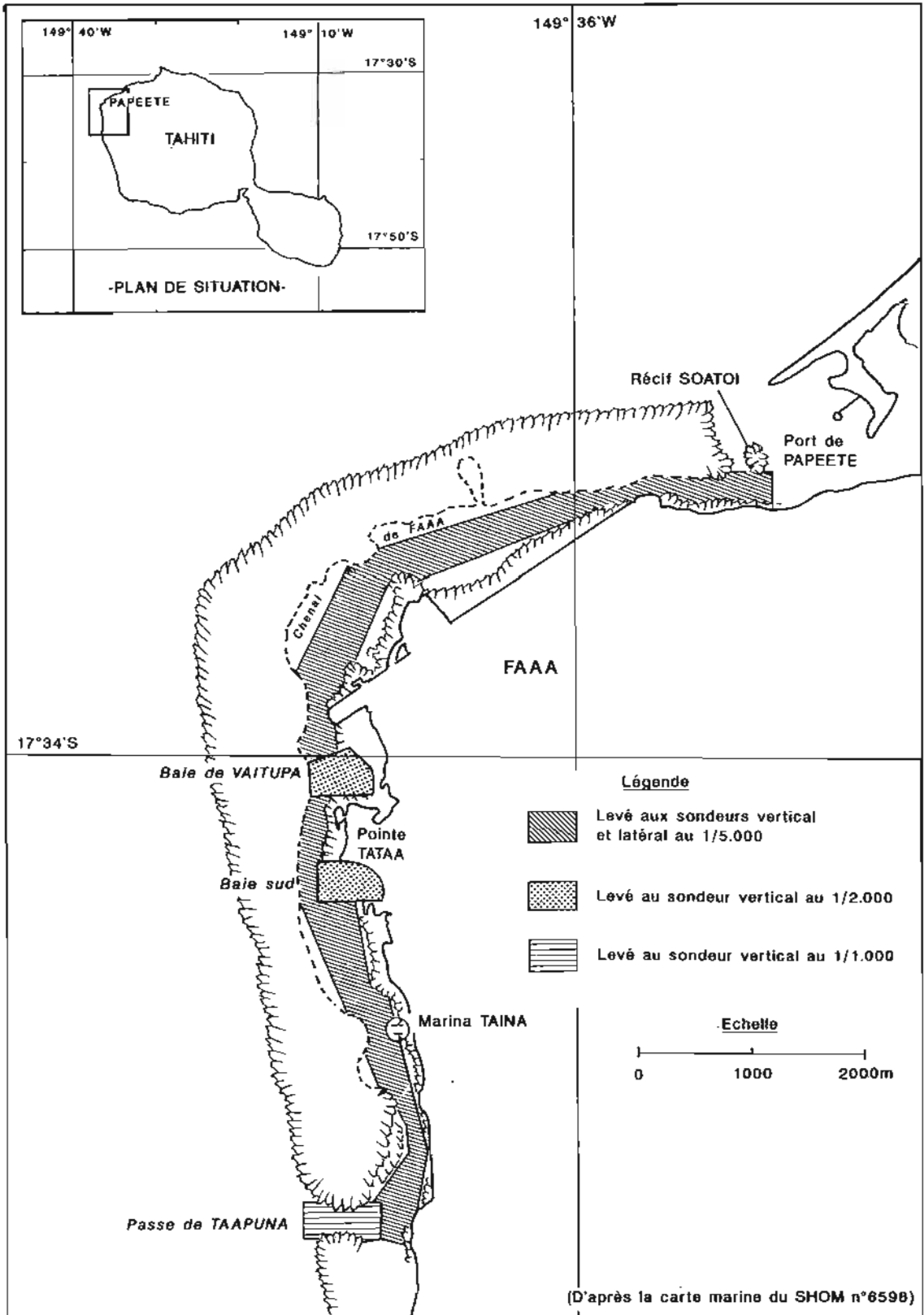
- le quai des Américains, construit pendant la deuxième guerre mondiale, en état de délabrement.

Le Service de l'Équipement de Polynésie française préparant une étude pour installer éventuellement un dépôt d'hydrocarbures, a demandé et obtenu le concours de la MOP pour effectuer un levé bathymétrique de la baie et des abords de ses deux quais.

Les travaux ont débuté en février 1989, en même temps que l'échelon de Polynésie organisait un stage d'hydrographie au profit du Groupe École d'Application des Officiers de Marine; l'intégration d'officiers élèves dans les équipes de sondage avait bien entendu considérablement perturbé le bon déroulement des travaux et une mission complémentaire a été nécessaire en août 1989.

Les travaux de géodésie ont été limités au rattachement par rapport au réseau IGN 51-54 existant, des stations optiques et Trident utilisées. Seuls quatre points nouveaux ont été bornés durablement et un amer a été triangulé.





Pl. 14.

Les travaux ont été rédigés dans le système IGN 51-54, en projection UTM fuseau n° 5, sur l'ellipsoïde international.

La localisation fut optique (3 lieux).

La marée a été observée :

— du 03 au 09 février 1989 sur deux marégraphes Suber immergés à l'aplomb des quais de Vaitape et de Farepiti;

— les 21 et 22 août 1989 sur un marégraphe Suber immergé à l'aplomb du quai de Vaitape;

— régulièrement par mesures de tirant d'air faites relativement au repère C de l'observatoire établi en 1989 à Vaitape.

A Vaitape, les repères R1 et R4 de l'observatoire établi en 1964 par la MHPF (fiche MOP datée du 24 juin 1986) ont disparu. Restent les repères R2, R3 (rebaptisés respectivement B et A dans la fiche d'observatoire établie en 1989) décrits sur la fiche de l'observatoire de 1986 et le 9° organeau (rebaptisé D dans la fiche d'observatoire de 1989) de la fiche *Jeanne d'Arc* 1982.

Suites aux analyses menées par la Section Océanographie de l'EPSHOM, la cote du zéro hydrographique utilisée pour la réduction des travaux de 1989 est située 5,7 cm au-dessus du zéro de 1964.

Cinq repères sont implantés et cotés.

Le levé bathymétrique en vedette de la baie de Faanui proprement dite a été effectué à l'échelle 1:5 000, avec contrôle des fonds au sondeur latéral. Les quais ont été sondés en coralline à l'échelle 1:1 000 (quai des Américains) et 1:500 (quai de Farepiti) (cf. pl. 15).

Deux recherches de roches ont été faites par plongeurs, une troisième à vue avec une perche topographique.

Les quais ont été topographiés au 1:1 000 par des perches régulièrement positionnées et en s'appuyant sur les documents établis par le Service de l'Équipement du Territoire. Des sondes ponctuelles ont été mesurées le long des quais au sondeur à main Hondex.

En baie de Faanui, le trait de côte figurant sur la minute établie au 1:5 000 en 1988 par le Service de l'Urbanisme du Territoire, d'après des photographies aériennes datant de 1987, a été contrôlé et les limites du platier de la baie ont été obtenues par des perches topographiques.

La nature superficielle des fonds a été observée régulièrement soit par plongeurs, soit à vue dans les fonds les plus faibles; partout, hors des limites du platier corallien, le fond est un mélange de sable et de vase.

### 5.3.2. Levé des abords du quai de Vaitape

Le levé des abords du quai de Vaitape à Bora Bora a été réalisé le 4 août 1989 en réponse à une

demande du Service des Ports de Polynésie française.

Le sondage a été conduit à partir d'une coralline équipée d'un sondeur Deso 20, d'une base hors-bord bi-fréquence Deso 10, et d'un ensemble Hydrac. La localisation était optique et la marée utilisée fut celle décrite au paragraphe 5.3.1 (observatoire de Vaitape).

Les travaux sont rédigés en projection UTM, fuseau n° 5, sur l'ellipsoïde international dans le système IGN 51-54. la zone figurée sur la planche 15 a été sondée au 1:500. Cette densité de profils permet une détection des relèvements de fonds satisfaisante pour les abords du quai, et aucune recherche de roche n'est apparue nécessaire à l'analyse des bandes de sonde. Un contrôle des fonds situés au droit du quai vers l'ouest, réalisé par plongeurs sur une bande de 15 m de large, n'a révélé lui non plus aucun détail remarquable émergeant de la morphologie générale. Cependant divers bateaux empêchaient l'accès à la partie sud du quai et une petite surface est ainsi insuffisamment traitée.

La topographie des abords du quai a été levée avec des moyens classiques (perche et optique) et la nature des fonds a été déterminée soit à vue soit par plongeurs; partout le fond est un mélange de sable et de vase.

### 5.3.3.

L'ouvert des passes de Bora Bora a été sondé à une échelle variant du 1:25 000 au 1:100 000 par *L'Estafette* entre le 4 et le 8 février 1989, suivant des profils rectilignes (cf. pl. 16). Les profondeurs ont été observées sur un sondeur Raythéon et réduites des corrections de célérité observées avec un bathycélérimètre Suber SLS 21.

La localisation était assurée par deux ou trois lieux Trident (lorsque seuls deux lieux étaient exploitables, l'estime de *L'Estafette* assurait un contrôle).

L'ensemble du levé a été rédigé à l'échelle 1:100 000.

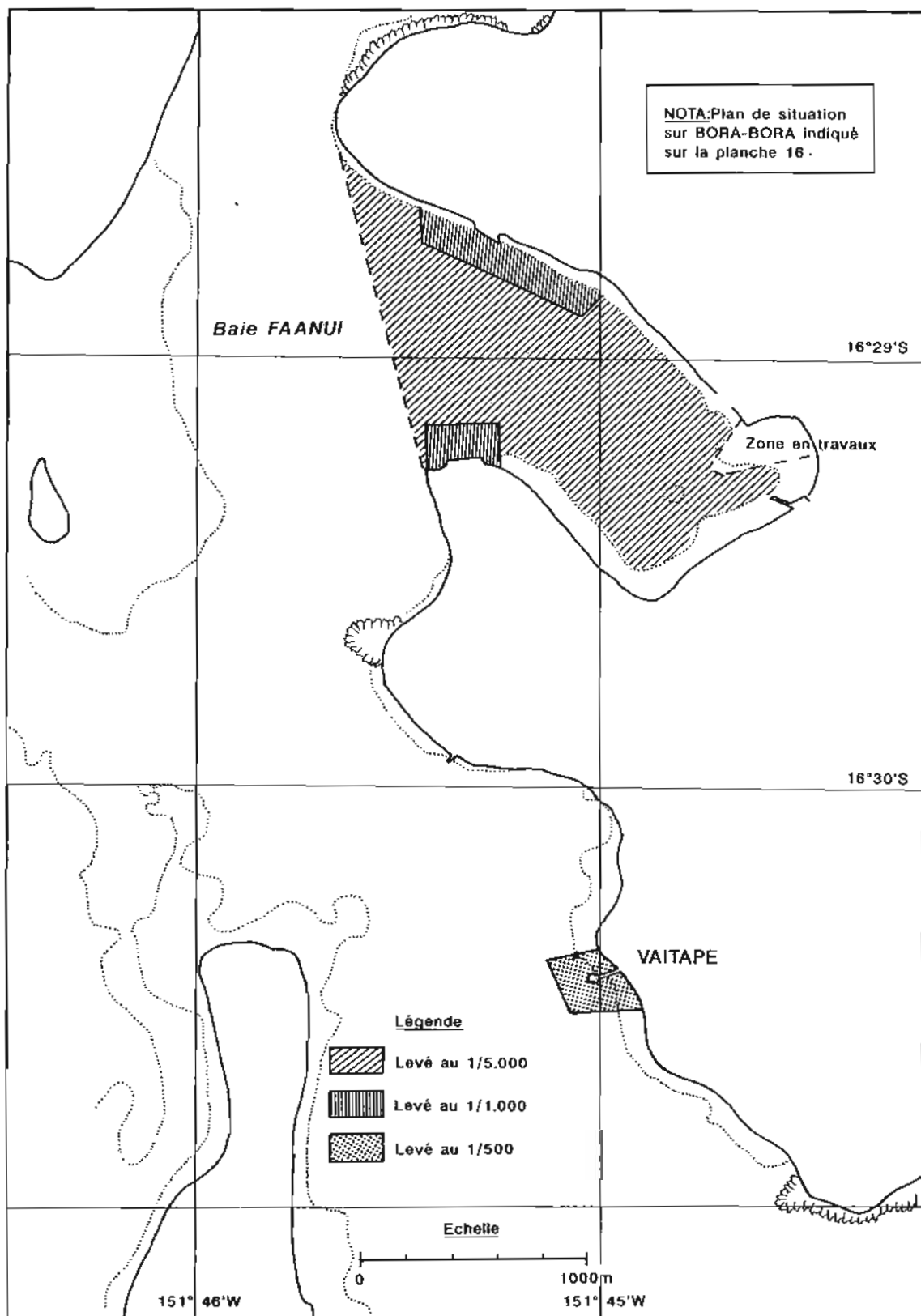
## 5.4. Travaux à Moorea

### 5.4.1. Sondage du quai de Papetoai et du chenal d'accès en venant de la passe Tareu

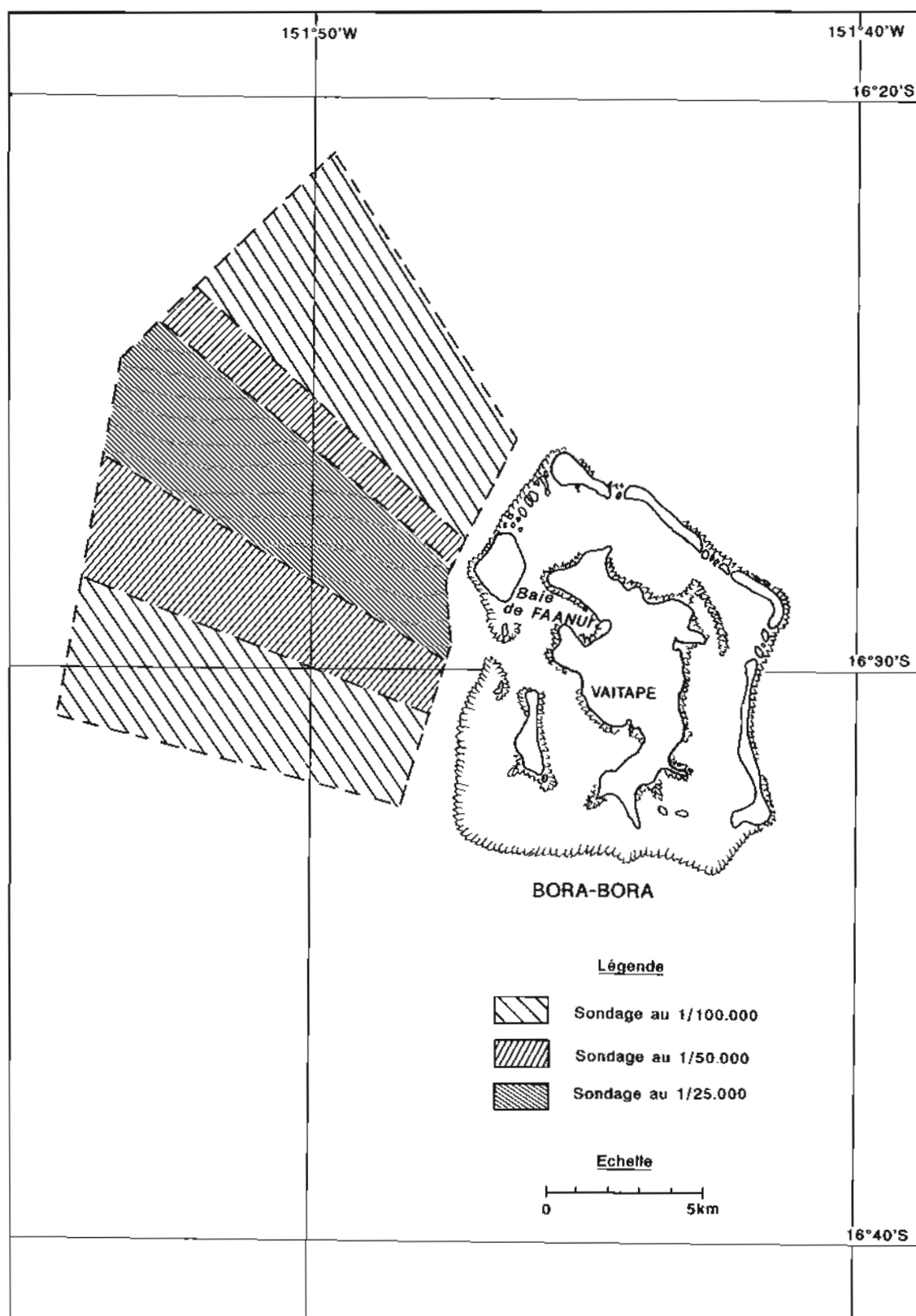
En réponse à une demande du Service des Ports, un levé bathymétrique entre la passe Tareu et les abords du quai de Papetoai a été réalisé à Moorea en juillet 1989.

L'objet du levé aux abords de la passe Tareu étant de vérifier les fonds après déroctage, un contrôle de la passe au sondeur latéral effectué le 15 mars 1990 a complété et achevé les travaux de juillet 1989.

Le matériel nécessaire au levé (coralline, moteurs hors-bord, sondeurs, équipement de géodésie,



Pl. 15.



Pl. 16.



Dangel, transmissions...) fut transporté par ferry et une équipe autonome a séjourné sur l'île du 3 au 7 juillet.

La localisation fut optique sauf dans la darse où l'on eut recours à la cordelle.

Les travaux sont rédigés en projection UTM, fuseau n° 6, sur l'ellipsoïde international dans le système IGN 52.

La marée a été observée régulièrement par mesures de tirant d'air depuis le repère R2 de la fiche d'observatoire de Papetoai daté du 16 mai 1990.

La densité des profils du levé aux abords de la passe Tareu est satisfaisante pour une échelle de 1:2500, et tous les fichiers intermédiaires ont été traités à cette échelle. L'ensemble des travaux fut néanmoins rédigé au 1:5000, conformément à la demande du Service des Ports.

Les fonds rencontrés sont réguliers et aucune recherche de roche n'est apparue nécessaire, malgré la densité des profils du sondage régulier et le levé de contrôle au sondeur latéral.

Les travaux topographiques autour de la passe Tareu ont été limités à un contrôle de la minute 70 15<sup>5</sup>, qui s'est avérée satisfaisante.

Les abords du quai de Papetoai ont été sondés à l'échelle 1:500, et la darse proprement dite au 1:250 (cf. pl. 17). Les fonds sont très réguliers. La topographie des abords du quai a été obtenue en s'appuyant sur les plans topographiques des services territoriaux contrôlés par un report des points positionnés par l'échelon et les informations recueillies en coralline lorsqu'elle a effectué des profils au ras du platier.

La topographie de la darse a été obtenue par triangulation des angles des quais.

#### 5.4.2. Sondage des abords du quai de Paopao

Les abords du quai de Paopao à Moorea ont été sondés le 6 juillet 1989 toujours en réponse à une demande du Service des Ports. Ce levé a été réalisé à l'occasion des travaux décrits dans le paragraphe précédent.

L'embarcation porte-sondeur était localisée par trois théodolites et les travaux ont été rédigés en projection UTM, fuseau n° 6, sur l'ellipsoïde international dans le système géodésique IGN 52.

La zone figurée sur la planche 18 a été sondée à l'échelle 1:500. Aucune recherche de roche ne fut nécessaire. La marée a été observée régulièrement par mesures de tirant d'air depuis l'embase du point Bollard à Paopao. Des mesures de tirant d'air simultanées avec le repère R2 de Papetoai (cf paragraphe précédent) ont permis d'une part de déterminer la cote de cette embase, d'autre part de confirmer que la marée était la même à Paopao et Papetoai (aux imprécisions des mesures de tirant d'air près).

La topographie est déduite de mesures à la perche, de routes suivies par la coralline au ras du

platier et des documents du Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme.

#### 5.5. Tahaa

Le sondage de la baie de Tapuamu et des abords du quai du village Tapuamu à Tahaa avait été demandé en 1988 et 1989 par le Service des Ports de Polynésie française; les travaux géodésiques préliminaires ont eu lieu en novembre 1989 et le levé a été réalisé avec le concours du patrouilleur *La Tapaieuse* entre le 4 et le 9 février 1990.

Le levé a été réalisé à l'échelle 1:2500 dans la baie et 1:500 pour les abords du quai (cf. pl. 19). Cette densité de profils permet une détection des relèvements de fonds satisfaisante pour les abords du quai, et une représentation fine de la morphologie des fonds dans la zone levée au 1:2500.

Six recherches de roches ont été effectuées par plongeurs d'après l'analyse des bandes de sonde, et une investigation à vue a été menée en coralline sur l'ensemble de la zone.

Le sondage a été conduit à partir d'une coralline équipée d'un sondeur Deso 20, d'une base hors-bord bi-fréquence Deso 10, et d'un ensemble Hydrac. La localisation fut optique. La topographie a été levée avec des moyens classiques (perche et optique).

Sept bornes durables et une station provisoire matérialisée de façon peu durable ont été implantées et positionnées dans le système IGN 1951-52. Trois amers et cinq balises ont été positionnés et décrits.

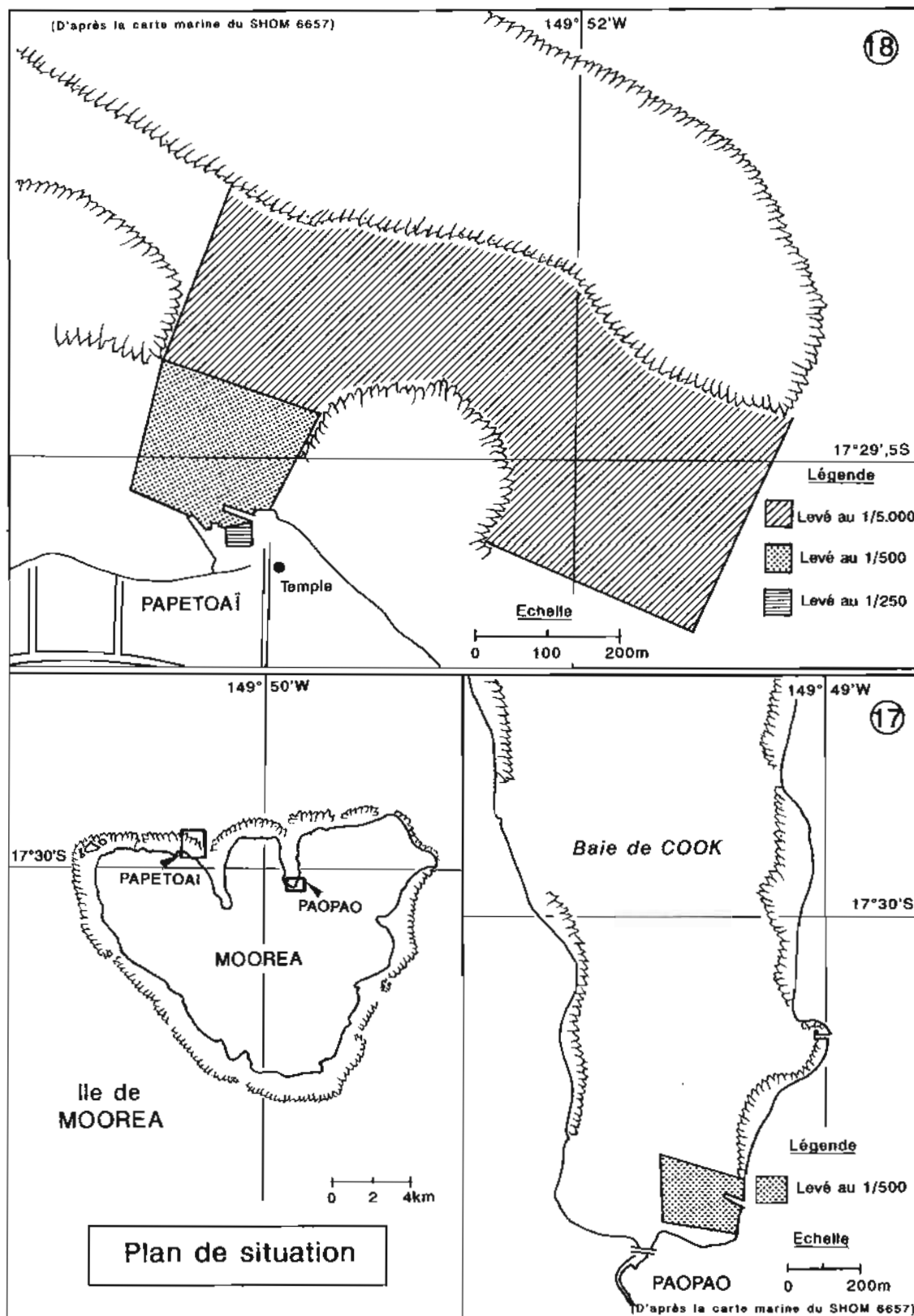
La marée a été observée sur un marégraphe Suiber SLS 13, immergé à l'aplomb du quai. Le calage du zéro instrumental a été déduit de mesures de tirant d'air relativement au repère R2 implanté en 1989.

La cote des trois repères installés en 1989 à Tapuamu a été déterminée par nivellement depuis le repère C6 des observatoires mis en place à Tiva (Tahaa) par la MHPF en 1957 et la MOP en 1985. Le zéro de réduction des sondes adopté est le zéro historique, déterminé en 1957 à Tiva par concordance avec la marée d'Uturoa (Raïatea).

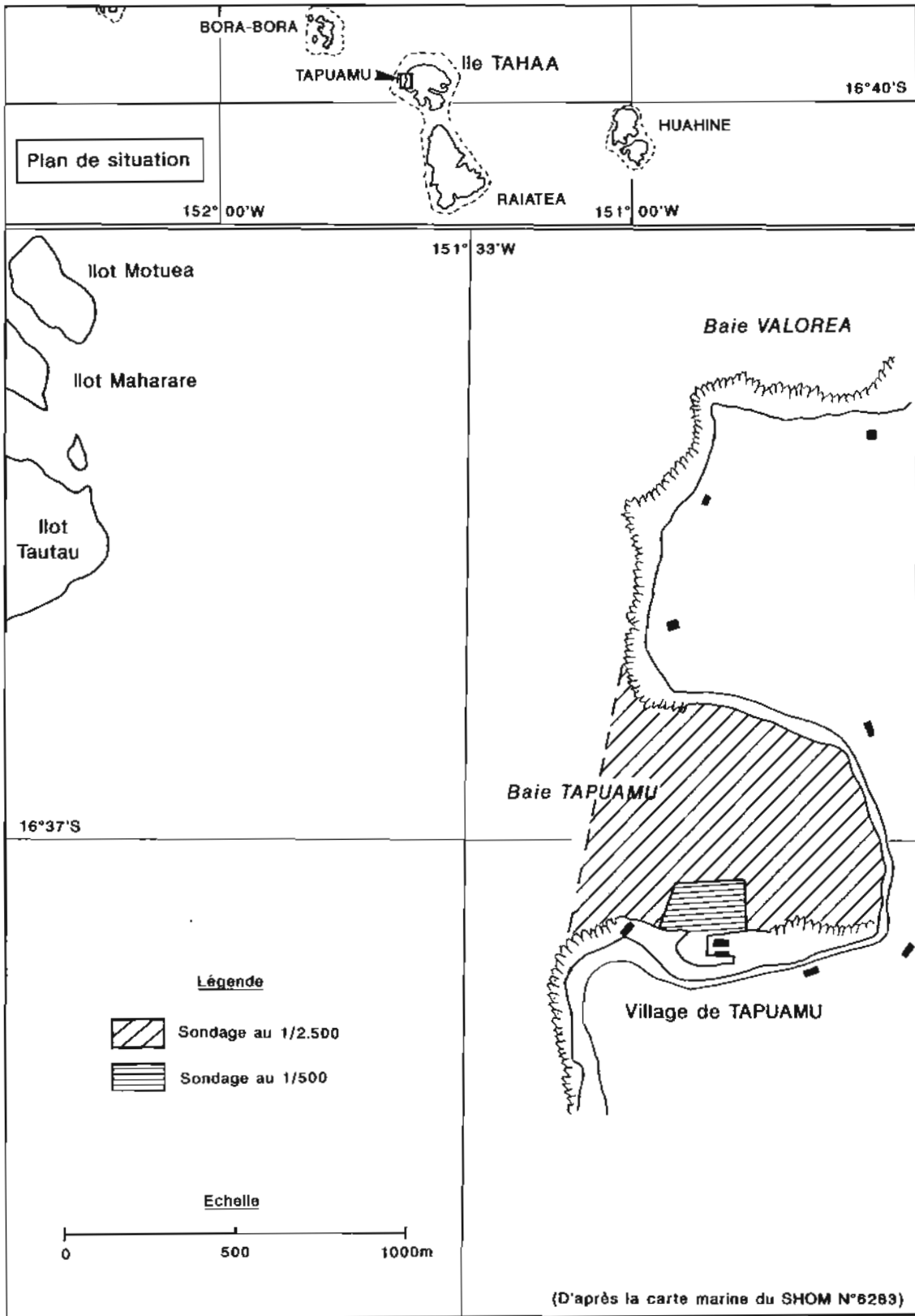
#### 5.6. Travaux au profit du port de Papeete

Dans le cadre d'une convention onéreuse liant le SHOM et le Port Autonome de Papeete, divers travaux de faible envergure sont réalisés à façon. Les moyens mis en œuvre sont modestes (coralline équipée d'un sondeur Atlas à base hors-bord, localisation optique, marée mesurée à l'observatoire permanent de Fare Ute, pas d'infrastructure géodésique durable,...). Entre novembre 1988 et juillet 1989, l'échelon de Polynésie a ainsi réalisé les levés suivants :

— sondage du bassin nord-ouest du port de Papeete (Motu Uta) entrepris dans le cadre d'un projet d'extension du quai de pêche hauturière (12/1989);



Pl. 17 et 18.



Pl. 19.



— sondage de la marina Taina à Punaia en vue d'y faire accéder des barges (7/1988).

### 5.7. Divers

Un sondage le long du quai des réparations dans le port de Papeete (base marine) a été réalisé en juillet 1988 pour répondre à une demande officieuse de la marine à Papeete (direction du port).

### 5.8. Raiatea et Huahine

Un levé des abords des quais d'Uturoa à Raiatea a été réalisé en août et novembre 1989. La rédaction de ce levé n'était pas achevée en juillet 1990. Le compte rendu de ce levé sera réalisé par mon successeur dans son rapport de mission.

Une observation de longue durée (supérieure à un an) a été réalisée sur marégraphes Suber SLS 13 et 23 au pied du quai de Fare à Huahine. Les observations étaient achevées à mon départ, mais les dossiers de rédaction non encore établis.

## V. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

L'activité hydrographique soutenue de l'échelon de Polynésie de la MOP, et l'absence d'ingénieur adjoint n'ont pas permis d'avoir une activité d'innovation méthodologique ou technique importante. Quelques actions concrètes ont néanmoins vu le jour, mais de nombreux thèmes potentiels n'ont hélas pu être abordés.

### 1. Utilisation de SPOT

L'utilisation de SPOT en hydrographie et cartographie marine a fait l'objet de nombreuses analyses et études au SHOM. Les caractéristiques des satellites, les principes d'exploitation de l'imagerie qu'ils fournissent, les précisions que l'on peut attendre de ces exploitations ont fait l'objet de rapports et publications au sein du SHOM par divers ingénieurs : A. Fourgassié, T. Garlan, Y. Guillam, C. Le Visage et moi-même. On se rapportera utilement à ces articles pour les conditions générales d'utilisation des satellites SPOT dans un service hydrographique.

Deux types de travaux ont été réalisés :

#### 1.1. Recueil de données de base sur les atolls des Tuamotu

Pour exploiter l'imagerie SPOT il convient de recueillir sur le terrain un minimum d'informations qui serviront ensuite de vérité de terrain.

Ces informations sont de deux types.

D'abord il faut pouvoir corriger les déformations de l'image SPOT et la placer dans un système géodésique connu.

Du fait de la structure du capteur SPOT, les distorsions internes de l'image sont faibles. La connaissance des paramètres d'attitude du satellite (observés à bord et transmis en même temps que les mesures radiométriques), et d'un minimum de trois points connus par leurs coordonnées géodésiques et repérés par leur position dans l'image (identification), suffisent pour redresser et caler l'image, et contrôler les résultats obtenus.

Les mesures de terrain correspondantes (localisation GPS, triangulation, repérage) étaient réalisées en même temps que les travaux géodésiques de base programmés.

Ensuite, pour déduire des mesures radiométriques faites par SPOT une information géographique, il est utile de disposer d'un jeu de référence où la nature du terrain est connue (nature des sols et des fonds, couvert végétal, bathymétrie,...). L'échelon a mis en place des procédures de recueil de ces données en des points préalablement repérés sur l'image à interpréter.

La méthodologie et les moyens employés pour recueillir les paramètres précédemment décrits, ont été présentés dans une plaquette éditée localement avec les concours de la Station Polynésienne de Télédétection (SPT) et le Territoire de Polynésie française.

#### 1.2. Associations avec la SPT

La SPT est une structure mixte IFREMER – Territoire de Polynésie française, chargée de promouvoir et faciliter l'utilisation de données satellitaires dans le Pacifique. Elle dispose pour cela de moyens d'analyse de l'image spatiale (système de traitement dédié) et d'élaboration de produits particuliers (impression électrostatique grand format, poste cartographique...), et procède à la mise en place d'une banque de données sur le Territoire de Polynésie française en association avec divers partenaires dont le SHOM.

Une collaboration étroite entre la MOP et la SPT a permis diverses opérations :

— mise en place d'un logiciel de préparation pour le recueil des données de terrain. Ce logiciel a été réalisé sur un contrat financé par le SHOM. Il permet à des opérateurs non spécialisés (en l'occurrence des OMH de l'échelon) d'effectuer quelques prétraitements de l'imagerie (amélioration de



contraste, représentation en fausses couleurs « normalisées »,...) et d'éditer des documents de terrain (sorties graphiques, zooms,...);

— *implantation du logiciel de rectification du SHOM*; ce logiciel permet à partir des données brutes (image et paramètres d'attitude) de corriger les déformations internes principales de la scène SPOT et de la géocoder (rééchantillonnage suivant une grille repérée en projection UTM, sur un ellipsoïde quelconque).

Les observations géodésiques de terrain sont ensuite utilisées pour caler l'image dans un système de référence absolu, et le cas échéant corriger les déformations et défauts d'orientation résiduels;

— *création d'applications cartographiques* au profit de services territoriaux; le rôle de la MOP fut alors d'identifier et de formaliser les besoins, et de conseiller les opérateurs mettant en place les applications;

— *prédéfini-tion d'un portefeuille d'iconocartes* des atolls des Tuamotu – Gambiers.

Dès lors que les observations de vérité de terrain ont été acquises, que les logiciels de rectification géométrique ont été mis en place, et que divers outils d'analyse ont été développés [représentation en vraies couleurs, classification, analyse bathymétrique (cf. travaux à Tetiaroa)], il fut possible d'envisager de produire rapidement un ensemble de représentations cartographiques simplifiées (iconocartes) s'appuyant sur l'imagerie SPOT, pour les zones de Polynésie française où l'information cartographique de base est déficiente et où la conduite de levés systématiques est une tâche disproportionnée avec les moyens disponibles et les besoins réels; c'est-à-dire en pratique les archipels d'atolls.

L'objectif n'est alors pas de réaliser une véritable cartographie (qui reste trop sophistiquée pour les moyens en place à la SPT et qui nécessiterait de disposer d'un ensemble d'informations de base trop important), mais d'offrir une solution d'attente avant que les cartes nécessaires ne soient publiées (plusieurs décennies sans doute).

Afin d'étudier les modalités de réalisation de ces iconocartes (format, facture, contenu) et d'évaluer l'intérêt qu'elles pourront susciter, il fut décidé de présenter un prototype d'iconocarte à l'occasion du colloque Pix Îles organisé en novembre 1989 conjointement à Nouméa et Papeete au profit des utilisateurs de l'imagerie satellitale dans le Pacifique.

Un prototype d'iconocarte de Manihi fut donc réalisé avec le concours actif de l'EPSHOM et en utilisant toute la puissance de cet établissement pour les processus cartographiques (scanneur, plotteur laser, postes cartographiques, imprimerie...). Cette iconocarte présente un fond d'image SPOT avec un domaine terrestre apparaissant en vraies couleurs, une estimation des profondeurs dans le lagon, quelques données hydrographiques observées par l'échelon, et diverses informations de géographie humaine (hôtels, aéroport, fermes perlicoles...).

Un tel produit ne fournit pas réellement d'information nautique, mais il fut pris soin de ne pas surcharger l'estimation bathymétrique fournie afin que la représentation des fonds puisse être consultée par les pratiques.

L'opportunité de poursuivre en vraie grandeur la réalisation d'iconocartes et les demandes de modification de la présentation et du contenu de ces iconocartes devaient être discutées lors du colloque Pix Îles.

## 2. Utilisation de GPS

La géodésie et la localisation marine des prochaines années reposeront en grande partie sur le système GPS, et les grandes étendues mal connues de la Polynésie française représentent une zone privilégiée où l'apport de GPS est dès à présent appréciable.

Les nombreuses actions entreprises au SHOM concernant le système GPS sont déjà largement présentées et discutées dans les articles rédigés par des ingénieurs hydrographes français; je me bornerai donc à résumer ici les résultats pratiques observés par l'échelon de Polynésie depuis janvier 1989 qui ont fait l'objet d'un rapport particulier.

L'échelon permanent de la Mission Océanographique du Pacifique en Polynésie a reçu en novembre 1988 un couple de récepteurs GPS Sercel NR52, puis en octobre 1989 d'un récepteur GPS de navigation (Sercel TR5S). Depuis ces dates, 26 mesures différentielles ont été effectuées, au cours de 11 missions, et 4 missions de sondage hauturier représentant environ 25 journées de travaux ont été réalisées en utilisant les récepteurs GPS.

### 2.1. Aspects relatifs au matériel

#### Géodésie

La plupart des observations géodésiques effectuées par l'échelon avec les récepteurs GPS ont été des mesures différentielles et les résultats ont alors été obtenus par traitement des doubles différences à l'aide des logiciels fournis par la société Sercel (GPSMIS).

Les récepteurs mis en œuvre étaient les NR52. Ces récepteurs sont fiables (la seule panne franche en un an d'utilisation concernait en fait l'alimentation), mais leur mise en œuvre est lourde: l'ensemble du matériel nécessaire (récepteurs, batteries de 12 V à forte autonomie, pied de théodolite, psychromètre et baromètre, éclairage pour les sessions nocturnes...) représente un poids de plus de 120 kg par station et un certain encombrement. Le lieu d'implantation, outre les contraintes liées à la bonne



Mesures GPS en mode géodésique.

réception des satellites, doit en tenir compte et la mise en œuvre d'une station GPS n'est pas anodine.

L'intérêt pratique de la fiabilité matérielle des récepteurs géodésiques Sercel, fut cependant diminuée par quelques défauts de jeunesse de la première version des logiciels d'acquisition; ces défauts qui ont rendu pendant plus de dix mois le succès des mesures GPS aléatoire, ont été corrigés par le constructeur et la version 2 (compatible avec les signaux transmis par les satellites du bloc II) s'est révélée fiable.

Bien que d'emploi aisé, les logiciels de traitement des données GPS ne sont guère exploitables que par des personnes maîtrisant correctement les subtilités du système GPS.

### *En navigation*

Le récepteur de navigation TR5S est performant et souple d'emploi. La seule panne en un an d'utilisation a été réparée en utilisant le lot de rechange. Ce lot de rechange est satisfaisant, sauf en ce qui concerne le moniteur de contrôle et de visualisation qui est unique.

Le logiciel interne aurait besoin de quelques aménagements qui faciliteraient l'exploitation du système, en particulier lorsque les possibilités de dégradation sont activées (meilleure paramétrisation des prévisions, affichage à la demande de toutes les informations transmises avec les almanachs, amélioration de la gestion des changements de configuration et des fonctions d'aide à la décision...). Mais même sans ces améliorations le logiciel s'est révélé sûr, performant et aisé à mettre en œuvre par tous les opérateurs.

L'acquisition sur HP 9816 des données GPS via le réseau Hydroboucle du système Hydrac n'a pas posé de difficulté après que les soucis initiaux de mise en place aient été surmontés en octobre.

## *2.2. Précision des mesures géodésiques*

### *Précision absolue*

Deux traitements de la position absolue d'un récepteur sont possibles :

- traitement séquentiel de chaque point observé sur au moins quatre satellites et moyenne des différentes positions successives. Ces résultats n'ont été utilisés que comme contrôle;

- traitement global par moindres carrés de l'ensemble des mesures de pseudodistances acquises. Une matrice de corrélation permet d'évaluer la cohérence des observations. C'est ce traitement qui a toujours été retenu par l'échelon pour obtenir un positionnement absolu.

La position absolue fournie par les récepteurs GPS a été directement comparée à celle fournie par des séries d'observations Transit sur récepteur JMR (solution éprouvée dans les missions du SHOM) sur 4 sites; pour ce qui concerne les archipels des Marquises et des Tuamotu, les positionnements absolus GPS et Transit sont cohérents, dans la fourchette de la précision attribuée a priori au système Transit.

Ce résultat est particulièrement utile dans le cas des travaux de l'échelon puisqu'il permet de remplacer les fastidieuses séries d'observations Transit par une série courte sur satellites GPS. Lorsque la dégradation volontaire SA (Selective Availability) sera en place sur la constellation définitive, cette conclusion devra être confirmée.

### *Mesures différentielles*

Il n'est pas aisé de chiffrer la précision des mesures GPS, par manque de références fiables; la précision théorique offerte par GPS en mode différentiel permet en effet de détecter les incohérences des réseaux géodésiques, incohérences particulièrement évidentes dans les réseaux locaux le plus souvent



sommaires établis en Polynésie française. Deux évaluations de la précision des mesures géodésiques GPS ont été faites.

#### Comparaison avec des mesures de géodésie classique.

Cette comparaison n'est vraiment fiable que lorsque les mesures géodésiques sont bien contrôlées et donc le plus directes possibles. Plusieurs missions de l'échelon ont permis de recueillir ces données de comparaison, par exemple :

- l'écart entre la distance calculée par GPS et une distance mesurée par géodimètre est de 0,12 m pour une distance de 1 250 m en baie de Hane (Ua Huka – Marquises), et de 0,05 m pour une distance de 5 300 m à Takapoto (Tuamotu);

- à Takapoto (Tuamotu), l'azimut astronomique observé diffère de celui calculé sur les résultats d'une session différentielle de 8";

- à Tahiti, l'erreur de fermeture d'une polygonale d'environ 30 km de long ceinturant la presqu'île de Taravao et s'appuyant sur deux points observés en GPS différentiel est de 0,6 m en x et 0,2 m en y; à Apataki (Tuamotu), malgré une faible durée des sessions GPS, l'écart entre mesures géodésiques d'un cheminement de 30 km orienté par mesures astronomiques et la solution GPS était inférieur à 0,6 m;

- à Hakamoui (Ua Pou – Marquises), les mesures GPS différentielles ont permis de détecter une erreur de 1,4 m sur l'altitude d'une station d'un réseau MOP; le contrôle par nivellement a montré que l'erreur était de 1,3 m.

Cet ensemble de résultats, obtenus dans des conditions opérationnelles et non dans une situation expérimentale où des précautions particulières sont souvent prises, montre la qualité des mesures GPS différentielles à courte et moyenne distances.

#### Analyse des écarts entre sessions d'une même mission GPS différentielle.

Cette analyse permet d'estimer la fidélité des observations GPS. Les résultats observés par l'échelon ont été joints à ceux de l'EPSHOM et de la Mission Océanographique de la Méditerranée. On peut établir une dépendance entre cohérence intersessions et distance interstations par la relation (unité le mètre) :

$$\text{Écart}_{\text{intersessions}} = 0,2 + 8 \times 10^{-6} \times \text{distance}_{\text{interstations}}$$

#### Comment qualifier une mission ?

Il convient de tempérer les excellentes performances présentées ci-dessus. Les résultats obtenus par l'échelon ont été le plus souvent adoptés après une analyse longue et délicate des solutions calculées et de nombreux rejus faisant varier divers paramètres qui ont conduit à rejeter diverses sessions aberrantes. Une réflexion sur les conditions de validation d'une observation GPS différentielle a été me-

née qui, à défaut de donner un ensemble de critères logiques, indique une approche méthodologique.

Cette méthodologie est détaillée dans le rapport particulier déjà cité et je n'en donnerai ici que quelques éléments :

*Pour tenter de définir si les résultats d'une session différentielle isolée sont pertinents, il convient d'analyser les solutions pseudodistances pour chaque point (en particulier de critiquer les courbes de résidus de pseudodistances et les courbes de résidus des doubles différences) et de comparer les solutions simples et doubles différences.*

*Une bonne session devrait durer plus d'une heure, concerner cinq satellites et être associée à des observations météorologiques rigoureuses.*

*Les données accompagnant le calcul en doubles différences doivent être analysées : fixation des entiers, écart type et coefficients d'autocorrélation, résidus des doubles différences, dispersion de ces résidus, écart-type de la position...*

*Une mesure géodésique indépendante apporte une assistance inestimable pour qualifier les résultats d'une session.*

#### Effets observés de la dégradation des données des satellites du bloc II en mode géodésique.

Même lors de la période du 4 au 11 décembre 1989 où le ministère de la défense américain avait procédé à des essais de dégradation d'une importance nettement supérieure à celle prévue pour la mise en place du Selective Availability (jusqu'à 1 024 m d'erreur d'horloge annoncés sur le satellite 16!), les résultats observés en mode géodésique différentiel ne sont pas affectés par l'activation du SA.

Le positionnement absolu observé en période de dégradation est, si la durée des mesures est suffisamment longue (au moins une heure) équivalent en valeur moyenne à celui observé hors période d'activation du SA, mais est plus dispersé. Ce résultat est probablement dû au caractère particulier des dégradations mises en œuvre, puisqu'elle ne concernaient apparemment que les paramètres d'horloge.

#### 2.3. Précision des mesures en mode navigation

Toutes les missions localisées par GPS ont été effectuées en mode 2D+T, avec des tolérances pour la validation des données GPS de 7 en dilution géométrique de précision (HDOP) et de 2° pour l'élévation minimale des satellites.

Pour deux des missions de sondage large réalisées par l'échelon avec l'aide de GPS, les données fournies par les satellites étaient non dégradées; dans ce cas, la position GPS a été comparée à celle déduite de mesures Trident. On a observé que les écarts entre les positions fournies par les 2 systèmes étaient dans 90% des cas inférieurs à 20 m et dans 96% des cas à 25 m. L'écart maximum observé a été de 40 m avec un HDOP de 6. Les résidus de calcul étaient faibles et le « Lpme » (taille du « chapeau ») inférieur à 10 mètres.

Les autres missions de sondage large se sont déroulées dans des périodes d'activation du SA. Du 4 au 11 novembre 1989, l'importance des dégradations rendait impossible l'utilisation d'une configuration où les satellites du bloc I étaient absents; on a pu ainsi observer des positions erronées de près d'un kilomètre lorsque le bâtiment était près de la côte (franchissement d'une passe).

Pour les autres missions localisées avec GPS dégradé, on a observé :

- au changement de constellation des sauts d'une cinquantaine de mètres, le maximum étant de plus de 100 mètres;

- au mouillage une dispersion des mesures sur une constellation donnée comprise entre 50 et 100 mètres;

- des résidus de calcul de la solution variant de façon monotone par morceaux entre quelques mètres et parfois plus de 50 mètres;

- que dans le choix des constellations à retenir lorsque le SA est activé, il vaut mieux un petit HDOP avec un gros résidu qu'un gros HDOP avec un petit résidu.

On peut estimer globalement la précision absolue meilleure que 100 mètres. La présence de satellites du bloc I (non dégradés) permet d'observer les satellites les plus perturbés et de les invalider éventuellement ou de filtrer les mesures GPS par l'estime de *L'Estafette* (la précision était alors meilleure que l'hectomètre); ces possibilités disparaîtront lorsque la constellation sera complète, et les levés d'échelle supérieure au 1:100 000 ne seront plus envisageables en mode naturel.

## 2.4. Conclusions

Après quinze mois d'utilisation à MOP/PPT, le GPS est devenu un outil privilégié des travaux en Polynésie.

Pour la localisation des travaux au large, disposer sans infrastructure préalable d'un système de localisation satisfaisant a apporté une souplesse appréciable pour la programmation des levés: cependant la précision garantie avec le seul mode SPS (standard) n'est acceptable que pour des sondages de reconnaissance à des échelles inférieures au 1:100 000. Cette limitation est peu contraignante pour l'exécution des levés réguliers confiés à l'échelon; par contre elle deviendra gênante lors des travaux plus fins sur les structures caractéristiques profondes de moins de 250 mètres que l'on rencontre fréquemment dans l'Archipel des Marquises.

Le GPS a en outre permis d'alléger sensiblement les difficultés rencontrées lors des travaux géodésiques dans les Tuamotu (rattachements à un système mondial, portées limitées par les faibles altitudes...) et surtout aux Marquises: il n'y est plus nécessaire de mettre sur pied de véritables petites expéditions pour transporter un système géodésique à travers les

montagnes. Mettre en place l'équipement géodésique d'une baie se fait désormais en quelques heures.

Pour l'avenir des travaux en Polynésie, trois évolutions sont à analyser :

- possibilité d'équiper les vedettes d'un récepteur GPS adapté; de nombreux hauts-fonds apparaissent en effet sur les cartes de l'Archipel des Marquises avec des profondeurs n'autorisant pas l'emploi d'un bâtiment, et donc du récepteur GPS Sercel TR5S (encombrement, fragilité de l'écran cathodique, alimentation);

- mise en œuvre d'une station GPS différentiel ou d'un récepteur code P pour achever les travaux hauturiers à des échelles supérieures au 1:40 000; un tel équipement n'est nécessaire en Polynésie que si le mode standard SPS avec mise en œuvre du SA est la norme. Si l'utilisation d'un récepteur différentiel en vedette était possible, les applications pour des levés côtiers seraient également nombreuses;

- envisager l'acquisition de récepteurs géodésiques légers à mettre en œuvre, si ces récepteurs se révèlent aussi fiables que les couples Sercel NR52.

## 3. Divers

### 3.1.

Le centre ORSTOM de Nouméa a étudié l'apport de l'inversion des anomalies de géoïde observées par altimétrie satellitale (SEASAT), pour évaluer les profondeurs du bassin de Polynésie française. Une telle évaluation offre une résolution très basse et ne montre de corrélation qu'avec les reliefs sous-marins majeurs.

La comparaison de cette analyse avec les cartes en service (SHOM) et des fichiers de synthèse de données bathymétriques (SYNBAPS) avait permis de prédire l'existence des monts sous-marins qui n'y apparaissent pas.

Au cours des transits vers les Marquises, *L'Estafette* a fait route sur la position prévue de deux hauts-fonds prédits et a ainsi mis en évidence :

- un pic conique remontant à une profondeur inférieure à 1 100 mètres par fonds de 3 000 mètres pour l'un (prévision 1 500 m);

- une structure assez étendue (plus de 10 M) de 1 500 mètres de profondeur par 2 500 mètres de fonds pour l'autre (prévision 1 000 m).

Ce contrôle confirme l'aptitude des mesures altimétriques satellitales à dégager la morphologie majeure des bassins océaniques; même si la finesse de l'inversion des anomalies du géoïde est médiocre, l'interprétation qualitative de l'existence des structures importantes est assez bonne.



Ce constat a été mis à profit pour étudier - l'existence d'un haut-fond émergeant signalé en  $35^{\circ} 14' S$  et  $150^{\circ} 28' W$  : le « récif Ernest Le Gouvé ». Si un tel haut-fond avait existé au milieu d'un bassin de 3 000 m de profondeur, une anomalie du géoïde aurait été nette sur les mesures satellitales et son empreinte surfacique aurait été bien supérieure à la distance intertrace de satellite SEASAT; elle aurait certainement été détectée. Ce n'est pas le cas et l'inexistence d'un récif présumé, dont l'intérêt éventuel s'il avait émergé eût été un notable agrandissement de la zone exclusive française, a pu être établie sans avoir recours à un long et coûteux levé océanique.

### 3.2.

Au cours d'un stage professionnel organisé à l'ENSTA, l'ingénieur de l'Armement Aymar a étudié une analyse de cohérence des levés bathymétriques de la MOP. A partir d'hypothèses sur la structure morphologique des fonds (profondeurs, pentes limites), Aymar propose une analyse surfacique des fichiers validés de type TRAVAL, qui détecte des sondes ou groupes de sondes suspects.

Cette approche est semblable aux tests de cohérence effectués à partir de modèles maillés générés sur un ensemble de sondes ponctuelles, mais il était difficile d'utiliser des modèles numériques de terrain sur HP 9816 (performances du calculateur et mémoires limitées); l'innovation résidait donc dans une gestion itérative des sondages.

Ce logiciel en est hélas resté au stade de prototype prometteur (des tests sur des levés réels en cours d'exploitation ont permis de mettre en évidence diverses anomalies de numérisation qu'il est

toujours fastidieux de détecter par analyse visuelle), du fait de la faiblesse des effectifs scientifiques de l'échelon.

## VI. CONCLUSIONS

Les dix-neuf mois pendant lesquels j'ai dirigé l'échelon de Polynésie de la MOP auront été marqués par une forte activité hydrographique (levés et rédaction). Cela fut rendu possible par une nouvelle jeunesse de *L'Estafette* et par la forte motivation d'une équipe réduite mais soudée, opérant dans un environnement technique et administratif serein.

Comme conséquence de l'effectif limité, des difficultés sont apparues pour gérer le contrôle des très nombreux dossiers à réaliser (les levés sont généralement d'extension modeste, mais les documents d'accompagnement concernant, la géodésie, la marée, les courants, les fiches signalétiques diverses, les rapports... sont en nombre incompressible) et pour conduire une activité de développement suivie (la mise en place de programmes de travaux avec la SPT dans le domaine essentiel pour la Polynésie de la télédétection spatiale, permet néanmoins un optimisme modéré).

L'éloignement de la métropole a rendu plus sensibles les problèmes liés à la maintenance préventive ou corrective du matériel spécifique et à la gestion des stocks. Les dispositions mises en place et les liens souples avec l'échelon de Nouvelle-Calédonie permettent de bien maîtriser cette logistique, mais au prix d'une attention constante et de contrôles parfois bien contraignants.

## ANNEXE 1

### LISTE DES RAPPORTS PARTICULIERS

Zone des travaux	Numéro et date rapport	Nature	
<b>Marquises</b>			
Hiva Oa/Taaoa	98 29/06/89	Levé de baie	R
Nuku Hiva/Tai O Hae	130 19/07/89	"	R
Fatu Iva/Hanavave	131 19/07/89	"	R
Îles inhabitées	195 22/11/89	Géodésie	A1
Ua Pou/Hakamoui	207 20/12/89	Levé de baie	A
Fatu Iva/Omoa	9 12/01/90	Plan de vague	A*
Ua Pou/Hakahetau	72 19/04/90	Levé de baie	A
Ua Pou/Hakahau	73 19/04/90	"	A
Ua Huka/Hane	81 25/04/90	"	A*
Large Marquises	103 25/05/90	Grande sonde	A
Hiva Oa/Puamau	114 11/06/90	Levé de baie	A
Hiva Oa/Atuona	115 11/06/90	Contrôle	A*
Géodésie Marquises	131 12/07/90	Géodésie	A
Tahuata/Hapatoni		Levé de baie	L
Nuku Hiva/Hatiheu		"	D*
Ua Pou/Hakatao		"	D
Nuku Hiva/Anaho		"	D*
Eiao/Vaituha		"	D*
Tahuata/Hana Tetena		"	D
<b>Tuamotu</b>			
Makatea	37 09/03/89	Stéréopréparation	R*
Rimatara	39 09/03/89	Géodésie	R*1
Tikehau	40 14/03/89	Spatio-préparation	R
Ahe	41 15/03/89	"	R
Manihi	70 09/05/89	"	R
Rangiroa (1988)	132 19/07/89	"	R
Takarua	166 04/10/89	"	A
Apataki	167 04/10/89	Compléments	A
Rangiroa (1989)	208 20/12/89	Levé de quai	A*1
Fakarava	74 19/04/90	Spatio-préparation	A
Takapoto	82 25/04/90	"	A
Tetiaroa	130 12/07/90	"	A*1
Makemo		"	L*
Rangiroa (1990)		Levé de quai	L*
Aratika		Spatio-préparation	D
<b>Société</b>			
Tahiti/Motu Uta	71 09/05/89	Levé de quai	A*
Tahiti/Marina Taina	72 09/05/89	Levé de quai	R*
Tahiti/Taapuna	105 04/07/89	Bathy/topo	R*
Tahiti/Quai de pêche	43 16/03/89	Levé de quai	R*
Abords sud de Tahiti	1 03/01/90	Grande sonde	A
Moorea/Paopao	75 23/04/90	Levé de baie	A*
Moorea/Papeotai	76 23/04/90	"	A*
Bora Bora/Faanui	100 21/05/90	"	A*
Bora Bora/Vaitape	101 21/05/90	"	A*
Tahaa	102 21/05/90	"	A*1
Raiatea/Utuoroa		"	L*
<b>Australes</b>			
Tubuai	6 10/01/90	Abords de quai	A*1
Raivavae	7 10/01/90	"	A*1
<b>Divers</b>	83 30/04/90	Emploi du GPS	

Signification des codes et abréviations :

R : seule la rédaction a été assurée

1 : un concours extérieur a été apporté

L : le levé est achevé, rédaction en cours (juillet 1990)

\* : travaux demandés par un organisme extérieur au SHOM

D : les travaux de levé ne sont pas achevés (juillet 1990)

A : travaux entièrement achevés entre novembre 1988 et juillet 1990

## ANNEXE 2

### ORGANISATION D'UN LEVÉ DE BAIE AUX MARQUISES

Le levé d'une baie commence par la mise en place de l'infrastructure géodésique et la stéréopréparation des photographies aériennes du Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme du Territoire. A cette occasion des mesures satellites (Transit puis GPS) permettent le rattachement du système géodésique local (baptisé IGN 72) à un système mondial (WGS 72 ou 84), et les mesures directes (angles et distances) fournissent un contrôle de la cohérence de ce réseau. Ces travaux préparatoires sont réalisés en une journée avant le levé proprement dit.

La durée du levé hydrographe est typiquement de 4 à 6 jours; il est effectué suivant les normes indiquées dans le tableau ci-dessous.

En fonction des contraintes particulières ces normes ont pu être légèrement modifiées, mais elles constituent une référence moyenne.

Les zones de mouillage font l'objet d'une attention particulière (contrôle au sondeur latéral et plongeurs). Au moins trois repères de nivellement sont installés et rattachés aux repères anciens s'ils existent, et/ou à l'observatoire permanent de Tai O Hae (Nuku Hiva) par concordance des observations marégraphiques. Celles-ci sont en général faites à l'aide de marégraphes plongeurs Suber sur une durée n'excédant que rarement la semaine. Une ou deux observations courantométriques sont réalisées sur une durée d'au moins quinze jours.

Revue d'amers, topographie du trait de côte, prélèvements de natures de fond, contrôle de l'information nautique complètent le levé.

Les données sont traitées immédiatement à bord pour éviter dans la mesure du possible un complément ultérieur.

Zone	Échelle	Localisation	Observations
Baie principale :			
Fond de baie (profondeur < 5 m)	1:2 500	Optique	Sondeur latéral
Profondeur < 50 m	1:5 000	"	
Profondeur > 50 m	1:5 000	"	
Baie secondaire :			
Profondeur < 30 m	1:2 500	Optique	
Profondeur > 30 m	1:5 000	Optique/Trident	
Ouvert de la baie	1:10 000	Optique/Trident	

## ANNEXE 3

Le rapport résumé ici décrit les principales mesures faites depuis 1987 et propose de définir un système géodésique unique pour l'Archipel des Marquises relié au système mondial WGS 84.

### 1. SYSTÈMES GÉODÉSQUES DANS LES MARQUISES AVANT 1987

#### 1.1.

Les travaux antérieurs à 1972 (Missions du Service Central Hydrographique, IGN, cadastre...) ont été fusionnés, pour les besoins de l'aérotriangulation, dans un réseau baptisé IGN 72. Toutes les bornes en place en 1972 sur les Marquises n'ont pas été intégrées dans ce réseau IGN, mais la répartition et la densité de celles retenues sont normalement suffisantes pour effectuer les travaux géodésiques de rattachement nécessaires aux relevés cartographiques.

Le réseau IGN 72 est décrit dans six répertoires :

- Nuku Hiva qui contient 29 points bornés;
- Ua Huka qui contient 10 points bornés;
- Ua Pou qui contient 18 points bornés;
- Hiva Oa qui contient 18 points bornés à Hiva Oa, 9 points bornés à Tahuata, 1 borne à Mohotani;
- Fatu Iva qui contient 43 points bornés;
- Eiao qui contient 12 bornes sur l'île d'Eiao, et 2 bornes sur l'île de Hatutaa.

#### 1.2.

Pour les besoins des travaux côtiers entre 1987 et juin 1990, l'échelon de Polynésie de la MOP s'est en général appuyé sur le réseau des stations IGN 72 afin d'établir les triangulations complémentaires; les points sont construits avec une précision standard et les visées ferment correctement.

La cohérence constatée du réseau des points des répertoires IGN, permet de supposer que sur chaque île les mesures ont été correctement compensées, et bien que l'ordre et la précision des points du réseau IGN 72 soient inconnus et les méthodes de compilation floues, on parlera dans la suite de cette annexe de système IGN 72.

#### 1.3.

On observe que les organismes effectuant des travaux géodésiques aux Marquises ont rattaché depuis 1972 leurs mesures aux points du réseau décrit par l'IGN (sauf la MOP en 1981 à Nuku Hiva). C'est pourquoi dans la présente annexe seul sera considéré le système IGN 72.

#### 1.4.

Notons enfin que la plupart des points du cadastre sont soit rattachés aux points du réseau IGN 72 s'ils ont été implantés après cette date, soit inclus dans les répertoires IGN.

### 2. MISSIONS GÉODÉSQUES DE LA MOP DANS LES MARQUISES : 1987-1990

15 missions de la MOP se sont déroulées aux Marquises de 1987 à juin 1990. Les travaux géodésiques réalisés concernent essentiellement :

- la mise en place et le positionnement de stations pour la localisation des mobiles de sondage et des travaux topographiques;
- le rattachement d'un ou plusieurs points bornés à un système géodésique mondial par mesures satellitales.
- quelques mesures de contrôle des réseaux en place (azimut astronomique, mesures de distances, recherche de stations);
- la définition d'observatoires de marée rattachés à celui de Nuku Hiva (référence pour les Marquises).

Ces missions sont présentées en appendice 1 et les mesures les plus importantes sont indiquées île par île en appendice 2. Les données recueillies permettent dès à présent d'établir, avec une précision suffisante pour les besoins cartographiques, les liens entre les systèmes locaux mis en place sur les îles marquisiennes et le système mondial WGS 84.

On peut alors considérer, bien qu'il n'y ait pas compensation globale ni en général de mesures directes inter-îles, que l'on dispose d'un réseau de points géodésiques cohérent pour l'ensemble de l'archipel et par extension d'un système géodésique unique.



### 3. PROPOSITION POUR UN SYSTÈME GÉODÉSIQUE UNIQUE AUX MARQUISES

#### 3.1.

Pour chaque île du tableau I suivant, la transformation des coordonnées planimétriques du système IGN 72 défini sur l'ellipsoïde international, en coordonnées référencées au système WGS 84, est obtenue par une simple translation de vecteur (X, Y, Z) appliquée aux coordonnées géocentriques dans le système IGN 72, sans rotation ni homothétie (cette hypothèse simplificatrice est justifiée par les contrôles d'orientation et d'échelle présentés en appendice 2).

Tableau I

Nom de l'île	X	Y	Z
Nuku Hiva	+ 133	+ 191	+ 183
Hiva Oa	+ 332	- 11,5	+ 60
Tahuata	+ 332	- 11,5	+ 60
Ua Pou	+ 132	+ 186	+ 192
Ua Huka	+ 84	+ 274	+ 64,5
Fatu Iva	+ 60	+ 284,5	+ 115,5
Eiao	+ 332	- 64	+ 251

#### 3.2.

Un état des bornes du réseau IGN 72 décrit dans les répertoires déjà cités, tel qu'il a été observé au cours des missions d'hydrographie de l'échelon, est donné dans l'annexe 4 du rapport.

Il est également proposé d'adopter un ordre pour les points du réseau IGN 72 selon le principe suivant :

- ordre 1 pour les points clairement identifiés dans les répertoires IGN comme points astronomiques de base;
- ordre 2 pour les autres points astronomiques et les points appartenant à une base du réseau (orientation astronomique);
- ordre 3 pour les points d'accrochage de l'aérotriangulation de l'IGN;
- ordre 4 pour les points utilisés en contrôle de l'aérotriangulation;
- ordre 5 pour les autres points (qui n'ont été utilisés que comme contrôle des restitutions).

### 4. RÉSEAU DE NIVELLEMENT AUX MARQUISES

#### 4.1.

La marée a été observée à l'occasion des levés hydrographiques de l'échelon à la fois dans un port

servant de référence et dans la zone des travaux. A partir de ces observations un zéro de réduction des sondes a été adopté pour chaque baie par concordance avec l'observation de référence; 3 à 7 repères de nivellement ont été cotés dans chaque baie relativement à ce zéro.

L'observatoire de référence pour les Marquises est normalement celui de Tai O Hae à Nuku Hiva. Cependant dans le groupe sud de l'archipel, les concordances ont été souvent déterminées relativement à l'observatoire mis en place à Atuona (Hiva Oa), lui-même rattaché à celui de Nuku Hiva.

#### 4.2.

L'altitude des points des répertoires IGN est donnée relativement au niveau moyen. Ces altitudes sont en général cohérentes avec les observations géodésiques de site effectuée par la MOP. On peut globalement estimer leur précision meilleure que le mètre.

### 5. PRÉCISION

#### 5.1.

Le rapport résumé ici donne des éléments permettant d'adopter aux Marquises un réseau de points géodésiques rattachés à un système mondial unique (WGS 84).

La précision absolue de ce rattachement est d'environ 5 à 10 mètres et est compatible avec l'édition de cartes à grande échelle référencées au système WGS 84.

Sur chaque île, la position relative des points bornés est meilleure que 50 cm.

#### 5.2.

Un affinement des résultats peut être obtenu à l'aide de mesures de rattachement inter-îles (directes ou par observations différentielles de satellites GPS) sur au moins deux points par île, l'ensemble de ces observations étant ensuite compensé.

Une telle opération est relativement lourde à organiser et ne semble pas devoir être considérée comme un objectif prioritaire pour les travaux hydrographiques futurs.

**APPENDICE 1 À L'ANNEXE 3**  
**DESCRIPTION DES TRAVAUX**

Objet	Dates	N° rapport de l'échelon	Mesures
<b>Nuku Hiva</b>			
Levé de la baie de Tai O Hae	3 et 8/88	130 du 19/07/1989	1,3,4,5,7
Géodésie en baie d'Hatiheu	4/90		2,3,5
<b>Ua Pou</b>			
Levé de la baie d'Hakahau	8,10/87 1,3/88	24 du 08/04/1988	1,3,4,5,7
Levé de la baie d'Hakamoui	4,5/89	207 du 20/12/1989	2,3,7
Levé de la baie d'Hakahetau	4,11/89	72 du 19/04/1990	2,3,7
Géodésie en baie d'Hakatao	4/89 4/90		3,6
<b>Ua Huka</b>			
Levé de la baie de Hane	11/89 4/90	81 du 25/04/1990	2,3,5,7
<b>Hiva Oa</b>			
Levé de la baie de Taaoa	9/88 3/89	98 du 29/06/1989	1,3,7
Levé de la baie de Hanaiapa	8,9/88	127 du 18/07/1989	3,7
Levé de la baie de Puamau	8/88 6,9/89 5/90	114 du 11/06/1990	2,3,7
<b>Tahuata</b>			
Levé de la baie de Vaitahu	8,9/87	25 du 08/04/1988	2,7
Levé en baie d'Hapatonî	6/89 et 5/90		2,3,7
Géodésie en baie d'Hanatetena	9/89		3
<b>Fatu Iva</b>			
Levé de la baie d'Omoa	6,7/87	23 du 08/04/1988	1,3,4,5,7
Levé de la baie de Hanavave	8,9/88	131 du 19/07/1989	3,7
Plan de vagues à Omoa	4/89	9 du 12/01/1990	3,7
<b>Îles inhabitées</b>			
Séréopréparation à Fatu Huku, Motu Iti, Eiao et Mohotani	1/89	195 du 22/11/1989	2,3,6
Géodésie à Vaituha (Eiao)	5/90		2,3

Nota 1 : les dates sont en mois/année

Nota 2 : les codes des mesures sont les suivants :

- 1 : mesures sur satellites Transit
- 2 : mesures sur satellites GPS
- 3 : géodésie de rattachement
- 4 : azimut astronomique
- 5 : contrôle d'échelle
- 6 : stéréopréparation
- 7 : nivellement/marée

## APPENDICE 2 À L'ANNEXE 3

### RÉSULTATS PARTICULIERS OBSERVÉS

#### 1. HIVA OA

##### 1.1.

Deux séries de mesures sur satellites Transit ont été faites sur des durées de 11 et 12 jours à Atuona et une mesure GPS absolue à Puamau.

##### 1.2.

Un cheminement a permis de transporter la géodésie d'Atuona à Hanaiapa. A cette occasion les coordonnées du point IGN 72 disponible dans cette baie ont été confirmées, montrant ainsi que l'échelle du réseau était correcte.

#### 2. TAHUATA

##### 2.1.

Le système IGN 72 mis en place à Tahuata était directement rattaché à celui de Hiva Oa par une mesure d'azimut/distance au-dessus du chenal séparant les deux îles. Lors de l'équipement géodésique local mis en place par la MOP en 1987 à Vaitahu, ce rattachement a été contrôlé et confirmé et les îles de Hiva Oa et Tahuata peuvent être considérées comme faisant partie d'un ensemble géodésique unique.

##### 2.2.

Une session GPS a été acquise sur le point Plage à Vaitahu.

#### 3. FATU HIVA

Des mesures sur satellites Transit ont été faites sur une durée de 7 jours à Omoa.

L'orientation du réseau IGN 72 a été contrôlée par mesures astronomiques et son échelle par mesures de distance au telluromètre MRA 5: elles sont correctes.

#### 4. NUKU HIVA

##### 4.1.

Des mesures sur satellites Transit ont été faites sur une durée de 14 jours à Tai O Hae et 4 journées de mesures GPS ont été observées au même point.

L'orientation du réseau IGN 72 a été contrôlée par mesures astronomiques et son échelle par mesures de distance au telluromètre MRA 5: elles sont correctes.

##### 4.2.

5 sessions de mesures sur satellites GPS ont été observées en baie d'Hatiheu mais ces sessions ont été acquises avec une constellation GPS dans laquelle la dégradation des paramètres horloge et éphémérides transmis était mise en œuvre pour les satellites du bloc II. Seules trois sessions acquises avec chacune 4 satellites du bloc I ont permis d'estimer le vecteur de translation entre les centres des ellipsoïdes attachés aux systèmes IGN 72 et WGS 84.

#### 5. UA POU

Des mesures sur satellites Transit ont été faites sur des durées de 4 et 5 jours à Hakahau, et 4 sessions de mesures GPS ont été observées au même point. En outre 3 sessions de mesures GPS ont été acquises à Hakahetau.

L'orientation du réseau IGN 72 a été contrôlée par mesures astronomiques et GPS différentielles et son échelle par des mesures de distance au telluromètre MRA 5 et des mesures GPS différentielles: elles sont correctes.

#### 6. UA UKA

Deux sessions de mesures GPS différentielles ont été acquises en baie de Hane. Elles ont permis d'établir une base dans le système WGS 84, base à laquelle les stations du réseau IGN 72 retrouvées ont été rattachées.

## 7. ÎLES INHABITÉES

### 7.1.

Une mission hélicoptérée a permis d'établir le positionnement absolu des quatre îles ou groupes d'îles inhabitées des Marquises. Sur Eiao le système géodésique en place (IGN 72) a été rattaché au WGS 84 par mesures GPS différentielles.

A Motu Iti, Fatu Huku et Mohotani un réseau d'étendue restreinte et baptisé MOP 89 a été mis en

place. Ce réseau est directement rattaché au système WGS 84 par mesures GPS différentielles avec Tai O Hae.

### 7.2.

En mai 1990 une mission de préparation géodésique a permis de rattacher au voisinage de la baie de Vaituha à Eiao deux points des répertoires IGN à une base observée par mesures GPS différentielles dans le système géodésique WGS 84.

## ANNEXE 4

### LISTE DES POINTS GÉODÉSQUES NOUVEAUX AUX MARQUISES

Système IGN 72 – UTM fuseau n° 7 – ellipsoïde international (sauf en baie de Hane)

Position corrigée de 3 points géodésiques implantés en 1988

#### Hakahetau

Nom du point	X	Y	Z
Vaïmiti	595 878,5	8 962 969,5	35,0
Hinano	596 688,9	8 963 542,9	3,0
Manola	597 432,6	8 964 146,7	21,0
Teiki	598 915,8	8 965 957,6	90,0
Fémur	598 490,9	8 965 779,8	7,0
Crane	598 031,4	8 965 349,9	27,0
Tibia	598 443,4	8 965 161,2	1,5
IGN 26	597 977,98	8 964 698,40	207,9
Amer Clocher de l'église d'Hakahetau	598 309,0	8 965 004,7	15,0

Nom du point	X	Y	Z
Max	604 317,0	8 965 232,2	19,4
Borne incendie	604 893,9	8 965 084,4	13,0
Marché bis	604 536,6	8 965 011,2	5,7

#### Hakamoui

Nom du point	X	Y	Z
Frégate	608 601,4	8 964 770,0	86
Blue lagoon	603 946,61	8 962 664,27	238,3
Mattat	605 102,4	8 964 873,4	127
Queen Mary	605 719,68	8 962 198,50	10,7
Rose Marie	606 038,3	8 962 679,3	3,3
Bloody Mary	605 657,6	8 962 184,8	27,7
Pretty Marie	607 014,0	8 962 127,8	10,5
Marie Marie	607 226,3	8 963 354,0	3,7
Lady Mary	606 329,5	8 963 000,9	10,6
Gobie	605 444,6	8 965 099,1	3,0
Thon	605 658,9	8 965 325,6	5,3
Murène	606 191,3	8 965 193,4	9,9
Mérou	605 542,9	8 964 833,8	4,0
Piaf	607 698,2	8 964 783,7	2,0
Percée	607 196,3	8 964 668,5	2,9

#### Hanaipa

Nom du point	X	Y	Z
Station Vague	717 005,1	8 925 806,6	3,6
Station Tertre	717 695,0	8 925 786,4	10,8
Station Vieux wharf	717 418,8	8 925 161,8	4,0
Station cote 159 :			
repère 1	717 976,2	8 926 041,6	158,0
repère 2	717 929,1	8 926 043,9	147,9
repère 3	717 942,3	8 926 111,7	135,0
Tetiki (MHPF 67)	715 565,98	8 925 511,96	261,5
Amer Séchoirs à coprah	717 616,8	8 925 052,0	5,0



**Hanavave**

Nom du point	X	Y	Z
Teanatapu	755 628,08	8 841 277,39	476,8
Teamotua : repère 1	755 761,38	8 840 153,34	640,2
repère 2	755 765,6	8 840 159,4	645,2
Hanakiikii	755 392,3	8 842 320,1	0,4
Motu Poha	755 424,1	8 841 973,0	0,4
Plage	755 771,8	8 842 098,9	2,0
Matautu	754 344,97	8 841 372,04	11,0
Tepului	755 033,36	8 842 747,99	1,0
Amers			
Pylône Matahumu	753 187	8 837 183	83
Chapelle Hanavave	755 835,1	8 842 237,5	16
Relais hertzien	754,911,5	8 841 510,7	266,8

**Puamau**

Nom du point	X	Y	Z
Toere	731 942,4	8 920 809,1	4,0
Aite Kohe	734 055,3	8 920 510,6	3,5
Bourgogne	733 565,5	8 920 113,7	1,3
Bretagne	733 558,3	8 920 282,3	6,4
Plage	732 056,3	8 919 849,1	1,2
Pahu	731 807,6	8 920 344,3	3,0
Umete	733 039,0	8 920 349,5	3,5
Tapa	732 683,8	8 919 903,0	2,0
Provence	733 796,2	8 919 850,2	5,9
Picardie	733 915,6	8 920 107,9	1,9
Bastion	732 176,6	8 921 086,6	37,0
Kakai 1	733 382,2	8 920 141,5	129,0
Kakai 2	733 219,4	8 920 277,9	77,0
Amers			
Clocher de Puamau	732 106,7	8 919 734,4	20,3
Calvaire blanc	732 078	8 919 660	env 30

**Omoa**

Nom du point	X	Y	Z
Mahitua	753 839	8 834 405	9,6

**Hakahau**

Le point Max mis en place en 1987 à Hakahau a disparu.

**Taaoa**

Nom du point	X	Y	Z
Motu Anakee			
- Boulon	714 864,6	8 914 255,9	2,4
- Signal	714 865,8	8 914 255,7	2,0
Teaeoa			
- Piquet	715 790,9	8 914 832,6	7,0
- Croix	715 787,3	8 914 832,8	7,0
Taaoa plage			
- Piquet	712 360,96	8 912 468,69	3,0
Mont Ootua			
- Borne Ootua	722 915,17	8 918 990,43	796,0
- Borne Ootua 2	722 887,57	8 918 897,90	799,0
Taaoa crête			
- Piquet	713 543,91	8 910 311,14	378,1
Pua			
- Borne	712 936,85	8 910 658,60	413,0
Meteo			
- Principal	715 217,57	8 915 342,57	51,8
- Secondaire	715 238,04	8 915 347,40	51,0
- JMR 87*	715 229,73	8 915 367,77	59,4
Amers			
Feu de la jetée	715 625,1	8 915 445,3	4,3
Pylône Tapeata	721 618	8 919 752	681
Pylône Clovis	714 222	8 915 019	136
Phare pte Feki	715 231,25	8 915 267,35	45,8

\* Borne implantée en 1987; avait disparu en 1988 (noyée dans le béton d'une nouvelle terrasse).

**Tai O Hae (Nuku Hiva)**

Nom du point	X	Y	Z
Fort Collet : boulon	599 542,37	9 014 214,34	28,4
Paahatea : tige fer	598 564,3	9 014 508,3	1,0
Mop feu : borne	598 710,7	9 014 588,8	4,7
Arc : borne	599 261,5	9 012 502,3	1,5
Jeanne : borne	598 291,9	9 012 761,0	1,7
Canon : borne	598 121,3	9 011 622,6	6,3
Fusil : borne	599 462,9	9 011 690,1	3,4
Sentinelle est	599 499,48	9 011 557,34	42,5
Corail : borne	599 358,8	9 013 579,9	9,5
Résidence :			
repère 2	599 678,36	9 014 105,67	2,0
repère 3	599 664,35	9 014 090,70	2,0
repère 4	599 675,61	9 014 111,50	2,3
repère 5	599 671,53	9 014 101,71	2,3
repère 6	599 675,13	9 014 097,22	2,3
Amers			
Feu du Fort Collet	599 542,3	9 014 213,4	30,0
Balise est	599 169,9	9 014 497,0	5,0
Mât de pavillon	599 189,0	9 014 553,0	15,4
Balise ouest	599 583,1	9 014 496,7	4,8
Monument aux morts	599 190,6	9 014 562,1	6,5
Monument « découverte »	599 523	9 014 442	4
Feu directionnel	598 732,3	9 014 613,3	15,5
Résidence : mât pavillon	599 675,78	9 014 111,35	15,7

Système WGS 84 – UTM fuseau n° 7 – ellipsoïde  
WGS 84

### Hane

Nom du point	X	Y	Z
<b>Bornés</b>			
Ploërdut GPS	661 007,02	9 013 075,33	3,5
Véro (GPS)	661 726,31	9 012 035,26	2,9
Béa	661 710,1	9 012 015,8	4,0
Bubry	661 726,2	9 012 343,1	63,2
Dinard	660 926,6	9 012 679,6	48,9
Gouenec	662 103,5	9 012 287,6	2,6
Paimpol	660 951,9	9 012 453,3	49,9
Ploërdut (optique)	661 012,4	9 013 069,4	1,5
Rochebonne	661 111,8	9 013 174,0	5,0
Roscoff	660 695,3	9 012 171,3	73,0
Tregastel	661 094,1	9 013 139,4	2,0
<b>Non borné</b>			
Lignol	662 045,3	9 012 470,2	-

Position des points de rattachement des réseaux IGN 72 et WGS 84

Projection UTM fuseau n° 7

Ellipsoïde international si système IGN 72

Ellipsoïde WGS 84 si système WGS 84

Nom du point	Coordonnées IGN 72		Z	Coordonnées WGS 84	
	X	Y		X	Y
Manche à air est	659 426,49	9 011 696,33	36,0	659 266,24	9 011 761,70
Station Béa	661 870,30	9 011 949,55	3,0	661 710,10	9 012 015,85
Motu Hane (sommets)	661 886,4	9 011 813,5	162,0	661 728,20	9 011 876,55

**ANNEXE 5**  
**LISTE DES POINTS GÉODÉSIQUES NOUVEAUX AUX TUAMOTU**

**Tikehau**

Système MOP 88 – projection UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde WGS 72

Désignation	X	Y	Z*
Tuherahera	366 354,12	8 328 696,62	1,0
Tavanaia	377 061,67	8 331 255,74	1,0
Motu Mauu	368 591,56	8 332 367,72	0,1
Paaie	373 498,72	8 337 241,88	0,7
Tohuarei	375 035,14	8 334 107,77	0,3
Oeoe	376 197,22	8 347 289,99	1,0
Puarua	382 096,79	8 344 383,99	1,0
Teo	367 212,67	8 344 484,06	1,0
<b>Points rattachés</b>			
Tuherahera : second. MOP 86	366 356,87	8 328 693,05	1,0
Tuherahera : second. MOP 87	366 270,05	8 328 690,29	2,0
Tuherahera : second. MOP 88	366 336,13	8 328 750,53	
Motu Mauu : secondaire	368 578,89	8 332 353,55	0,1
Tavanaia : secondaire	372 991,38	8 331 205,40	0,2
Oeoe : « carré »	376 313,0	8 347 163,6	0,5
Motu Mauu (borne MHPF ?)	368 570,58	8 332 349,38	0,2
<b>Balises</b>			
Balise bâbord n° 2	363 765,0	8 339 751,1	4,0
Balise bâbord n° 4	363 803,3	8 339 125,4	4,0
Balise bâbord n° 6	364 079,1	8 337 951,7	4,0
Balise bâbord n° 8	364 166,7	8 337 342,5	4,0
Balise bâbord n° 10	364 513,4	8 336 370,4	4,0
Balise bâbord n° 12	364 893,4	8 335 372,1	4,0
Balise bâbord n° 14	365 368,5	8 334 391,4	4,0
Balise bâbord n° 16	365 639,6	8 333 760,9	4,0
Balise bâbord n° 18	366 362,9	8 332 118,5	4,0
Balise bâbord n° 20	366 694,6	8 331 464,1	4,0
Balise bâbord n° 22	367 044,6	8 329 525,3	4,0
Balise tribord n° 1	363 303,9	8 339 390,2	4,0
Balise tribord n° 3	366 783,3	8 330 470,2	4,0
Ancienne balise Tamara	364 562,7	8 336 374,1	1,5
Ancienne balise Castel	365 425,7	8 334 436,5	5,0
Ancienne balise jetée	366 693,7	8 328 634,4	3,0

\*: L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé (en l'absence d'observation de marée).

## Ahe

Système MOP 88 – projection UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde WGS 72

Désignation	X	Y	Z*
Fondamental	569 614,35	8 392 942,21	0,5
Terme nord	570 510,70	8 402 129,96	0,5
Tigris	572 799,42	8 398 315,07	0,5
Hangar	569 371,6	8 392 621,5	2,4
Tribun	569 388,96	8 400 135,01	0,0
Wharf	569 317,89	8 392 656,65	1,0
Points rattachés			
Fondamental : borne n° 2	569 609,26	8 392 947,33	0,3
borne n° 3	569 594,71	8 392 759,91	1,0
Terme nord : secondaire	570 496,69	8 402 445,82	0,5
Tigris : secondaire	572 804,35	8 398 310,82	0,5
Wharf : n° 2	569 283,56	8 392 678,95	1,0
Wharf : socle mât pavillon	569 323,71	8 392 653,06	2,0
Balisage			
Balise bâbord n° 2	569 343,27	8 401 517,53	4,0
Balise bâbord n° 4	570 298,24	8 399 878,74	3,4
Balise bâbord n° 6	569 557,03	8 398 373,05	3,8
Balise bâbord n° 8	569 447,45	8 396 915,86	4,2
Balise bâbord n° 10	569 103,40	8 394 075,49	3,8
Balise tribord n° 1	570 932,53	8 401 458,67	3,8
Balise tribord n° 3	569 435,20	8 400 110,03	4,0
Balise tribord n° 5	568 699,87	8 394 553,29	3,8
Balise tribord n° 7	568 934,19	8 393 581,08	3,8
Espar n° 1	569 103,74	8 392 802,29	1,6
Espar n° 2	569 134,75	8 392 747,17	1,4
Espar n° 3	569 120,86	8 392 613,61	1,3
Espar n° 4	569 491,09	8 400 975,43	2,5
Espar n° 5	569 622,03	8 397 843,85	1,8
Amer			
Maison sur pilotis	569 117,01	8 392 795,80	5,0

\* L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé (en l'absence d'observation de marée).



## Takaroa

Système MOP 89 – projection UTM fuseau n°6 – ellipsoïde WGS 72

Désignation	X	Y	Z*
Terme sud	711 549,97	8 398 866,74	1,2
Terme nord	715 725,31	8 401 987,17	0,4
Terme est	718 670,86	8 398 127,78	1,2
Quai sud	711 504,8	8 398 856,8	0,6
Quai est	711 556,1	8 398 889,8	0,8
Citerne	711 527,4	8 398 867,6	3,4
Terme nord 2	715 717,09	8 401 996,85	0,6
Xavier	720 781,87	8 405 830,37	1,1
Xavier 2	720 767,83	8 405 833,65	1,4
Cocotier 1	727 654,6	8 405 174,1	1,6
Cocotier 2	727 651,7	8 405 177,6	1,1
Ugolin	712 780,11	8 395 789,19	0,6
Alfa	711 483,5	8 398 389,5	0,5
Olaf	723 856,0	8 402 969,7	0,8
Willy	723 051,3	8 405 813,7	1,3
Vanaa	724 120,6	8 406 038,6	1,1
Astro 1969	711 474,2	8 398 910,7	1,1
<b>Balisage</b>			
Tourelle n° 1	711 137,0	8 398 789,5	2,5
Tourelle n° 2	711 144,9	8 398 891,7	2,5
Tourelle n° 3	711 249,7	8 398 801,6	2,5
Tourelle n° 4	711 253,0	8 398 875,2	2,5
Tourelle n° 6	711 394,6	8 398 863,3	2,5
Espar n° 1	712 468,7	8 398 750,2	1,5
Espar n° 2	712 565,4	8 398 744,1	1,5
Espar n° 3	713 091,9	8 399 525,1	1,5
Espar n° 4	713 343,5	8 399 864,4	1,5
Espar n° 5	713 551,9	8 400 034,5	1,0
Espar n° 6	713 568,3	8 399 875,7	1,0
Espar n° 7	713 487,6	8 399 760,2	1,2
Espar n° 8	714 118,8	8 399 075,3	1,5
Espar n° 9	714 222,5	8 398 782,3	1,5
Espar n° 10	713 434,8	8 398 535,5	1,5
Espar n° 11	713 176,5	8 399 245,9	1,1
Espar n° 12	712 718,9	8 400 007,3	1,5
Espar n° 13	712 628,1	8 400 296,6	1,2
<b>Amers</b>			
Manche à air	712 795,8	8 401 052,9	10,5
Clocher du temple	711 378,63	8 399 044,86	24,9
Mât de pavillon	711 470,69	8 398 869,01	9,5
Épave 1	716 955	8 403 514	-
Épave 2	713 436	8 401 111	-

\* L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé (en l'absence d'observation de marée).

**Takapoto**

Système WGS 84 – projection UTM fuseau n° 6  
– ellipsoïde WGS 84

Désignation	X	Y	Z
Matra 90 GPS	688 474,71	8 373 637,66	0,90
Harley	692 712,13	8 378 113,90	0,92
Alpine	698 886,22	8 389 893,66	0,17
Guzzy	693 243,00	8 386 281,70	0,20
Eva MOP 90	689 507,61	8 378 829,62	0,40
Mairie	688 422,3	8 373 545,4	1,4
AX	688 176,4	8 373 358,0	2,5
Chorus	690 270,5	8 374 519,6	1,5
Église	688 349,6	8 373 467,8	12
Taravana*	699 556,71	8 386 388,65	0,5
<b>Amer</b>			
Ancien phare blanc	688 183,0	8 373 378,5	9
Manche à air*	688 505	8 372 985	9

L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé du lagon, sauf pour les stations GPS rattachées à Matra 90 GPS.

\* Les coordonnées de ce point ne sont pas déduites de mesures géodésiques faites en 1990, mais des éléments du rattachement entre les systèmes MHPF 69 et WGS 84 adoptés et appliqués aux coordonnées déterminées en 1969 (la distance Alpine – Taravana observée en 1969 étant toutefois inchangée).

**Apataki**

Projection UTM fuseau n° 7 – ellipsoïde international

Dans les colonnes 2 et 3, figurent les coordonnées telles qu'elles avaient été adoptées lors du levé de 1986-87 dans le système MOP 86. Dans les colonnes 4 et 5, les coordonnées corrigées d'après les mesures de 1989 sont indiquées dans le système MOP 89.

Nom de la station	X (1986)	Y (1986)	X (1989)	Y (1989)
<b>Bornes</b>				
Niutahi				
repère 1	562 893,69	8 278 753,05	562 893,69	8 278 753,05
repère 2	562 898,15	8 278 756,01	562 898,15	8 278 756,01
repère 3	562 897,70	8 278 759,38	562 897,70	8 278 759,38
Taina	561 615,93	8 284 278,95	561 615,21	8 284 278,79
Jasmin	559 634,80	8 294 105,08	559 632,80	8 294 104,67
Piano	560 574,32	8 301 825,23	560 571,32	8 301 824,94
Pitate	563 306,37	8 306 067,06	563 302,82	8 306 067,12
Jonque	564 810,4	8 307 622,9	564 806,7	8 307 623,2
<b>Balises</b>				
Alignement au 76,4°				
balise antérieure	562 828,8	8 278 741,2	562 828,8	8 278 741,2
balise postérieure	562 886,7	8 278 755,0	562 886,7	8 278 755,0
Alignement passe Pakaka				
pilier antérieur	563 056,0	8 278 949,5	563 056,0	8 278 949,5
balise postérieure	563 349,2	8 279 073,2	563 349,1	8 279 073,3
espar bâbord est	563 333,2	8 278 765,4	563 333,2	8 278 765,4
espar bâbord ouest	563 183,5	8 278 796,2	563 183,5	8 278 796,3
Espar de Roto Ava	néant	néant	565 995,79	8 307 112,02
<b>Amer</b>				
Clocher de Niutahi	562 960,9	8 278 517,4	562 961,0	8 278 518,4

**Makatea**

Système MOP 88 – UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde WGS 72

Nom du point	X	Y	Z*
Astro MOP 88	365 395,71	8 248 716,94	70,2
Puutiare	363 995,73	8 251 527,58	123,5
Vigie	365 278,43	8 248 740,82	69,4
Aetia MOP 88	363 709,73	8 248 040,85	73,0
Éolienne	365 355,49	8 248 661,22	79,1
Astro Marine	363 156,52	8 250 017,42	24,9

\* Altitude ellipsoïdale

**Fakarava**

Zone nord

Système WGS 84 – projection UTM fuseau n° 6  
– ellipsoïde WGS 84

Désignation	X	Y	Z*
<b>Bornes</b>			
Paimpolaise	647 600,30	8 224 388,69	0,90
Hermine	648 153,02	8 221 004,02	0,77
Noé	635 209,66	8 220 609,64	1,47
Bouton	649 696,74	8 216 050,62	0,85
Caillou	647 809,74	8 221 010,34	0,5
Aéroport	644 194,84	8 224 670,68	0,8
Altair	642 927,3	8 224 195,9	0,8
Paradis	648 333,5	8 220 467,0	1,0
Cat	647 566,0	8 224 364,5	0,9
<b>Amers</b>			
Mât de pavillon	647 616,8	8 224 386,1	11
Eglise de Rotoava	647 924,0	8 223 758,3	12
Phare de Rotoava	645 246,4	8 225 216,5	15
Monument aux morts	647 875,5	8 224 536,4	16
Fare aéroport	644 221	8 224 758	8
<b>Balises</b>			
Balise lagon	644 126,3	8 221 867,6	3
Balise passe	639 719,1	8 221 503,4	3
Espar conique	647 486,6	8 223 794,6	3
Espar cylindrique	646 690,8	8 224 538,5	3

\* L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé du lagon, sauf pour les stations GPS rattachées à Paimpolaise.

Zone sud

Système MOP 89 – projection UTM fuseau n° 6 –  
ellipsoïde WGS 84

Désignation	X	Y	Z*
<b>Bornes</b>			
Motu Aito	665 091,40	8 174 358,90	0,9
Kuokuo	658 131,71	8 172 345,55	0,5
Petit motu	659 634,29	8 175 528,89	1,0
Quasimodo	664 173,09	8 173 419,16	1,0
Henriette	665 595,48	8 174 812,13	1,0
Fa	667 095,82	8 176 288,29	0,5
Miksou	670 453,08	8 177 758,20	1,0
Mornet	674 162,13	8 182 034,68	0,8
Popet	671 349,58	8 185 140,85	0,8
Tom	668 449,19	8 188 012,52	4,0

\* L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé du lagon.

**Tetiaroa**Système MOP 90 – projection UTM fuseau n° 6 –  
ellipsoïde WGS 84

Désignation	X	Y	Z*
Aito	224 667,00	8 116 941,00	1
Tiare	224 376,55	8 116 241,13	0,5
Dahlia	227 156,6	8 116 673,6	1
Carnélia	229 253,9	8 118 939,6	1
Yucca	225 158,4	8 118 292,0	1
David	224 327,5	8 115 672,4	0,5
Manche à air	224 554,1	8 116 830,7	1**

\* L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé du lagon.

\*\* Axe et embase du mât

**Manihi**Système MOP 88 – projection UTM fuseau n° 6  
– ellipsoïde WGS 72

Nom du point	X	Y	Z*
<b>Bornes</b>			
Terme sud	601 619,61	8 401 308,78	0,6
Terme nord	601 381,32	8 405 998,11	0,5
Aéroport MOP 88	600 987,34	8 404 278,99	0,7
<b>Amers</b>			
Clocher du temple protestant	601 345,3	8 401 320,4	11,0
Mât de pavillon	601 246,6	8 401 350,3	9,5
Aéroport manche W	600 154,1	8 403 838,1	11,0
manche E	601 173,0	8 404 366,5	8,0
<b>Balises</b>			
Tribord n° 1	601 213,1	8 401 300,2	3,7
Bâbord n° 2	601 126,8	8 401 353,3	4,0
" 4	601 188,9	8 401 444,5	3,7
" 6	601 275,5	8 401 551,4	3,9

\* Altitude rapportée au niveau moyen estimé

**Rangiroa**Système MHPF 66 – projection UTM fuseau n° 6  
– ellipsoïde international

Désignation	X	Y	Z*
<b>Bornes</b>			
Tiputa quai			
– douille (JMR)**	432 299,76	8 343 729,85	0,6
– boulon n° 1	432 295,93	8 343 727,43	0,6
– boulon n° 2	432 287,74	8 343 759,81	0,8
Faurumai borne MOP 88	415 641,7	8 348 217,5	0,2
Soufron borne MOP 88	432 002,2	8 344 383,2	0,5
<b>Amers</b>			
Avatoru : temple sanito	423 442,0	8 347 603,3	17
Tiputa : mât d'éolienne	432 713,6	8 344 112,6	23
Avatoru : église	423 462,1	8 347 322,7	15,5
Rangiroa phare	408 187,9	8 350 063,8	31
<b>Balises</b>			
Balise passe Tiputa			
croix peinte	431 694,1	8 343 752,2	4,3
croix peinte	431 693,95	8 343 751,00	1,2

\* L'altitude est rapportée au niveau moyen estimé du lagon.

\*\* Les coordonnées WGS 72 de ce point sont X = 432 541,37 ; Y = 8 344 099,71

## ANNEXE 6

## LISTE DES POINTS GÉODÉSIQUES NOUVEAUX DANS L'ARCHIPEL DE LA SOCIÉTÉ

## Presqu'île de Taïarapu

Position des 16 points géodésiques positionnés en 1989.

Système MOP 89 – projection UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde international

Nom du point	X	Y	Z	Observations
GPS pointe Vavi	256 562,34	8 028 104,22	0,3	Borne principale
Matahihae	256 790,59	8 027 407,37	0,0	Borne principale
Havae	260 028,49	8 023 793,35	0,0	Borne principale
Trident Havae	261 610,0	8 023 576,3	0,5	Borne secondaire
Beaumanoir	264 244,17	8 023 031,36	0,1	Borne principale
Hutupu	269 645,55	8 020 611,91	0,1	Borne principale
Trident Hutupu	268 649,0	8 021 646,2	0,5	Borne secondaire
Azen	272 595,56	8 022 461,18	2,5	Non borné*
Trident Azen	272 574,3	8 022 465,7	1,0	Non borné
Terurua	272 838,39	8 022 727,58	1,0	Non borné
Fenuaino	275 171,06	8 026 323,27	0,2	Borne principale
Mataorio	274 687,7	8 029 988,0	0,5	Borne secondaire
Toarua	274 662,02	8 032 783,52	0,0	Borne principale
Trident Toarua	274 443,1	8 032 442,8	0,5	Borne secondaire
Tautisable	272 191,32	8 035 802,01	0,1	Non borné
Tautinou	270 939,40	8 036 605,19	0,0	Non borné

\* Bien que non bornée, la station Azen est aisée à retrouver: c'est l'axe d'un rocher remarquable et de faible surface au sommet.

Position des 7 stations Trident occupées en 1989

Cordonnées MOP 89 – UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde international

Nom du point	x	y	z	x'	y'
Havae	261 610	8 023 576	12,5	261 611	8 023 574
Beaumanoir	264 244	8 023 031	12,6	264 245	8 023 029
Hutupu	268 649	8 021 646	12,5	268 650	8 021 644
Azen	272 574	8 022 466	13,0	272 575	8 022 463
Fenuaino	275 171	8 026 323	12,2	275 171	8 026 323
Mataorio	274 688	8 029 988	12,5	274 686	8 029 987
Toarua	274 443	8 032 443	12,5	264 441	8 032 441

(x,y) : coordonnées définitives

z : altitude de l'aérien

(x',y') : coordonnées adoptées pour la localisation du sondage



Liste des points géodésiques anciens recalculés  
Projection UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde international

Nom du point	x	y	x'	y'
Olivano: bollard nord de l'embossage Vairao	255 440,1	8 032 103,3	255 441,61	8 032 101,56
Feu antérieur: alignement de la passe Tapuera	256 421,5	8 031 402,6	256 423,79	8 031 399,79
Feu postérieur: alignement de la passe Tapuera	256 510,2	8 031 460,9	256 512,20	8 031 458,40
Balise tribord de la pointe Matahihae	256 792,7	8 027 420,9	256 794,45	8 027 419,36
Balise tribord: hôtel du Pari à Teahupo	255 143,6	8 024 000,0	261 145,97	8 023 998,64
Fenuaino	275 171,06	8 026 323,27	275 171,4	8 026 322,6

(x,y): coordonnées MOP 89

(X,Y): coordonnées IGN ou MHPF 72

**Chenal de Taapuna à Papeete**

Position des 16 amers et balises positionnés

Système IGN 72 – projection UTM fuseau n° 7 –  
ellipsoïde international

**Bora Bora**

Système IGN 51-54, projection UTM fuseau n° 5  
– ellipsoïde international

Désignation	X	Y	Z
Pylône OPT 1 Faaa	224 403	8 057 594	47,8
Pylône OPT 2 Faaa	224 419	8 057 534	47,0
Pylône OPT 3 Faaa	224 491	8 057 585	54,2
Pylône OPT 4 Faaa	224 331	8 057 543	46,7
Pylône OPT 5 Faaa	224 369	8 057 582	52,2
Phare pointe Aroa Moorea	205 277,44	8 065 773,04	22,1
Balise gonio Faaa	222 002	8 056 383	4
Abri pêcheur Faaa	224 982	8 058 407	3
Cathédrale Faaa	223 411	8 056 576	39
Vaitupa pylône n° 1	222 231	8 055 905	–
Vaitupa pylône n° 2	222 282	8 055 856	–
Vaitupa pylône n° 3	222 309	8 055 777	–
Vaitupa pylône n° 4	222 289	8 055 581	–
Vaitupa pylône n° 5	222 240	8 055 593	–
Vaitupa pylône n° 6	222 165	8 055 758	–
Vaitupa pylône n° 7	222 177	8 055 788	–
Collecteur gonio Faaa	222 067	8 056 442	4

Nom du point	X	Y	Z
<b>Points bornés</b>			
Équipement	633 359,6	8 177 461,9	1,4
SAT 116	632 871,8	8 177 717,4	2,0
Borne est sur le quai de Farepiti	632 879,4	8 176 745,6	0,8
Topua	632 080,5	8 174 552,2	0,7
Pirio (point IGN)	632 773,52	8 175 728,06	81,3
<b>Points non bornés</b>			
Trident			
Équipement	633 360,2	8 177 462,6	7,5
Puarau	634 005,7	8 176 921,6	7,0
Tapu	630 891,6	8 174 850,1	7,0
Teveraia	630 756,3	8 177 589,0	8,0
Tereia	632 659,46	8 178 259,85	129,0
<b>Stations optiques</b>			
Puarau	634 004,8	8 176 921,4	1,0
Platier	632 709,8	8 177 804,4	0,2
Épave	634 230,7	8 176 569,1	0,5
Remblais	633 963,3	8 176 795,9	0,8
Corail 1	633 328,9	8 176 365,3	0,4
Corail 2	633 326,3	8 176 366,3	0,4
Blue Lagoon	632 602,7	8 174 213,8	1,5

**Moorea**

Système IGN 52 – UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde international

Kersaint et Wharf font partie des répertoires de l'IGN et Orantium a été rattaché au réseau géodésique local.

Nom du point	X	Y	Z
<b>Points IGN</b>			
Wharf de Papetoai	195 095,61	8 063 588,81	0,94
Kersaint	195 853,62	8 063 873,23	0,95
<b>Points nouveaux</b>			
Troca	194 526,2	8 063 619,5	1,0
Porcelaine	195 010,3	8 063 564,1	1,0
Orantium*	197 182,0	8 063 297,1	1,0
Bollard	200 617,14	8 062 099,71	1,2
Clark	200 511,0	8 061 976,4	0,5
Gall	200 355,4	8 062 020,1	0,5

\* Cette borne avait déjà disparu en mars 1990.

**Tahaa**

Position des 16 points positionnés en baie de Tapuamu

Système IGN 51-52 – UTM fuseau n° 5 – ellipsoïde international

Nom du point	X	Y	Z
<b>Bornés</b>			
Touffe 1	655 350,3	8 161 985,4	1,0
Touffe 2	655 421,3	8 161 997,1	1,0
Carotte	655 318,5	8 161 971,3	1,1
Morbion	653 606,8	8 163 154,5	1,0
Poule	655 782,5	8 162 499,9	1,0
Poil	655 257,0	8 161 972,0	1,0
Puce	655 881,0	8 162 060,3	1,0
<b>Non borné</b>			
Maideu	655 328,1	8 162 682,0	/
<b>Amers</b>			
Marque 16/95	654 922,6	8 161 904,4	/
Marque 628/5	655 180,5	8 162 699,2	/
Marque cardinale nord	655 058,8	8 162 044,7	/
Capitainerie Tapua	655 361,3	8 161 949,1	12
Clocher Tapuamu	655 238,6	8 162 233,5	12
Mât de pavillon Tapuamu	655 154,9	8 161 972,2	7
Espar baie Tapuamu	655 743,0	8 162 129,5	1,0
Espar baie Tapuamu	655 683,9	8 162 186,6	1,0
Espar baie Tapuamu	655 604,2	8 162 197,6	1,0

**ANNEXE 7****LISTE DES POINTS POSITIONNÉS DANS L'ARCHIPEL DES AUSTRALES****Rimatara**

Système MOP 88 – UTM fuseau n° 6 – ellipsoïde WGS 72

Nom du point	X	Y	Z
<b>Bornés</b>			
Citerne	518 644,96	7 495 978,59	11,7
Relais TV	518 900,5	7 495 741,8	48,9
Base A	519 068,0	7 496 171,1	1,5
Amaru (école)	521 361,2	7 495 648,7	5,2
Anapoto (rocher)	518 538,6	7 496 070,8	3,0
Puporo	519 822,0	7 496 036,1	27,8
Taviria Honu	518 856,3	7 495 585,0	47,7
Anutupoo « Lotus »	518 858,3	7 496 554,4	3,0
Anapoto (porte du temple)	518 618,2	7 496 009,9	8,7
<b>Détails topographiques</b>			
Temple d'Anatopo, muret angle NE	518 636,2	7 496 025,6	–
Temple d'Amaru, muret angle NW	521 207,0	7 495 509,1	–
muret angle NE	521 229,4	7 495 505,6	–
Temple Mufuauru, muret angle SW	520 089,8	7 493 968,9	–

ERRATA  
aux  
ANNALES HYDROGRAPHIQUES  
(Vol. 18, n° 765, 1992)

Passage de la marée au-dessus d'un talus en océan stratifié  
A. Pichon et R. Mazé

p. 65	Prinsenberg		au lieu de	Pinsenberg
p. 66	paragraphe 1.1.1	$w = \frac{d\eta}{dt}$	au lieu de	$\eta = \frac{dw}{dt}$
p. 66	paragraphe 1.1.2	$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} - fv \right) = -\frac{\partial p}{\partial x}$	au lieu de	$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} - fv \right) = \frac{\partial p}{\partial x}$
p. 66	paragraphe 1.1.2	$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + fu \right) = 0$	au lieu de	$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} - fu \right) = 0$
p. 66	paragraphe 1.1.2	$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + g \right) = -\frac{\partial p}{\partial z}$	au lieu de	$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + g \right) = \frac{\partial p}{\partial z}$
p. 67	paragraphe 1.1.3	$\bar{\rho}_0 \left( 1 - \frac{N^2}{g} z \right)$	au lieu de	$\bar{\rho}_0 \left( 1 - \frac{N_2}{g} z \right)$
p. 67	paragraphe 1.2.1	$\vec{u}_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}$	au lieu de	$\vec{u}_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}$
p. 67	paragraphe 1.1.3	$w = w_1 \cdot e^{kx}$	au lieu de	$w = w_1 \cdot e^{kx}$
p. 68	paragraphe 1.3	$\frac{\partial \Psi_3}{\partial x} = \dots = w_1 \frac{N^2}{N^2 - \omega^2}$	au lieu de	$\frac{\partial \Psi_3}{\partial x} = \dots = -\omega_1 \frac{N^2}{N^2 - \omega^2}$
p. 68	paragraphe 1.2.1	$w_1 = \frac{dw_1}{dt}; w_i = \frac{dw_i}{dt}$	au lieu de	$\eta_1 = \frac{d\eta_1}{dt}; \eta_i = \frac{d\eta_i}{dt}$
p. 68	paragraphe 1.2.2	$\bar{\rho}_0 \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} - fv_i \right) = \dots$	au lieu de	$\bar{\rho}_0 \frac{\partial u_i}{\partial t} - fu_i = \dots$
		$\bar{\rho}_0 \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} - fv_i \right) = \dots$	au lieu de	$\bar{\rho}_0 \frac{\partial u_i}{\partial t} - fv_i = \dots$
		$\bar{\rho}_0 \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + fu_i \right) = \dots$	au lieu de	$\bar{\rho}_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} + fu_i = \dots$
p. 69	paragraphe 2.1	$\frac{\partial p}{\partial x} - \alpha^2 \frac{\partial q}{\partial z} = K$	au lieu de	$\frac{\partial p}{\partial x} - \alpha^2 \frac{\partial p}{\partial z} = K$
p. 71	paragraphe 2.3.1	$\xi_0 = 0.65 \text{ m}$	au lieu de	$\xi_0 = 0.65 \text{ cm}$
p. 71	paragraphe 2.3.1	$a(x) = \alpha = \frac{\sqrt{\omega^2 - f^2}}{N}$	au lieu de	$a(x) = \alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 - f^2}{N}}$
p. 72		$u_M = \frac{1}{2} (u_A + u_B)$	au lieu de	$u_M = \frac{1}{2} (u_A - u_B)$
p. 72		$w(x, z, t) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\omega^2 - f^2}}{N}$	au lieu de	$w(x, z, t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega^2 - f^2}{N}}$
p. 73		$u_{D_1} = \frac{a - \alpha}{a + \alpha}$	au lieu de	$u_{D_1} = \frac{a - \alpha}{a - \alpha}$
p. 79		$w(z_{\max})$	au lieu de	$wz_{\max}$

**L O U I S - J E A N**  
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex  
Tél. : 92.53.17.00  
Dépôt légal : 772 — Octobre 1993  
Imprimé en France



# 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, les noms de lieu et les noms d'instruments doivent être écrits en bas de casse (minuscules) avec la première lettre en capitale (majuscule).

Par exception à la règle ci-dessus, les noms propres sont écrits en capitales dans la bibliographie.

Les noms de navires, les références à des ouvrages et les noms des espèces animales ou végétales doivent être écrits en italique ou soulignés d'un trait continu.

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 en anglais.

5) Les références bibliographiques seront groupées à la fin du manuscrit ; elles seront classées dans l'ordre d'apparition dans le texte. Ces références comporteront : nom de l'auteur, initiales des prénoms, date, titre complet de l'article, titre du périodique abrégé selon les règles internationales, volume, pagination complète.

6) Les manuscrits dactylographiés et les planches ne doivent pas excéder 25 pages.

## Illustration

1) Les dessins doivent être exécutés à l'encre de Chine sur papier calque de préférence, sinon sur bristol ou carte grattage (les tirages Ozalid, photocopies ou tout autre moyen de reproduction ne peuvent être acceptés).

2) Ils doivent être envoyés roulés ou à plat, mais jamais pliés.

3) Ils peuvent être présentés à grande échelle ; des réductions, exécutées par l'atelier de photographie, les ramèneront au format exigé de la publication : 16,5 × 25 cm ; ils ne devront en aucun cas être présentés à une échelle nécessitant un agrandissement. Lettres et chiffres seront écrits soigneusement et suffisamment grands pour qu'ils demeurent facilement lisibles une fois la réduction effectuée. Il est demandé de tenir compte dans la préparation des planches de la présentation du texte sur deux colonnes.

4) Pour les cartes et plans, il convient de faire figurer une échelle linéaire dont l'unité de mesure sera évidemment indiquée, et de ne pas mentionner d'échelle numérique susceptible d'être modifiée par réduction du cliché.

## Tirés à la suite

Les auteurs d'une même communication reçoivent collectivement vingt-cinq exemplaires de leur article. Les tirés à la suite supplémentaires doivent être commandés à l'envoi du manuscrit en précisant le nombre d'exemplaires ainsi que l'adresse à laquelle doivent être envoyées les factures.

## SOMMAIRE

Pages

### Première partie

Sur la projection de Mercator transverse de l'ellipsoïde terrestre, par J.J. LEVALLOIS, Ingénieur Général Géographe .....	5
Essai d'approche statistique prévisionnelle du courant côtier en fonction du vent, par P. RÉVILLON, Capitaine de Vaisseau honoraire, Centre d'Études et de Recherches de Biologie et d'Océanographie Médicale, Nice .....	13
Évaluation et procédures d'exploitation du sondeur multifaisceaux Lennermor, par L. KERLÉGUER, Ingénieur de l'Armement .....	37

### Deuxième partie

Mission Océanographique du Pacifique – Échelon de Polynésie (décembre 1988 – juillet 1990), par M. LE GOUIC, Ingénieur Principal de l'Armement (hydrographe) .....	77
--	----