

9 – un nouveau métier

L'hydrographe de l'après-guerre utilisait encore beaucoup d'instruments qui faisaient partie, sous une forme un peu moins élaborée, de la panoplie de son ancêtre du XIXe siècle. Les progrès apportés aux composants électroniques, et particulièrement leur miniaturisation, ont permis de concevoir des appareils compacts, de faible consommation et de plus en plus autonomes qui, installés à terre, sous l'eau, à bord des navires ou dans des satellites, ont transformé en quelques décennies la pratique de l'hydrographie et en ont fait un nouveau métier.

Localisation

Retour des observateurs sur le rivage

Dans son appendice au voyage de D'Entrecasteaux, Beautemps-Beaupré identifie deux méthodes permettant de localiser les canots qui sondent : observer à partir du rivage et observer à partir du canot. Pour observer à partir du rivage, il faut placer, en deux points déterminés, des observateurs qui relèvent avec des instruments de mesure d'angles la position du canot chaque fois qu'il mouille et qu'il fait un signal. Cette méthode est bonne, écrit-il, « mais elle a le désavantage de ne pouvoir être employée que quand il s'agit de sonder de très petits espaces de mer : elle est aussi d'une longueur extrême. A combien de méprises d'ailleurs, n'est-on pas exposé lorsqu'on en fait usage ! Il faut mouiller à chaque instant, les signaux peuvent se confondre, les montres s'arrêter, les instruments se déranger ; et le moindre inconvénient qu'il y ait à craindre, c'est de perdre le fruit d'un travail très pénible. » Beautemps-Beaupré préconise donc la seconde méthode, toujours en usage au service hydrographique à la sortie de la deuxième guerre mondiale.

Une enquête du Bureau hydrographique international (BHI) sur les méthodes de sondage des états membres, publiée en 1934, montre que la plupart des pays avait suivi l'exemple de la France. Toutefois, le service hydrographique espagnol utilisait la première méthode décrite par Beautemps-Beaupré, et un des observateurs sur le rivage guidait l'embarcation sur le profil (voir encadré n°1) avec des pavillons ou un héliographe.

C'est le Bureau topographique suisse qui, vers 1883, a mis au point le guidage sur profil à partir du rivage. L'embarcation de sonde était localisée en gisement et distance, grâce à son mât gradué, par un observateur à terre. Au début, l'embarcation suivait un alignement constitué de l'emplace-

ment de l'observateur et d'un jalon placé à bonne distance derrière lui dans la direction du profil à suivre. Mais souvent, le relief autour des lacs ne permettait pas d'installer des jalons suffisamment loin. Aussi les ingénieurs avaient-ils mis au point une méthode de guidage de l'embarcation par l'observateur à terre, grâce à des pavillons.

Les observations faites en embarcation ou sur les navires présentent l'inconvénient d'avoir une portée limitée : en mer la portée optique dépend de la hauteur du point observé et de celle de l'observateur, qui n'est pas très élevée sur un bateau. De plus, les signaux situés sur la côte deviennent difficiles à voir à partir d'une certaine distance. Pour sonder loin de la côte, ce qui devenait nécessaire avec l'augmentation des tirants d'eau, les hydrographes devaient déployer des balises flottantes ou utiliser d'autres systèmes de localisation, comme le repérage par le son. Aussi, à partir de 1951, les missions hydrographiques commencèrent-elles à utiliser la localisation des navires par des observateurs situés à terre.

La première expérimentation fut réalisée sur l'*Amiral-Mouchez* en mai 1951 (mission hydrographique des côtes de France et d'Afrique du Nord), au large du Maroc : « Le bâtiment naviguait de nuit en suivant une route constante, il était muni d'une couronne lumineuse placée en tête de mât. Deux postes d'observation au théodolite étaient installés à terre, près de la côte, à 25 kilomètres environ l'un de l'autre. Chacun de ces postes disposait d'un poste radiophonique fonctionnant sur accumulateurs et d'un bon compteur. A l'instant de chaque station, le bâtiment était visé simultanément par les deux théodolites [...] Dans l'ensemble, les lignes de sondes ainsi exécutées atteignirent la limite de visibilité géographique de la couronne lumineuse vue des postes d'observation. L'extrémité des lignes se trouvait ainsi à 15 ou 16 milles de la côte, par fonds de 125 à 130 mètres. »

Encadré n°1 : lignes de sonde et profils

Jusqu'au traité d'hydrographie de l'ingénieur Germain, en 1882, on ne trouve aucune information sur la manière de parcourir les zones à sonder. Les minutes du pilote français montrent que les trajectoires des canots ne correspondaient pas à un schéma précis.



1 - détail d'une des dernières minutes du pilote français, levée en 1838 dans le secteur de l'Aber-Wrac'h. Les routes suivies correspondent à des alignements et la couverture de la zone n'est pas systématique - minute hydrographique ancienne 009_1_05_18_Cr_1938, téléchargeable sur le site data.shom.fr

Dans son ouvrage, Germain indique qu'il y a en général avantage à disposer les sondes suivant des lignes perpendiculaires à la côte afin de mieux déterminer les courbes d'égale profondeur et de mieux mettre en évidence les variations du fond. Aussi, les ingénieurs hydrographes sondent-ils en suivant des lignes de sonde¹ parallèles, perpendiculaires à la côte et régulièrement espacées.

Pour se guider le long de ces lignes, les hydrographes utilisent des alignements constitués d'un point proche de la côte et d'un point qui en est éloigné. Ces points ne sont pas forcément de position connue. Parfois, les hydrographes ont recours à des jalons plantés sur la côte, voire à un homme muni d'un pavillon qui se déplace le long de la côte à un signal convenu.

On peut également sonder en suivant un arc de cercle (appelé « segment ») avec un cercle hydrographique, selon le procédé recommandé par l'ingénieur Bouquet de la Grye. Le patron de l'embarcation suit l'alignement de deux points, l'un en vue directe, l'autre réfléchi sur le miroir de son cercle réglé à la valeur choisie.

Dans la technique du radioguidage, un observateur, le « guide », en station sur la côte avec un



2 - sondage en suivant un segment (arc de cercle) - illustration de P. Perchoc pour la couverture du bulletin Amhydro n°3



3 - détail d'une minute levée dans le golfe de Saint-Tropez en 1897. Les lignes de sonde correspondent à des segments (arcs de cercle) et la couverture de la zone est systématique - minute hydrographique ancienne 017_2_19_Cr_1897, téléchargeable sur le site data.shom.fr

théodolite orienté dans la direction du profil à suivre, guide la vedette ou le bâtiment pour qu'il entre dans le champ de vision de son théodolite, puis qu'il reste, en approche ou en éloignement selon le cas, dans la direction indiquée par l'instrument.

Le guidage se fait au moyen de la radio selon un vocabulaire particulier. A bord, le secrétaire de séance donne par radio la cadence des « tops » de localisation. A chaque top, deux autres observateurs, les « traversiers », placés sur la côte et munis chacun d'un théodolite, indiquent sous quel angle ils relèvent la vedette ou le bâtiment.

¹ La même expression est utilisée pour désigner le filin gradué auquel on attache le plomb de sonde. Au XXe siècle, les lignes de sonde suivies par l'embarcation ou le navire prennent le nom de profils de sonde, puis simplement de profils.

Lorsque le profil est terminé, le guide oriente son théodolite dans la direction du profil suivant et le processus recommence. Le film de reconstitution « profil au top », accessible à partir de la page *médiathèque / vidéos sur l'hydrographie* du site www.amhydro.org, montre le déroulement d'une séance de radioguidage dans les années 1970.

Il est également possible de suivre un profil correspondant à un lieu de radiolocalisation : hyperbole ou cercle. Le patron de la vedette ou l'homme de barre du bâtiment dispose alors d'un répéteur

lui indiquant la valeur instantanée du lieu de radiolocalisation. Il peut ainsi comparer cette valeur à la valeur de consigne et corriger sa route en conséquence.

Avec le déploiement de l'informatique embarquée, la position de la vedette ou du bâtiment est calculée en permanence. Les profils peuvent alors être définis sans référence à un lieu de localisation particulier et leur suivi s'effectue grâce à un indicateur droite-gauche qui fournit l'écart en mètres à gauche ou à droite du profil.

Cette nouvelle méthode de travail s'étendit aux autres missions et engloba le radioguidage du navire (septembre 1951, mission hydrographique de Madagascar) puis des vedettes.

Un des avantages procurés par cette méthode, et permis par l'équipement des missions en postes radios portables, était de ne plus nécessiter de signaux à terre, ce qui réduisait la durée des travaux de préparation des sondages.



4 - radioguidage à la mission hydrographique de l'océan Indien en 1963 - photothèque Amhydro

Dès lors, le cercle hydrographique fut de moins en moins utilisé pour la localisation en mer. Dans les années 1970, il servait principalement en topographie, pour déterminer le trait de côte.

Radiolocalisation

Ce changement de méthode de localisation, s'il permettait de repousser un peu les limites de portée, ne résolvait pas le problème des levés hors de vue de côte. Les hydrographes se tournèrent alors vers les systèmes de radiolocalisation, auxquels la guerre venait de donner un grand développement.

Les systèmes de radiolocalisation utilisent les ondes électromagnétiques, découvertes par Hertz en 1888, et leur propagation dans l'air (voir encadré n°2).

Utilisation des ondes électromagnétiques pour la navigation avant la guerre

Entre la fin du XIXe siècle et le milieu du XXe siècle, les ondes électromagnétiques sont utilisées en navigation maritime pour :

- la réception à bord de l'heure de référence, en particulier pour déterminer les longitudes ; ces signaux horaires sont également utilisés par les hydrographes pour le calcul des positions astronomiques (voir chapitre 8, encadré n°2),
- la transmission d'informations entre navires et avec la terre au moyen de la T.S.F. (télégraphie sans fil),
- la détermination de la position du navire en recoupant des directions données par radiogoniométrie (radiophares) ; la précision de ces positions est insuffisante pour une utilisation hydrographique.

Réalisations pendant la guerre

Le besoin d'une radiolocalisation précise pendant la guerre concerne surtout l'aviation, en particulier l'aviation de bombardement.

Alliés et allemands développent des systèmes permettant de guider les bombardiers sur leurs objectifs. Deux familles de systèmes sont développées : des systèmes de guidage et des systèmes de radiolocalisation, à usage plus général.

Dans la première famille, l'avion est guidé sur une trajectoire au moyen d'un ensemble d'émetteurs et de récepteurs radio situés à terre et à bord. L'avion est informé de sa position par rapport à la trajectoire prévue et de sa distance au point de largage des bombes.

Encadré n°2 : propagation des ondes électromagnétiques dans l'air

Les ondes électromagnétiques

Une onde correspond à un transport d'énergie. L'énergie mécanique utilise la matière pour se déplacer ; le son, par exemple, peut se déplacer dans l'air, dans l'eau, ou dans un corps solide. L'énergie électromagnétique, créée par la conversion, par une antenne, d'une énergie électrique, n'utilise pas la matière pour se déplacer. Elle peut se déplacer dans le vide, mais aussi dans l'atmosphère qui entoure la terre.

Une caractéristique importante des ondes est leur fréquence, qui correspond au nombre de vibrations par secondes et qui s'exprime en Hertz (Hz). La gamme des fréquences 10 Hz à 300 GHz correspond aux ondes radio. Au-delà, on trouve les ondes lumineuses : rayons infrarouges, lumière visible et rayons ultraviolets, puis les rayons X et enfin les rayons gamma.

Les ondes radio sont elles-mêmes découpées en catégories en fonction de leur fréquence :

- VLF - très basse fréquence : 3 à 30 kHz,
- LF - basse fréquence : 30 à 300 kHz,
- MF - moyenne fréquence : 300 kHz à 3 MHz,
- HF - haute fréquence : 3 à 30 MHz,
- VHF - très haute fréquence : 30 à 300 MHz,
- UHF - ultra haute fréquence : 300 MHz à 3 GHz,
- SHF - super haute fréquence : 3 à 30 GHz,
- EHF - extra haute fréquence : 30 à 300 GHz

La propagation des ondes électromagnétiques s'effectue à partir de l'antenne dans toutes les directions (comme un sphère qui grossit), en ligne droite, à la vitesse dite « de la lumière » (299 792 km/s). Cette propagation peut être perturbée par certains phénomènes, l'effet de ces perturbations variant avec la fréquence des ondes.

L'atmosphère

L'atmosphère terrestre, la couche d'air qui englobe la terre, n'a pas une structure homogène. On peut la décomposer verticalement en zones, en fonction de la manière dont varie la température. On a ainsi, en partant de la surface de la terre, la tropo-

sphère, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère.

La troposphère affecte la propagation des ondes VHF et supérieures en fonction des conditions météorologiques (température et humidité de l'air). Mais l'effet le plus important sur la propagation des ondes est dû à l'ionosphère, située au niveau de la mésosphère et de la thermosphère.

L'ionosphère

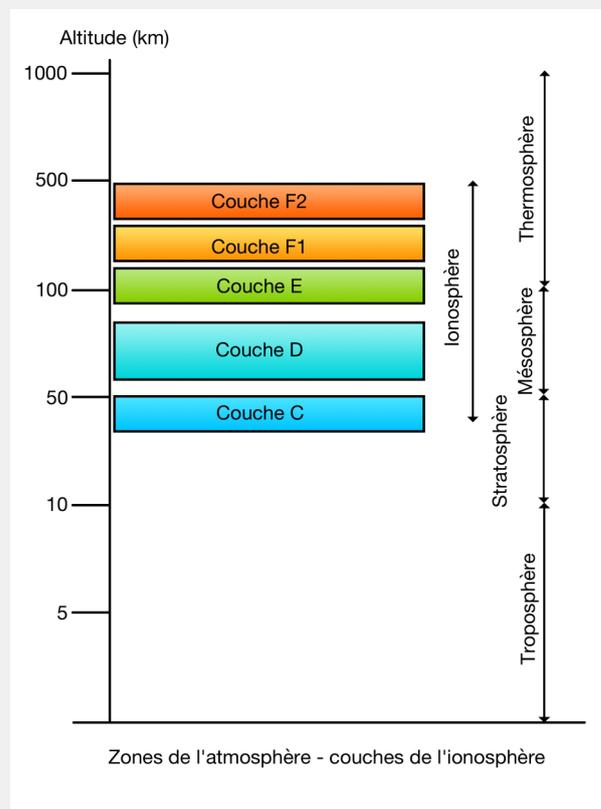


figure 1 - structure de l'atmosphère et couches de l'ionosphère (le jour), d'après un schéma de Ian Poole

Dans l'ionosphère, le rayonnement du soleil frappe les molécules de gaz et les transforme en ions positifs en libérant des électrons libres. La nuit, ces électrons libres ont tendance à se recombiner avec les ions positifs.

La concentration en électrons dans l'ionosphère n'est pas uniforme verticalement. On identifie plusieurs couches qui présentent un comportement différent :

- La couche C, la plus basse, est très peu ionisée et n'a pas d'effet notable sur les ondes électromagnétiques.

- La couche D se situe dans la zone 50 à 80 km d'altitude. Cette couche étant assez dense, les ions et les électrons se recombinaient facilement lorsque le rayonnement solaire est masqué par la terre. Il en résulte que cette couche disparaît pendant la nuit.
- La couche E se situe entre 100 et 125 km. Encore assez dense, elle disparaît presque entièrement pendant la nuit.
- La couche F se trouve à une altitude qui dépend du moment de la journée, de la saison et de l'activité solaire, celle-ci variant selon un cycle d'environ onze ans. Le jour, elle se sépare en deux couches, F1 et F2, qui fusionnent la nuit venue. F1 se situe approximativement à 200 km, F2 entre 300 km et 400 km et, la nuit, la couche F est à 250 km. La faible densité des gaz dans cette couche ralentit la recombinaison nocturne des ions et des électrons. La couche F présente donc une ionisation suffisante pour perturber les ondes électromagnétiques la nuit.

Le trajet des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques émises sur la terre peuvent suivre plusieurs trajets.

Ondes de sol

En principe, les ondes devraient se propager en ligne droite et se perdre dans l'espace une fois que l'horizon visuel est franchi. Mais les courants induits qui sont présents à la surface de la terre ralentissent les ondes et les obligent à suivre la courbure de la terre. Ainsi, une onde peut-elle être reçue sur la terre au-delà de l'horizon visuel de l'émetteur. Ce mode de propagation, dit « onde de sol », concerne les ondes électromagnétiques de basse fréquence (VLF, LF et MF).

Ondes de ciel

Comme les ondes se propagent dans toutes les directions, une partie d'entre-elles traverse l'atmosphère. Au passage dans l'ionosphère, leur présence excite la vibration des électrons libres, qui ont alors tendance à entrer en collision avec les ions positifs. L'énergie consommée dans ces collisions vient diminuer celle des ondes. Mais les électrons ont un autre effet : ils agissent comme de petites antennes et re-diffusent les ondes. En fonction de la fréquence des ondes et de la densité en électrons, l'effet peut aller d'une simple atténuation jusqu'à ce qui ressemble à une réflexion, où les ondes retournent vers la terre.

L'action des différentes couches de l'ionosphère sur les ondes est la suivante :

- Couche D (le jour) : atténuation des ondes VLF, LF et MF. Plus la fréquence de l'onde est basse, puis l'atténuation est forte.
- Couches E et F : la densité des électrons libres étant plus faible, le nombre de collisions diminue et la réfraction prend le dessus, l'effet diminuant avec l'augmentation des fréquences.

Il en résulte que l'effet de l'ionosphère, le jour, est le suivant (il est aussi fonction de l'angle sous lequel les ondes traversent la couche) :

- les fréquences basses, VLF, LF et MF sont absorbées par la couche D,
- les fréquences plus élevées traversent la couche D. Plus la fréquence est élevée, plus l'onde traverse de couche avant d'être réfléchi. On observe ainsi des ondes réfléchies par la couche E, des ondes réfléchies par la couche F1, des ondes réfléchies par la couche F2 et enfin des ondes qui traversent l'ionosphère et se perdent dans l'espace.

Le rebond des ondes sur l'ionosphère peut atteindre 2 000 km avec la couche E et 4 000 km avec la couche F2. La surface de la terre, en particulier en mer, peut à son tour réfléchir l'onde vers le ciel pour un autre rebond. Il est ainsi possible à une onde de faire le tour de la terre.

Effet de la propagation sur la précision de la radiolocalisation

Les systèmes de radiolocalisation étant basés sur la mesure du temps de propagation des ondes électromagnétiques, leur précision est affectée par les anomalies de cette propagation :

- les ondes de ciel qui, lorsqu'elles sont privilégiées par le récepteur au détriment des ondes de sol, entraînent une mauvaise détermination des distances parcourues,
- le trajet terrestre des ondes de sol (portion du trajet des ondes effectuée sur la terre ferme, où les conditions de propagation sont différentes du trajet maritime des ondes),
- les transitions jour-nuit et nuit-jour, pendant lesquelles le comportement de l'ionosphère change brutalement, entraînant des modifications brusques des conditions de propagation à l'origine, par exemple, de sauts dans le comptage des hyperboles.

Dans la seconde famille, on trouve presque exclusivement des systèmes hyperboliques (les allemands ont développé un système directionnel, le *Sonne*, repris par les anglais et renommé *Consol*).

La localisation hyperbolique est basée sur la mesure, en un point inconnu, de différences de distances entre des couples de points connus. Chaque différence de distances détermine une hyperbole dont les foyers sont les deux points du couple considéré. L'intersection d'au moins deux hyperboles, provenant de deux couples différents, fournit la position du point de mesure d'une manière similaire au repérage par le son (voir chapitre 7, encadré n°2).

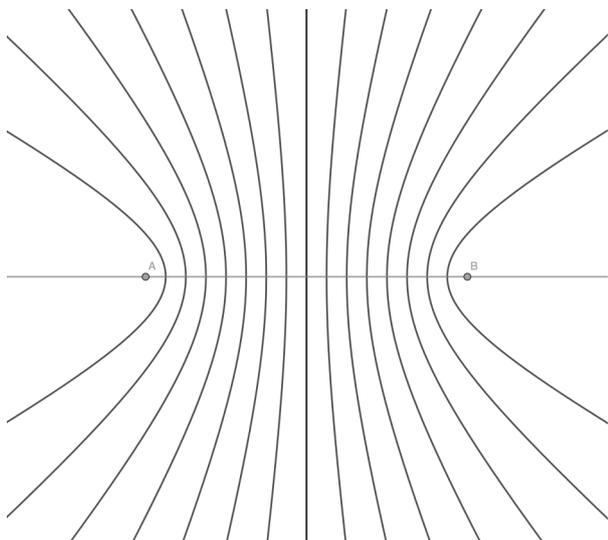


figure 2 - échantillon d'hyperboles pour un couple A B

Une première méthode pour mesurer la différence de distances consiste à mesurer l'écart de temps entre la réception de deux signaux émis au même moment par les deux points connus. Les signaux peuvent être, par exemple, des impulsions transmises par radio. Les systèmes britannique *Gee* et américain *Loran* utilisaient cette méthode.

Une seconde méthode consiste à mesurer le déphasage d'ondes de même fréquence émises de manière synchronisée par les deux points connus. C'est la méthode utilisée par le système britannique *Decca*. Cette méthode demande à résoudre deux problèmes :

- Il est difficile techniquement de différencier deux ondes de même fréquence émises de deux points différents. Il est plus simple de faire émettre une fréquence différente à chaque point, les deux fréquences étant ensuite manipulées pour permettre la comparaison des phases.
- Le déphasage obtenu donne uniquement la valeur à ajouter à une hyperbole « ronde », sans

préciser laquelle, chaque hyperbole « ronde » correspondant à une absence de déphasage. Pour déterminer cette hyperbole, il faut démarrer la navigation en un point connu, en lisant sur la carte la valeur de l'hyperbole « ronde » correspondante. Cette valeur est placée dans un compteur. Au cours du déplacement du mobile, chaque fois que le récepteur indique le passage par une absence de déphasage, le compteur doit être augmenté ou diminué de 1 selon que l'on a atteint l'absence de déphasage de manière croissante ou décroissante.

L'encadré n°3 fournit des informations supplémentaires sur ces premiers systèmes de radiolocalisation.

Développements ultérieurs

Systèmes hyperboliques

Après la guerre, les systèmes de radiolocalisation font l'objet de développements pour la navigation maritime mais aussi pour d'autres secteurs d'activité ayant besoin d'une grande précision, comme la prospection pétrolière en mer.

Les hydrographes s'intéressent également à ces nouveautés. La mission hydrographique de dragage de mines qui opère en Manche utilise en 1946/1947 la première chaîne Decca anglaise lors de la mise en place d'une triangulation flottante. L'*Amiral-Mouchez* évalue l'utilisation du Decca pour la navigation et pour l'hydrographie fin 1947.

La première utilisation opérationnelle d'un système de radiolocalisation par le service hydrographique a lieu en 1951, lorsqu'un système Decca est déployé pour le sondage de l'embouchure de la Gironde. L'utilisation d'un tel système demande la présence d'une équipe à terre pour l'installation du système, puis pour sa calibration (les positions du navire fournies par le système de radiolocalisation sont comparées aux positions fournies par des observations au théodolite faites à partir de la terre, ce qui permet de déterminer les corrections constantes à appliquer aux mesures fournies par le récepteur). Il faut ensuite assurer la maintenance du système pendant la durée du levé, puis procéder à son démontage à l'issue des travaux.

Le progrès technique continuant, d'autres systèmes hyperboliques vont être utilisés par la suite (la date indiquée est celle de la première utilisation par le service hydrographique) :

- Rana (1954),
- Toran (1958),

Encadré n°3 : premiers systèmes de radiolocalisation hyperbolique

Gee et Loran

Les systèmes Gee (britannique) et Loran (américain) fonctionnent sur le même principe : trois émetteurs synchronisés, un maître et deux esclaves (ou quatre émetteurs formant deux couples maître / esclave dans le cas du Loran), émettent au même instant une impulsion radio. Le mobile reçoit les trois (ou quatre) impulsions, mesure la différence de temps de réception entre chaque impulsion esclave et l'impulsion maître et en déduit les différences de distances qui correspondent à deux hyperboles. La position du mobile se trouve à l'intersection de ces deux hyperboles.

Le Gee a été utilisé d'abord sur les avions puis sur les navires. Il était le système de localisation principal des navires lors du débarquement en Normandie en juin 1944.

Decca

Le système de navigation Decca est constitué de chaînes de radiobalises émettrices, chaque chaîne se composant d'un émetteur maître et de deux esclaves, ou plus, contrôlés par les transmissions du maître. Ces stations sont placées à des intervalles de 80 à 100 km.

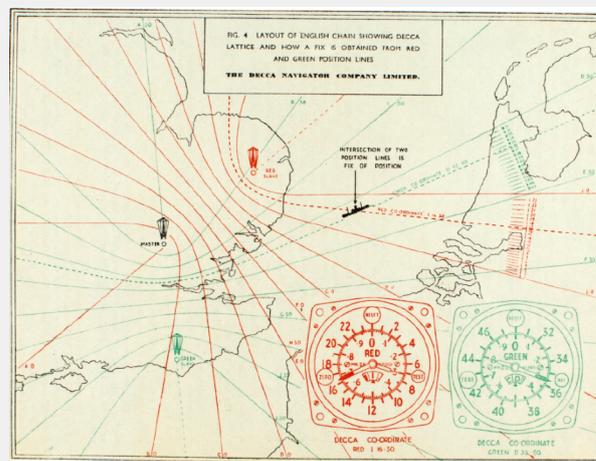
Le système fonctionne dans la bande basse fréquence (80-150 kHz). Les émissions sont constituées d'un signal continu non modulé avec une puissance d'émission de l'ordre de 2 kilowatts.

Chaque balise a sa propre fréquence, la fréquence des esclaves étant liée à celle du maître dans un rapport simple tel que $4/3$ ou $3/2^1$ et les signaux sont synchronisés par un verrouillage de phase. L'utilisateur mesure, au moyen d'un récepteur multi-canal, la différence de phases entre les paires d'émetteurs maître-esclave, à la fréquence multiple commune la plus basse ou à la fréquence de comparaison de chaque paire. Il est possible de relier cette différence de phases à une différence de distances entre les stations et le récepteur, permettant ainsi de localiser le récepteur sur l'une des lignes hyperboliques de position, ou voies, pour chaque paire de stations. Les voies peuvent être calculées et dessinées sous forme de réseaux en surimpression sur une carte de navigation ordinaire.

Une chaîne de trois balises est nécessaire pour obtenir une position. Dans certaines circonstances, une quatrième balise de la même chaîne est nécessaire pour offrir une couverture à 360° .

La portée du système est de l'ordre de 300 km et la précision globale d'environ 400 m. Le système peut être mis en défaut par les ondes de ciel.

Le Decca est d'une utilisation très facile grâce à ses indicateurs de réception, les « décomètres », qui assurent le comptage des hyperboles et fournissent directement les informations à reporter sur la carte.



5 - configuration de la chaîne Decca et exemple de détermination de la position. Le décomètre rouge indique I 16 30 ; le décomètre vert indique D 35 80. On cherche sur la carte les hyperboles rouge I 16 / I 17 et verte D 35 / D 36 (le dessin ne comporte que les hyperboles 0 : A 0, B 0, C 0, etc.) et on interpole les centièmes, respectivement 30 et 80 pour trouver la position du navire - Revue hydrographique internationale - Volume XXIV - 1947

Des comparaisons effectuées entre le Gee et le Decca ont montré que ce dernier était plus précis et avait une plus grande portée en mer. Le Decca a été utilisé pour la première fois lors du débarquement en Normandie. Démarré le 5 juin 1944, pour le dragage des mines précédant le débarquement, il a été stoppé le surlendemain. Il équipait dix-neuf bâtiments : dix dragueurs de mines, cinq engins de débarquement affectés au commandement, deux vedettes de tête de convoi et cinq autres navires.

Il a ensuite été déployé sur l'Escaut à l'automne 1944 pour permettre la navigation par temps de brume.

¹ La fréquence de base f étant de 14 kHz, le maître émet à $6 \times f$, l'esclave n°1 à $8 \times f$ et l'esclave n°2 à $9 \times f$. La comparaison de phases maître - esclave 1 s'effectue à $24 \times f$, la comparaison maître - esclave 2 à $18 \times f$.

- Toran 3G (1968),
- Ragep (1971),
- Decca Hi-Fix (1972),
- Rana P17 (1980),
- Syledis (1982)

Ces systèmes hyperboliques sont précis mais leur portée est limitée. Le Rana et le Toran, par exemple, portent à 200 km. En 1968, une version longue distance du Toran, la version 3G, offre une précision de 10 m à 500 km des côtes mais de jour uniquement. Lorsque la nuit vient, les modifications de propagation des ondes électromagnétiques dans l'ionosphère créent des perturbations qui affolent les compteurs d'hyperboles et peuvent provoquer des sauts inopinés. Le matin, avant de reprendre le travail, le bâtiment hydrographique doit recalculer ses compteurs en passant près d'une bouée placée à cet effet ou au-dessus d'une épave facilement détectable au sondeur.



6 - station Toran d'Assinie, 1964 -
photothèque Amhydro - M. Marchand

A côté de ces systèmes précis, mais de portée limitée, des systèmes moins précis, ayant une portée « mondiale » sont utilisés :

- Loran C (1964),
- Omega (1971)

La position qu'ils fournissent peut être améliorée par un recalage au moyen du satellite Transit (voir plus loin). Elle atteint alors une précision de l'ordre d'une centaine de mètres.

Systèmes circulaires

En 1959, le service hydrographique procède aux essais du Derveaux, un système de radiolocalisation circulaire. Un interrogateur à bord du navire transmet des impulsions à trois balises à terre qui renvoient aussitôt une réponse. L'interrogateur mesure le temps mis entre l'envoi des impulsions et la réception des réponses et en déduit sa distance à chacune des balises. A partir de chaque balise, on peut tracer un cercle dont le rayon correspond à la distance mesurée. L'intersection de ces cercles fournit la position du navire, avec une précision de 10 à 20 m.

Ce type de système ayant une portée optique, on place les balises à des endroits élevés pour obtenir une bonne couverture géographique. La contrepartie est que la balise peut être masquée à proximité de la côte si celle-ci est abrupte, obligeant à utiliser près des côtes un autre moyen de localisation.

Le successeur du Derveaux, le Trident, commence à être utilisé à partir de 1966.

Balises acoustiques

Lorsqu'une localisation précise est nécessaire pour la réalisation de travaux hydrographiques à grande distance de la côte, le service hydrographique utilise un système de localisation au moyen de balises acoustiques.

Des balises sont mouillées à 30 mètres au-dessus du fond, qui peut être à plusieurs milliers de mètres sous la surface. Un interrogateur est placé sous la coque du navire. Le principe est le même que dans les systèmes circulaires, mais en utilisant une onde acoustique.

Le système est ensuite calibré, ce qui permet de déterminer, dans un repère local, la position en trois dimensions des balises et la position en surface du navire. Le repère local est ensuite orienté au moyen du compas du navire, puis calé géographiquement grâce au satellite Transit (voir ci-dessous). La précision de la localisation est de l'ordre d'une dizaine de mètres.

Après utilisation du système, les balises sont libérées par un signal acoustique particulier, puis récupérées après être remontées à la surface.

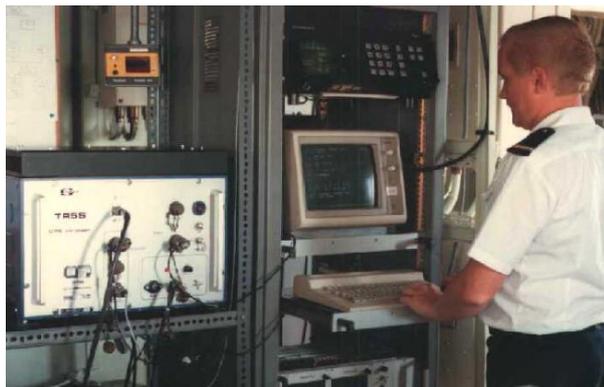
Systèmes à base de satellites

Les systèmes de radiolocalisation à base d'émetteurs situés à terre offrent soit une grande précision, soit une grande couverture géographique. Il est possible d'obtenir les deux à la fois en plaçant les émetteurs dans le ciel, en orbite autour de la

terre. De plus, les problèmes de propagation des ondes électromagnétiques sont simplifiés et la dégradation nocturne peut être évitée.

Le premier système développé est le Transit, mis en service à usage militaire en 1964 et ouvert aux usages civils à partir de 1967. Ce système ne permet pas une localisation en continu. Le service hydrographique l'utilise à partir de 1968 pour recalculer les positions dans les travaux à très grande distance de la côte, pour localiser les champs de balises acoustiques et pour déterminer à terre la position des points géodésiques à quelques mètres près.

Le second système est le GPS, utilisé par le service hydrographique à partir de 1986. En 1992, le SHOM réalise un premier levé côtier, en Guyane, exclusivement au moyen du GPS en mode différentiel. Le GPS, capable de fournir partout sur terre, en permanence, une position très précise, rend caducs tous les autres moyens de localisation, aussi bien pour les levés en mer que pour la détermination des points à terre et du trait de côte. Cela modifie profondément la manière de travailler des hydrographes. A la fin du film « profil au top » qui reconstitue une séance de radioguidage, l'hydrographe qui joue le rôle du guide témoin : « On avait vraiment un rapport avec le milieu marin à l'époque. C'est à dire, qu'en fait, on était sur le terrain. Maintenant, avec un GPS, on n'a plus besoin de stations à terre : la vedette peut arriver sur zone et commencer à travailler. A mon sens on a perdu une partie de ce qui était extrêmement agréable dans la spécialité d'hydrographe. Enfin, pour moi, c'est des très bons souvenirs. »



7 - récepteur GPS dans le PC scientifique du D'Entrecasteaux en 1987 - photothèque Amhydro

Un autre aspect important pour l'hydrographie est que la précision des cartes marines disponibles est inférieure à la précision de la navigation assistée par le GPS. De plus, ces cartes sont basées le plus souvent sur un autre ellipsoïde que celui qu'utilise le GPS¹. Reporter naïvement la position du GPS

¹ Le GPS utilise le système géodésique WGS 84, bien adapté globalement à la forme de la terre. Les cartes marines adoptent un système géodésique dont l'ellipsoïde est bien adapté localement.

sur une carte marine peut entraîner une erreur supérieure à 100 m (supérieure à 1 000 m sur une carte de la Guadeloupe). Les services hydrographiques ont donc été obligés de modifier leurs cartes et de refaire les levés avec plus de précision.

Il existe également le système DORIS, utilisable uniquement en point fixe sur une durée de plusieurs jours, qui permet de déterminer avec une grande précision la position des points géodésiques.

L'encadré n°4 fournit des informations supplémentaires sur ces systèmes de radiolocalisation.

Mesures sur le terrain

Triangulation

Dans les années 1950, les opérations de triangulation à terre sont modifiées par l'apparition d'appareils électroniques permettant de mesurer facilement les distances.

Jusque là, la mesure de distances était une opération longue et délicate qui n'était effectuée qu'une ou deux fois dans une triangulation. L'essentiel des opérations de triangulation consistait à mesurer des angles avec un théodolite. A partir de 1958, le service hydrographique équipe ses missions avec de nouveaux appareils de mesure de distances dont les noms varient selon le constructeur : Géodimètre, Telluromètre, Distomat.

Leur principe commun est de déterminer, par me-



8 - Telluromètre, Côte d'Ivoire, 1964 - photothèque Amhydro

Encadré n°4 : systèmes de localisation à base de satellites

Transit

Le 4 octobre 1957, l'URSS lance le premier satellite artificiel, nommé Spoutnik, une petite sphère métallique faisant le tour de la terre en un peu moins de 100 minutes tout en émettant par radio un « bip-bip ».

En 1958, deux scientifiques américains réussissent à déterminer avec précision la position du satellite grâce à l'effet Doppler qui affecte ses émissions radio.

L'effet Doppler, découvert en 1842, affecte une onde lorsque sa source d'émission est en mouvement par rapport à un observateur considéré comme fixe. Si l'émetteur se rapproche de l'observateur, l'onde est contractée et la fréquence observée est supérieure à la fréquence d'émission. Au contraire, si l'émetteur s'éloigne de l'observateur, l'onde est dilatée et la fréquence observée est inférieure à la fréquence d'émission. On peut constater ce phénomène, par exemple, au passage d'un véhicule de secours actionnant sa sirène. La variation de la fréquence observée étant liée à la vitesse de l'émetteur relativement à l'observateur, l'effet Doppler permet de déterminer cette vitesse.

L'expérience des scientifiques américains montre, par réciprocité, qu'il doit être possible de réaliser un système de localisation précis et de portée mondiale à partir d'un satellite dont l'orbite serait parfaitement connue. Un tel système serait utile pour, par exemple, recalculer la position des sous-marins stratégiques américains.

Le système, baptisé Transit, devient opérationnel en 1964 et son utilisation est ouverte au secteur civil, du moins pour les Etats-Unis et leurs alliés, à partir de 1967.

Le système Transit comporte trois composants :

- les satellites (sept en 1973) qui tournent autour de la terre un peu plus de 13 fois par jour, à 900 km d'altitude, en passant par les pôles. Leurs orbites sont décalées afin qu'il y ait plusieurs passages par jour en tout point de la terre,
- les stations au sol qui déterminent précisément l'orbite des satellites par des mesures Doppler et envoient les informations de prévisions d'orbites aux satellites,

- les récepteurs placés à bord des mobiles.

Les satellites émettent toutes les deux minutes rondes un message décrivant leur orbite. Ce message est émis sur deux fréquences différentes.

Lorsqu'un satellite passe au-dessus de l'horizon d'un mobile, celui-ci reçoit son message émis sur les deux fréquences et en extrait les informations d'orbite qui lui permettent de déterminer la position du satellite au début de l'émission du message. Le récepteur effectue ensuite les mesures Doppler et corrige autant que possible les résultats des erreurs liées à la propagation des ondes dans l'atmosphère¹. A partir de quatre messages émis par le satellite aux positions P1, P2, P3 et P4, le récepteur détermine trois différences de distances P2-P1, P3-P2 et P4-P3. Chaque différence de distances correspond à une surface engendrée par une hyperbole (un hyperboloïde). En faisant l'intersection de cette surface avec l'ellipsoïde terrestre, on obtient un lieu, l'intersection des trois lieux déterminant la position du mobile. Toutes ces opérations nécessitent un calculateur couplé au récepteur. Le mobile se déplaçant pendant les mesures, il doit le faire de la manière la plus constante possible, et son déplacement est pris en compte dans les calculs.

Le système Transit offre une couverture mondiale à un nombre d'utilisateurs illimité et une bonne précision de localisation (50 m en point fixe, 100 à 200 m en mer), aussi bien de jour que de nuit. Son principal inconvénient est de ne fournir cette localisation que de manière intermittente.

GPS / Navstar

Le système GPS (Global Positioning System), également appelé Navstar (Navigation Satellite Timing And Ranging), développé par les Etats-Unis à partir de 1973, est destiné à fournir une réponse globale à tous les problèmes de localisation militaire :

- couverture mondiale, à la surface de la terre et dans l'atmosphère,
- nombre d'utilisateurs illimité,
- précision d'une dizaine de mètres pour la navigation, quelque soit la vitesse du mobile, et inférieure au mètre pour des observations en point fixe,

¹ La réfraction ionosphérique dévie les ondes en fonction de leur fréquence. En observant l'effet Doppler affectant deux ondes de fréquences différentes, on arrive à éliminer une grande partie de cette réfraction. La réfraction troposphérique, due aux conditions atmosphériques, peut être corrigée grâce à des tables de corrections.

- possibilité de déterminer la position en permanence.

Pour obtenir ces caractéristiques, la position est calculée à partir de distances mesurées entre le mobile et plusieurs satellites qui doivent être visibles au même instant. Vingt-quatre satellites sont prévus, répartis en six plans orbitaux afin que quatre satellites soient visibles en tout point de la terre. Leur orbite est située à 20 000 km de la terre, dont ils font le tour en douze heures.

La détermination de la distance est faite par le récepteur. Le satellite indique l'heure à laquelle il émet ses messages. Le récepteur, qui dispose d'une horloge interne, note l'instant auquel il reçoit le message. Le décalage constaté correspond au temps de transmission du message, et par conséquent à la distance entre le récepteur et le satellite. Cette distance est toutefois affectée de l'erreur d'horloge du récepteur, bien moins précise que celle du satellite. En mesurant simultanément les distances à quatre satellites au moins, le récepteur peut déterminer les quatre valeurs inconnues : sa position sur l'ellipsoïde, son altitude par rapport à l'ellipsoïde et la dérive de son horloge.

Le système est déployé à des fins de tests à partir de 1978. Il est ouvert au secteur civil, avec des performances moindres (une centaine de mètres), en 1983. Le nombre de satellites prévu est atteint en 1993. A partir de l'an 2000, la précision pour un usage civil passe à une vingtaine de mètres (une seule fréquence du satellite étant utilisable en mode civil, l'erreur due à l'ionosphère n'est pas éliminée).

Par la suite, d'autres nations mettent au point leurs propres systèmes de localisation par satellite : l'URSS à partir de 1982 (Glonass), la Chine à partir de 2000 (Beidou), l'Europe à partir de 2005 (Galileo). Les récepteurs modernes savent combiner les observations de tous ces satellites.

La précision du GPS dans 95% des cas est de l'ordre de 10 mètres sur la position et 15 mètres sur l'altitude². Cette précision peut être améliorée par l'utilisation d'un mode de fonctionnement dit « différentiel ».

GPS différentiel

Le mode différentiel repose sur l'idée que l'imprécision instantanée du GPS affecte d'une même manière tous les récepteurs situés dans une même zone. Un récepteur situé sur un point fixe de référence dont la position est connue avec

précision détermine en permanence les distances aux satellites visibles, comme le fait un récepteur ordinaire. En comparant ces distances observées aux distances réelles calculées à partir de sa position, il en déduit des corrections à appliquer et les diffuse par radio. Tous les récepteurs utilisant le mode différentiel reçoivent ces corrections et les utilisent pour améliorer la position que leur fournit le GPS. La précision finale obtenue est de l'ordre du mètre dans un rayon de 100 km autour du point de référence. Les corrections à appliquer peuvent également être diffusées par satellite (système SBAS - Satellite-Based Augmentation System).

Mesure par différence de phase

Une précision encore plus grande est obtenue avec le fonctionnement dit RTK (Real Time Kinematic - cinématique temps réel). Le principe est le même que le GPS différentiel mais les récepteurs affinent les distances en mesurant les déphasages de l'onde porteuse du satellite. La précision relative est de l'ordre du centimètre dans un rayon de 30 km. Ce mode de fonctionnement est utilisé pour le guidage des drones et pour les travaux de précision.

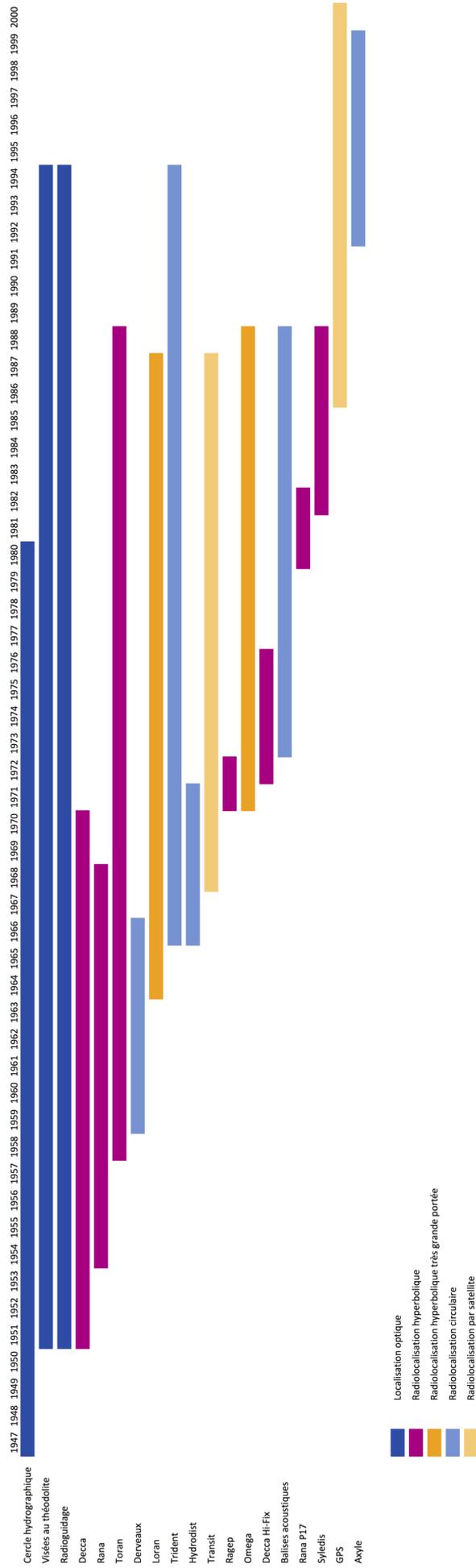
DORIS

Le système DORIS, de conception française (CNES, IGN et GRGS³), permet depuis le début des années 1990 de déterminer de manière précise (aujourd'hui, quelques centimètres) l'orbite d'un satellite. Il fonctionne à l'inverse du Transit : des balises terrestres, au nombre d'une cinquantaine, émettent deux ondes de fréquences différentes. Lorsque un satellite doté d'un récepteur DORIS passe au-dessus d'une balise terrestre, il effectue des mesures Doppler qui lui permettent de calculer précisément sa position. Il communique ensuite cette information au centre de contrôle du système.

Comme l'orbite des satellites équipés de récepteurs DORIS est connue avec précision, il est possible de mettre en place à terre une balise provisoire et de déterminer sa position avec une précision de quelques centimètres. Le calcul de la position est similaire à celui qui est effectué avec le système Transit, la seule différence étant que l'émetteur est à terre et le récepteur dans le satellite. A partir de 1992, le SHOM utilise ce système de positionnement pour déterminer la position d'une douzaine de stations installées sur des atolls en Polynésie française.

² La précision est fortement dégradée dans les 5% restants.

³ Centre National d'Etudes Spatiales, Institut Géographique National, Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale



9 - plages d'utilisation des moyens de localisation au service hydrographique, relevées dans les Annales hydrographiques entre 1947 et 2000. A partir de l'an 2000, seul le GPS est utilisé, hors cas particuliers

sure de phase, la distance aller-retour d'une onde lumineuse émise par l'instrument situé au point A et réfléchi par un réflecteur situé au point B. Une des techniques mises en œuvre consiste à moduler l'onde lumineuse par un signal de basse fréquence (et donc de grande longueur d'onde, supérieure au double de la distance AB). En mesurant le déphasage de ce signal à son retour, on obtient une valeur approchée de la distance parcourue par l'onde, valeur que l'on affine ensuite en multipliant successivement la fréquence de modulation par 10.

La précision obtenue par ces appareils est de l'ordre de quelques centimètres pour des distances allant jusqu'à 100 km.

Mesures en mer

Les hydrographes utilisent de nombreux appareils en mer, dont la mise en œuvre peut prendre plusieurs formes :

- l'appareil est fixé à la coque du navire et s'utilise lorsque le navire est en route ; c'est le cas des sondeurs,
- l'appareil est remorqué par le navire et s'utilise lorsque celui-ci est en route ; c'est le cas lorsque la mesure peut être gênée par le bruit du navire, sa masse métallique, etc. ou lorsqu'elle doit être effectuée près du fond,
- l'appareil est fixé à un câble et immergé, navire stoppé ; ce cas concerne les mesures effectuées à point fixe dans l'eau ou au fond de la mer : prélèvement d'échantillons d'eau, prélèvement de sédiments,
- l'appareil est mis en place à un endroit déterminé puis récupéré plus tard ; cela concerne les mesures de longue durée au point fixe : observation du courant et de la marée.

On peut ajouter un cas de figure qui commence à apparaître en hydrographie, celui des véhicules autonomes : l'appareil est mis en place à un endroit, effectue des mesures en se déplaçant dans une zone prédéfinie, puis est récupéré. Ce type d'appareil peut évoluer en surface, sous la surface ou dans les airs.

Détermination du relief sous-marin

Sondeur à ultrasons

Le service hydrographique reprend ses travaux après la guerre avec les sondeurs disponibles, notamment ceux qui équipent les navires récupérés, ce qui constitue un ensemble très varié. Les em-

barcations ne disposent souvent que du plomb poisson, et on note l'utilisation d'un sondeur au son (fusil) en 1950, à la mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique.

Les constructeurs proposent principalement des sondeurs à magnétostriction, dont les projecteurs à disques de nickel sont plus simples à fabriquer que ceux des sondeurs piézoélectriques à mosaïque de quartz. Le service hydrographique s'équipe en sondeurs de marque Hughes and Son, modèle MS 21, de type F (petits fonds, pour embarcation), G (fonds moyens) et H (grands fonds). Ces sondeurs sont à enregistreur électrolytique, dont le défaut principal, en plus d'une odeur très désagréable, est la déformation du papier d'enregistrement. A la fin des années 1950, le Service s'équipe du modèle MS 26 à enregistreur sur papier métallisé. Ce papier se conserve mieux et l'odeur de brûlé, produite lors de l'enregistrement, est plus supportable.

A partir des années 1970, le service hydrographique adopte des sondeurs allemands de marque ELAC (Arcturus, Castor, Deneb) et Atlas Krupp (Deso 10, Deso 20) ainsi que des sondeurs américains Raytheon et EDO. Aujourd'hui, les bâtiments hydrographiques sont équipés de sondeurs norvégiens Kongsberg Simrad EA.



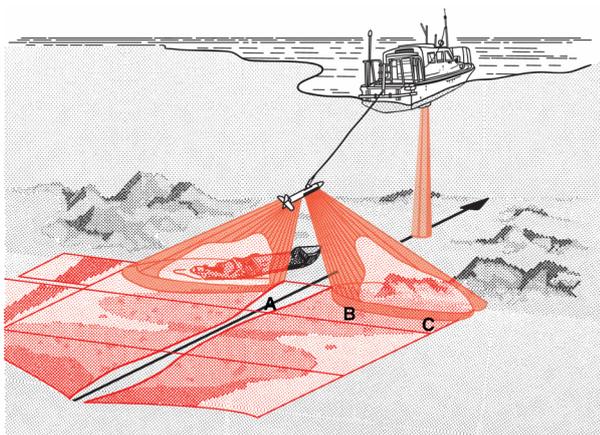
10 - enregistreur du sondeur Raytheon dans le PC scientifique de l'Estafette en 1982 - photothèque Amhydro

Avec l'arrivée d'autres types de sondeurs, ces sondeurs sont maintenant désignés sous les noms de sondeurs verticaux ou sondeurs monofaisceau.

Sondeur latéral

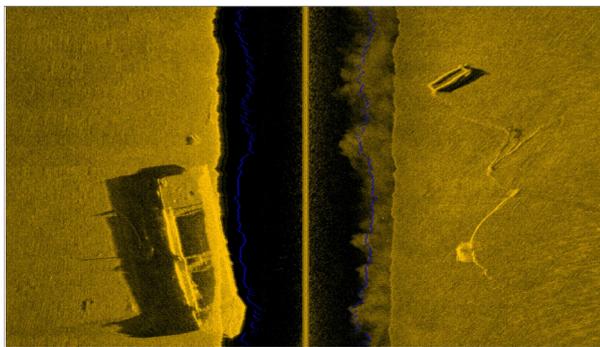
Le sondeur latéral, parfois appelé sonar latéral ou sonal, est utilisé par le SHOM à partir de 1974. Cet appareil permet de révéler les irrégularités du fond comme le fait la lumière rasante du soleil sur un mur.

L'appareil se présente comme un « poisson » qui doit opérer à faible distance au-dessus du fond. Il



11 - principe de fonctionnement du sondeur latéral, d'après un schéma publié dans les Annales hydrographiques en 1998 - illustration Z. Svilar

est donc le plus souvent remorqué par le navire. L'appareil émet à gauche et à droite une impulsion ultrasonore perpendiculaire à son déplacement. Cette impulsion est assez large verticalement mais de faible épaisseur horizontalement (voir illustration ci-dessus). Sur un fond plat, l'impulsion arrive d'abord au point A, ensuite au point B et enfin au point C. Le signal réfléchi qui revient au sondeur est donc d'une durée assez longue et son intensité varie avec la réflectivité du fond. Si le fond présente un pic, le signal renvoyé par le pic sera plus fort, puis il y aura une absence momentanée de signal dans la zone d'ombre du pic, permettant de mesurer approximativement sa hauteur.



12 - image fournie par le sondeur latéral - à gauche, épave d'un transport de minéral, située en rade de Nouméa, dans la baie de Numbo ; au centre, la zone aveugle ; à droite des chaînes, un cadre métallique et un corps mort - avec l'aimable autorisation d'Action Hydro Topo - Nouméa

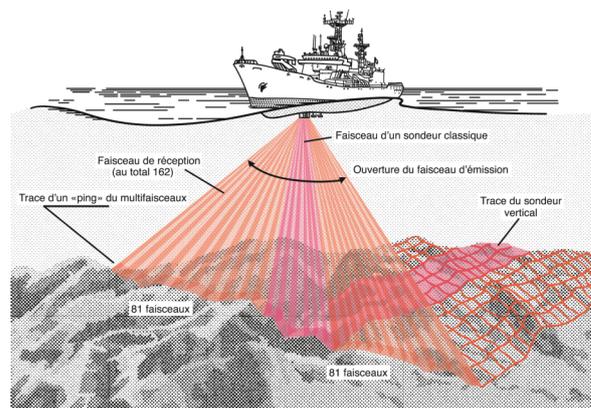
L'appareil restitue sur un enregistreur papier le résultat de chaque émission d'impulsion sous la forme d'une fine bande en niveau de gris. La juxtaposition de ces bandes fournit ce qui ressemble à une photographie du fond, faisant bien ressortir ses irrégularités.

Sondeur multifaisceaux

Le sondeur multifaisceaux apparaît à la fin des an-

nées 1970. Le CNEXO s'équipe d'un sondeur grands fonds en 1977, le SHOM d'un sondeur petits fonds en 1988 et d'un sondeur grands fonds en 1993.

Un sondeur vertical émet une impulsion qui atteint le fond sous la forme d'une surface à peu près circulaire. Un écho de faible durée est renvoyé et on adopte en général la profondeur correspondant à l'instant de réception du début de l'écho et la position du navire correspondant à l'instant de la mesure. Une imprécision supplémentaire est apportée par les mouvements de la mer qui provoquent la rotation du navire sur ses 3 axes (phénomènes appelés tangage, roulis et lacet) ainsi que son déplacement vertical (appelé pilonnement). Afin de réduire cette imprécision, le *D'Entrecasteaux*, entré en service en 1971, dispose, en plus de deux sondeurs grands fonds, d'un sondeur grands fonds dont la base est stabilisée pour compenser le tangage et le roulis.



13 - principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux, d'après un schéma publié dans les Annales hydrographiques en 1998 - illustration Z. Svilar

Le sondeur multifaisceaux permet d'obtenir plusieurs valeurs de profondeur à chaque émission d'impulsion. Pour cela l'impulsion est émise sous la forme d'un faisceau large mais de faible épaisseur, comme dans le cas du sondeur latéral. Contrairement à ce dernier, le faisceau est dirigé vers le fond. L'écho, large, est reçu par le sondeur au moyen d'un réseau de récepteurs alignés perpendiculairement au déplacement. Chaque récepteur capte ainsi une petite partie de l'écho. Après prise en compte des rotations du navire, on obtient un ensemble de profondeurs réparties à gauche et à droite du navire (16 pour le sondeur du CNEXO, 20 pour le sondeur petits fonds du SHOM, 162 pour le sondeur grands fonds). La surface ainsi sondée a une largeur qui dépend de la profondeur (0,75 fois le fond pour le sondeur du CNEXO, 2,4 fois le fond pour le sondeur petits fonds du SHOM). Le sondeur fournit directement une représentation en courbes de niveau ou en

relief de la zone sondée. Ce type de sondeur permet de couvrir la zone à sonder entièrement et bien plus plus rapidement qu'avec un sondeur monofaisceau.

Marée

Depuis le XIXe siècle, l'observation de la marée reposait sur quelques marégraphes enregistreurs à flotteur placés dans les principaux ports et sur les échelles de marée installées par les missions hydrographiques dans les zones à sonder.

En 1887, l'ingénieur hydrographe Favé avait mis au point un marégraphe plongeur posé sur le fond qui déterminait la hauteur de l'eau grâce à un manomètre et l'enregistrait sur papier noirci à la fumée.



14 - marégraphe avec échelle de marée en Terre-Adélie, 1947 - photothèque Amhydro

Après la guerre, ces deux familles de marégraphes, à flotteur et à pression, sont modernisées. L'enregistrement des mesures est numérique et les marégraphes à terre peuvent télétransmettre leurs observations.

Les marégraphes à puits de tranquillisation, installés à terre, sont en général couplés à une échelle de marée qui sert à contrôler leur fonctionnement. Ces marégraphes utilisent plusieurs techniques pour mesurer la hauteur d'eau dans le puits :

- flotteurs,
- sondes à ultrasons,
- sondes électromagnétiques

Les marégraphes posés sur le fond ou immergés à une certaine profondeur utilisent d'autres techniques pour déterminer en permanence la hauteur de la colonne d'eau :

- capteurs de pression
- cordes vibrantes
- jauges de contrainte
- quartz piézoélectriques

On trouve également des marégraphes pneumatiques installés à terre, sans puits de tranquillisation.

Courants

Jusqu'à la seconde guerre mondiale, la direction et la vitesse des courants de marée étaient observées de différents manières :

- détermination régulière de la position d'un flotteur libre,
- mesure directe en laissant dériver un flotteur captif pendant 30 secondes,
- mesure au courantomètre immergé à moulinet, à transmission instantanée ou à enregistrement mécanique ou photographique.

Ces observations de courant ne se faisaient que par petits fonds. A partir de 1950, le courantomètre remorqué G.E.K. permet de déterminer en tout lieu le courant marin de surface en mesurant son champ électrique induit.

Alors que les courantomètres immergés bénéficiaient des progrès techniques, une nouvelle méthode de détermination des courants apparut dans les années 1970 : la mesure par effet Doppler. En 1974, le Service évaluait un courantomètre profileur de coque à effet Doppler construit par la société Thomson. Cet appareil à deux paires de faisceaux à ultrasons fournissait toutes les 2 secondes des informations sur le courant dans la tranche 0 à 100 m par pas de 3 mètres. La vitesse du courant était calculée à partir de l'effet Doppler subi par une impulsion ultrasonore réfléchiée par les particules et organismes en suspension se déplaçant avec les masses d'eau. Le manque de précision de la localisation ne permit pas d'exploiter ces mesures et il fallut attendre vingt ans pour voir réapparaître les courantomètres Doppler sous le nom générique d'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Ces appareils sont utilisés en deux versions : fixés à la coque du navire ou immergés sur le fond.

Les flotteurs libres ont également évolué. Ils embarquent aujourd'hui des équipements électroniques et communiquent régulièrement leurs mesures aux satellites du système ARGOS, un sys-

tème mondial de localisation et de collecte de données par satellite lancé en 1986 et dédié à l'étude et à la protection de l'environnement.

Nature du fond

Avant l'arrivée des sondeurs à ultrasons, la nature du fond était déterminée au moment du sondage avec le plomb de sonde. La base du plomb de sonde comportait une cavité que le sondeur remplissait de suif. A la remontée du plomb, le sondeur examinait le suif. Celui-ci ramenait soit un échantillon du fond (sable, vase, etc.), soit son empreinte (cailloux, galets, roches). L'information étant utile aux navigateurs à la recherche d'un bon mouillage, elle était portée sur les cartes marines.

Des moyens plus lourds étaient parfois mis en œuvre pour déterminer la nature du fond, soit par raclage du fond, soit par prélèvement d'un échantillon par carottage.

Aujourd'hui, la connaissance de la nature du fond, ou sédimentologie marine, est utile dans d'autres domaines. La nature du fond peut influencer, par exemple, sur la propagation du son dans l'eau.

En plus de la technique du prélèvement, on détermine actuellement la nature du fond par l'examen de l'écho fourni par un sondeur vertical ou par le micro relief révélé par le sondeur multifaisceaux ou le sondeur latéral. Le service hydrographique utilise également des sondeurs verticaux spéciaux permettant d'étudier les premières couches du sous-sol marin : les sondeurs de sédiments.

Caractéristiques de l'eau de mer

Les premières mesures des caractéristiques de l'eau de mer ont été effectuées au XIXe siècle lors des campagnes océanographiques. L'intérêt de déterminer ces caractéristiques pour l'hydrographie apparut après la première guerre mondiale, en même temps que le sondage et le repérage par le son. Les caractéristiques qui influent sur la vitesse de propagation du son dans l'eau sont la température, la salinité et la pression.

Jusque dans les années 1960, la mesure de la température s'effectuait au moyen de thermomètres à renversement. Le renversement permettait de rompre la colonne de mercure et de mémoriser la température atteinte au moment du renversement. Celle-ci étant affectée par la pression, on combinait en général ces thermomètres avec des thermomètres protégés, qui indiquaient la température non affectée par la pression.

On mesurait les températures à différentes profondeurs en fixant les thermomètres le long d'un câble lesté que l'on descendait, navire stoppé, dans les profondeurs. Une fois que le premier thermomètre avait atteint la profondeur souhaitée, on faisait glisser le long du câble une masse métallique, le « messenger », qui provoquait le retournement du dernier thermomètre installé, libérant ainsi le messenger dont on l'avait muni, qui allait à son tour provoquer le retournement du thermomètre suivant. En serrant le câble entre ses doigts, on percevait les renversements successifs des thermomètres. Une fois le dernier renversement effectué, on remontait le câble, on retirait les thermomètres et on notait les températures qu'ils indiquaient.

Pour obtenir les valeurs de salinité, on prélevait des échantillons d'eau de mer à différentes profondeurs. Pour cela, on installait sur le câble des bouteilles à renversement se présentant sous la forme de tubes équipés d'un couvercle à chaque extrémité et on fixait les thermomètres sur ces bouteilles. Le renversement commandé par le messenger provoquait la fermeture des couvercles, emprisonnant l'échantillon d'eau de mer dans la bouteille.



15 - mise en place d'une bouteille à renversement - photothèque Amhydro - H. Bré

On analysait ensuite les échantillons obtenus, certaines analyses devant être réalisées immédiatement. La mesure de la conductivité de l'eau de mer, qui permet de connaître sa salinité, pouvait être faite longtemps après le prélèvement.

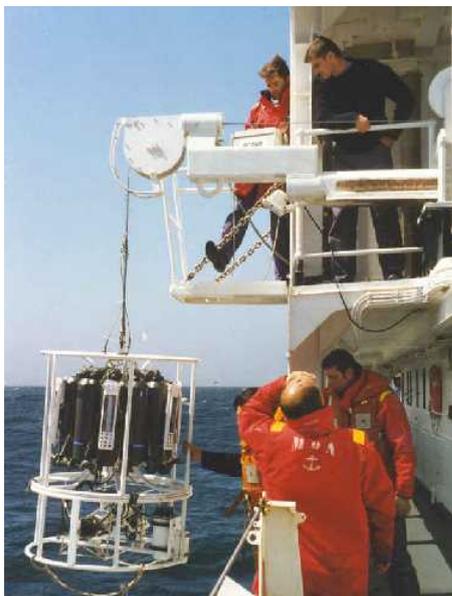
La pression était déterminée en fonction de la profondeur atteinte par l'ensemble bouteille et thermomètre.

La seconde guerre mondiale apporta un nouvel instrument, le bathythermographe, qui, lorsqu'il était remorqué par un navire, mesurait la température de l'eau de mer en fonction de la profondeur. L'enregistrement s'effectuait sur un verre fumé.

A partir des années 1960, le progrès technique fit apparaître de nouveaux instruments : sondes perdues et bathysondes.

Les sondes perdues, de la société Sippican, sont placées dans un porte-sonde tenu à la main. Un fil conducteur sort de la sonde et est raccordé à un enregistreur à bord. Le lanceur se porte à l'arrière du navire et libère la sonde au-dessus de l'eau. Celle-ci s'enfonce dans la mer par son propre poids, ce qui déroule le fil conducteur. La sonde mesure en permanence la température de l'eau et on obtient sur l'enregistreur un graphique de la température en fonction du temps, donc de la profondeur théorique. Lorsque tout le fil a été dévidé, il se casse et la sonde tombe au fond de la mer. Différents modèles de sondes permettent différentes mesures (température, célérité, conductivité) à des profondeurs allant jusqu'à 2 000 m.

Les bathysondes sont des appareils que l'on immerge au bout d'un câble, à l'arrêt, à la profondeur voulue. Ils mesurent et transmettent différents paramètres : pression, température, conductivité, et certains modèles peuvent recevoir des bouteilles à prélèvement déclenchées une par une à partir du navire.



16 - mise à l'eau d'une bathysonde sur le *D'Entrecasteaux* en 1997 - photothèque Amhydro

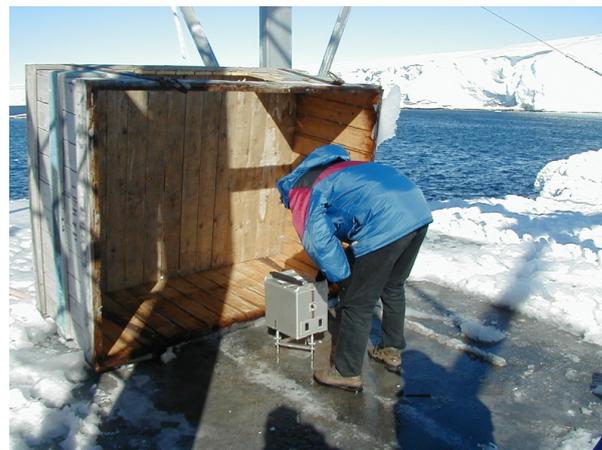
Le service hydrographique a utilisé successivement des bathysondes Howaldt, Guildline et SBE, ainsi que des sondes autonomes de mesures océanographiques (SAMO), conçues par ses ingénieurs, qui descendaient et remontaient de manière autonome sans nécessiter de câble.

Aujourd'hui, les hydrographes utilisent des célérimètres qui, fixés sous la coque ou immergés, mesurent directement la vitesse du son dans l'eau.

Pesanteur

Les premières mesures de la pesanteur absolue ont été faites en déterminant la période d'un pendule ou la durée de la chute d'un objet dans le vide. Ce type de mesure n'était, en principe, réalisable qu'à terre, mais le scientifique néerlandais Felix Vening Meinesz créa, dans les années 1920, un appareil à plusieurs pendules utilisable dans un sous-marin. Avec cet appareil, le service hydrographique effectua des mesures absolues en Méditerranée à bord d'un sous-marin entre 1934 et 1936.

En 1958, la firme Askania mit au point un gravimètre marin installé sur une plate-forme stabilisée par gyroscope. Cet appareil mesurait la pesanteur relative en déterminant l'allongement d'un ressort fixé à une masse dont le poids variait en fonction de la pesanteur. Le passage à la pesanteur absolue était effectué en comparant la mesure du gravimètre à quai en un point où la pesanteur absolue était connue. L'appareil étant affecté d'une dérive, on effectuait une mesure de calage avant de partir en mer et une mesure au retour de mer, la dérive observée étant répartie proportionnellement au temps.



17 - mesure de gravité en Terre Adélie en 2000 - photothèque Amhydro

En 1963, le service hydrographique acquit un premier gravimètre Askania et l'installa successivement sur l'*Amiral-Mouchez*, le *Paul-Goffeny*, l'*Espérance* et le *D'Entrecasteaux*. Les mesures restaient délicates : tout changement de route perturbait l'appareil et il fallait rester sur la nouvelle route pendant une demi-heure avant de relancer les mesures. En plus des corrections instrumentales, on apportait une correction liée au déplacement du navire et à la rotation de la terre, appelée correction Eötvös.

Une nouvelle technique de mesure absolue de la gravité a été mise au point au début du XXI^e siècle : l'interférométrie atomique.

De manière générale, l'interférométrie consiste à partager une onde afin de lui faire suivre deux chemins différents, puis à la recombinaison. La recombinaison met en évidence des interférences qui permettent de mesurer, par exemple, la différence de temps de parcours entre les deux chemins.

L'interférométrie atomique fonctionne sur le même principe mais elle nécessite de refroidir les atomes afin d'augmenter leur longueur d'onde². Le gravimètre est un tube à vide. Il comporte un piège magnéto-optique constitué de lasers et de champs magnétiques qui manipulent des atomes afin de diminuer leur vitesse, ce qui les refroidit, et de les concentrer. Le nuage d'atomes chute alors dans le vide. Une première impulsion laser sépare le nuage en deux, les atomes ayant absorbé des photons chutant plus vite que les autres. Une seconde impulsion inverse l'effet de la première, ce qui conduit les nuages à se regrouper. Une troisième impulsion laser les mélange, ce qui fait apparaître les franges d'interférences. L'analyse de ces interférences permet de déterminer avec une grande précision l'accélération de la pesanteur.

Les premiers essais d'un gravimètre marin fonctionnant sur ce principe ont été réalisés par le SHOM en 2015, et ont conduit à un développement industriel à partir de 2017.

Magnétisme

Les mesures de magnétisme effectuées par les premières missions hydrographiques concernaient principalement la déclinaison magnétique (angle entre la direction du pôle Nord et le nord indiqué par la boussole) et parfois l'inclinaison magnétique (angle entre le plan horizontal et la direction indiquée par une boussole d'inclinaison). Par la suite, il fut possible d'effectuer des mesures d'intensité du champ magnétique.

En 1951, un essai de recherche d'épaves au moyen d'un magnétomètre est effectué par la mission hydrographique de dragage. L'essai n'est pas concluant.

Il faut attendre la fin des années 1970 pour que les missions hydrographiques reçoivent des magnétomètres remorqués. Ces équipements, qui mesurent l'intensité du champ magnétique total de la terre, sont principalement utilisés pour la recherche d'épaves, dont la masse métallique provoque une perturbation locale du champ magnétique terrestre.

² Un atome peut être vu comme une particule ou comme une onde. C'est la dualité onde-corpuscule, un des concepts de la mécanique quantique.

³ La photogrammétrie est l'exploitation stéréoscopique de couples de photographies, permettant de restituer les volumes ou le relief.

Mesures à distance

Photographie aérienne et photogrammétrie³

Les missions hydrographiques utilisent les photographies aériennes depuis la fin de la première guerre mondiale pour déterminer le trait de côte et mettre en évidence certains hauts fonds. Les cartographes du Service ont également recours à des photographies aériennes lors de la préparation des cartes.



18 - restitution photogrammétrique à la Mission Océanographique du Pacifique, 1980 - photothèque Amhydro

En 1983, l'EPSHOM crée un bureau « photogrammétrie » et l'équipe d'un stéréorestituteur analytique. Il devient possible de déterminer la position précise de points identifiés sur les photographies.

En 1987, ce bureau étudie la possibilité de déterminer la profondeur à partir des photographies (c'est la photobathymétrie). Des levés photogrammétriques sont réalisés à partir de 1988. La localisation de l'avion s'effectue d'abord avec le système Trident, puis au moyen du GPS.

En 1996, les études sur la photobathymétrie sont abandonnées, les résultats n'étant pas suffisamment précis. L'activité du bureau se concentre alors sur la fourniture de produits pour les cartographes du SHOM.

Téledétection

La téledétection consiste à effectuer des mesures de la terre à partir de satellites en orbite. Elle fournit notamment des informations sur le trait de côte et sur l'océan.

Le premier satellite d'observation de la terre à des fins civiles est lancé en 1972 dans le cadre du pro-

gramme Landsat. Au début des années 1980, le SHOM commence à exploiter les données produites par ce satellite pour la réalisation des cartes marines. Le satellite fournit des images en couleur et des images multispectrales (où une valeur correspond à une couleur ou à l'infrarouge), dont la résolution est de l'ordre de 80 m.

Les satellites SPOT, lancés à partir de 1986, sont plus précis (résolution de 10 m en couleur et 20 m en multispectral). Dès 1989, le SHOM produit à titre de démonstration une « spatiocarte » de l'île d'Ouvéa, en Nouvelle-Calédonie, qui mélange informations fournies par le satellite et données issues des levés hydrographiques. L'intérêt des images du satellite est qu'elles donnent une vision du fond de la mer, jusqu'à une profondeur d'une trentaine de mètres dans les meilleures conditions. Le SHOM décide par la suite de produire des spatiocartes pour l'archipel des Tuamotu, pour une fraction du coût correspondant à des levés hydrographiques classiques. Ces spatiocartes nécessitent cependant d'effectuer quelques travaux, dits de spatiopréparation, sur place : localisation au GPS de points de calage, sondages témoins, prélèvement d'échantillons du fond.

Par la suite, les satellites fournissent de nombreuses observations sur la terre et sur les océans :

- températures de surface révélées par des images infrarouges,
- couleur de l'eau, liée à la présence de chlorophylle,
- hauteur de la mer mesurée par des radars altimètres, pour la connaissance des courants et de la marée,
- variations de l'accélération de la pesanteur, déterminées par les perturbations des orbites des satellites.

Sondage aéroporté

Les hydrographes décrivent la partie immergée de la terre, tandis que les géographes en décrivent la partie émergée. Chacun ayant ses méthodes de travail et s'arrêtant au trait de côte, il en résulte des difficultés dans la représentation de la bande littorale située de part et d'autre du trait de côte. En particulier, les origines des altitudes et des profondeurs ne coïncident pas.

En 2003, à la suite d'une recommandation européenne sur la gestion des zones littorales, le Comité interministériel de la mer demande au SHOM et à l'IGN de produire un référentiel géographique commun du littoral. Ainsi naît le projet Litto3D®. Un premier levé expérimental est effectué en 2005 dans le golfe du Morbihan.

Les données de la partie maritime proviennent de levés effectués en avion avec un LiDAR (light detection and ranging) bathymétrique, complétés par des levés classiques effectués en mer avec un sondeur multifaisceaux. Le LiDAR bathymétrique est constitué de deux faisceaux laser, l'un émettant dans le vert, l'autre dans l'infrarouge. Le signal infrarouge est réfléchi par la surface de l'eau alors que le signal vert pénètre dans l'eau (jusqu'à 70 m si l'eau est très claire), ce qui permet de déterminer la profondeur. Les lasers fournissent des distances qui, après prise en compte de l'altitude de l'avion fournie par un GPS et de son attitude (roulis, tangage, lacet), permettent de connaître la profondeur du fond et l'altitude des zones émergées.

Tomographie acoustique océanique

La tomographie acoustique océanique, mise au point dans les années 1970, consiste à installer des émetteurs et récepteurs sonores à basse fréquence⁴ autour de la zone à étudier et à mesurer de manière régulière leurs temps de propaga-



19 - image Litto3D® du port des Quilles à Sète - source www.shom.fr

⁴ Les sons à basse fréquence se propagent très loin dans les masses d'eau.

tion. Toute perturbation dans la zone d'étude se traduit par une modification des temps de propagation. On peut ainsi mettre en évidence des fronts thermiques, des courants marins et d'autres caractéristiques de la masse d'eau.

Enregistrement et exploitation des mesures

Dans les années 1960, la section marée-géophysique du service hydrographique s'équipe d'un ordinateur CAB 500, remplacé par la suite par un ordinateur IBM. L'ordinateur est d'abord utilisé pour le calcul de la marée, pour le tracé des cartes de radiolocalisation (tracé des réseaux d'hyperboles et de cercles utilisés par les missions hydrographiques) et pour des calculs au profit du Bureau d'études océanographiques.

En 1972, le SHOM lance plusieurs projets informatiques :

- la constitution de bases de données hydrographiques et océanographiques,
- un projet de cartographie assistée par ordinateur : CARTAS (voir plus loin),
- un projet d'acquisition et de traitement des données dans les missions hydrographiques : SATAD (système d'acquisition et de traitement automatique des données)

Le prototype SATAD, développé à l'EPSHOM, est embarqué sur le *D'Entrecasteaux* en 1975. Il débouche en 1983 sur une première génération de systèmes informatiques utilisés dans les missions hydrographiques : HYDRAC-HYTRAI. HYDRAC permet l'acquisition des données en vedette et à bord des navires, HYTRAI leur traitement à bord ou dans les locaux à terre des missions.

Ce système maison est remplacé dix ans plus tard par une deuxième génération dont la réalisation est confiée à une société de service en informatique : le système AQIDOC-TRADOC.

La troisième génération est composée d'équipements et de logiciels disponibles dans le commerce.

Ces systèmes modifient en profondeur le travail dans les missions hydrographiques. A bord des vedettes, il ne reste plus aujourd'hui que le patron qui dirige l'embarcation, le mécanicien qui veille sur le fonctionnement du moteur et un hydrographe qui décide des routes à suivre et surveille le

bon fonctionnement des appareils et des ordinateurs. Dans les salles de dessin des missions, tous les calculs et tracés sont réalisés par ordinateur et le travail des hydrographes consiste principalement à ordonnancer les traitements informatiques et à vérifier leur bonne exécution afin d'obtenir des résultats de qualité.



20 - PC hydrographique du *Lapérouse* en 1988 - photothèque Amhydro

Cartographie

Jusqu'à la seconde guerre mondiale, le service hydrographique produisait ses cartes par gravure sur cuivre, à l'envers. L'impression se faisait soit directement à partir du cuivre, soit après report sur un zinc d'impression afin d'éviter l'usure du cuivre.

Dans ce domaine, le progrès apparaît d'abord, après la guerre, grâce aux matières plastiques. Les nouvelles cartes sont gravées sur des feuilles de matière plastique, les « couches à tracer », recouvertes d'une couche opaque qui se retire par grattage. Un autre procédé permet de transférer sur un film plastique les cartes gravées sur cuivre pour un report facile sur les zincs d'impression. Ceux-ci peuvent être à l'endroit, ce qui facilite leur mise à jour.

Dans les années 1960, l'arrivée des tables traçantes pilotées par ordinateur permet d'accélérer la gravure des couches à tracer et de produire en petites quantités des cartes et des documents graphiques.

En 1972, le SHOM lance le projet de cartographie assistée par ordinateur CARTAS. Son but est de créer un outil permettant de numériser de manière vectorielle des documents graphiques⁵, de manipuler l'information numérisée puis de la restituer sous forme graphique.

Les postes de travail informatisés apparaissent au cours de la décennie suivante. Les cartographes

⁵ Une cellule photo électrique commandée par ordinateur suit le contour des traits et les transforme en segments.

élaborent les cartes au moyen d'un poste cartographique interactif de première génération (PCI1). En parallèle, le SHOM lance une étude sur les cartes électroniques, aboutissant à une seconde génération de poste de travail : le PCI2.

Bien que les premiers systèmes d'exploitation des cartes électroniques soient apparus au milieu des années 1980, l'adoption des normes internationales dans ce domaine et les difficultés techniques retardent la fourniture de cartes au format numérique par les services hydrographiques. Le SHOM produit ses premières cartes dans ce format au début des années 2000.

De leur côté, les moyens d'impression sur papier subissent également des évolutions techniques. Le Service passe du concept de lot (impression d'un stock de cartes, conservation et mise à jour avant délivrance à l'unité) à celui de l'impression à la demande. En 2012, l'OCI de Toulon reçoit un traceur

grand format déporté dont l'impression est pilotée à partir de Brest.

L'avenir

Nul ne connaît l'avenir, mais il faut quand même s'y préparer. En 2011, le SHOM lance une réflexion sur le renouvellement de ses moyens d'acquisition des données : navires et instruments. Le programme CHOF (capacité hydro-océanographique future) prend en compte les avancées techniques en cours, dont les engins autonomes, ou drones, et les techniques d'intelligence artificielle appliquées au traitement de gros volumes de données, l'évolution des besoins militaires et la réduction probable des moyens budgétaires. Il s'agira donc de faire plus avec moins. Le remplacement des trois bâtiments hydrographiques de 2ème classe *Borda*, *Lapérouse* et *Laplace* est prévu en 2025-2026.

Bibliographie

La Revue Hydrographique Internationale est publiée depuis 1923 en deux langues : anglais et français. Seule la version anglaise est consultable en ligne ; les titres des articles utilisés pour ce chapitre et mentionnés dans la bibliographie sont les titres de la version anglaise.

N°	Auteur	Titre - édition
1	(anonyme) - 1934	Methods of sounding - Revue hydrographique internationale - volume XI n°1 - 1934
2	(collectif) - 1946	International meeting on radio aids to maritime navigation - Revue hydrographique internationale - volume XXIII - 1946
3	(collectif) - 1947	Radio aids to marine navigation - Revue hydrographique internationale - volume XXIV - 1947
4	(chefs puis directeurs de missions) - 1947-2013	Rapports de missions publiés dans les Annales hydrographiques de 1947 à 2013
5	Beautemps-Beaupré, Charles-François - 1808	Exposé des méthodes employées pour lever et construire les cartes et plans qui composent l'atlas du voyage du contre-amiral Bruny-Dentrecasteaux - Voyage de d'Entrecasteaux, envoyé à la recherche de La Pérouse - Tome I - Appendice
6	Bénéteau, Didier - 2002	Evolution de la photogrammétrie au SHOM - Bulletin Amhydro n°22 - 2002
7	Bérenquier, Pierre et Soulier, Jacques - 1973	Système Sylosat de localisation précise par satellites Transit - quatrième colloque sur le traitement du signal et ses applications - 1973
8	Blanchard, Walter - 2014	The genesis of the Decca navigator system - The journal of navigation - 2015
9	Blondel, André - 1930	Les Radiophares - Annales des Ponts et Chaussées - tome II, fascicule V - 1930
10	Brunel, André - 1957	Radio position-fixing systems in french hydrography - Revue hydrographique internationale - volume XXXIV n°2 - 1957
11	Caillemer, André - 1971	Astronomie de position, géodésie - 1ère édition 1971 et 2ème édition 1983
12	Chimot, Jean-Marc ; Mouscardès, Pierre ; Bisquay, Hervé ; Grenard, Patrick et Guillam, Yves - 1998	Levés hydrographiques et campagnes océanographiques : évolution, état de l'art et perspectives - Annales hydrographiques - n°769 5ème série volume 22 - 1998
13	Comolet-Tirman, André - 2007	Proposition de nouvelle rédaction du paragraphe GRAVIMÉTRIE de l'Histoire du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine - texte non publié
14	Correia, Paul - 2012	Guide pratique du GPS
15	Covillault, Pierre - 1979	Histoire du service hydrographique de la marine (de 1914 à 1970)
16	Fourgassié, Alain - 1990	La spatiocarte marine, une solution pour la cartographie des atolls polynésiens - Journées internationales Pix'iles 90 tenues à Nouméa et à Tahiti - 1990
17	Geiger, Rémi - 2019	Des atomes pour sonder la gravité - La Recherche - n°547 - mai 2019
18	Germain, Adrien - 1882	Traité d'hydrographie, levé et construction des cartes marines - ouvrage n°641A
19	Le Gouic, Michel - 1998	Evolution scientifique et technique du service hydrographique - Annales hydrographiques - n°769 5ème série volume 22 - 1998

20	Lunel, Jean - 1956	General comments regarding use of radiolocalisation systems and ultrasonic sounding in hydrography - Revue hydrographique internationale - volume XXXIV n°1 - 1957
21	Lurton, Xavier - 1998	Acoustique sous-marine - Présentation et applications
22	Marguet, Frédéric - 1931	Histoire générale de la navigation du XVe au XXe siècle
23	Poole, Ian - 1998	Basic Radio: Principles and Technology
24	Renard, Vincent et Allenou, Jean-Paul - 1978	Le SEA-BEAM, sondeur à multi-faisceaux du N/O Jean Charcot - description, évaluation et premiers résultats - Revue hydrographique internationale - volume LVI n°1 - 1979
25	Roubertou, André - 1971	Bathymetric surveying on the continental shelf - Revue hydrographique internationale - volume XLIX n°1 - 1972
26	Service central hydrographique - 1937	Manuel du breveté hydrographe - Tome 1 - hydrographie - 1937
27	Service central hydrographique - 1941	Manuel de l'aide-hydrographe - 2ème édition - 1941
28	Service central hydrographique - 1967	Manuel d'hydrographie - 2ème édition - 1967
29	Simon, Bernard - 2007	La marée - la marée océanique côtière
30	SHOM - 2003	GPS et navigation maritime - Guide du Shom 940 - 2003
31	SHOM - 2007-2019	Rapport annuels des années 2006 à 2018
32	SHOM - IGN - 2012	Litto3D® - v1.0 spécifications techniques - v1.5 - 2012
33	Shom - 2019	Guide du Shom pour la réalisation des levés hydrographiques
34	Tavernier, G - 1998	DORIS : orbite et localisation précises
35	Trevisan, Bernard - 2008	Les systèmes embarqués du SHOM - Épisode 1 - Bulletin Amhydro n°28 - 2008
36	Trevisan, Bernard - 2020	Le (radio)guidage est-il né dans les Alpes ? - Bulletin Amhydro n°40 - 2020

Autorisation No 03/2020

Le matériel provenant de la publication P-1 de l'OHI Revue Hydrographique Internationale (RHI) est reproduit avec la permission du Secrétariat de l'Organisation hydrographique internationale (OHI) (Autorisation N° 03/2020), agissant au nom de l'Organisation hydrographique internationale (OHI), qui n'est pas responsable de l'exactitude du matériel reproduit : en cas de doute le texte authentique de l'OHI prévaut. L'inclusion de matériel provenant de l'OHI ne sera pas interprétée comme équivalant à une approbation de ce produit par l'OHI.

