

1^{er} Congrès International de l'Association Française de Topographie - "La Topographie du futur"

Hydrographie et Bathymétrie

par M. LE GOUIC
Ingénieur au Service Hydrographique
et Océanographique de la Marine

1 — Introduction

1.1 - Avant de commencer cet exposé, il est bon de revenir sur son titre : "Hydrographie et Bathymétrie". Beaucoup y verront un pléonasmе, considérant que le levé hydrographique a pour objet de donner une image fidèle de la topographie sous-marine, c'est-à-dire d'en observer la bathymétrie.

L'hydrographie peut être considérée comme la part de l'océanographie qui se consacre à l'information nautique, c'est-à-dire, à l'ensemble des éléments permettant d'utiliser l'océan comme moyen de communication. Parmi ces éléments figure, en bonne place, la représentation bathymétrique des fonds, mais aussi tout ce qui peut aider le navigateur (général, amers, topographie terrestre, marée, courants, localisation...).

D'autre part, il n'existe pas de représentation bathymétrique unique, contrairement à ce qui peut arriver — partiellement — sur terre : cette polyvalence relative de la carte terrestre est en grande partie liée au fait que le cartographe terrestre voit la réalité du terrain et en a donc une connaissance qualitative. Dans un levé bathymétrique, il faut deviner ce que l'on ne voit pas et le travail à effectuer est bien plus considérable qu'à terre.

Plus considérable et plus coûteux, car il immobilise des moyens importants, l'idée de réaliser un levé marin exhaustif, polyvalent est probablement irréalisable pour des zones étendues. Du fait de la difficulté, de la lenteur et du coût des levés en mer, à chaque époque on se contente de parer au plus pressé, tenant compte des connaissances déjà acquises, des techniques existantes et des moyens disponibles. Longtemps les besoins se sont confondus avec ceux de la navigation dont ils ont suivi l'évolution. Les levés effectués pouvaient servir à d'autres besoins — recherche scientifique, aménagement du littoral, génie océanique... — mais ils n'étaient pas conçus en fonction de ces usages.

En réalité on en avait peu conscience car l'instrumentation manquait pour faire des levés plus adaptés. Depuis quelques années moyens et besoins se développent simultanément et on a mis en évidence une certaine divergence entre les objectifs correspondant aux différents travaux bathymétriques.

Pour illustrer cette non polyvalence des levés bathymétriques, on peut analyser sommairement le besoin principal de différentes catégories d'utilisateurs.

Thème	Objectif principal	Caractéristiques du levé marin
Navigation	Sécurité	— Recherche des points hauts
Géologie Géophysique	Analyse structurale Evolution morphologique	— Analyse statistique des structures — Levé local (en général sur les reliefs en creux, fosses ou canyons)
Océanographie physique	Circulation	— Étude des passages profonds de communication entre bassins
Exploitation minière	Inventaire	— Analyses statistiques et évaluation des volumes
Travaux sous-marins	Morphologie	— Mesure des pentes
.....

Cette divergence partielle des besoins nous conduira à utiliser deux expressions distinctes pour parler des levés : le levé bathymétrique qui vise à déterminer la topographie du fond sans spécifier l'objectif, et le levé hydrographique au sens strict qui a pour finalité la navigation et comporte une part importante de bathymétrie.

1.2 - Puisque le levé hydrographique a pour but de fournir les éléments nécessaires à la sécurité de navigation, on peut penser qu'après 2 siècles de travaux et en dehors des zones évolutives, la tâche de l'hydrographe devrait être faible. En fait il n'en est — bien sûr — rien :

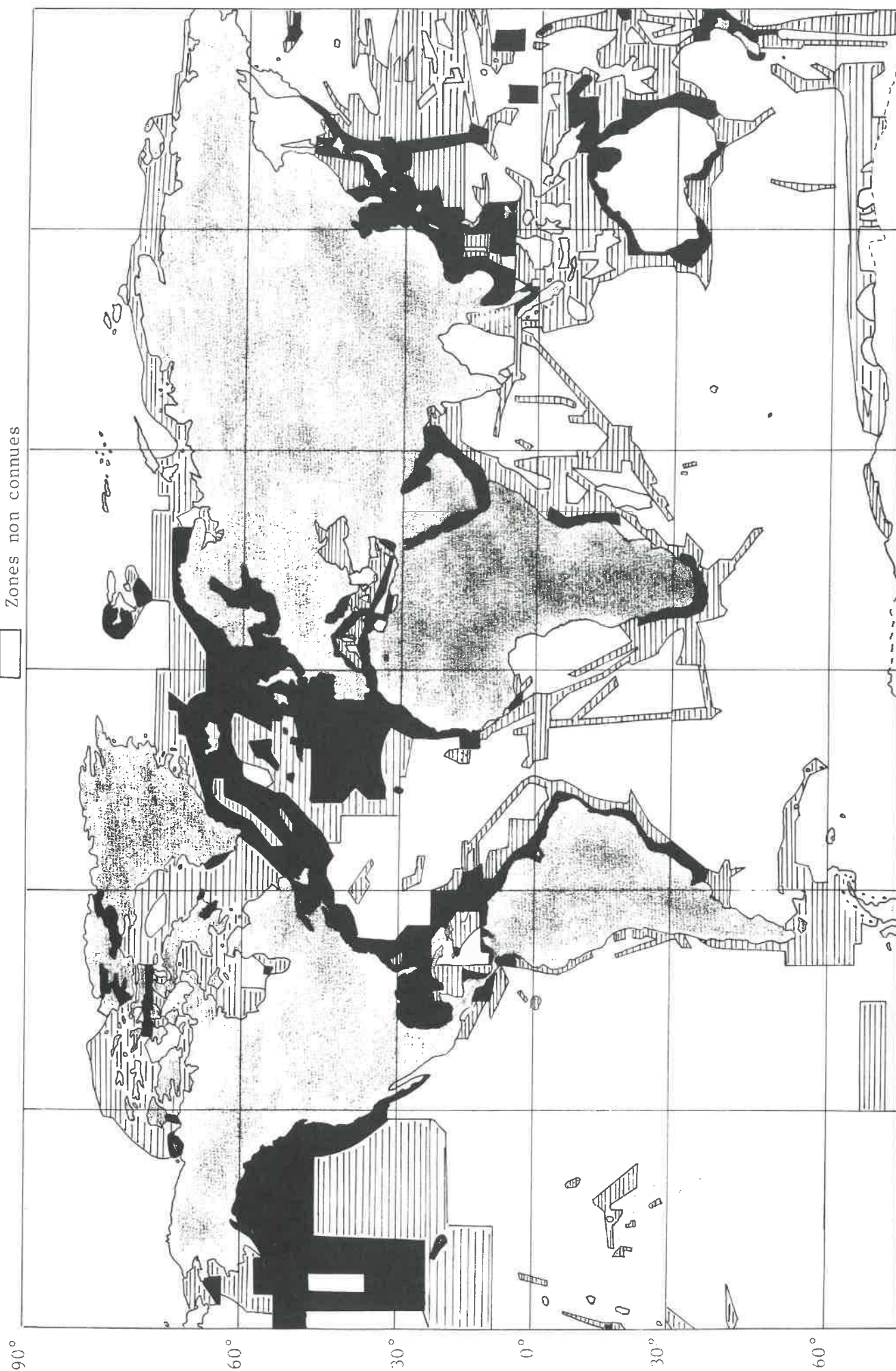
— que ce soit pour la simple reconnaissance de l'océan mondial (planche 1) puisque malgré la coopération internationale (politique d'échanges, GEBCO...), la plus grande partie des fonds ne bénéficie même pas d'une description valable des grandes structures ;

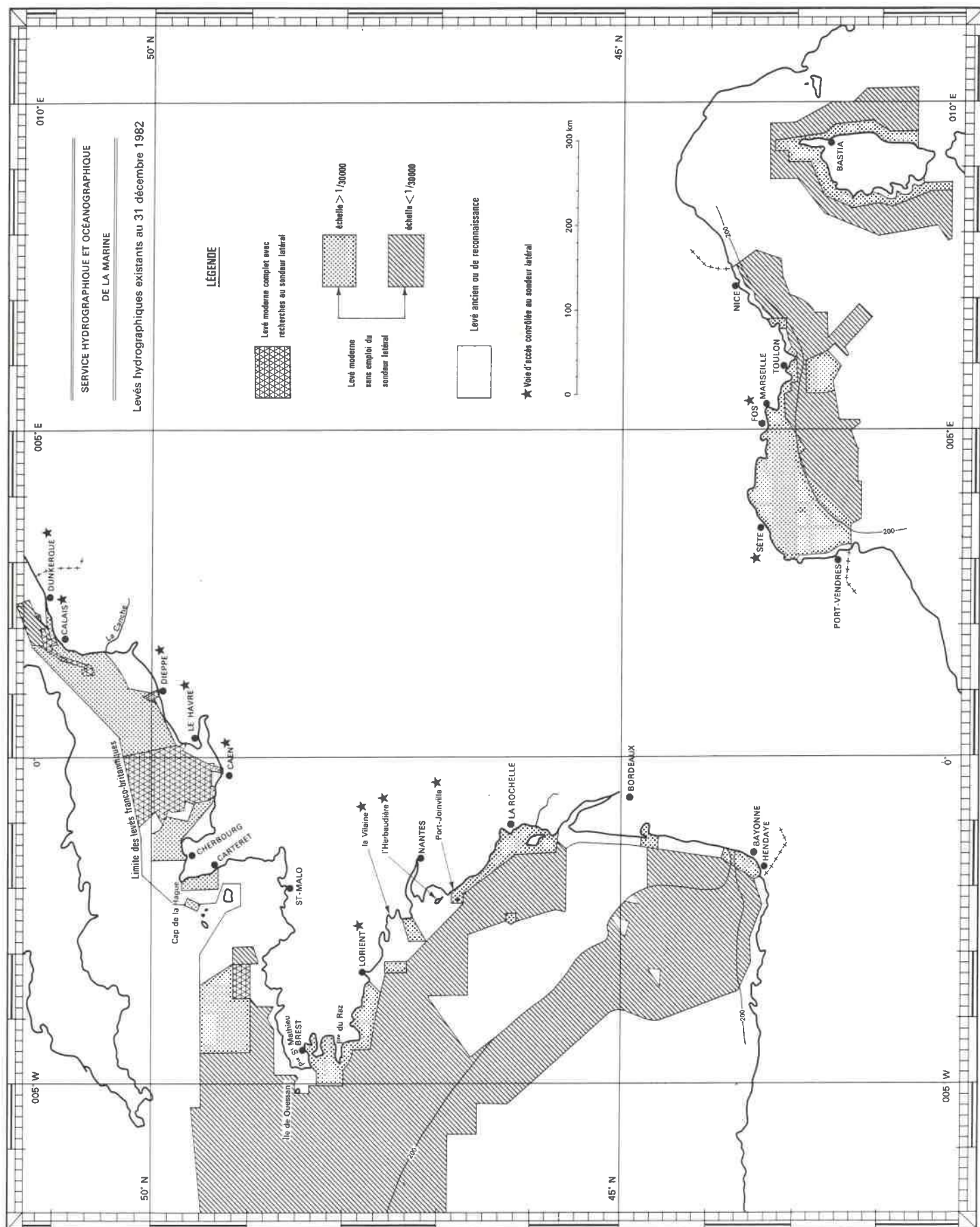
— que ce soit pour la couverture systématique des eaux nationales pour lesquelles les plans de charge

Zones où la densité des sondages permet de
décrire les grandes structures du fond

Zones où la densité des sondages ne permet pas
d'évaluer les grandes structures du fond

Zones non connues





des différents Services Hydrographiques couvrent plusieurs décennies (planche 2) et suivent les règlements internationaux (ZEE, échanges...);

— que ce soit pour réactualiser les levés selon les normes de qualité fixée par l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI) en fonction des moyens techniques disponibles, ou en fonction des besoins nouveaux à satisfaire (navires à fort tirant d'eau, séparation de trafic, remorquages d'engins (chaluts, sonars...), navigation sous-marine...): on peut ainsi noter que la plupart des levés français antérieurs à 1970 sont aujourd'hui probablement caducs.

Devant l'importance des travaux à réaliser, on assiste à une diversification des méthodes bathymétriques et à un développement des capteurs déjà opérationnels.

2 — Principes généraux d'un levé bathymétrique classique

Une détermination idéale de la topographie sous-marine devrait associer à chaque parcelle du fond une position dans les trois dimensions, c'est-à-dire une position horizontale et une profondeur, l'une et l'autre rapportées à un système de référence bien spécifié (ce qui suppose d'ailleurs, que les profondeurs soient réduites de la marée). Dans un levé hydrographique, les notions de localisation, et de sondage bathymétrique, ne sont pas indépendantes.

2.1 - Bathymétrie

Avec les moyens classiques, une position du bâtiment sondeur ne fournit d'information que sur une parcelle du fond. Il faudrait donc que le bâtiment occupe successivement toutes les positions possibles à la surface de la mer. C'est évidemment exclu, et les mesures sont conduites suivant des routes régulièrement espacées, les profils de sondes constituant ce qu'on appelle le levé régulier. On déduit du levé régulier les parties critiques qui méritent une étude plus fine.

Cet espacement des sondages conduit au problème important de l'interpolation: entre 2 points de mesure, nous n'obtenons que des valeurs probables de la profondeur et des détails importants de fond peuvent échapper complètement à l'exploration initiale ou ne pas marquer suffisamment les enregistrements pour justifier une étude particulière.

2.1.1 - Les mesures actuelles sont acoustiques. Le principe consiste à mesurer le temps mis par une onde sonore ou ultra-sonore (qui sont les seules à se propager avec une faible atténuation dans l'eau) pour traverser la tranche d'eau, se réfléchir sur le fond, et revenir vers l'hydrophone de réception. Ce temps est converti en distance en associant une vitesse de propagation du son dans l'eau, dépendant des conditions locales de température et de salinité. On réalise grâce à une haute cadence d'interrogation, une mesure quasi-continue le long d'un profil.

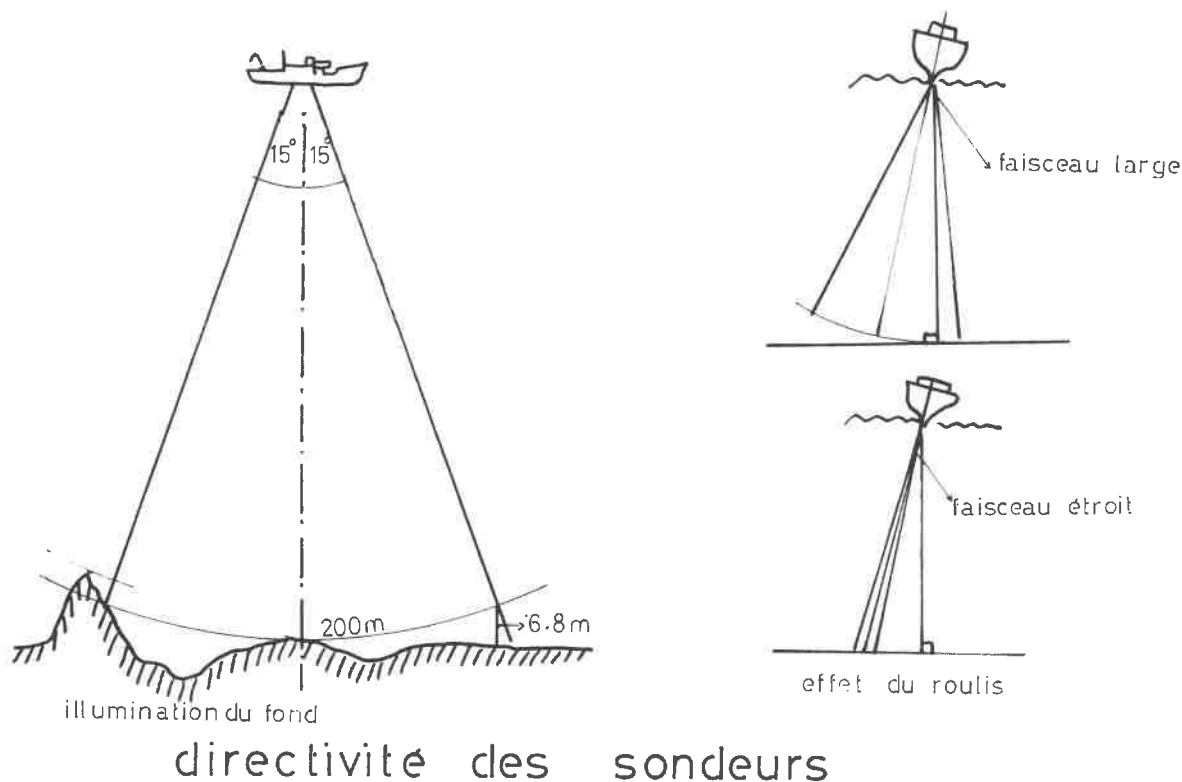


Fig. 3

... premier congrès international de l'AFT

Un émetteur sonore rudimentaire crée des ondes qui se propagent dans toutes les directions et atteignent une grande surface du fond dont chaque parcelle réfléchit une quantité plus ou moins grande d'énergie sonore. Le début de la réception correspond au point situé à la distance minimale de l'émetteur et qui n'est que rarement situé à la verticale du navire : l'image du fond est déformée (relief émoussé, faibles pentes...) (figure 3). On améliore la directivité du faisceau sonore en augmentant la taille de la base d'émission (limitée par les possibilités d'installation) ou la fréquence (avec une diminution de portée), ce qui assure une meilleure fidélité de la représentation mais au détriment de la taille de la zone insonifiée, donc au détriment de la sécurité de détection.

Les sondeurs à faisceaux larges (demi-ouverture du lobe d'émission de 10 à 15°), quoique créant des déformations importantes de l'image du fond, ont plusieurs avantages en hydrographie et sont donc considérés comme le meilleur compromis aujourd'hui :

- la surface du fond "interrogée" est importante et la probabilité de détecter les relèvements de fonds est satisfaisante ;
- la plupart des navigateurs sont équipés de sondeurs de ce type ;
- la déformation du fond se fait systématiquement dans le sens des profondeurs plus faibles, donc dans le sens de la sécurité ;

2.1.2 - Pour les différentes phases du levé, de l'exploration initiale aux recherches finales, on

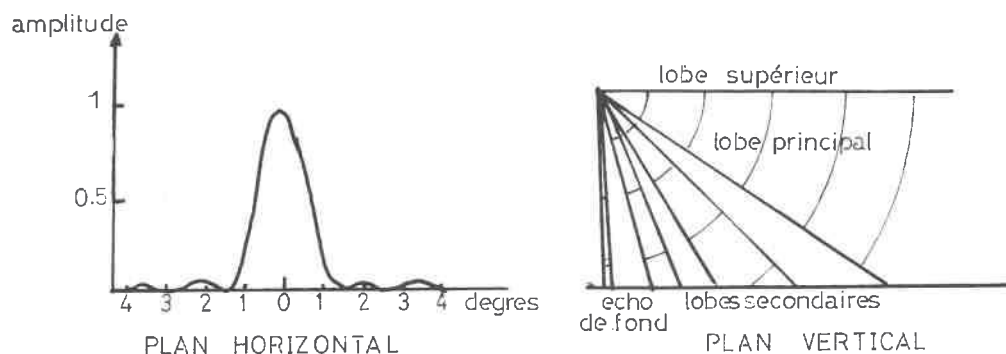
adopte des normes qui visent à ne gaspiller ni le temps, ni l'argent, et sont donc fonction non seulement des moyens technologiques disponibles et des caractéristiques de la zone, mais aussi des objectifs du levé. A titre d'exemple, l'espacement des profils du réseau régulier est actuellement le plus souvent de 100 m par petits fonds, de 200 m sur le reste du plateau continental, et de 500 à 2 000 m au-delà : ils ont été définis d'après les qualités des sondeurs actuels et des systèmes de positionnement disponibles.

La représentation du fond obtenue ne correspond à la réalité qu'avec une certaine probabilité, d'autant plus grande que le réseau régulier est plus serré. Les dangers ponctuels ont les plus grandes chances de ne pas être décelés.

2.2 - Détection des obstructions

Une obstruction (naturelle ou artificielle) est un danger qui du fait de ses dimensions horizontales, a toutes chances d'échapper au sondage régulier ; il peut s'agir d'une épave, d'un obstacle artificiel, d'un pâtre de corail... Pour qu'un levé hydrographique d'aujourd'hui soit complet, il faut, en plus du levé régulier probabiliste, offrir des garanties que l'on n'a pas laissé échapper d'obstruction dangereuse entre 2 profils.

Pour offrir, par exemple, la garantie qu'aucun relèvement de fond supérieur à 1 % de la profondeur ait échappé au cours du levé régulier, il faudrait réduire la distance entre 2 profils à un quart de la profondeur. En sondant à 10 nœuds, 24 heures sur 24 (ce qui est impossible), lever un carré de 10 M



Géométrie du sondeur latéral

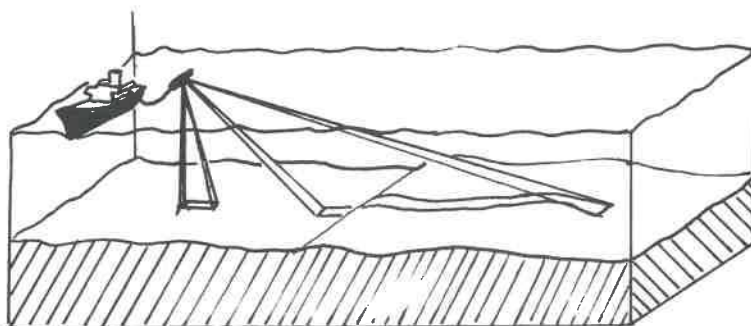


Fig. 4

× 10 M (ce qui représente une petite zone) par 20 mètres de fonds prendrait plus de 5 mois !

On allège cette tâche de détection des obstructions en utilisant des moyens d'investigation transversale : ce sont les sondeurs latéraux et les sonars hydrographiques. Un sonar émet des ondes acoustiques qui ont une grande directivité en azimut et une forte incidence par rapport au fond. Ces ondes atteignent le fond suivant une bande étroite, dont chaque parcelle est alors caractérisée par son azimut, sa distance à l'émetteur, et une certaine mesure de l'énergie retournée.

Avec le sondeur latéral (figure 4), le balayage du fond est obtenu par déplacement de la base émettrice-réceptrice, remorquée à une certaine immersion choisie en fonction de la profondeur du fond. Avec le sonar hydrographique (figure 5), le balayage est

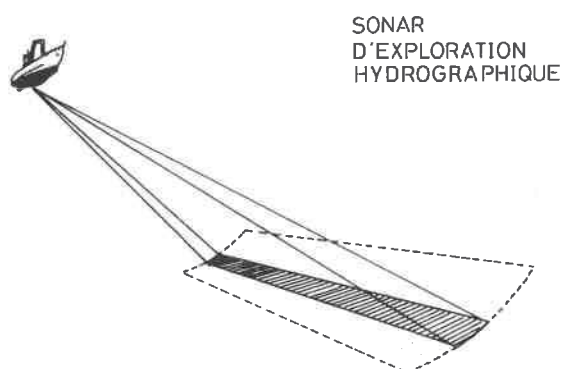


Fig. 5

réalisé électroniquement en modifiant l'orientation du faisceau ; par rapport au sondeur latéral, les faisceaux sont stabilisés et les informations recueillies ne sont pas tributaires de la navigation d'un engin remorqué : il est par contre beaucoup plus cher et son installation est fixe dans le bateau.

Dans les 2 cas, l'image acoustique obtenue sur l'enregistreur (papier) ou sur écran de contrôle ressemble à un négatif de photographie où les obstacles laissent une trace foncée (haute énergie réfléchie) suivie de l'ombre portée. Cette image ne donne que des renseignements qualitatifs (sauf à faire des hypothèses hardies sur la structure hydrologique de la tranche d'eau) : pour obtenir une information sur la profondeur des obstacles, il faudrait en plus de la distance et de l'azimut de l'obstacle à l'émetteur, mesurer son site : c'est ce que réalisent les sondeurs multi-faisceaux (cf. § 3).

2.3 - Localisation

Sans entrer dans les détails de la localisation marine, on peut dire que dans le schéma classique, le problème du positionnement est résolu en 2 temps : on détermine d'abord les positions précises d'un certain nombre de points à terre, et c'est par rapport à ces points géodésiques qu'on détermine les positions du moyen flottant.

Les différents systèmes radio-électriques utilisés se distinguent les uns des autres par diverses caractéristiques, notamment la fréquence des ondes. En

général, précision et portée sont deux qualités contradictoires : deux fois la portée optique et une précision métrique pour le Trident III par exemple, une portée de plusieurs milliers de km et une précision de quelques hectomètres avec le Loran C.

Au large, il n'existe actuellement qu'un système n'exigeant pas d'infrastructure terrestre : c'est le système de satellites Transit, mais qui même couplé avec une centrale d'estime performante (loch Doppler ou gyroscope par exemple) ne permet guère qu'une précision de 500 mètres au mieux.

Ces considérations de portée et de précision sont importantes en hydrographie, car il est nécessaire que la précision lors des levés soit supérieure à celle dont auront besoin les utilisateurs d'une part, et que l'on puisse réaliser des mesures intercalaires entre deux points sondés d'autre part. L'échelle du levé bathymétrique doit en tenir compte.

Une évolution — décisive — est en vue avec le système Navstar. Les utilisateurs qui pourront bénéficier de la précision maximale, seront en mesure de se localiser à quelques mètres près en n'importe quel point du globe. C'est dire que ce système suffirait à lui seul à satisfaire la plupart des besoins de localisation hydrographique, sans opérations géodésiques préliminaires !

Aspect complémentaire de cette évolution, les exigences cartographiques des navigateurs vont croître (une imprécision de quelques centaines de mètres sera intolérable dès lors qu'ils auront les moyens de connaître leur position avec une incertitude bien moindre) et de nombreux levés hydrographiques satisfaisants aujourd'hui seront à reprendre !

Ayant précisé les principes généraux et caractéristiques principales des levés hydrographiques, nous allons examiner les tendances actuelles vers des solutions plus efficaces aux problèmes que pose la réalisation de levés bathymétriques. En premier lieu, nous allons considérer les mesures effectuées depuis un navire.

3 — Mesures acoustiques

Nous avons vu qu'avec les techniques acoustiques classiques, il faut faire un choix entre les sondeurs à faisceau large qui assurent une bonne couverture du fond lors des levés mais qui déforment l'image de la topographie sous-marine, et les sondeurs à faisceau étroit qui sont plus justes, mais également très directifs, la bande insonifiée étant très étroite.

Une solution pour regrouper dans un même outil les qualités contradictoires de ces deux types de sondeurs est de couvrir le fond par plusieurs sondes juxtaposées, chacune correspondant à un sondeur élémentaire de faible ouverture angulaire. On associe ainsi les qualités de couverture (par la multiplication des mesures) et de précision.

Des essais ont été faits par les Services Hydrographiques Canadiens et Finlandais pour installer

... premier congrès international de l'AFT

sur une rampe perpendiculaire à l'axe d'un navire des transducteurs juxtaposés : mais l'équipement ainsi réalisé ne peut fonctionner qu'en eaux très calmes (figure 6).

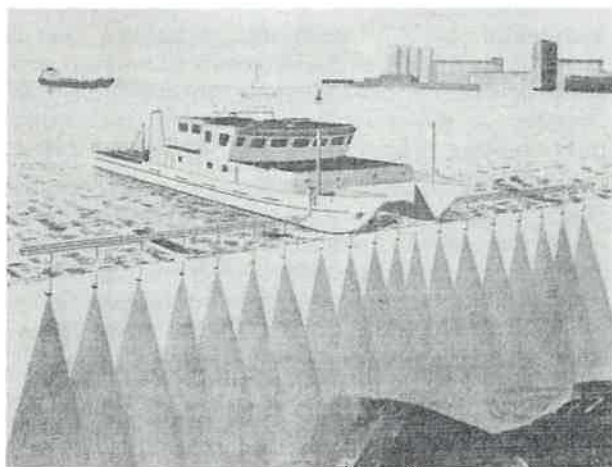


Fig. 6

Le développement des techniques de traitement du signal a permis la réalisation d'une catégorie révolutionnaire de sondeurs, dits multifaisceaux, dans lequel les sondes élémentaires sont créées électroniquement. A l'émission, un volume très étroit dans l'axe du navire, mais très ouvert transversalement est insonifié. A la réception, au contraire, une forte directivité en site est assurée à une série d'hydrophones juxtaposés. La composition des figures d'émission et de réception fournit des sondes élémentaires s'appuyant sur des parcelles du fond de faible surface (figure 7). Le bateau se déplaçant, l'ensemble de ces parcelles couvre complètement une bande du fond dont la largeur est fonction de l'inclinaison des faisceaux extrêmes et de la profondeur.

Pour l'hydrographe qui doit faire de ces mesures une exploitation quantitative, la révolution vient de ce qu'il n'est plus inconcevable de recueillir une information sur toute parcelle du fond. L'image obtenue est certes lissée en fonction de la taille des parcelles de terrain "éclairées", mais c'est un lissage tel qu'on connaît avec rigueur les dimensions des détails qui ont pu être éliminés.

Le sondeur multifaisceaux résout le problème d'interpolation, en réalisant en temps réel un levé surfacique, et la connotation probabiliste du mot sondage doit être supprimée.

Pour que le temps nécessaire à la couverture (complète) d'une zone ne soit pas prohibitif, il faut qu'à chaque cycle de mesure, une bande de largeur suffisante soit couverte. Avec le Sea Beam de la General Instrument Corporation, cette bande représente les 3/4 de la profondeur : une conséquence est que ce Sea Beam ne pourra être utilisé avec profit que pour les fonds importants.

Si l'on veut travailler sur le plateau continental ou dans les eaux littorales, la couverture recherchée pour une bonne efficacité représente plusieurs fois la profondeur. Ceci est très difficile à réaliser, car aux problèmes de génération des faisceaux élémen-

taires, s'ajoutent des difficultés de stabilisation, de directivité et surtout les effets de la réfraction liée à la structure hydrologique de la tranche d'eau. Ces difficultés expliquent que le seul sondeur multifaisceaux civil actuellement opérationnel soit destiné aux grands fonds.

Néanmoins, devant l'apport décisif que laissent entrevoir la possibilité d'accéder à des levés surfaciques les sondeurs multifaisceaux, le SHOM a demandé à la société Thomson/CSF d'étudier la réalisation d'un sondeur à faisceaux multiples destiné à travailler par petits fonds.

Il est d'ores et déjà certain que les levés des services hydrographiques équipés de tels sondeurs (grands ou petits fonds) vont tendre vers une polyvalence plus grande. En effet, pour un travail en mer de durée sensiblement égale à celle aujourd'hui nécessaire, l'hydrographe pourra relever un véritable modèle numérique de terrain dont l'exploitation couvrira davantage que les simples besoins de la navigation. Il est d'ailleurs probable que les normes des levés hydrographiques "modernes" devront suivre cette évolution majeure (puisque l'on passe d'un levé linéaire à un levé surfacique) et que bien des levés jugés aujourd'hui satisfaisants seront rapidement considérés caducs.

Une question reste néanmoins en suspens : les sondeurs multifaisceaux permettront-ils d'éviter les opérations spécifiques de recherche d'obstructions ? Les faisceaux générés n'auront probablement pas la finesse nécessaire pour représenter sans ambiguïté la nature de l'obstruction, mais seule l'expérience pourra trancher.

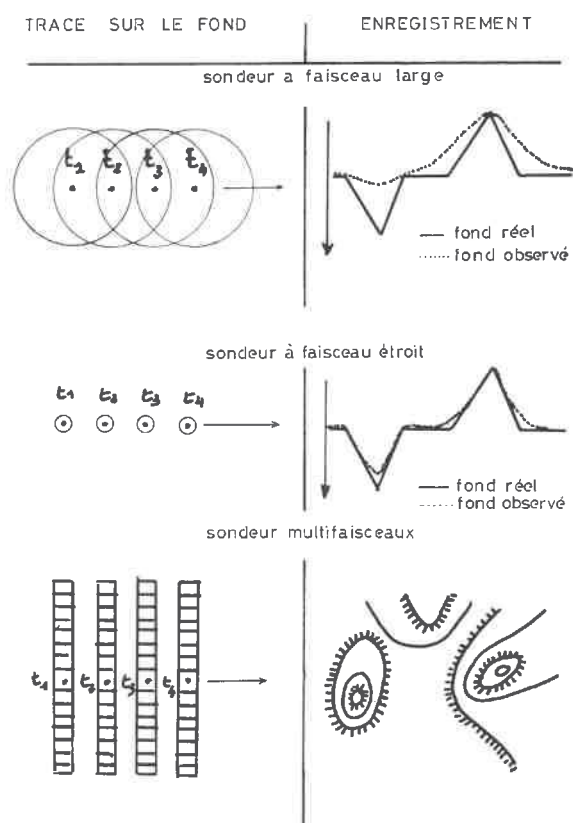


Fig. 7

Les sondeurs acoustiques utilisés en hydrographie sont mis en œuvre à partir de bâtiments de surface et la rapidité d'exécution des levés est tributaire de la vitesse de ces navires. Le phénomène de cavitation et les bruits hydrodynamiques ne permettent pas d'envisager des vitesses supérieures à 30 nœuds. Les dangers propres à la navigation en eaux peu profondes constituent une limitation supplémentaire.

La télédétection à partir d'aéronefs ou de satellites offre théoriquement la possibilité de s'affranchir de ces contraintes mais concerne exclusivement le domaine des petits fonds (techniques optiques ou hyperfréquence).

4 — Levés aéroportés

4.1 - Photobathymétrie

L'utilisation des photographies aériennes pour la restitution topographique des terres émergées — qui est une composante d'un levé hydrographique — est courante et ce sont les techniques de la photogrammétrie terrestre qui sont appliquées.

En examinant de près le cliché d'une zone côtière, on s'aperçoit que lorsque l'eau est assez claire, le fond est très nettement visible et que l'on peut également représenter la topographie du fond marin en eaux peu profondes.

Les difficultés proviennent de la transition air-eau, milieux d'indices différents, en particulier :

- il faut tenir compte de la réfraction du rayon lumineux non seulement pour le calcul des profondeurs, mais aussi pour le pointé sous-marin (parallaxe résiduelle lorsque les modèles ont été formés sur terre) ;
- il faut pouvoir enchaîner deux clichés dont la partie commune est uniquement marine ;
- la surface de la mer est agitée et les clichés d'une même portion d'eau ne représentent pas exactement la même surface ;
- la réflexion du soleil sur la surface cause des reflets parasites.

Les deux premiers points sont résolus avec les restituteurs analytiques, où l'on peut calculer des grilles de déformation pour la propagation sous l'eau. Il faut prendre en compte les deux autres points dès la réalisation de la mission de prise de vues. Les contraintes affectant les missions photographiques sur le littoral sont ainsi plus grandes que pour les missions terrestres :

- position du soleil : il doit être suffisamment haut pour que la tranche d'eau soit éclairée ($>30^\circ$) mais pas trop, pour éviter la réflexion spéculaire (fonction des focales, de la taille des clichés, de l'orientation des axes de prise de vues) ;
- marée : dans les zones à fort marnage, il faut observer simultanément au vol les hauteurs d'eau. On ne travaille alors qu'au voisinage d'une basse mer de vive eau ;
- conditions météorologiques : le vent doit être faible, non seulement pour assurer une bonne stabilité au vol de l'avion, mais surtout pour que la

houle n'affecte pas les clichés. L'absence de brume est obligatoire car il n'est pas possible d'utiliser les filtres jaunes classiques (masque sur l'eau) ;

— localisation : une localisation fine de l'avion doit être assurée non seulement pour guider l'avion, mais aussi pour préparer la mise en place des clichés. Avec un système Trident III, associé à un altimètre laser (ou mieux un lidar), on obtient une précision absolue d'environ 2 mètres en planimétrie et un mètre en altitude.

Si ces précautions sont respectées lors de la prise de vues, l'efficacité des méthodes photogrammétriques joue pleinement, et ce d'autant plus que la zone à lever est plus tourmentée et donc plus dangereuse (récif corailien par exemple). La prise en compte des divers paramètres (caméra, marée, réfraction, localisation...) est confiée au calculateur qui pilote le restituteur analytique. Le fait de disposer du plan d'eau comme référence d'horizontalité (surface équipotentielle) et d'altitude (marée connue) est un atout important lorsque l'infrastructure géodésique est peu dense.

Le rendement du levé photobathymétrique est grand et les profondeurs hydrographiques peuvent atteindre 10 mètres dans les eaux claires. La comparaison avec les documents classiques (issus de mesures acoustiques) est difficile car le levé photobathymétrique est continu puisqu'on représente les courbes de niveau et non un échantillonnage de valeurs ponctuelles.

Notons cependant, qu'avant la diffusion de ces levés aux navigateurs, un contrôle par des méthodes acoustiques est nécessaire pour valider l'ensemble de la restitution.

4.2 - Lasers hydrographiques

Les performances des mesures bathymétriques à partir de photographies aériennes, pour intéressantes qu'elles soient, sont limitées par les contraintes météorologiques strictes et la transparence de l'eau. En France métropolitaine, il est rare de voir le fond au-delà de 2 ou 3 mètres.

Pour améliorer les possibilités des mesures aéroportées, on est conduit à utiliser une technique active de mesures. Les ondes acoustiques se propagent difficilement dans l'air, les ondes hyperfréquences pas du tout dans l'eau. Il reste l'optique dont la fenêtre de transparence maximum se situe, pour la mer, entre 530 et 580 nm en tenant compte des teneurs probables en pigments dissous.

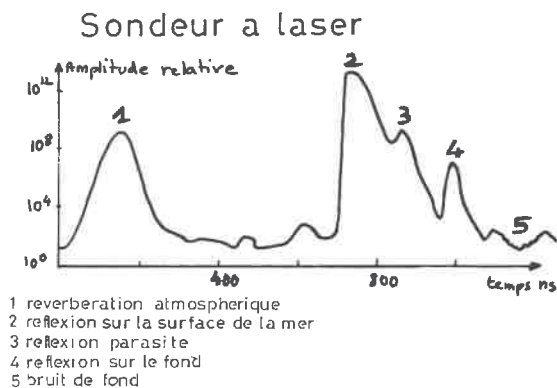
Pour assurer une bonne directivité aux faisceaux optiques émis, on utilise un système laser. Un balayage du rayon lumineux permet d'obtenir une couverture satisfaisante (l'angle maximum d'incidence étant voisin de 40°).

L'énergie émise doit rester faible pour ne pas causer de dommage aux êtres vivants susceptibles de croiser le rayon laser. La largeur des impulsions fixe la résolution : 0,3 mètre par fonds de 30 mètres avec une largeur de 3 ns.

Le récepteur se compose d'un objectif équipé de filtres sélectifs (destinés à réduire les bruits parasites de réverbération et de réflexion), couplé à un dispositif de détection, d'amplification et de comptage.

... premier congrès international de l'AFT

Dans l'enregistrement retour (figure 8), le signal correspondant au fond est un pic local beaucoup plus faible que l'écho de la réflexion sur la surface ou que le signal de la réverbération atmosphérique, ce qui rend sa détection difficile.



SIGNAL RECU PAR UN SONDEUR A LASER

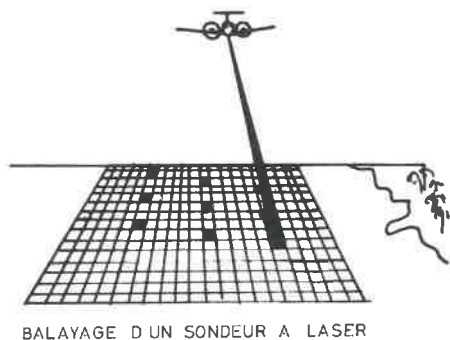


Fig. 8

Avec les réalisations actuelles (Canada, USA, Australie), la densité des sondages est élevée : 10 m dans les deux directions, ce qui correspond à un levé à 1/1 000. Mais la notion de profil disparaît : en effet, pour avoir une densité longitudinale comparable à celle obtenue en sondage acoustique (0,5 m le long du profil), il faudrait une fréquence de balayage 20 fois plus élevée, ce qui est difficilement accessible avec la technologie actuelle. C'est pourtant une évolution nécessaire si l'on veut garantir la détection des obstructions dangereuses de faible dimension.

Les performances obtenues avec les systèmes opérationnels varient de 10 à 50 mètres pour la portée et de 0,5 à 1 m pour la précision (chiffres comparables aux normes fixées par l'OHI). Elles sont très largement dépendantes de la transparence de l'eau (qui limite la portée jusqu'à une profondeur nulle si la turbidité est importante), des conditions atmosphériques (opérations nocturnes, sans pluie ni brouillard, vol à basse altitude) et de l'état de la mer (le vent doit être présent (vagues capillaires qui conditionnent la réflexion à la surface de la mer) mais faible pour ne pas déformer les échos réfléchis).

La faisabilité des sondages hydrographiques par laser aéroporté ne fait aucun doute, mais les restrictions d'emploi et de propagation de la lumière dans l'eau font qu'il est aujourd'hui difficile d'évaluer la rentabilité d'un tel sondage. Le SHOM a entrepris le développement d'un laser aéroporté pour ses levés côtiers.

L'utilisation des avions pour effectuer des levés hydrographiques, permet d'augmenter les rendements des opérations en mer mais la préparation des travaux reste délicate et la réalisation parfois aléatoire. D'où l'idée de profiter des qualités propres aux satellites : rapidité de survol, répétitivité des passages, taille importante des zones observées, indépendance relative aux infrastructures terrestres. Malheureusement, l'éloignement limite la précision des mesures et les méthodes satellitaires ne concernent que des levés de reconnaissance.

5 — Télédétection spatiale

5.1 - Radiométrie passive

Un satellite d'observation de la terre (Landsat, Spot...) découpe perpendiculairement à sa trace une bande de quelques dizaines de kilomètres de large, cette bande étant segmentée mécaniquement ou électroniquement en parcelles élémentaires (pixels) sur lesquelles l'énergie radiométrique réémise par le sol est mesurée (figure 9). L'avance du satellite sur son orbite permet de couvrir complètement une bande de terre située autour de sa trace au sol. L'observation se fait dans plusieurs canaux qui couvrent généralement le domaine visible et le proche infra-rouge.

ILLUSTRATION DE LA TECHNIQUE DU BALAYAGE PUSH BROOM

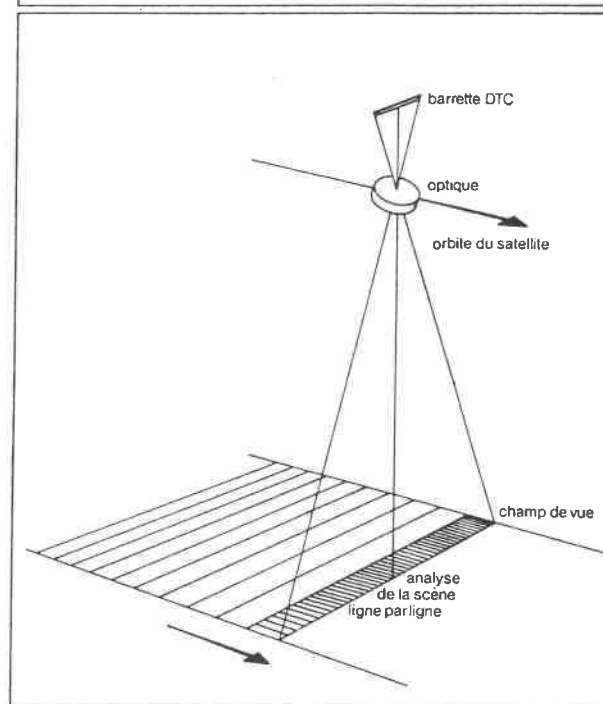


Fig. 9

Au-dessus des eaux littorales, le rayonnement est absorbé sélectivement par l'eau (pénétration nulle en infra-rouge puis croissante vers le bleu) et proportionnellement à la longueur du trajet. En théorie, il est possible, si le fond est visible, de relier les variations de profondeurs avec celles des signaux enregistrés. Les paramètres influençant cette mesure sont nombreux : absorption par les molécules d'eau et les pigments dissous, réflectance du fond, turbidité, bruits de fond atmosphériques et instrumentaux (figure 10).

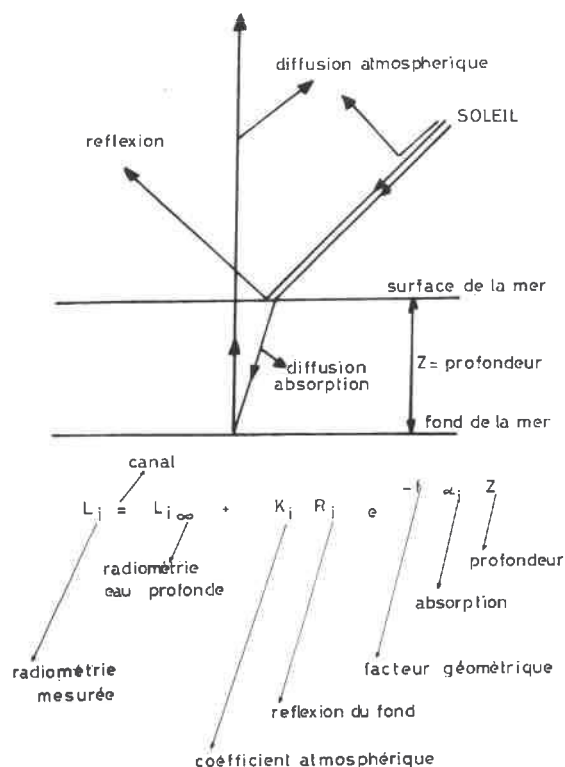


Fig. 10

La détection du fond ne pourra se faire que si l'association concurrentielle de ces paramètres, composant le signal radiométrique, se fait en faveur de la réflectance du fond. En utilisant les caractéristiques optiques de plusieurs canaux de mesure, on établit un modèle bathymétrique ajusté sur quelques valeurs connues (ce qui est toujours possible en hydrographie, puisqu'au cours des levés de reconnaissance du siècle dernier, quelques profondeurs étaient systématiquement observées). La précision peut être dans de bonnes conditions de 10 % jusqu'à des profondeurs de 30 mètres. L'échelle de la restitution est fonction de la taille des pixels et de la précision de leur localisation sur la surface de la terre : elle varie de 1/250 000 à 1/100 000 avec le satellite. La représentation bathymétrique obtenue ne peut pas être assimilée à un levé hydrographique, mais servira à optimiser l'utilisation des navires et à préparer les calendriers de travaux

nécessaires. Ce sont des levés de reconnaissance qui permettent de représenter le trait de côte, de détecter les hauts fonds et de fournir une évaluation bathymétrique rapide de zones insuffisamment connues (figure 11).

5.2 - Capteurs actifs

Avec un radar, on peut s'affranchir de la dépendance des mesures radiométriques aux conditions locales d'observation (nuages en particulier). Mais du fait de l'altitude élevée des satellites porteurs (les orbites optimales se situent entre 600 et 800 km d'altitude), on ne peut concevoir une antenne dont la taille permette une résolution au sol suffisante (antenne de 2 km pour une résolution de 10 m) : on contourne cette impossibilité physique en réalisant par le calcul une antenne synthétique (SAR : Synthetic Aperture Radar) : le principe consiste à corréler les signaux reçus de plusieurs interrogations successives sur un point et le résultat est la création mathématique d'une antenne de grandes dimensions (figure 12).

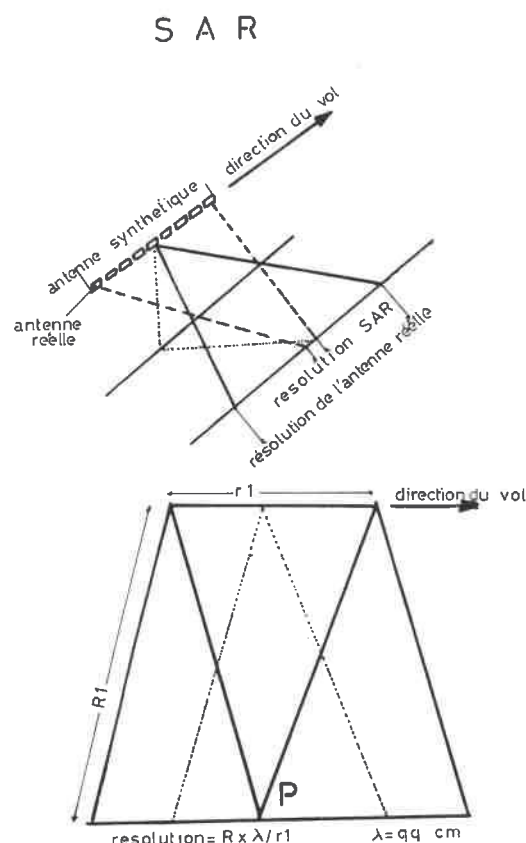
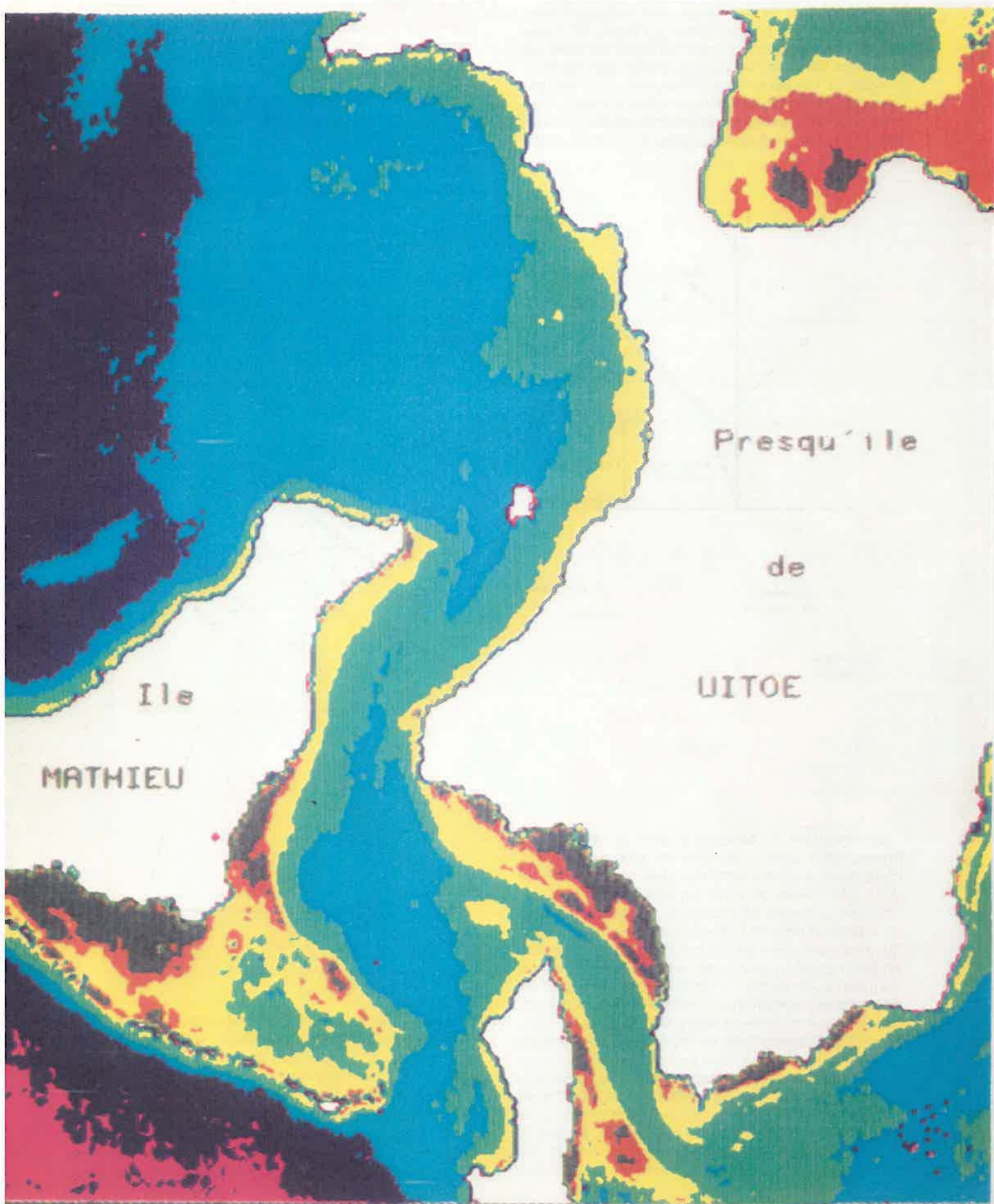


Fig. 12

Les ondes radars ont une fréquence de quelques GHz et ne pénètrent pas dans l'eau. Seules les observations de la surface de la mer sont donc possibles et la topographie du fond marin ne sera visible que si elle laisse une trace en surface.

Le processus d'observation de la bathymétrie peut être schématiquement décrit comme suit. Tout d'abord pour qu'il y ait réflexion de l'onde radar sur la surface de la mer, il faut qu'il y ait commensura-



Canal X51-X53 lisse.Axel13.
SPOT NOUVELLE CALEDONIE (simulation)

bilité entre sa longueur d'onde et celle des rugosités en surface : les ondes SAR sont centimétriques, elles s'appuieront donc sur les ondes capillaires générées par le vent (modéré, sinon seule la houle sera perceptible). Si la tranche d'eau est animée d'un courant laminaire (de marée par exemple), l'écoulement sera modifié au passage sur les discontinuités du fond et, si la profondeur n'est pas

Observation de la topographie avec un radar

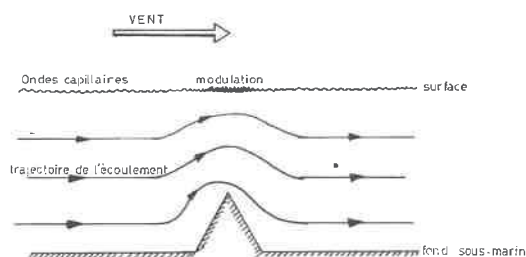


Fig. 13

trop importante, cette modification pourra être transmise par la couche d'eau jusqu'à la surface (figure 13). C'est cette modulation, témoin de la variation d'écoulement et donc de la topographie sous-marine, que percevra le SAR (figure 14).

Bien sûr, l'information recueillie n'est que qualitative et ne peut pas se substituer à un levé hydrographique. Mais dans les fonds à grande variabilité et très fréquentés (Pas-de-Calais par exemple), nécessitant des levés détaillés très réguliers (tous



Fig. 14

les 2 à 3 ans), le suivi de l'évolution des obstructions principales est alors possible, sans avoir à recourir à une mobilisation importante de moyens. La préparation et la réalisation des levés de contrôle en sera grandement facilitée. C'est dans ce sens que les SAR (satellites ou aéroportés) peuvent être considérés comme des aides à l'hydrographie.

6 — Conclusion

Je me suis limité à la présentation des techniques actuellement opérationnelles ou prometteuses, qui permettent d'effectuer ou d'assister un levé hydrographique. Toute une partie d'études en cours n'a pas été évoquée (sonars interférométriques, altimétrie satellitaire, méthodes magnétiques aéroportées, sonars laser...) car elles n'en sont qu'au stade de la prospective. Le tableau ci-dessous résume les moyens actuels ou prévisibles qui permettent d'avoir accès à la description de la topographie sous-marine.

Domaine	Moyen	Objectif	Support	Etat de l'art au SHOM
Acoustique	Sondeur classique	Levé bathymétrique	Bateau	Opérationnel
	Sondeur multifaisceaux	Levé bathymétrique polyvalent	Bateau	En développement
Mixte	Sonars	Détection d'obstructions	Bateau	Opérationnels
	Sonar interférométrique	Cotation des obstructions	Bateau	Veille scientifique
Mixte	Laser-acoustique		Bateau	Veille scientifique
Optique	Radiomètres	Reconnaissance bathymétrique	Satellite	En développement
	Photobathymétrie	Levé hydrographique	Avion	Opérationnel
	Laser	Levé bathymétrique	Avion	En développement
	Sonar laser	Détection d'obstructions	Bateau	Veille scientifique
Hyperfréquence	SAR et SLAR	Description topographique	Avion et satellite	En développement
	Altimètres	Description topographique	Satellite	Veille scientifique
Magnétisme	Magnétomètre et générateur de champ	Levé bathymétrique	Avion	Veille scientifique