

L'Institut Français de Navigation : 50 années d'avancées spectaculaires des géosciences au service des navigateurs

■ Jean BOURGOIN

L'après deuxième guerre mondiale a vu l'explosion de systèmes et de technologies nouvelles telles que la radiolocalisation, la localisation par satellites, le sondage par les sondeurs ultra-sonores, les sondeurs latéraux et multifaisceaux, l'automatisation de l'acquisition et du traitement des données, la carte électronique, l'océanologie spatiale. Les principaux progrès en géodésie sont issus chronologiquement, du traitement des mesures par ordinateur (1960), des distancemètres électroniques (1969), des satellites (1969), du GPS (1989), assorti du système DORIS, qui permet des déterminations au centimètre. La localisation en mer et la navigation ont bénéficié dès 1955 de l'avènement de la radiolocalisation, puis de la localisation par satellites. Le SHOM et l'IFN ont largement participé aux développements des techniques les concernant, et qui recoupent celles de la géodésie (TRANSIT, GPS, etc.). La mesure des profondeurs est fondamentale en hydrographie. Depuis 1945, la mesure bathymétrique par des méthodes acoustiques a pris la relève du sondage au plomb poisson. Le sondeur multifaisceaux, au milieu des années 1970 a permis de passer du sondage linéaire au sondage surfacique. A la fin des années 1980, le "sonar hydrographique Marine" permet de détecter des objets métriques dans un rayon de 700 mètres, par des profondeurs inférieures à 120 mètres. Depuis les années 1980, le pilotage des restitués analytiques par ordinateur permet d'exploiter la radiolocalisation précise de l'avion, et de tenir compte de la réfraction au passage du dioptré air-eau, dans les fonds inférieurs à 10 mètres, en eau claire. Le satellite SPOT 1, lancé en 1986, permet de déterminer la profondeur en eaux claires, dans les fonds inférieurs à 30 mètres. En océanographie, la radar-altimétrie par satellites a ouvert, à partir de 1978 (SEASAT), des voies nouvelles pour la mesure et la prévision de la "topographie des océans", qui donne accès à la marée et aux courants géostrophiques. Par ailleurs, la tomographie acoustique, à partir de sources basse fréquence, a permis de scruter la tranche d'eau sur des vastes étendues. En gravimétrie, l'utilisation optimale des centrales à inertie des sous marins a conduit la Marine à exprimer des besoins en matière de connaissance du géoïde. Un modèle de pesanteur pour l'Atlantique Nord Est a été développé en 1987, par le SHOM, en collaboration avec le CNES. En sédimentologie, l'imagerie donnée par les sondeurs latéraux et multifaisceaux a apporté des réponses, aussi bien aux problèmes de chasse aux mines, qu'à ceux de la pêche et de la navigation dans le Pas de Calais. Le cinquantenaire de l'Institut Français de Navigation a donné l'occasion de célébrer une période sans précédent dans l'application des géosciences à la mer, mais aussi une collaboration amicale et fructueuse entre l'IFN et le SHOM.

L'hydrographie n'est pas une science, mais un domaine technique qui fait appel à bon nombre de discipline scientifiques. Pour la mener à bien, il est essentiel de garantir à ses bénéficiaires une qualité de connaissance supérieure à celle que ces bénéficiaires peuvent eux mêmes atteindre avec les moyens dont ils disposent. De ce fait, l'hydro-

graphe a toujours été amené à considérer une amélioration continue de ses méthodes et de ses moyens afin de conserver la maîtrise de la satisfaction des besoins des usagers de la mer et, si possible, anticiper ces besoins. Pour cette raison, les hydrographes ont largement contribué aux développements scientifiques liés à la connaissance des océans, que ce soit en

matière d'instrumentation, de compréhension ou de modélisation.

Jusqu'à la deuxième guerre mondiale, les hydrographes ont appliqué la doctrine de levé élaborée par Beautemps-Beaupré (publié en 1808 dans un appendice au rapport de mission de d'Encasteaux). Les efforts ont surtout porté sur les problèmes de géodésie, de

■ ■ ■ précision des instruments d'optique, de chronométrie, de théorie des marées. Depuis la deuxième guerre mondiale, on a assisté à l'explosion de systèmes et de technologies tels que : la radiolocalisation, le sondage par les sondeurs ultra-sonores, les sondeurs multifaisceaux et les sondeurs latéraux, la localisation par les satellites, l'automatisation de l'acquisition et du traitement des données, la carte électronique, l'océanologie spatiale.

Ces nouvelles technologies ont du prendre en compte une nouvelle gamme de tirants d'eau, allant de 2 mètres à 30 mètres qui rendent caducs nombre de levés antérieurs aux années 1970, conçus pour les tirants d'eau de 8,5 m des Liberty ships. Le développement simultané des besoins et des moyens s'est accéléré au cours des dernières décennies, laissant aux hydrographes le soin de promouvoir les recherches pour de nouvelles applications au bénéfice des navigateurs.

Je vous propose de faire un voyage au travers des disciplines mises en œuvre par les hydrographes au service des utilisateurs de leurs produits.

La géodésie terrestre

Les travaux géodésiques servent de base aux sondages, qui constituent l'essentiel de toute mission hydrographique. L'opération indispensable dans l'établissement de tout réseau géodésique consiste à déterminer la position géographique de l'un des points de ce réseau, au moyen du théodolite et du chronomètre, jusqu'à la mise au point, en 1901 de l'astrolabe à prisme (par Claude et Driencourt) et la disposition des signaux horaires, à l'issue de la première guerre mondiale. L'astrolabe était d'un usage courant dans les missions hydrographiques des années 1930. Il permettait de déterminer avec précision (la seconde sexagésimale) la latitude et la longitude du lieu, par la méthode des hauteurs égales. Il restera en usage jusqu'aux années 1970.

Une fois le réseau calé, son orientation était déterminée par une visée sur étoile, au théodolite. L'échelle du réseau était enfin fixée, au



Fig. 1 : station VLBI installée à l'EPHOM en août et septembre 1989

début du XX^e siècle, par la mesure de la distance séparant deux points du réseau, au moyen du fil invar, sous tension constante.

Les vrais progrès en vitesse d'exécution et exactitude apparurent en France à partir de 1958 dans les missions hydrographiques en Afrique, avec les distancemètres, géodimètres et telluromètres.

Les ingénieurs hydrographes établirent des procédures calculatoires rigoureuses permettant de s'affranchir des contraintes de l'environnement (température, pression, hygrométrie) et de dominer les calculs sur l'Ellipsoïde dans les systèmes de projections appropriées.

Pour mettre en œuvre les chaînes de radiolocalisation à longue portée, il fut nécessaire de disposer de canevas géodésiques homogènes. A partir des années 1960 l'ordinateur permit d'effectuer un traitement global des observations et de s'affranchir de la plupart des simplifications abusives liées au calcul en projection. C'est ainsi que, pendant longtemps, les hydrographes avaient utilisé un mode de représentation plane, consistant à rabattre successivement tous les triangles sur le plan de l'un d'entre eux, après avoir corrigé les angles observés du tiers de l'excès sphérique. Ce procédé ne peut s'appliquer qu'à des bandes étroites de terrain, relativement rectilignes. Les différents systèmes géodésiques réalisés formaient des tronçons indépendants, présentant des hétérogénéités internes

et des discontinuités à la jonction avec les systèmes voisins.

Le système des satellites TRANSIT fut utilisé par le SHOM dès 1969 pour permettre le rattachement à un système géodésique mondial des réseaux locaux constitués au fil du temps par les missions hydrographiques, ou utilisés sur les cartes marines. Plusieurs centaines de rattachements géodésiques ont été réalisés avec le système TRANSIT entre 1969 et 1997.

Par ailleurs, dès 1989 le GPS fut utilisé couramment dans les travaux géodésiques de la mission océanographique du Pacifique pour positionner, orienter, et mettre à l'échelle les systèmes géodésiques des archipels de la Polynésie française.

Le GPS est actuellement utilisé systématiquement dans les missions du SHOM. Il se révèle particulièrement performant pour les mesures relatives en mode différentiel, où les stations sont rattachées à quelques centimètres près jusqu'à un éloignement de 200 km, puis en mode cinématique, qui permet dorénavant la même précision, la station rattachée étant mobile.

Pour un positionnement absolu, nécessaire au rattachement de territoires éloignés, la précision accessible correspond à un cube de 10 m de côté. Pour cette raison, le SHOM, dès 1992 a utilisé, en partenariat avec l'IGN, une génération complémentaire de satellites de positionnement absolu ultra-

précis. Il s'agit du système DORIS qui, pour un réseau principal de 13 stations en Polynésie, a assuré une précision de quelques centimètres. Il est ainsi désormais possible d'envisager des applications géophysiques concernant les marées océaniques ou terrestres et le tectonique des plaques, ou même des études de courants océaniques.

La localisation en mer et la navigation

Avec l'abandon du cercle hydrographique vers 1955, on est passé de localisation optique à la localisation radio-électrique, puis actuellement à la localisation par satellites. Ces trois étapes marquent de façon très typique les évolutions de l'Institut Français de Navigation (IFN) consacré par le colloque de son cinquantenaire.

Après la seconde guerre mondiale, les hydrographes avaient défriché le terrain de la radionavigation et préparé l'utilisation courante pour les navigateurs des systèmes internationaux comme l'OMEGA, le LORAN C, le DECCA, et des systèmes nationaux comme le RANA, le SYLEDIS, le TORAN, le TRIDENT, appropriés aux travaux hydrographiques, ou encore les systèmes satellitaires.

L'industrie, stimulée par les besoins des compagnies pétrolières avait proposé rapidement une grande variété de systèmes, les uns fournissant directement

des distances à un émetteur, les autres des différences de distances entre deux stations terrestres. Ces derniers étant utilisés de façon passive n'étaient pas saturables et pouvaient satisfaire un nombre illimité d'utilisateurs. Ils peuvent être classés suivant la fréquence des ondes utilisées. Leur précision et leur portée varient en sens inverse. Par exemple : avec une portée inférieure à 10 km, la précision du système Axyle est submétrique ; avec une portée de 800 milles, la précision du LORAN C est hectométrique ; avec une couverture mondiale, la précision du système OMEGA est kilométrique. D'une façon générale, plus les fréquences sont basses, plus la portée est grande et la précision faible.

En fait, l'évolution des systèmes est devenue telle que les systèmes en développement se retrouvèrent rapidement en usage opérationnel. Le SHOM a ainsi organisé trois colloques nationaux sur le positionnement en mer, en 1971, 1979, et 1987, dont les propositions novatrices étaient devenues dix ans après d'application ordinaire, quand elles n'étaient pas tout simplement dépassées par de nouvelles techniques. Il avait aussi apporté sa contribution à la solution de nombreux problèmes, tels que ceux des conditions de propagation, de réflexion, de calibration, du calcul du point, de la généralisation à l'ellipsoïde des ellipses et hyperboles "géodésiques", limitée jusque là au plan.

L'arrivée des systèmes satellitaires a marqué un tournant décisif dans la localisation. En effet, les stations embarquées sur satellite sont aisément reçues en ondes courtes et elles apportent une bonne précision de localisation : c'était déjà le cas, en 1970, avec le satellite TRANSIT, dont les positions sont obtenues par intégration des signaux émis sur un arc long d'orbite, et qui fut largement employé avant l'apparition du GPS.

Le système GPS (constellation de 24 satellites distribués sur 6 plans orbitaux et tournant à 20 200 km au dessus de nos têtes) a révolutionné la problématique de la localisation au large. Dès la phase probatoire, le GPS a été utilisé systématiquement dans les missions du SHOM depuis 1989, tant pour calibrer les systèmes à base terrestre que pour réaliser des levés en métropole et outre-mer. Sa précision est décimétrique en mode normal, métrique en mode différentiel (DGPS), décimétrique, voire centimétrique en mode cinématique. Seuls, actuellement, les levés côtiers et portuaires sont encore localisés par le système Axyle (SERCEL), quand ils ne le sont pas par le GPS en mode cinématique.

Tous les systèmes de radionavigation, de radiolocalisation et de positionnement par satellites ont fait l'objet de nombreuses études du Service Hydrographique et de l'Institut Français de Navigation, qui ont été publiées par ces organismes.

La mesure des profondeurs

La mesure des profondeurs est l'opération fondamentale en hydrographie. Elle doit être rattachée à une altitude conventionnelle pour tenir compte des variations périodiques du niveau de la mer. Elle conduit à la mise en œuvre de diverses techniques telles que la géodésie terrestre, le positionnement en mer, l'étude des marées, l'hydrologie ou les techniques de sondage.

L'océan étant opaque au rayonnement électromagnétique, la mesure bathymétrique est obtenue par des méthodes acoustiques depuis 1945, époque qui marque la fin des sondages au plomb



Fig. 2 : station Trident III

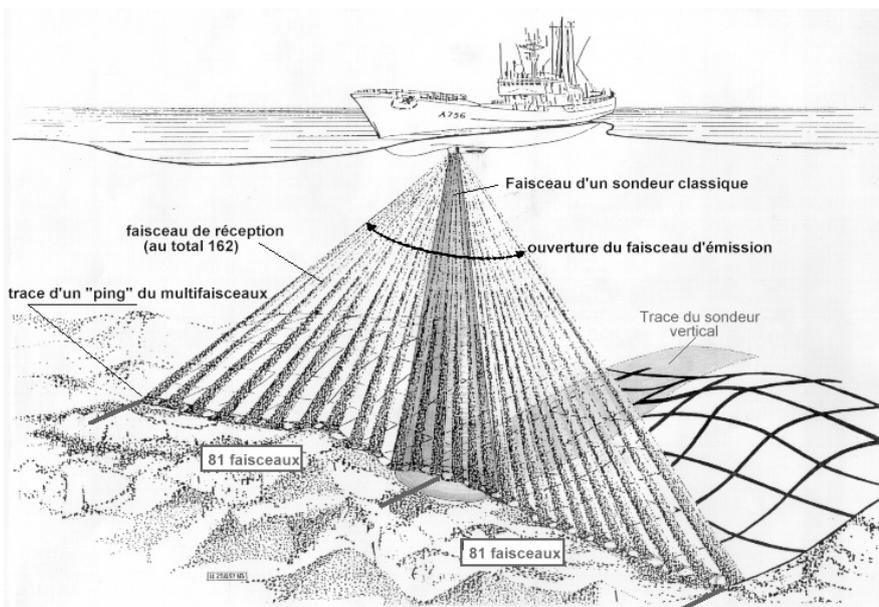


Fig. 3 : schéma de déploiement des faisceaux du SMF EM12 Dual montés sur le BH1 L'Espérance

Il existe des modèles grands fonds, pour la bathymétrie au large, et la géophysique : c'est le cas de l'EM12-DUAL de SIMRAD (qui a équipé "L'Espérance" au SHOM) : 162 faisceaux balaient une largeur de 150°, correspondant à 4 fois la profondeur, en acquérant 10° sondes au km² ; mais aussi des modèles petits fonds, pour les applications côtières, comme le sondeur Lennermor-Thomson-Sintra-ASM, acquis en 1988, et précurseur dans sa génération, qui permet, entre 20 et 300 mètres de profondeur, une fauchée de 90° par un ensemble de 20 sondeurs élémentaires. Le SHOM utilise actuellement l'EM 2002 dont les performances sont voisines.

Les sondeurs multifaisceaux représentent une avancée spectaculaire par rapport au sondage conventionnel, mais leur bonne exploitation reste complexe en raison des problèmes de calibration, de roulis, de tangage, de lacet, de célérité du son dans l'eau, etc.

■ La détection des obstructions

Le sondeur latéral

Elle concerne la détermination de la position, de la profondeur, de la nature, des obstacles naturels ou artificiels. Dans les années 1970 sont apparus les sondeurs latéraux (Edgerton) qui donnaient des images acoustiques du fond, transversalement à la route suivie. Les

■ ■ ■ poisson. On rappelle, au passage, que l'inventeur du sondage vertical acoustique ultrasonore est l'ingénieur hydrographe Marti, en 1919. Son système enregistrait une explosion, sur microphone assorti d'un amplificateur et d'un oscillographe à plume. Il fut breveté en 1930 sous l'appellation "Langevin-Florisson-Marti". Pour mémoire, au passage, signalons que les sondeurs petits et grands fonds utilisés au SHOM proviennent des firmes Hughes, Atlas, Edo, Raytheon.

Le sondeur ultra-sonore classique, à faisceau unique, d'un cône d'ouverture de 20° à 30°, explore le fond selon un profil de sonde. La sécurité hors du cône d'émission, avec ce type de sondeur, est assurée par le sondeur latéral. La mise en service de compensateurs de pilonnement, en 1980, pour les bâtiments océanographiques du SHOM, et en 1996, pour les vedettes, a permis d'affranchir les sondages des mouvements de plate-forme.

■ Les sondeurs multi-faisceaux

Au milieu des années 1970 est apparu un concept nouveau, celui du sondeur multi-faisceaux.

Le principe de fonctionnement du sondeur multi-faisceaux est basé sur des techniques acoustiques permettant de mesurer les profondeurs sur toute une fauchée perpendiculaire à l'axe du

navire, sur une largeur variant de 2 à 7 fois la profondeur. La technique généralement utilisée est dite des "faisceaux croisés", car l'émission du signal sonore et la réception l'écho réfléchi se font selon des faisceaux perpendiculaires dont l'intersection représente la surface sondée. L'émission est effectuée par un faisceau de très faible ouverture longitudinale (environ 2°), mais très large latéralement (de 30° à 150°). La réception est effectuée par plusieurs faisceaux (de 20 à 200 selon les cas), de faible ouverture latérale (de 1° à 5°) et de grande ouverture longitudinale (environ 20°).

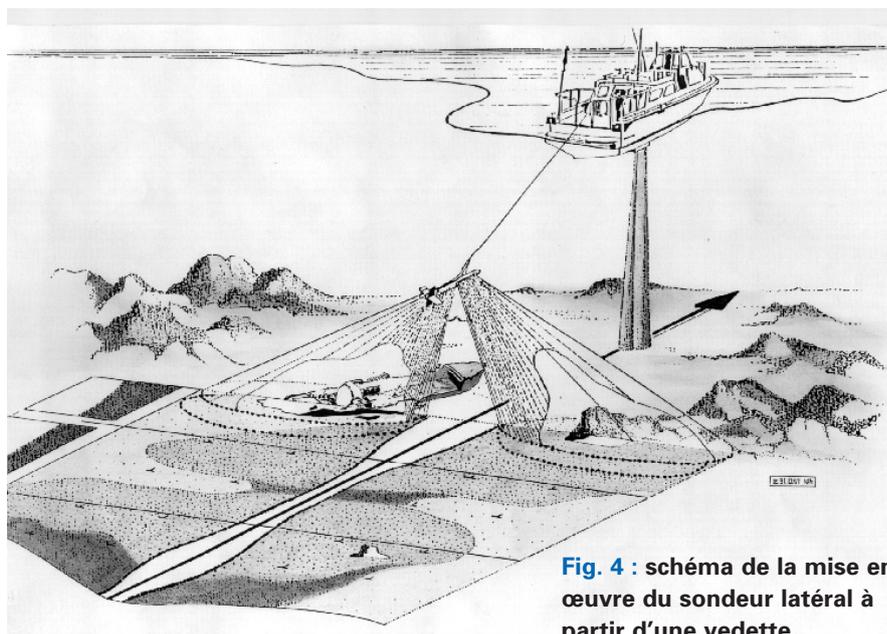


Fig. 4 : schéma de la mise en œuvre du sondeur latéral à partir d'une vedette

sondeurs latéraux sont remorqués par des vedettes ou des bâtiments. Tout point suspect doit être insonifié deux fois à partir de profils situés de part et d'autre de ce point. Des exemples :

- un objet de taille 0,7 m est détectable par fond de 30 m, à partir de profils espacés de 75 m,
- l'acquisition à la fin des années 1980, pour le bâtiment hydrographique La Pérouse, d'un "sonar d'exploration hydrographique Marine", dérivé des sonars de chasse aux mines, permettrait dans un rayon de 700 m de détecter des objets de dimension métrique par des profondeurs inférieures à 120 mètres.

Pour mémoire : la cotation des hauts fonds était effectuée dès 1884 par la drague Renaud, à laquelle a succédé la drague américaine à partir des années 1950.

La photogrammétrie

Depuis les années 1980, on constate un essor de l'activité photogrammétrique au SHOM : le pilotage des restitués analytiques par ordinateur permet, d'une part, d'exploiter la radiolocalisation précise de l'avion de prise de vue et, d'autre part, de tenir compte de la réfraction au passage du dioptré air-mer, pour effectuer des cotations stéréoscopiques sous l'eau jusqu'à des profondeurs de 10 m dans les eaux claires.

Le laser

Le laser est utilisé en Australie, au Canada, aux États-Unis, en Suède, pour des déterminations bathymétriques en eaux claires, jusqu'à des profondeurs de 50 mètres. Le SHOM en envisage une utilisation systématique prochaine pour les levés en zone littorale, et opérationnelle pour les besoins de la Marine.

Les satellites SPOT

Le scanner multispectral du satellite SPOT, lancé pour la première fois en 1986, rayonne sur une bande au sol de 60 km de large, l'unité de surface mesurée étant un carré de 20 m de côté, appelé pixel. L'énergie réémise par le sol est mesurée par le radiomètre du scanner dans 3 canaux : le vert, le rouge et l'infrarouge. Le rayonnement est absorbé sélectivement par

la tranche d'eau, avec une pénétration nulle en infrarouge, et maximale dans le vert, et proportionnellement à la longueur du trajet, c'est à dire la profondeur. La précision obtenue est de 5 à 10 % pour les profondeurs inférieures à 30 m, dans les eaux claires. A signaler l'exploitation des images SPOT dans les cartes marines, pour les régions coralliennes.

Le niveau de référence des sondes

Les profondeurs sont traditionnellement réduites à un niveau localement fixe appelé zéro hydrographique, normalement inférieur aux plus basses mers astronomiques. Cette réduction suppose que l'on connaisse la marée au point de mesure, ce qu'on obtient par un modèle calé sur des observations en des points proches, y compris à l'aide de marégraphes immergés. Mais l'amplitude de la marée variant avec la position, la cote de ce niveau par rapport à des références terrestres est variable.

Les satellites de positionnement (GPS aujourd'hui, GPS et GALILEO demain) permettent maintenant, jusqu'à quelques dizaines de kilomètres des côtes de mesurer l'altitude absolue des mobiles par rapport à l'ellipsoïde de référence ; on peut donc mesurer la forme de la topographie sous-marine directement par rapport à cette référence, ce qui évite une source d'imprécision dans la réduction des sondes et permet de gérer la continuité terre-mer. Il reste à généraliser l'emploi de ces nouvelles technologies, dont la faisabilité est démontrée, dans des systèmes opérationnels.

La marée

La marée est un phénomène déterministe dépendant de la rotation :

- de la Lune autour de la Terre (29,53 jours),
- de la Terre autour du soleil (365,24 jours),
- de la Terre sur elle-même (24 heures).

Le résultat est le rythme biquotidien des marées, avec des modulations semi-mensuelles et mensuelles entre vives eaux et mortes eaux, et des variations



Fig. 5 : mouillage d'un marégraphe grand fond dans le détroit de Bab El Mandeb

semi-annuelles et annuelles correspondant aux marées d'équinoxe.

- la première théorie est celle de Newton, de l'attraction universelle, en 1687. La théorie de Newton est dite statique, parce qu'elle néglige l'inertie du fluide,
- la seconde théorie, un siècle plus tard, est celle de Laplace, qui imagine la "formule de Laplace". Sa théorie, dynamique, est basée sur deux principes :
 - les oscillations forcées des molécules d'eau ont la même période que la force périodique qui leur donne naissance ;
 - les très petites forces qui créent la marée se superposent en petits mouvements leur correspondant.

Laplace admet que l'amplitude de la marée est proportionnelle à sa valeur théorique, et que la marée est déphasée par rapport à sa valeur théorique : les facteurs de proportionnalité et de déphasage dépendent des contours des continents et des profondeurs.

- en 1870 Lord Kelvin invente l'analyse harmonique, et la met en pratique grâce à une machine analogique, le "Tide predictor".
- en 1883, Darwin identifie et baptise les principales composantes harmoniques, avec des sigles (N2, S2, M2, K2 etc.)

La marée a toujours été un domaine d'excellence au service hydrographique mais, depuis les années 1980, elle fait

partie des objectifs de programmes spatiaux internationaux auxquels participe la France. L'altimétrie spatiale de haute précision donne accès, à la précision de quelques centimètres, à la marée sur l'ensemble du globe.

N'oublions pas, pour autant, que la marée se mesure d'abord et aussi avec des marégraphes.

■ Les modèles numériques de marée

Les performances actuelles des ordinateurs permettent de prédire la marée par des modèles numériques s'appuyant sur les équations de l'hydrodynamique. On découpe le domaine intéressé en mailles auxquelles on applique les principes suivants :

- le principe de conservation : la variation de la hauteur d'eau dans une maille résulte des différences de quantité d'eau entrant et sortant. Elle dépend en fait des courants traversant la maille ;
- le principe fondamental de la dynamique, qui est appliqué aux forces suivantes :
 - les forces de pression dues aux différences de hauteur d'eau avec les mailles avoisinantes ;
 - la force de Coriolis ;
 - les forces de freinage s'exerçant au voisinage du fond et des parois des mailles.

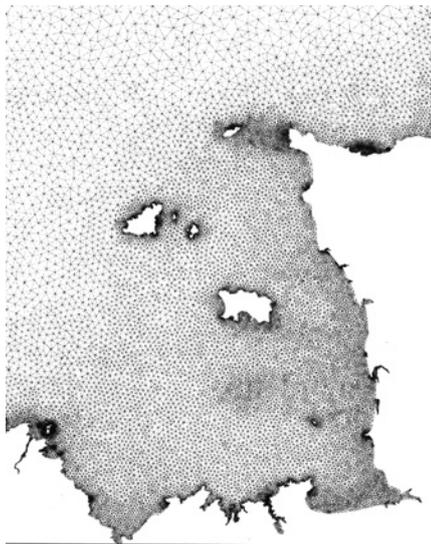


Fig. 6 : la modélisation numérique : maillage golf normand Breton

Le tout est formalisé dans les équations de Navier-Stokes. Il est entendu que le "moteur" du mouvement est constitué par la marée aux limites ouvertes du modèle, qu'il faut mesurer ou prévoir. Le service hydrographique utilise depuis 1988 les modèles numériques pour élaborer ses atlas de courant.

L'océanographie

L'immensité de l'océan mondial et la difficulté d'observation ont opposé des obstacles majeurs dans le passé à la compréhension globale de la dynamique de son fonctionnement en relation avec les échanges atmosphériques.

Décrire, comprendre et prévoir l'état et la variabilité de l'océan dans son ensemble est une tâche très difficile, du fait de son étendue, et des échelles tant spatiales que temporelles des phénomènes à observer tels que les ondes internes, la houle, la marée, dont les échelles temporelles s'étendent de la minute à la journée, ou encore les tourbillons et les grands courants dont les échelles de temps s'étalant de quelques mois à plusieurs années. Les précisions requises pour rendre compte de ces phénomènes sont du centimètre par seconde pour les courants, et le dixième ou le centième de degré pour la température de l'eau. Les deux voies d'approche des problèmes à résoudre sont l'espace et les mesures en mer.

■ L'océanographie spatiale

Dans le dernier quart du siècle passé, les satellites géoscientifiques et l'informatique ont ouvert des voies nouvelles révolutionnaires pour la mesure et la prévision des phénomènes océanographiques. Les paramètres météoro-océanographiques, vents, courants, houle, température de surface, ne peuvent être observés globalement qu'à partir de l'espace. Mais l'océan est rebelle à se laisser traverser par le rayonnement électromagnétique. D'où une approche des phénomènes profonds par des phénomènes superficiels, tels que la topographie de la surface de la mer.

L'altimétrie radar

La terre peut être représentée par un ellipsoïde dont le centre est le centre de gravité des masses terrestres. Ce centre est actuellement déterminé au centimètre près. [L'ellipsoïde qui lui correspond est désigné par le sigle WGS84, pour "World Geodetic System 1984". Le système géodésique auquel il est rattaché est l'"International Terrestrial Reference System", l'ITRS].

La surface des océans au repos serait, - au conditionnel parce que les océans ne sont pas au repos -, un géoïde, surface perpendiculaire en tout point à la verticale.

Rapporté à l'Ellipsoïde, le géoïde présente des écarts, creux et bosses, de ± 100 mètres.

Le forçage atmosphérique par le vent, et la marée, créent des dénivellations de ± 1 mètre par rapport au géoïde : cet écart entre surface de la mer et géoïde est appelé "topographie des océans". Il permet d'appréhender les courants de surface appelés "géostrophiques", dans lesquels la force du gradient de pression et la force de Coriolis s'équilibrent l'un l'autre.

Le principe de la mesure altimétrique :

- L'altimètre radar mesure la distance satellite - surface de la mer,
- L'orbite du satellite est connue au centimètre près par rapport à l'Ellipsoïde WGS84, grâce au réseau de poursuite DORIS (DORIS pour Détermination d'Orbite de Radiopositionnement Intégré par Satellite), s'appuyant sur une cinquantaine de stations terrestres d'orbitographie, exploitant des radiosources extragalactiques. (Un système analogue a été développé en Allemagne sous l'appellation de PRARE),
- Le niveau de la mer est déterminé par la combinaison des deux informations ci-dessus.

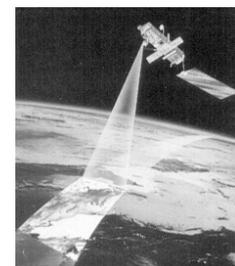


Fig. 7 : vue d'artiste du futur satellite ENVISAT

L'altimétrie radar a débuté avec le satellite expérimental SEASAT en 1978, suivi de ERS1 en 1991, Topex-Poséidon en 1992, ERS2 en 1995, ENVISAT en 2001 et Jason en 2002.

Autres applications des technologies spatiales

- *La température de la surface de la mer*
L'imagerie infra-rouge a été la première technique spatiale opérationnelle de la surface des océans. Les radiomètres imageurs multispectraux des satellites TIROS-N de la NOAA, en 1965, ont permis d'établir quotidiennement une carte des températures de surface de l'Atlantique Nord-Est et de la Méditerranée, au 1/10 de degré. La "cellule d'environnement de la marine" exploite ces mesures en les associant aux relevés bathycélérimétriques par zone de lutte anti-sous-marine.

- *La couleur de l'eau*

La couleur de l'eau est directement liée à sa teneur en chlorophylle, et la répartition de celle-ci à la surface de l'océan est corrélée aux structures thermiques. Le teneur en chlorophylle est déduite du rapport de deux mesures, l'une dans le bleu, l'autre dans le vert. Déjà mesuré, entre 1978 et 1986 par le satellite NIMBUS, ce paramètre est acquis depuis 1996 par ADEOS et actuellement par JASON.

■ L'océanographie embarquée

La tomographie acoustique

La tomographie acoustique fait partie des techniques récentes d'observation de l'océan, dérivées de l'acoustique sous-marine. Elle permet, à partir de sources basse fréquence (quelques centaines de hertz) de scruter l'intérieur des mers sur des vastes étendues, car aux basses fréquences l'atténuation est particulièrement faible.

La vitesse du son dans l'eau dépend, entre autres paramètres, de la température de celle-ci. En disposant de sources acoustiques et de récepteurs autour de la zone à étudier, et en mesurant les temps de parcours des ondes acoustiques entre les différents émetteurs et récepteurs, l'évolution des caractéristiques thermiques des eaux dans la zone considérée peut être suivie.

Les américains, pionniers de cette nouvelle technique, l'ont testée au début des années 1980. En France, le service hydrographique, en collaboration avec l'IFREMER, la DRET, l'UBO, et des laboratoires britanniques, a effectué une première expérience à grande échelle, GASTOM, en appareillant dans le Golfe de Gascogne (avec six émetteurs-récepteurs ERATO) en 1990.

Depuis 1990 le SHOM a mis au point des méthodes voisines appliquées sur de plus courtes distances permettant une description globale de la propagation acoustique directement utilisable pour la détection sous-marine.

Les systèmes embarqués

L'instrumentation embarquée a été totalement renouvelée depuis les années 1970.

La bathysonde (pression, température, conductivité) Howald 1970, a laissé la place à un multiéchantillonneur à rosette, puis à la sonde Guildline, et actuellement au capteur de troisième génération Sea-Bird Electronics.

Les thermomètres à renversement ont été remplacés par des thermomètres électroniques avec un facteur 10 de résolution.

Le bathythermographe Richard a été remplacé dans les années 1970 par des

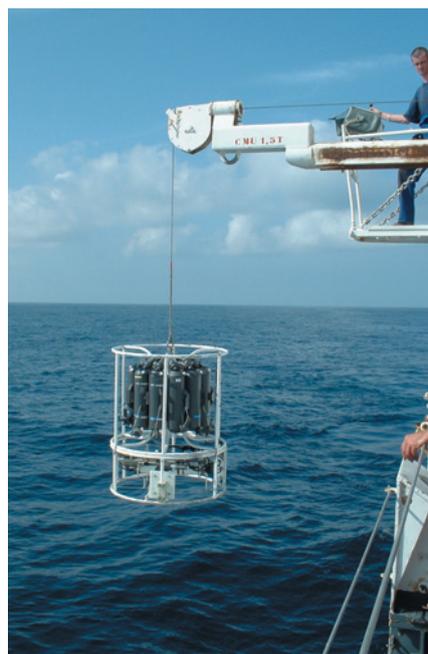


Fig. 8 : mise à l'eau d'une bathysonde

sondes perdables SIPPICAN, pour mesurer la température, la vitesse du son dans l'eau, la conductivité.

Le système SEA-SOAR (Chelsea), équipant le d'Entrecasteaux depuis 1994, est un poisson remorqué à profondeur variable contrôlée, mesurant, salinité, température et profondeur.

Le Flotteur dérivant de subsurface RAFOS effectue une mission préprogrammée du type "plongée - séjour en profondeur - remontée en surface". En fin de mission, le flotteur émet les informations acquises vers les satellites du système ARGOS. Les signaux acoustiques sont traités et archivés.

Les anciens MECABOLIER (courantométrie au point fixe selon la méthode d'Euler) ont été remplacés dans les années 1980 par des courantomètres SUBER de nouvelle génération.

Le magnétisme

Longtemps le magnétisme ne fut considéré au service hydrographique que dans l'optique de la navigation : toute carte marine doit en effet porter la valeur de la déclinaison magnétique. C'est ainsi que l'on relève dans les annales hydrographiques, entre 1952 et 1972, une centaine de rapports sur des mesures et déclinaisons et d'intensité magnétique effectuées par les missions hydrographiques avec les instruments appropriés tels que le théodolite Wild To de la firme Wild.

Les observations à terre du magnétisme disparurent presque complètement dans les missions hydrographiques avec l'avènement dans les années 1970 des modèles mondiaux calés sur un réseau de stations permanentes donnant une précision suffisante pour la navigation.

Par ailleurs, la recherche d'épaves a bénéficié du développement des magnétomètres remorqués qui mesurent le champ total et permettent donc de détecter les anomalies induites générées sur les épaves. Les magnétomètres usuels permettent de détecter une épave de 10 tonnes à 45 mètres, et une épave de 100 tonnes à 100 mètres. Les magnétomètres servant aux obser-

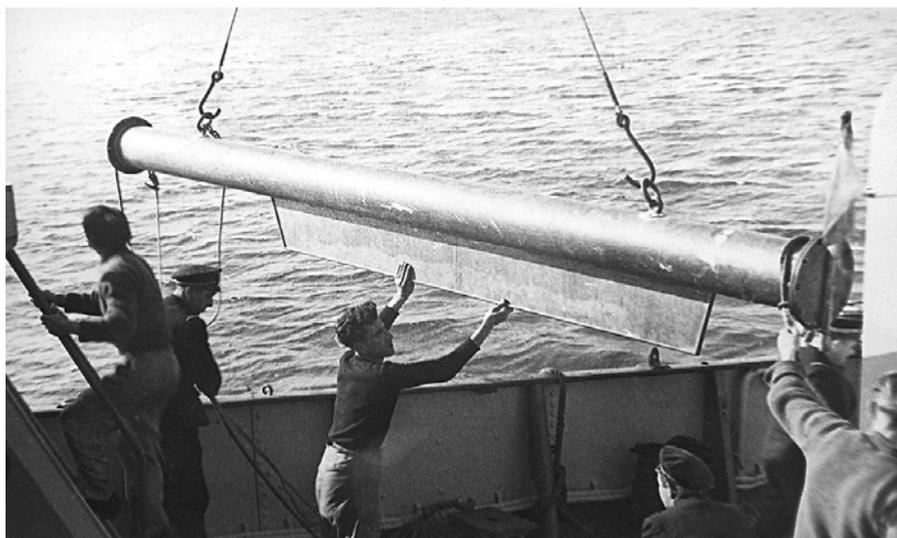


Fig. 9 : Mouillage d'un magnétomètre en 1951

■ ■ ■ vations à la mer mesurent le champ magnétique terrestre. Ils sont basés sur la propriété de résonance des protons plongés dans un champ magnétique.

On parle alors de résonance magnétique nucléaire (RMN). Ce type de capteur permet d'atteindre la précision du nanotesla. Ces magnétomètres sont remorqués derrière le bâtiment, à une distance d'au moins 2,5 fois sa longueur.

La gravimétrie

En 1885, les différences entre les positions astronomiques relatives de Nice

et Toulon et celles déduites de la triangulation de 1842, attirent l'attention sur les différences entre les verticales physiques, données par le fil à plomb, et les normales à l'ellipsoïde. Ces différences sont dues à la gravité : les points astronomiques se réfèrent à la verticale du lieu, les points géodésiques se réfèrent à l'ellipsoïde.

En 1929, ont lieu les premières mesures de gravité en sous-marin, par le géodésien Verring-Meinesz, à l'aide d'un ensemble de pendules dont on observait les oscillations à l'occasion d'une station en plongée. En 1933 et 1936, le service hydrographique reprend les mesures de gravité en

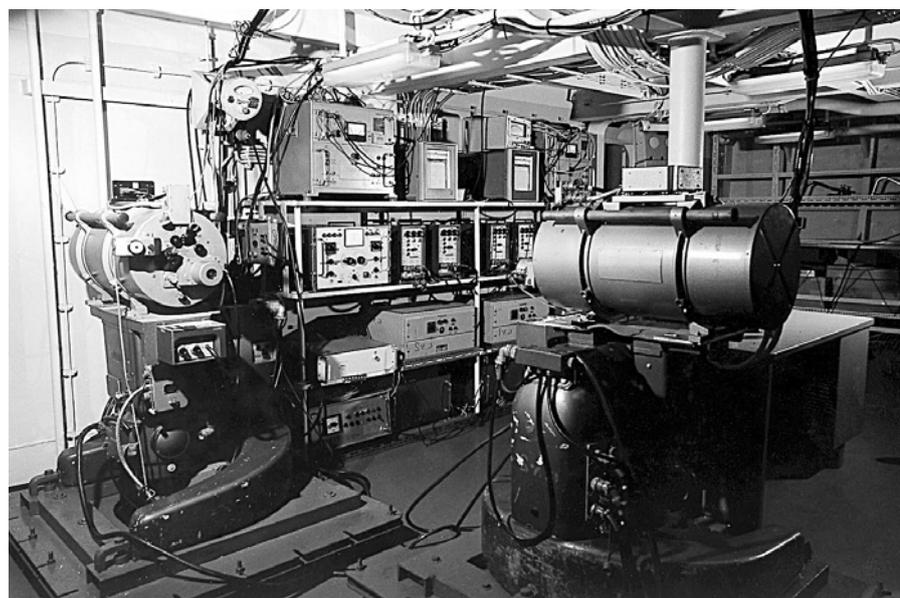


Fig. 10 : La salle des gravimètres à bord du D'Entrecasteaux : 1977

plongée à bord des sous-marins Fresnel et Espoir, en Méditerranée. La précision de 3 à 5 mGal était très suffisante pour mettre en évidence les anomalies de pesanteur par rapport au modèle international.

A la fin des années 1950, la mise au point par la firme ASKANIA (GSS2-Allemagne) d'un gravimètre marin et de sa plate-forme stabilisée pour bâtiment de surface, permit son utilisation sur les bâtiments du service hydrographique, avec une précision de quelques mGal, à partir de 1967.

L'utilisation optimale des centrales à inertie des sous-marins a conduit la Marine à exprimer des besoins en matière de connaissance du géoïde. Un modèle de pesanteur pour l'Atlantique Nord-Est a été développé en 1987 par le service hydrographique en collaboration avec le CNES. Ce modèle sert non seulement à maîtriser les perturbations dues aux anomalies de pesanteur, mais aussi à se servir de ces anomalies pour contrôler les centrales à inertie.

La sédimentologie

Dans le domaine de la sédimentologie et de la géologie marine, les travaux réalisés lors des levés hydrographiques ont été orientés jusqu'aux années 1980 :

- d'une part, vers la détermination de la nature superficielle du fond sous-marin, en vue de renseigner les cartes, car la nature des fonds intéresse la navigation, pour évaluer la tenue des mouillages,
- et, d'autre part, vers les études dites de "régime des côtes", dont le service hydrographique a été responsable de 1858 à 1958, en publiant les "Cahiers de recherches hydrographiques sur le régime des côtes".

Après la fin des sondages au plomb poisson, en 1945, la détermination de la nature du fond nécessitait des appareils de prélèvement, tels que bennes, dragues, carottiers, auxquels le service apporta largement sa contribution. Par ailleurs, la tradition d'archivage des natures de fond avait fait du service, jusqu'au années 1980, le service fran-



Fig. 11 : le tirant d'eau maximal des navires atteint maintenant les 30 m

çais disposant du fond documentaire le plus riche au plan national.

Dans les années 1980 l'augmentation du tirant d'eau des navires et de la fréquentation du Pas de Calais et du sud de la mer du Nord, amenèrent les français, les britanniques et les néerlandais, à contrôler par des levées périodiques les dunes sous-marines dans ces parages.

D'autre part, la Marine nationale exprima des besoins considérables en matière de connaissance sédimentologique pour les opérations de chasse aux mines et la maîtrise des conditions de propagation des ondes acoustiques, auxquels il faut ajouter ceux de la pêche. Dans les années 1990, une coopération s'engagea entre le SHOM et les laboratoires d'IFREMER et du Bureau des recherches Géologiques et Minières (BRGM).

De nouveaux outils acoustiques permettaient la description de la surface des fonds. Le sondeur latéral, utilisé en recherches de roches, donne aussi une imagerie des fonds qui permet de circonscrire les zones rocheuses, de différencier les sables grossiers et fins, et de décrire les structures sédimentaires. Une telle imagerie est également offerte par les sondeurs multifaisceaux grands fonds (EM12 Dual). Le system Rox-Ann d'analyse des signaux de retour des sondeurs verticaux permet d'obtenir des coupes sismiques à très haute résolution.

La coopération avec des laboratoires universitaires a débouché sur la création d'une variante des cartes marines : les cartes G (pour Garlan) présentant de façon synthétique la

nature superficielle des fonds, au profit d'une large communauté d'utilisateurs : pêcheurs, aménageurs, chercheurs et Défense nationale.

Pour conclure

L'hydrographie française plonge ses racines dans l'École de Dieppe, au XV^e siècle, bien avant que Colbert l'incorpore, en 1661, à son département de la Marine. Elle n'a pu se développer qu'en s'attachant à la compréhension des domaines qui servent la navigation : la mesure de la Terre, l'astronomie, la marée, les courants, la météorologie. Le spectre des études relatives à l'hydrographie s'est élargi et approfondi au fil des siècles, en franchissant laborieusement les premières barrières de la mesure précise du temps et des dimensions de la Terre, à la fin du XVIII^e siècle, qui marque la première grande étape de l'histoire du service.

L'ordonnance du 6 juin 1814, créant un "Corps des ingénieurs hydrographes", formés à l'École Polytechnique depuis 1816, va permettre à l'hydrographie de prendre son essor, fondé sur la robuste doctrine de Beautemps-Beaupré. Les hydrographes oeuvrent sous toutes les latitudes pendant tout le XIX^e siècle et jusqu'à la deuxième guerre mondiale, qui constitue une charnière dans son histoire.

Le développement des géosciences, dans l'après guerre mondiale, a ouvert un vaste champ d'études aux hydrographes dans les domaines de la géodésie, de l'astronomie, de la marée, de l'acoustique sous-marine, de l'océanographie et du spatial. On assiste depuis les années 1980, à un essor sans précédent du service hydrographique, basé sur l'informatique et l'espace. Il se traduit par un partenariat élargi et renforcé avec de nombreux grands organismes tels que le Centre National d'Études Spatiales (CNES), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), l'Institut Paul Émile Victor, l'Institut Océanographique (IO), la Météorologie Nationale. ●

Jean Bourgoïn Ingénieur Général de l'Armement (Hydrographe), de l'Académie de Marine

Remerciement

La rédaction d'XYZ est heureuse de remercier l'Institut Française de Navigation, qui a donné son autorisation à la présente publication, issue de la revue "Navigation" (numéro 202, avril 2003). Elle attire l'attention des lecteurs sur un autre article, passionnant, de cette revue : "En attendant Galiléo... La Terre mesurée depuis l'espace : de Diapason (1966) à Jason (2001), la contribution française", sous les signatures de Michel Lefebvre (ingénieur CNES) et François Barlier (astronome titulaire (CERGA)).

ABSTRACT

After World War Two there were a great number of new systems and technologies for localisation, sounding, automatization, data acquisition and processing, hydrography and oceanology. The progress in geodesy as well as in localisation and navigation is due to computers and satellites. The accuracy of sea depth measurement is the consequence of echo sounding improvement. The progress in oceanography knowledge owes to satellites with radar altimeter. The 50th anniversary of the French Institute of Navigation was an opportunity to review as far as possible all these evolutions, in tight conjunction with the French Hydrographic and Oceanographic Service.