

Le positionnement et la navigation en mer

40 années d'histoire et d'évolution

■ Bernard FLACELIÈRE

Toutes mesures et tous relevés effectués depuis la surface de la mer, du lac ou de la rivière nécessitent leurs positionnements dans le système de référence planimétrique officiel ou en usage. Quels ont été les moyens de positionnement mobile de surface pendant les années 1970 et quels ont été leurs évolutions durant ces 40 dernières années ? Les principes, méthodes et précisions sont rappelés ici. Également la navigation, action qui consiste à faire suivre à un mobile positionné une trajectoire prédéterminée, a évolué durant ces décennies. Il s'agira d'un florilège des méthodes et systèmes utilisés par l'auteur, ceux non utilisés pourront être cités pour mémoire.

MOTS-CLÉS

Positionnement, navigation, radionavigation, géométrie, circulaire, hyperbolique, bathymétrie.



Figure 1. Cercle hydrographique

Le positionnement

■ Principe

Tout positionnement de mobile s'appuie sur des points de base, à partir desquels on détermine la position. Ces points sont connus en coordonnées, essentiellement planimétriques pour les activités marines de surface, dans le système de référence officiel ou en usage. Ces points peuvent être des bornes, des monuments, des amers¹, des antennes radioélectriques. Avec le positionnement par GNSS, ce sont les satellites eux-mêmes qui deviennent ces points de base.

À partir de ces points de base nous allons déterminer la position du mobile en utilisant toutes les ressources de la géométrie et du traitement du signal radioélectrique, elles-mêmes alliées au calcul numérique et aux méthodes statistiques.

Le positionnement manuel est discret (ou discontinu) car l'opérateur ou les opérateurs doivent lire puis noter les

observations. Dans ce cas la trajectoire du mobile doit être interpolée entre les points de relevés, elle est donc supposée rectiligne. Le positionnement automatique est continu, à une certaine fréquence souvent supérieure à un hertz et est enregistré sur support numérique.

■ Méthodes géométriques

Nous allons parcourir ces méthodes en suivant la chronologie de l'histoire et en parallèle l'évolution des techniques.

Le relèvement angulaire

Place aux hydrographes pour ce premier paragraphe, qui préfèrent rester à bord de leur navire pour se positionner, le confort y est plus sûr que sur des côtes inhospitalières. Un cercle hydrographique (figure 1) tenu horizontalement est similaire à un sextant tenu verticalement. Il mesure un angle α entre deux points visés A et B : dans la lunette on voit deux moitiés d'images, une directe et une via un miroir. Mettant en coïncidence les deux points visés grâce à une molette qui agit sur le miroir, on mesure l'angle horizontal α entre ces deux points. Une mesure angulaire nous donne un arc capable

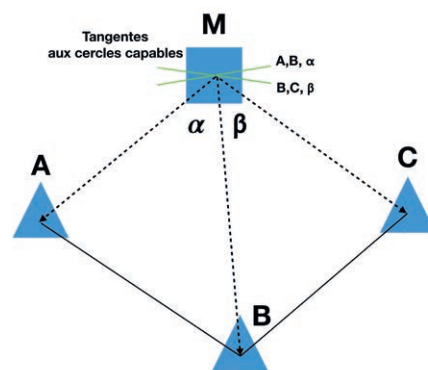


Figure 2. Le relèvement angulaire

(lieu sur lequel on voit le segment AB sous un angle α). Mais il faut un autre arc capable pour déterminer la position. Un deuxième opérateur avec le même type d'équipement mesure l'angle β entre B et C, ou bien, plus difficile le même opérateur prend la mesure et éventuellement suivant la précision requise, corrige *a posteriori* la position suivant l'estime de la vitesse et de la direction. On n'obtient là que deux lieux de position, donc il n'y a pas de redondance (figure 2).

L'intersection angulaire

Le topographe, lui, utilise les méthodes classiques de triangulation en station-

¹ Repère visuel identifiable sans ambiguïté utilisable pour prendre des relevements optiques ou pour naviguer sur un alignement.



Figure 3. Intersection au théodolite Wild T2, Maroc 1976

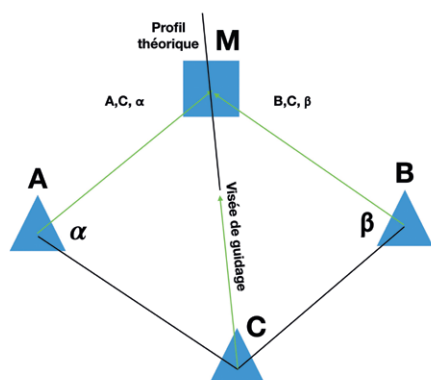


Figure 4. Intersection angulaire

nant les points de base et en visant le mobile en navigation (figure 3). Deux topographes stationnent sur des bornes A et B et mesurent aux théodolites les angles α et β tandis qu'éventuellement un troisième topographe situé en C guide par signal droite-gauche ou bien par radio le navire sur son profil théorique (figure 4). Un moyen de télécommunication est nécessaire sur chaque station et mobile pour synchroniser la prise des mesures dont le nombre ne peut excéder 4 ou 5 par minute. L'ensemble des profils peut être soit des radiantes depuis C, soit des parallèles avec un point C qui se déplace sur des piquets préimplantés, mais le mobile peut aussi s'aligner sur deux jalons prédisposés s'ils sont visibles. Le report du point est graphique suivant les angles mesurés ou en coordonnées après calcul topométrique. Les bathymétries de nombreux ports secondaires du Maroc (Al Hoceima, Larache, Mohammedia, El Jadida) sont positionnées suivant ce principe en 1976-1977 (Cabinet Gallot, Tanger).

Le point lancé, direction et distance

Dès l'arrivée des distancemètres à micro-ondes, le topographe pense à

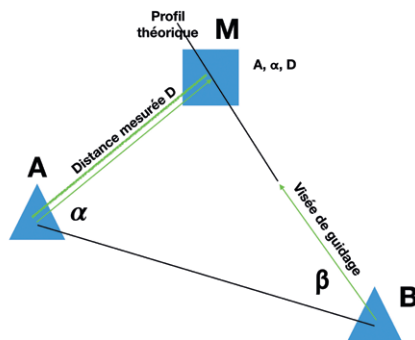


Figure 5. Point lancé, direction et distance

utiliser la distance mesurée comme lieu de position. Encore faut-il que la distance puisse être mesurée à la volée sur cible (prisme rétro-rélecteur) et non à la suite de nombreuses manipulations sur cible fixe, comme avec les Tellurometers. Cependant les directions et distances se mesurent d'abord depuis des instruments différents avant d'être fusionnés (figure 5).

Les relevés bathymétriques par la CNR² sur le chantier d'Avignon en 1972 sont positionnés par une mesure de type RADAR depuis une antenne sur la berge, le navire s'alignant à l'œil. Je ne me souviens plus du nom de cet équipement qui m'a servi à dessiner de beaux isobathes au nord du pont Saint-Bénézet (ou d'Avignon), depuis des bandes analogiques en papier de l'échosondeur.

Après le Rhône allons au Niger. En 1974, au Service topographique et du cadastre, on nous demande une idée de la pente du fleuve sur une certaine distance longitudinale et la forme du fond, d'un bord jusqu'au maximum des mesures possibles vers le centre du cours d'eau. Des têtes de profils nivelées sont implantées, le porte-mire entre dans l'eau et grâce aux fils stadimétriques du RDS Wild (tachéomètre autoréducteur) nous avons la distance en lisant la mire de 2 mètres ainsi que l'orientation de la visée. C'est la taille du porte-mire qui limite la couverture des mesures !

Sur la Garonne, entre le confluent du Tarn et Golfech en 1979, il s'agit de relever, pour EDF, la bathymétrie les fonds pour permettre les cubatures de gravier, la future construction de la centrale nucléaire oblige. Nous mettons

2 Compagnie nationale du Rhône



Figure 6. Point lancé au Maroc en 1976

en œuvre l'AGA Geodimeter 700³, une des premières stations totales mesurant directions et distances et comble de modernité, le Geodat 700 enregistre les données sur bande de papier perforé de type telex. Les bandes seront lues et traitées (positionnement puis bathymétrie) sur ordinateur PDP (Programmable Data Processor) construit par Digital Equipment Corporation (DEC).

Le Distomat Wild Sercel DI3 est essayé en 1976 au Maroc (figure 6) tandis que le DI3S en mode tracking est employé dès 1982 pour elf Congo pour positionner les navires depuis les plates-formes

3 http://www.geotronics.it/public/geodimeter_story.pdf



Figure 7. Distancemètre ESP Mk3 Rangefinder

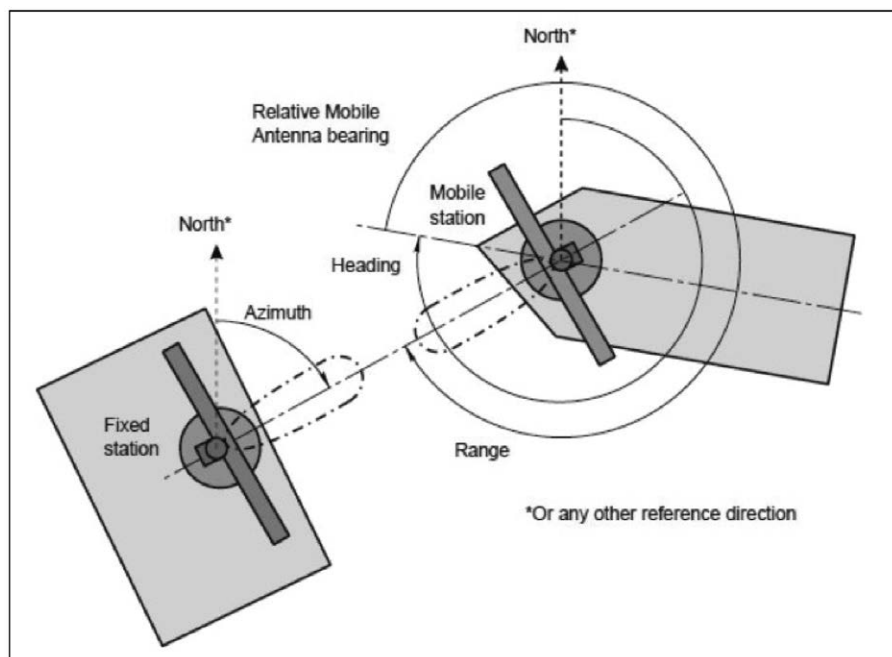


Figure 8. Principe du système Artemis

pétrolières. Ces deux Distomats sont montés sur des théodolites Wild T2 ou T16. Les visées de nuit sur des navires pilonnant dans la houle avec la nécessité de suivre le prisme quelques secondes pour accrocher la distance sont des moments d'anthologie.

Cette même année le distancemètre ESP Mk3 Rangefinder (figure 7) appartenant à la société Travocean et à la barge de pose de flexibles Chamar 3 est utilisé depuis des plates-formes, pendant qu'un théodolite donne l'alignement. L'Artemis® le système de *Nederlands Survey Apparaturen BV* est créé dans les années 1970 (Mk1) et est toujours en usage en 2019 sous la version Mk6. Il appartient maintenant à la société *Guidance Marine Ltd*⁴. Le système Artemis est un système de positionnement à micro-ondes basé sur la direction et la distance (jusqu'à 10 km). La station fixe est placée sur un point connu et orientée par des visées avec la lunette sur des points connus. Elle suit automatiquement la station mobile, la distance étant calculée (à 0.5 m près) et l'orientation de la station fixe (à 0.1°) envoyée vers le mobile (figure 8). C'est une méthode géométrique certes, mais déjà à classer dans celles de la radiolocalisation de par le transfert de données. Aucune redondance, car

deux lieux seulement sont disponibles, la hantise est qu'un hurluberlu sur la plate-forme, donne un coup de pied au trépied de la station fixe, bougeant ainsi notre référence.

■ La radiolocalisation

La radiolocalisation utilise des ondes radioélectriques pour se positionner, souvent indépendamment des conditions météorologiques et de visibilité.

Les systèmes de positionnement à base terrestre fonctionnent suivant deux modes.

- Le mode circulaire : la mesure du temps de parcours d'un signal (généralement un trajet aller-retour) entre le mobile et un émetteur situé à terre permet de calculer la distance D émetteur-navire ; le navire se trouve donc sur un cercle de rayon D ; à l'aide de deux émetteurs (ou plus), on détermine ainsi la position du mobile, à l'intersection des cercles. Le mode circulaire est saturable en nombre de mobiles émetteurs.
- Le mode hyperbolique : la mesure par le mobile de la différence des temps d'arrivée de signaux issus d'émetteurs synchronisés donne un lieu de position (hyperbole dont les émetteurs sont aux foyers) ; la combinaison des signaux issus de plusieurs balises donne la position du mobile à l'intersection des hyperboles. Les

récepteurs situés sur les mobiles étant passifs, le mode hyperbolique n'est pas saturable en nombre de mobiles.

- Certains systèmes peuvent offrir les deux modes de fonctionnement.
- Les mesures de durées sont transformées en distances radioélectriques. Il convient de corriger ces distances de toutes les erreurs systématiques (biais) liées aux retards électroniques, longueurs des câbles coaxiaux, météorologie par étalonnage (calibration) sur ligne de base ou observations in situ avec un système plus précis et calcul des corrections (*C-O : computed minus observed*) à appliquer. Ensuite les classiques réductions géodésiques, de courbure du signal, à l'horizontale, au niveau zéro de l'ellipsoïde et à la projection sont appliquées.
- Les trésors de la géométrie et des moindres carrés permettent de vérifier *in situ* la validité des calibrations.
 - o Pendant la traversée d'une ligne de base (*base line crossing*), entre une station à terre et une autre sur une plate-forme en mer ou bien entre deux stations de part et d'autre d'un golfe, les distances vers les stations sont enregistrées et la somme est faite, qui est soustraite à la distance géodésique (*C-O*). Cette valeur passe par un minimum que l'on calcule en ajustant une parabole dans le nuage de points. On devrait obtenir une valeur nulle.
 - o Si le réseau de positionnement est installé sur de nombreuses plates-formes, comme en mer du Nord Britannique, alors on traverse toutes les lignes de base disponibles et on calcule par moindre carré les corrections résiduelles à apporter aux stations.
- Enfin l'arrivée du nouveau système satellitaire américain que l'on appelle à l'époque GPS-NAVSTAR vient progressivement détrôner les méthodes de radiolocalisation classiques. Cependant, la crainte de perte de service, la présence de la dégradation pour les non-militaires US (*selective availability* levée sur décision de Bill Clinton le 1^{er} mai 2000) et le besoin de redondance font que des chaînes de radiolocalisation continueront à fonctionner après l'an 2000.

4 <https://www.guidance.eu.com/artemis-and-validator>



Figure 9. Bathymétrie positionnée au Trisponder, Égypte, lac Amer, 1978



Figure 10. Master ou Remote Trisponder



Figure 11. DMU Trisponder

Systèmes circulaires

Le Triponder fabriqué par del Norte Technology (USA) est opéré par Decca Survey Ltd en Europe et par Decca Survey France. Je l'ai utilisé la première fois en 1978 sur le lac Amer (canal de Suez, Égypte) lors du contrôle du dragage des Japonais Wakashiku, pour la compagnie nationale Suez Canal Authority (figure 9). Dans la foulée, au large de Ras Gharib et Ras Shukeir et à bord de la barge italienne Micoperi 30, le Trisponder a positionné plate-forme et oléoduc (pipeline) en mer Rouge.

Un peu de technique : le Trisponder fonctionne à 9,5 GHz avec une portée légèrement supérieure à la portée optique. La précision nominale sur une distance est de 3 m. Le mobile embarque le Master et deux stations sont équipées d'un Remote chacun (figure 10). Grâce à un système de Time Sharing (partage

des créneaux temporels) jusqu'à 4 mobiles peuvent opérer sur la même zone. Le DMU (Distance Measuring Unit) affiche les distances vers les deux Remotes, mais on peut afficher séquentiellement d'autres distances depuis d'autres stations (figure 11).

En juillet 1978, une campagne d'études de sols sous-marins pour Elf Congo débute au large de Pointe-Noire. Les distances à mesurer vont de 40 km près de la frontière Cabindaïse à 100 km après l'embouchure du fleuve Kouilou. Le Trispondeur ne peut mesurer ces distances car la côte manque de points hauts. Le Maxiran opéré par les Britanniques de Coastal Survey Ltd est la solution pour Decca Survey France. Fonctionnant de 420 à 450 MHz comme le Sylédis à venir, le Maxiran permet des mesures au-delà de l'horizon radioélectrique.

Les mats supports des antennes sont érigés (figure 12) puis le LCT Red Falcon navigue grâce au calculateur HP 9810 et la table traçante (figure 13) avec une précision de quelques mètres. Les 3 stations installées à terre nous donnent 3 distances et le Three Way Fix nous donne la solution avec un critère de qualité : centre du cercle inscrit dans le triangle et rayon de ce cercle. Les moindres carrés viendront avec plus de stations, donc de distances.

Dès 1979-1980, toujours au Congo c'est la relance des travaux d'exploration, de forage et de développement en mer. La CGG (Compagnie générale de géophysique), dont la branche radionavigation se transformera en Topnav, opère un contrat de positionnement avec du Sylédis de la société française Sercel. C'est un système dans la bande UHF, 420-450 MHz, qui fonctionne également en mode hyperbolique, et qui porte à plus de 100 km avec une précision de quelques mètres. Le Sylédis nécessite une calibration sur une base géodésique afin de déterminer tous les retards électroniques des équipements et des câbles coaxiaux (figure 14). Le Sylédis souffre d'une ambiguïté de 10 km sur les distances (modulo 10) qui nécessite à l'initialisation une position appro-



Figure 12. Mât et antenne Maxiran, Congo 1978



Figure 13. Navigation au Maxiran, Congo 1978



© BFL



Figure 14. Calibration de la chaîne Sylédis, Congo 1983

chée. De 3 stations au départ le réseau Congolais s'est étoffé jusqu'à 8 stations dont plusieurs sur les plates-formes en mer. Le Sylédis sera rencontré en de nombreuses autres occasions, en mer du Nord, en Angola, au Gabon, en Guinée Équatoriale.

Le sens inventif des électroniciens de la CGG est sans limite : nous positionnons souvent à partir d'une barge, une plate-forme pétrolière en cours de pose, soit flottante et reliée par des aussières, soit en pendant à la grue. Le mesure de l'excentricité en temps réel depuis l'arrière de la barge est impossible à cette époque et celle de l'orientation n'est pas maîtrisée. La solution est une combinaison de méthodes intelligentes, fruits de réflexions et d'essais :

- nous construisons un caisson qui comprendra un gyroscope (à cette époque de la taille d'une machine à laver le linge), une balise Sylédis et son antenne, des alimentations, un câble d'alimentation 400 V,
- nous posons à la grue le caisson sur la plate-forme en flottaison, mesurant tous les excentres et les différences d'alignements,
- sur la barge, le mobile Sylédis est configuré pour observer en mode hyperbolique et reçoit les informations de la balise plate-forme. Ainsi l'opérateur sur la barge travaille comme s'il se trouvait sur la plate-forme à poser. On a appelé cette méthode la balise "répétitrice".

Le Shoran est un système historique puisque créé par William Stuart Seeley en 1942, avec mise en œuvre pour les bombardements US en 1944 en Italie. Les Britanniques eux, utilisent le système Oboe pour arroser le nord de l'Allemagne. Le Shoran travaille sur 300 MHz, typiquement depuis 2 stations, à une portée de 300 *statute miles* (480 km), une précision de plusieurs décimètres mais donnait des distances en *statute miles* (160 km). Il est possible de positionner plusieurs mobiles. Le calage des pics de 2 signaux sur un oscilloscope s'effectue avec des manivelles (identiques à celles des restitueurs en photogrammétrie) tandis que sur le Shoran digital que j'ai utilisé dans le golfe de Gascogne en 1979 sur une sismique marine de l'Institut français du pétrole (IFP) à bord du MV Résolution, des boutons poussoirs tiennent ce rôle. Vu la puissance

émise par les stations à terre, la côte française est interdite au profit de la côte Cantabrique, moins regardante en autorisations administratives. Le Shoran est utilisé dans la recherche des hydrocarbures des années 1950 jusqu'aux années 1980.

Au Congo, été 1980, une étude de sols sous-marins est à mener avec la société française Sesam, au large de Pointe-Indienne. Cette société utilise son navire venant du Gabon ainsi que son système de positionnement Motorola RPS (*X-Band Range Positioning System*). Ce système opère dans la bande des 10 GHz, similaire à celle du Trisponder, dans une portée optique, et est donné pour une précision de 3 m environ sur la distance. Le système Motorola RPS est également utilisé par la société française Geomex en 1990 dans le golfe de Suez pour un positionnement de jack-up, plate-forme autoélévatrice de forage (*figure 15*). La société Sesam a publié dans notre revue suite au congrès de Brest de 1983, un article qui décrit les systèmes à courte portée, Motorola, Artemis, station théodolite et distance-mètre [Gaudillère, Ph. 1986].

Au Brunei en 1988, la zone de recherches d'hydrocarbures s'entend loin des côtes, au sein de la mer de Chine, les distances sont supérieures à 100 km et le Sylédis n'est pas la solution. Nous l'avons cette solution, c'est Argo, un produit de Cubic Corporation (USA). Il s'agit d'un système de positionnement utilisant des techniques de comparaison de phase et fonctionnant dans la bande des 1,6-2,0 MHz. Il offre des précisions meilleures que 20 mètres à une distance maximale de 400 km. Argo fonctionne principalement en mode circulaire, jusqu'à sept



Figure 15. Station Motorola sur le golfe de Suez, Égypte 1990

© BFL



Figure 16. Installation d'antennes Sylédis et Argo, Brunei 1988

stations mobiles pouvant utiliser les mêmes stations côtières par partage de temps. Il existe également un mode hyperbolique qui permet à un nombre illimité d'utilisateurs de partager le système. Ce système est opéré par la filiale locale de la société helvétique Geodetic (devenue Fugro Geodetic AG).

La fréquence très basse du signal Argo, quelques MHz, fait que le centre électrique d'émission et réception, qui devrait être l'antenne, n'est pas ponctuel mais est influencé par toute la masse métallique du navire semi-submersible de forage. Les corrections (C-O) aux distances Argo mesurées sont aussi dépendantes du cap du navire. La procédure de calibration est donc d'installer un système Sylédis également opéré par Geodetic. Dans la zone de portée du Sylédis, de l'ordre de 50 à 100 km, le navire de forage navigue, sous remorqueurs, dans le cap final du futur forage et nous observons simultanément les positions issues du Sylédis et les distances de l'Argo. Nous calculons ensuite les corrections à apporter aux distances Argo. Quand la comparaison est satisfaisante, nous faisons route vers le large, hors de portée du Sylédis, positionnés uniquement à l'Argo.

Systèmes hyperboliques

Ma première expérience avec le Sea-Fix en 1978 sur le lac Amer, canal de Suez, Égypte, permet d'introduire les systèmes hyperboliques. Une société

française de dragage travaille sur d'autres lots que ceux des Japonais et est équipée du Sea-Fix par Decca Survey France. Cette installation, opérant dans la bande 1,6-2,1 MHz, nécessite une calibration qui sera effectuée dans la foulée de l'opération Trisponder avec les Japonais. Je n'ai aucune idée à l'époque du fonctionnement d'un système hyperbolique, alors j'étudie le manuel de bord et je programme sur une calculette HP67 les séquences qui permettent d'obtenir les fameux C-O's, les corrections aux lectures pour obtenir des coordonnées correctes.

Le principe est le suivant (figure 17) : le *Master* émet, est reçu par le *Receiver* au temps t_0 tandis qu'il est reçu par le *B Slave* puis celui-ci émet aussitôt un signal qui est reçu par le *Receiver* au temps t_1 . La lecture du canal B est donc $c \cdot (t_1 - t_0)$ et idem pour le canal C. La célérité du signal est c .

Mon collègue britannique Graham Kirby, électronicien de profession, est sur un point géodésique avec un théodolite et moi sur un autre, puis on vise l'antenne Sea-Fix de la drague.

À un "top" donné à la radio VHF, nous relevons l'angle horizontal tandis que l'opérateur à bord relève les valeurs d'hyperboles MB et MC. La drague se déplace et nous arrivons à prendre une vingtaine de points couvrant la surface du chantier.

Nous connaissons les coordonnées M (*Master*), B (*B Slave*) et C (*C Slave*).

Connaissant les coordonnées R (*Receiver*) obtenues par intersections au théodolite, je calcule $C_B = MB + BR - MR$ que je compare à OB lu par l'opérateur

à bord, puis je calcule la correction de calibration pour le lieu MB, soit $C_B - O_B$. De même, $C_C = MC + CR - MR$ donnant la correction de calibration pour le lieu MC, soit $C_C - O_C$.

Je ne me souviens plus si les C-O obtenus étaient constants sur la zone de travail ou s'il a fallu interpoler des courbes d'iso-corrrections, mais le dragueur fut content du résultat !

Les années qui suivent ne m'ont guère vu utiliser des systèmes hyperboliques, mais j'ai fort heureusement suivi les travaux et avatars de mes collègues sur de nombreuses mers exotiques ou tout simplement étrangères.

Le Pulse/8 est un système fabriqué par Decca Survey depuis les années 70 jusqu'aux années 90. Il fonctionne dans la bande des basses fréquences et émet une transmission par impulsions très similaires à celle de Loran-C. Il s'agit d'un système hyperbolique utilisant des techniques de temps de vol, avec identification de station émettrice. La portée est de plusieurs centaines de km. Le Pulse/8 est utilisé par Jean-Jacques Riou en mer du Nord norvégienne [Riou, J.J. 1986], lors d'une mission de 1983, combinant également *Decca Main Chain*, Artemis, système satellitaire Transit⁵ et son récepteur JMR4 et acoustique sous-marine. Les topographes nous racontent les sauts du Pulse/8 lors des tempêtes de neige hivernales, quand les hyperboles

⁵ Système de positionnement mis au point pour la marine des États-Unis par l'université Johns-Hopkins à partir de 1958, déclaré service civil en 1967 et arrêté fin 1996.

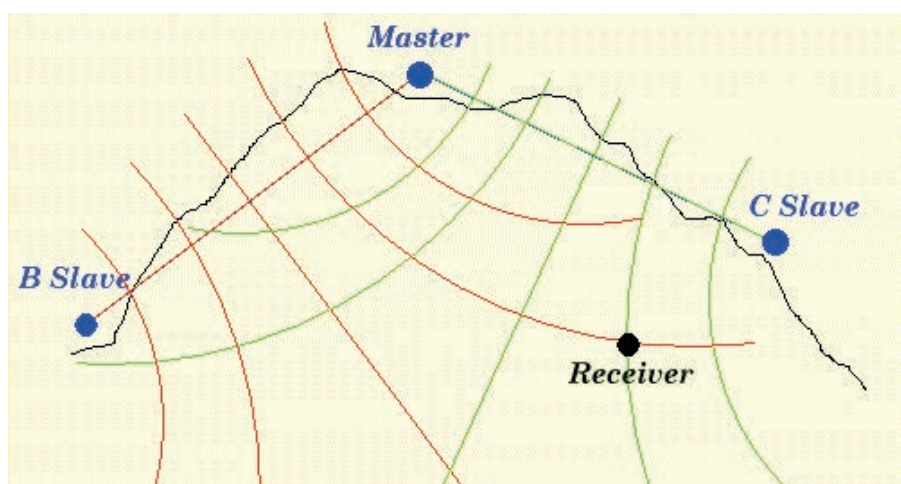


Figure 17. Principe du positionnement hyperbolique

s'amuse à baguenauder sous les yeux du navigateur. Seul le passage d'un satellite Transit, toutes les heures environ, permet de lever le doute et de recalculer les fameuses hyperboles.

Systèmes satellitaires

Dès les années 1980, les topographes comprennent que le GPS-NAVSTAR va révolutionner les campagnes de positionnement. La géodésie terrestre s'en empare et utilise le post-traitement des données statiques acquises afin d'obtenir des vecteurs tridimensionnels. En mer, la méthode du point isolé (4 satellites et leurs pseudo-distances au minimum et 4 inconnues X,Y, Z, dT) nous offre de 5 à 15 m, ce qui est merveilleux en navigation, tant que la dégradation n'est pas introduite. Dans ce cas l'erreur est plutôt de 50 à 100 m. L'attention des topographes sera vite attirée vers le problème des paramètres de passage du système satellitaire (WGS84 ou ITRFxx) vers les systèmes locaux. Au Gabon en septembre 1994, une campagne d'observation sur 3 points autour de Port-Gentil par le système DORIS [Strittmatter, J. 2013] a permis de déterminer les 3 paramètres tridimensionnels de translation entre l'ITRF92 ou 93 et le référentiel M'Poraloko.

L'heure du DGPS (*Differential Global Satellite System*) est arrivé, afin de corriger les erreurs systématiques et accidentelles. La station de référence sur un point connu calcule en continu les distances théoriques vers les satellites, connaissant les éphémérides (C), observe les pseudo-distances reçues (O), calcule les corrections à appliquer (C-O) à chaque satellite et à chaque observation. Ces corrections sont ensuite envoyées vers le récepteur des utilisateurs (*figure 18*) par radio



Figure 18. Récepteur DGPS NR51 Sercel, années 1990



Figure 19. Relevés GPS cinématiques au Cap Lopez, Gabon 1996

ou liaison satellitaire de communication en format constructeur (Sercel) ou RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*).

Le système se compose d'une station de référence seule mais les soucis de redondance et de sécurité du topographe ont vite fait d'imposer la présence d'une deuxième station et de la comparaison des solutions en ligne lors de la navigation.

La précision, dépendante de l'éloignement de la station de référence, pouvait être meilleure que 5 m.

La panoplie des méthodes et logiciels de Sercel autorise d'intéressantes expériences. Il est possible d'observer pseudo-distance et phase L1 (monofréquence) et post-traiter la solution en trajectographie ou cinématique. En mode trajectographie, on enregistre sur une durée importante et on traite les données (référence et mobile) *a posteriori*, même pour une plate-forme de forage qui bouge légèrement. La précision est d'environ 10^{-5} de la distance en planimétrie. En mode cinématique, un presque RTK avant l'heure, il s'agit de stationner un point connu, d'initialiser les mesures et se promener avec son antenne mais sans perdre le contact avec les satellites. Les points courants ou des points à la demande sont post-traités et la précision planimétrique est de quelques centimètres. Si cette méthode a été souvent employée lors des relevés du trait de côte et de la plage du Cap Lopez (*figure 19*) les essais sur embarcation pour des bathymétries n'ont guère été concluants (transport de la canne-antenne) et la

méthode RTK (*Real Time Kinematic*) arrivera bientôt.

La navigation

■ Principe

La navigation consiste, connaissant sa position, à amener son mobile vers un but connu en coordonnées et en général suivant une trajectoire prédéfinie, elle-même connue en coordonnées. Il peut aussi s'agir de naviguer le long d'une série de profils rectilignes, régulièrement espacés, afin de couvrir une zone. Il convient, en général, de connaître et de maîtriser le cap du mobile.

■ Comment fait-on actuellement ?

Depuis des décennies la navigation est aidée des moyens informatiques qui ont bouleversé la vie des topographes. Ordinateurs puissants permettent d'ingérer et de traiter les données brutes et d'exprimer des coordonnées filtrées, compensées, ramenées à un point précis du mobile. La navigation s'effectue sur des visualisations graphiques du terrain, comprenant les obstacles, objets remarquables, isobathes et bien entendu le projet, profil, cible, etc. Ces visualisations sur écran et les positions sont souvent reliées aux commandes du système de navigation du navire. C'est le positionnement dynamique, se tenir sur une cible ou sur un profil automatiquement.

■ Comment faisons-nous avant ?

Le premier problème à résoudre est le calcul de la position. Avant l'informatique embarquée, la position est forcément calculée *a posteriori* numé-



riquement (intersections de directions) ou graphiquement (rapporteurs). La conduite du mobile sur son profil s'effectue alors sur le terrain, par alignement sur des signaux ou bien grâce à une visée par théodolite et la radio de l'opérateur. Cependant la radionavigation nous demande d'autres méthodes, hors de vue de la côte. Ce seront les cartes de cercles ou d'hyperboles, documents papiers sur lesquels on positionne graphiquement le point par les reports des lectures des lieux de position et on donne les indications à l'homme de barre, la direction et la distance à suivre. Ces cartes de lieux sont préparées souvent à la main pour un positionnement de forage (ou sur une petite zone d'étude). On calcule les distances ou hyperboles à lire sur le point théorique (calcul inverse à celui du positionnement, tenant éventuellement compte des corrections géodésiques) et on trace les tangentes aux lieux. Pour naviguer, quand c'est possible, on essaie de garder un lieu constant et on incrémente les distances sur un autre lieu. Il n'est guère possible de suivre plus de 2 lieux en mode dynamique.

Je n'oublierai jamais la tête des plongeurs de la C.G.DORIS quand ils ont trouvé le *pipe* (oléoduc sous-marin) exactement sous le corps-mort (Iest) de la bouée de marquage que je venais de larguer, en mer Rouge. À l'aide d'un Trisponder affichant 2 distances, j'ai fait suivre au navire une distance la plus proche de la direction du pipe, donnant des indications gauche-droite, et donnant le moment de largage quand la poupe du navire passe au droit de l'autre distance. Dans le mille !

Avant les calculs en temps réel, les observations interfacées au calculateur, le topographe développe rapidement les méthodes avec calepines, type HP67 ou 97, où les distances sont entrées à la main, la position est calculée, et la distance et la direction, vers la cible, sont données.

L'interfaçage des observations à un calculateur offre désormais le calcul en temps réel, avec toutes les options de compensation, de filtrage et de stockage. Avant les écrans graphiques, ce sont les tables traçantes avec les stylets en feutre de couleur qui permettent de visualiser la navigation. Également les construc-

teurs offrent des instruments d'aide à la navigation comme Sercel avec l'UCM (Unité de calcul microprogrammée) qui calcule X,Y depuis les distances et l'IDP (Indicateur de profil) pour suivre une route théorique.

Conclusion

Après ce voyage historique et technique, continuez avec l'article suivant à suivre les évolutions du positionnement et de la navigation en mer, à l'époque contemporaine avec la contribution d'Edouard Guidice (ingénieur géomètre-topographe chez Total SA). ●

Remerciements / acknowledgement

Thanks to Allan Cordwell for making its radiopositioning website available : [Cordwell, A. 2015].

Contact

Bernard FLACELIÈRE
bernard.flaceliere@orange.fr

Bibliographie

- Gaudillère, Ph. (1986). Colloque de Brest. *Reconnaissance bathymétrique à courte portée*, Revue XYZ, N°26, p. 27-29.
Riou, J.J. (1986). Colloque de Brest. *Localisation à longue portée, positionnement en mer, colonne de Frigg Nord-Est*, Revue XYZ, N°29, p. 44-48.
Strittmatter, J. (2013). *Le système DORIS et certaines améliorations récentes*, Revue XYZ, N°136, p. 24-28.
Cordwell, A. (2015). <http://www.alancordwell.co.uk/Legacy/radionavigation/index.php>.

ABSTRACT

All measurements and readings taken from the surface of the sea, lake or river require their positioning according to the official planimetric reference system. What were the means of mobile surface positioning during the 1970s and what have been their evolutions during the last 40 years? The principles, methods and precisions are recalled here. Also navigation, which consists of making a mobile to follow a predetermined trajectory, has evolved during these decades. It will be an anthology of methods and systems used by the author, unused ones may be mentioned for the record.

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BOSSER Pierre,
professeur associé, ENSTA Bretagne, Brest

BOTTON Serge,
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée

CLÉDAT Emmanuel,
doctorant, EPFL (Suisse)

HULLO Jean-François,
Dr.-Ing., ingénieur de recherche, EDF Energy, Royaume-Uni

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA Strasbourg

LEQUEUX James,
astronome émérite à l'Observatoire de Paris

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOPIN Irène,
ingénieur recherche, ENSTA Bretagne, Brest

MOREL Laurent,
professeur des universités, ESGT Le Mans

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier,
ingénieur, traducteur Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval, Québec

TOUZÉ Thomas,
dr. ing. géomètre, EDF

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

Font partie du comité de lecture les membres du comité de rédaction et la rédaction (la directrice des publications et son adjoint, le rédacteur en chef et son adjoint), voir la liste en page 1, sommaire.