

Nous présentons dans cet article une référence verticale souvent peu connue des utilisateurs non avertis et familiers avec l'hydrographie : il s'agit du niveau

Zéro hydrographique vers une détermination globale

G. Wöppelmann,
S. Allain,
P. Bahurel,
S. Lannuzel
B. Simon
EPSHOM
BREST

de référence des cartes marines ou **zéro hydrographique**. C'est, en quelque sorte, l'équivalent en mer de la surface de référence des altitudes à terre portées sur les cartes de l'IGN ; tous les relevés bathymétriques y sont rapportés.

Le **zéro hydrographique** ou zéro des cartes marines est le niveau de référence à partir duquel sont comptées, positivement vers le nadir, les sondes portées sur les cartes marines et, positivement vers le zénith, les hauteurs de marée. Il est choisi en France comme **le niveau des plus basses mers astronomiques**. Il s'agit d'un niveau théorique sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement.

Le choix d'un zéro hydrographique au voisinage des plus basses mers est arbitraire, mais commode, car le marin est pratiquement toujours assuré de disposer d'au moins autant d'eau que ce qui est indiqué sur la carte. Ce choix est adopté depuis peu par les pays membres de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI), excepté le Japon, mais sa traduction dans les faits risque de prendre du temps, car de très nombreuses cartes sont à refaire. Il pose en outre un certain nombre de problèmes de réalisation pratique et d'accès, essentiellement d'ordre technologique. Aussi, le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) entreprend un examen critique du zéro hydrographique, et notamment des méthodes employées pour le déterminer. Ce travail s'effectue dans un contexte favorable, à la lumière des possibilités offertes par les techniques spatiales d'altimétrie radar (TOPEX/POSEIDON...) et de positionnement (GPS...).

L'article présente les motivations du sujet d'étude et passe en revue les techniques et les données qui sont a priori susceptibles de contribuer à résoudre les problèmes qui se posent. Nous décrivons ensuite l'état de l'art des méthodes traditionnelles employées pour déterminer le zéro hydrographique et pour réduire les sondages bathymétriques. Cette partie permet de mieux appréhender les problèmes.

Une nouvelle approche du problème de la détermination et de l'accès au zéro hydrographique est proposée. Elle met à contribution les techniques spatiales mentionnées ci-dessus. Nous présentons enfin les résultats d'un essai en rade de Brest qui a permis d'évaluer les capacités du GPS cinématique pour la réduction des sondages.

CONTEXTE ET MOTIVATIONS

Pourquoi entreprendre aujourd'hui un examen et un inventaire détaillés et critiques du zéro hydrographique, et en particulier des méthodes employées pour le déterminer ?

a. *Le besoin d'uniformiser et de supprimer la notion de zones de marée qui a pour origine une détermination historique et imparfaite du zéro hydrographique.*

Le zéro hydrographique est déterminé en pratique à partir des observations de marégraphie. Il est alors coté par rapport au repère principal du marégraphe. Une fois validée, la cote est adoptée définitivement, même si l'on

s'aperçoit par la suite que, en raison de l'évolution du niveau des mers ou à cause d'une détermination initiale imprécise, elle ne correspond pas exactement au niveau des plus basses mers astronomiques. Afin de préserver la détermination du zéro, d'autres repères sont implantés à proximité du repère principal ou "fondamental". Ils sont rattachés les uns par rapport aux autres par nivellement. L'ensemble constitue **les repères de marée** de l'observatoire. Ils sont consignés dans une **fiche de marée** et ils matérialisent le zéro hydrographique. Dans la mesure du possible, ils sont également déterminés dans le système d'altitude du nivellement général, s'il existe.

Les zéros hydrographiques des ports français ont généralement été adoptés indépendamment les uns des

autres à une époque où les moyens techniques ne permettaient pas une détermination précise du niveau des plus basses mers. Il en résulte que l'écart entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers peut varier entre deux zones de marée. Il est par exemple égal à 40 cm à Calais et nul à Dieppe.

Une **zone de marée** est définie par ses limites géographiques et un port de référence où le zéro hydrographique est déterminé. La détermination résulte à la fois de la tradition et d'observations de longue durée. Pour chaque port situé à l'intérieur de la zone, une relation de concordance permet de choisir un zéro hydrographique en accord avec celui du port de référence. Entre deux zones de marée adjacentes, des discontinuités peuvent exister. Elles ont cependant peu de conséquences pratiques pour la navigation car aussi bien les sondes portées sur les cartes que les hauteurs d'eau déduites de l'usage des « Annuaire des marées » sont données par rapport au zéro hydrographique. Ainsi, l'addition de la sonde et de la hauteur d'eau à un instant donné fournit la profondeur.

b. Le problème de la réduction des sondages au large.

La détermination du zéro hydrographique et, par suite, l'accès à celui-ci pour la réduction des relevés bathymétriques, est fondée sur la méthode de concordance entre le marégraphe d'un port de référence, le plus proche de la zone d'intérêt, et le marégraphe temporaire mouillé dans cette même zone pendant une période variable, généralement mensuelle.

Cette méthode donne des résultats satisfaisants dès lors que les données d'un port de référence sont disponibles à proximité de la zone de sondage pendant les opérations de sondage, de façon générale près de la côte. En revanche, des difficultés surviennent en s'éloignant au large et il est fréquent de constater des écarts de l'ordre de vingt centimètres entre deux opérations de sondage successives. L'origine de ces écarts réside en particulier dans la méthode d'accès au zéro hydrographique. En effet, la méthode de concordance suppose qu'il n'existe pas de pente de la surface moyenne de la mer entre le port de référence et le port temporaire. Or, de fait, nombreux sont les facteurs qui peuvent remettre en question la validité de cette hypothèse : les irrégularités du géoïde, la présence de courants permanents ou saisonniers, les effets stériques différentiels entre les deux ports, etc.

c. Les nouveaux systèmes de navigation par satellites.

Les nouveaux systèmes spatiaux de navigation fournissent naturellement des positions dans un système de référence terrestre mondial et géocentrique. Le GPS, par exemple, fournit directement la hauteur, par rapport à l'ellipsoïde, d'un navire hydrographique convenablement équipé.

Quel système de référence adopter ?

Considérant les éléments exposés ci-dessus, l'Organisation Hydrographique Internationale propose d'adopter l'ellipsoïde d'un référentiel terrestre comme référence verticale internationale, dans laquelle le zéro hydrographique sera exprimé. Le WGS84 a été mentionné, mais il soulève encore un certain nombre de commentaires et de polémiques.

Les qualités que l'on souhaite trouver dans le référentiel terrestre sont la précision, la stabilité et l'accessibilité. D'une part, le zéro hydrographique ne doit pas être remis

en cause par des déterminations, ou des réalisations successives, du système de référence vertical choisi. D'autre part, l'accès doit être possible en tout point du globe et, si possible, indépendant du système spatial de positionnement.

Les progrès réalisés dans l'instrumentation et dans la modélisation des mesures et des corrections conduisent aujourd'hui à des réalisations de référentiels terrestres cohérents à environ 10 cm par les techniques de géodésie spatiale. Il s'agit principalement des techniques DORIS, GPS, SLR et VLBI, mais d'autres sont susceptibles de les rejoindre : PRARE, GLONASS. La précision du positionnement dans les repères géocentriques sous-jacents est toutefois meilleure, centimétrique, par exemple dans les ITRF successifs [Boucher et al, 1998]. Des erreurs de nature systématique sont responsables des écarts observés aujourd'hui entre les diverses réalisations, de l'ordre du décimètre. Elles sont actuellement modélisées par une similitude euclidienne à sept paramètres, qui est la forme générale de transformation entre deux repères orthonormés de l'espace affine euclidien. Une estimation précise de ces paramètres de transformation permet donc de se ramener de manière simple au repère choisi et de bénéficier de sa qualité intrinsèque.

La précision recherchée dans les sondes réduites au zéro hydrographique est meilleure que le décimètre. Aussi, le repère terrestre choisi doit avoir une qualité meilleure, centimétrique. Or, ces exigences ne semblent pas satisfaites par le WGS84, alors qu'elles le sont par l'ITRS. C'est principalement pour cela que l'Association Internationale de Géodésie et l'Union Géodésique et Géophysique Internationale recommandent l'utilisation de l'ITRS à des fins scientifiques.

Dans le contexte décrit ici, le SHOM se propose d'étudier la définition et le rattachement du zéro hydrographique dans un référentiel terrestre, a priori l'ITRS, à travers l'une de ses réalisations ITRF, la meilleure au moment du choix, puis d'étudier l'accès à ce zéro hydrographique en vue d'exploiter les résultats dans la réduction des sondages bathymétriques.

Quelles sont les techniques et les données disponibles qui sont a priori susceptibles de contribuer à la problématique de la détermination et de l'accès au zéro hydrographique ?

• **Les techniques de marégraphie.** Les marégraphes sont, nous l'avons vu, l'élément principal du processus employé actuellement pour déterminer le zéro hydrographique et réduire les sondages bathymétriques. Ils fournissent typiquement des hauteurs d'eau horaires dans une référence locale définie par rapport à des repères matériels, les repères de marée, disposés au voisinage immédiat de l'observatoire. L'échantillonnage des mesures peut néanmoins être plus élevé, soit en réglant a priori les paramètres d'un marégraphe numérique, soit en numérisant a posteriori les **marégrammes** d'un marégraphe analogique, c'est-à-dire les courbes de marée enregistrées sur rouleau de papier.

• **Les techniques de nivellement.** Le nivellement de précision, ou géométrique permet de déterminer les positions verticales relatives entre repères matériels. Il permet aussi de les rattacher au réseau national de nivellement. Les cotes des repères de marée sont ainsi obtenues et liées dans une même référence verticale.

- *Les techniques de géodésie spatiale.* Les techniques GPS, DORIS, SLR ou VLBI sont à l'origine des réalisations actuelles de qualité du système de référence terrestre international (ITRS). Elles permettent de densifier le repère terrestre et, notamment, d'exprimer la position des repères de marée avec une précision a priori centimétrique par rapport à l'ellipsoïde.

- *Les techniques d'altimétrie spatiale.* Les altimètres radar embarqués sur satellite, tels que ERS1, ERS2 ou TOPEX-POSEIDON, fournissent par construction des hauteurs d'eau dans un système de référence terrestre géocentrique. Des surfaces moyennes océaniques sont aujourd'hui produites dans le repère terrestre associé, c'est-à-dire par rapport à l'ellipsoïde.

- *Les modèles de marée.* Une bonne connaissance des composantes de la marée en un lieu permet de calculer avec précision la relation entre le niveau moyen de la mer et le niveau des plus basses mers astronomiques, autrement dit le zéro hydrographique théorique.

- Enfin, *les modèles de géoïde.* Les modèles de géoïde fournissent des hauteurs du géoïde par rapport à l'ellipsoïde d'un système de référence terrestre. Historiquement, le niveau de la mer a été utilisé pour définir le géoïde localement et établir l'origine des systèmes d'altitude des pays. Il faut savoir que cette approximation est toujours utilisée pour améliorer la qualité des modèles de géoïde en mer et réduire les erreurs systématiques de moyenne longueur d'onde que l'analyse des perturbations d'orbite des satellites actuels et la gravimétrie ne permettent pas de détecter. Une mission spatiale de satellite bas permettrait enfin de s'affranchir de ces erreurs de manière plus satisfaisante.

ÉTAT DE L'ART

1. Détermination du zéro hydrographique

Nous avons vu que le zéro hydrographique est situé au voisinage du niveau des plus basses mers astronomiques. Sa détermination passe par des observations de marégraphie et par l'analyse de celles-ci pour calculer les valeurs des différentes composantes de la marée au port d'observation. Ainsi, on déduit le niveau recherché des plus basses mers astronomiques et on le rapporte à un ensemble de repères proches du marégraphe. Ces repères, dits de marée, et leurs cotes réalisent concrètement la référence du zéro hydrographique.

Les composantes de la marée sont d'autant mieux connues que l'analyse porte sur des observations continues qui couvrent une longue durée. L'idéal est d'avoir une série de 19 ans de mesures pour tenir compte de la modulation à longue période des composantes de la marée. Un an d'observation continue est considéré comme l'intervalle minimum pour obtenir des résultats suffisamment précis pour les besoins de la prédiction de marée à l'usage des navigateurs. On distingue ainsi :

- *des ports de référence,* équipés de marégraphes permanents ou ayant fait l'objet d'observations continues sur plusieurs années. Dans ces ports, la réalisation du zéro hydrographique est jugée satisfaisante, fidèle à la définition.
- *et des observatoires temporaires.* Ils présentent moins d'une année de mesures, la plupart du temps à peine un mois.

La durée d'observation des observatoires temporaires est insuffisante pour une détermination précise du niveau

des plus basses mers astronomiques. Pour s'en convaincre, il suffit de se rappeler que le niveau des plus basses mers astronomiques est lié par définition au niveau moyen de la mer et de regarder une série temporelle de marégraphie de plusieurs années. Les fluctuations des niveaux moyens mensuels de la mer sont typiquement de plusieurs décimètres comme l'illustrent les graphiques ci-dessous, aussi bien en Méditerranée, à Marseille, que sur les côtes atlantiques, à Brest.

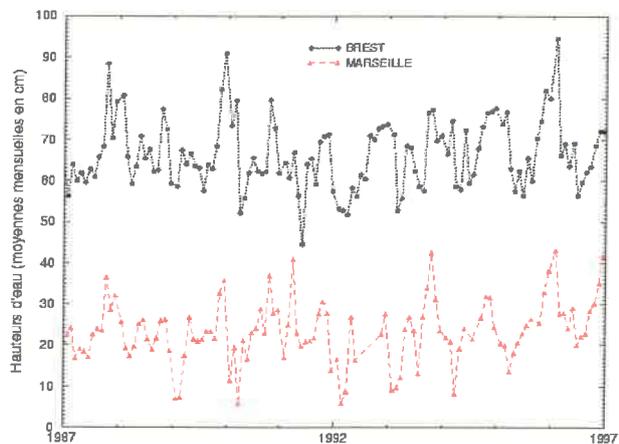


Fig. 1 – Séries temporelles de niveaux moyens mensuels des marégraphes de Brest et de Marseille [1987-1997]. (Les origines sont décalées arbitrairement).

Le recours à la méthode de concordance avec un port de référence voisin, où le zéro hydrographique est correctement défini, est de ce fait indispensable. La concordance porte sur les basses mers mesurées dans les deux ports. Le zéro hydrographique du port secondaire est alors choisi de sorte que la droite de régression calculée par la méthode des moindres carrés passe par l'origine des coordonnées du port de référence. Ce zéro est ensuite coté par rapport à des repères matériels comme dans le port de référence.

La plupart des zéros hydrographiques ont été établis dans le passé, à des dates différentes d'un port à l'autre, suivant les besoins de la navigation et avec les moyens disponibles au moment de la réalisation. Aussi, les hydrographes français, soucieux de la sécurité des navigateurs, et peut-être un peu méfiants des méthodes qu'ils appliquaient et/ou de leurs propres résultats, ont souvent pris une marge de sécurité et ont coté le zéro hydrographique en dessous des plus basses mers qu'ils avaient calculées. Par ailleurs, il convient de se rappeler que le niveau moyen de la mer varie dans l'espace et à long terme dans le temps. Certes les séries temporelles de moyennes annuelles montrent une variabilité moindre que les séries mensuelles sur une dizaine d'années, de l'ordre du décimètre, mais à plus long terme il n'est pas rare d'observer des variations de quelques décimètres.

Quelle que soit l'origine d'une réalisation imparfaite du zéro hydrographique, évolution du niveau moyen de la mer, mauvais choix de l'hydrographe, ou changement de régime des marées, celle-ci est maintenue sauf cas très exceptionnel où l'écart avec la définition théorique devient inacceptable, soit parce qu'il atteint à la sécurité des navigateurs, soit parce qu'il devient une entrave pour le commerce maritime. Les exemples récents de Saint-Nazaire et de Brest illustrent ces cas exceptionnels [SHOM, 1994].

2. Réduction des sondages bathymétriques

2.1. Principes

Les navires hydro-océanographiques mesurent les profondeurs à l'aide de sondeurs acoustiques. Les mesures sont des mesures de temps de propagation aller-retour de l'onde sonore. Elles sont traduites en distance entre le sondeur et la topographie sous-marine en tenant compte, si possible, des variations de la célérité du son dans la colonne d'eau traversée par le faisceau, de l'inclinaison du faisceau et de l'attitude du bateau (roulis, tangage). Cette distance peut être rapportée au niveau instantané de la mer à l'instant de mesure en appliquant une correction de tirant d'eau, dite dynamique lorsque les variations de charge et l'**accroupissement** du navire (effets de vitesse) sont pris en compte.

Les sondes portées sur les cartes marines ne sont cependant pas ramenées au niveau instantané de la mer pour des raisons évidentes : ce niveau varie avec le temps. Le navigateur ne pourrait pas exploiter directement l'information de la carte. Aussi, la mesure de profondeur est décomposée en deux parties ramenées à un niveau de référence plus stable, le zéro hydrographique. La partie fixe correspond à la sonde inscrite sur les cartes marines et la partie variable représente la hauteur d'eau à un instant donné par rapport au zéro hydrographique. Cette hauteur dépend en premier lieu de la marée. Plus rigoureusement, elle dépend aussi des effets météorologiques et climatiques. Un navigateur muni d'une carte marine et d'un annuaire des marées est donc en principe capable d'estimer la hauteur de la colonne d'eau présente sous son navire aux effets météo près.

2.2. Réduction par marée observée

La hauteur d'eau mesurée en un port de référence s'exprime par rapport au zéro hydrographique, adopté et fixé par rapport à des repères matériels à une époque donnée. Nous pouvons distinguer dans cette hauteur les contributions de la marée et des effets météorologiques.

La marée dépend de la date et du lieu. Toutefois, une simplification géographique est possible : à un instant donné, la marée est supposée identique sur une zone donnée, appelée **zone élémentaire de marée**, d'étendue assez variable, laissée à l'appréciation du Directeur de la mission hydrographique. Cette hypothèse de travail en bathymétrie comprend implicitement les effets météorologiques. De plus, on suppose que la surface moyenne de la mer ne présente pas de pente. Les éventuels effets stériques différentiels, courants géostrophiques, ondulations du géoïde, upwellings, sont ignorés. Cette simplification est très raisonnable dans la zone élémentaire de marée. Ainsi, les relevés bathymétriques réalisés à proximité d'un port de référence sont réduits au zéro hydrographique en retranchant aux sondes les hauteurs d'eau observées au marégraphe du port de référence et en appliquant des corrections de tirant d'eau dynamique.

Dès lors que l'hypothèse de base est remise en question dans une zone côtière de relevé bathymétrique, un travail préalable important consiste :

- (a) à implanter un marégraphe temporaire à proximité de la zone de sondage, si possible dans un port;
- (b) à construire un zéro hydrographique par concordance avec le port de référence voisin.

2.3. Réduction par modèle harmonique

Le mode opératoire décrit ci-dessus est parfois appliqué au large, à ceci près que l'on utilise des marégraphes

immergés et qu'il n'est bien entendu pas possible de poser des repères de marée. L'accès ultérieur à cette référence de réduction des sondages est par conséquent difficile.

Hors des zones élémentaires de marée et loin des points de mesure, le processus de réduction des sondes passe par l'utilisation d'un modèle de marée. Celui-ci comprend les constantes harmoniques des composantes de la marée en un certain nombre de points. Lorsque le point coïncide avec un port de référence ou un observatoire temporaire, les valeurs des constantes sont identiques (elles ont servi en pratique à caler le modèle). Plus généralement, les constantes harmoniques de la marée sont obtenues en tout point par interpolation entre les points où elles sont connues. Elles permettent de prédire les hauteurs d'eau aux points de relevé bathymétrique.

La correction des sondages est ensuite affinée par le report des effets météorologiques et de l'écart entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers théoriques. Ces quantités sont estimées au port le plus proche de la zone d'intérêt. L'écart entre la marée prédite et la marée observée par le marégraphe est attribué aux effets météorologiques.

Il n'est pas rare d'observer des écarts de vingt centimètres entre deux campagnes de bathymétrie sur une même zone. De nombreuses sources d'incertitude affectent la correction de hauteur d'eau : outre les défauts du modèle de marée, des erreurs systématiques peuvent venir des quantités estimées au port et qui sont reportées au lieu de sondage. Tant que le sondeur bathymétrique se trouve à proximité d'un port de référence, près de la côte, cette approche donne de bons résultats. Mais dès que la distance avec le port de référence augmente, les sources d'incertitude augmentent aussi. D'une part, les effets météorologiques ne sont plus vraiment identiques. D'autre part, le niveau moyen de la mer peut être différent d'une période de sondage à l'autre (*effets saisonniers, climatiques, hydrodynamiques... cf. figure 1*).

UTILISATION DES TECHNIQUES SPATIALES

1. Vers une surface globale du zéro hydrographique

L'idée est de déterminer et de fixer une fois pour toutes la position du zéro hydrographique en tout point par rapport à l'ellipsoïde d'un référentiel terrestre mondial de qualité, tel que l'ITRS. Dès lors qu'une telle cartographie de la surface du zéro hydrographique est disponible, le problème de la réduction des sondages se simplifie à l'utilisation d'une technique de positionnement spatiale précise dans le référentiel terrestre en question, a priori la même technique qui sert au positionnement horizontal des traces du sondeur. Aujourd'hui les méthodes de positionnement privilégiées sont fondées sur le traitement des mesures GPS, mais l'approche est indépendante et rien n'exclut des nouveaux systèmes de positionnement tels que GLONASS ou GNSS.

L'application de la nouvelle approche à la bathymétrie s'affranchit des problèmes de mouillage de marégraphe et des erreurs systématiques liées aux méthodes de transfert des effets météorologiques et des écarts entre zéro hydrographique et niveau des plus basses mers. Elle s'affranchit aussi de certains effets dynamiques du navire hydro-océanographique, sources additionnelles d'erreur systématique dans la réduction des sondes (*cf. les essais en rade de Brest*).

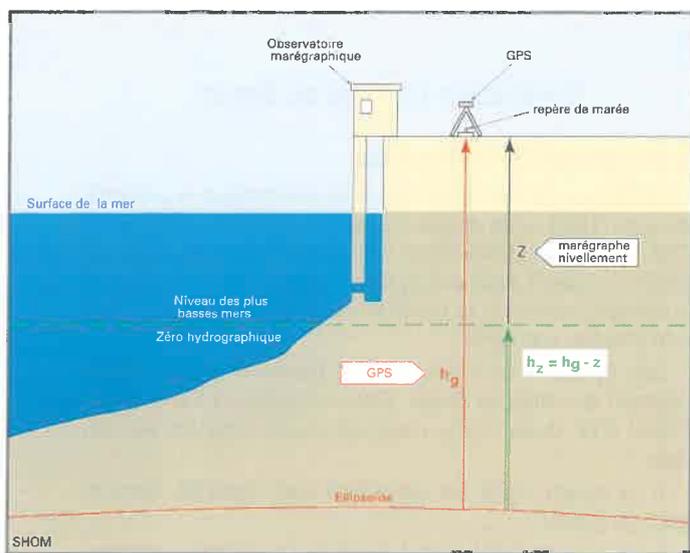


Fig. 2 – Détermination du zéro hydrographique près de la côte par rapport à l'ellipsoïde d'un référentiel terrestre en utilisant le GPS.

Pour des raisons purement technologiques, liées aux limites actuelles de l'altimétrie spatiale, la nouvelle approche distingue deux cas de figure suivant que l'on se trouve près de la côte ou pas. En effet, les altimètres radars sont mis en veille ou changent de mode à l'approche de la limite entre la mer et le continent. Le résultat est l'absence de mesures sur une bande côtière d'une dizaine, voire une vingtaine de kilomètres. Notons que toutes nos figures confondent la réalisation du zéro hydrographique avec le niveau des plus basses mers pour ne pas surcharger le dessin.

1.1. Près de la côte

L'approche près de la côte est illustrée dans la figure 2. Elle consiste à déterminer la position des repères de marée où le zéro hydrographique est défini en utilisant par exemple le GPS en mode géodésique, voire en mode cinématique.

La hauteur ellipsoïdale du zéro hydrographique est ainsi obtenue avec une précision centimétrique dans le référentiel terrestre souhaité, par rapport à l'ellipsoïde choisi.

L'approche pour réaliser le zéro hydrographique en mer, près de la côte, repose toujours sur la méthode de concordance et ses hypothèses. Les essais menés en rade de Brest montrent que le GPS remplace avec succès l'utilisation d'un marégraphe temporaire dans la zone de sondage bathymétrique.

Le zéro hydrographique est déterminé au port ou en mer indépendamment des relevés bathymétriques. Les résultats se présenteront a priori sous forme d'un maillage de points, matériels ou pas, où le zéro hydrographique sera exprimé et fixé par rapport à l'ellipsoïde. L'exploitation pour la réduction des sondages est décrite ci-après dans la section 2. Elle est commune à l'approche côtière ou au large, indépendante donc de la détermination du zéro hydrographique.

1.2. Au large

L'idée pour déterminer et fixer le zéro hydrographique par rapport à l'ellipsoïde d'un référentiel terrestre est de passer par la surface moyenne de la mer, connaissant par modèle de marée la relation entre le niveau des plus basses mers et le niveau moyen de la mer. Aujourd'hui, de nombreuses équipes dans le monde proposent de telles surfaces dérivées de l'exploitation des observations d'altimétrie spatiale. Le SHOM s'investit aussi dans l'étude de ces surfaces. Or, les observations d'altimétrie spa-

tiale sont par construction exprimées par rapport à l'ellipsoïde d'un système de référence terrestre mondial, conséquence des techniques d'orbitographie du satellite.

La figure 3 décrit comment à partir d'une telle surface moyenne de la mer nous pouvons déterminer la surface du zéro hydrographique, plus précisément le niveau des plus basses mers astronomiques. Il vient la relation suivante, donnant la hauteur ellipsoïdale du zéro hydrographique en tout point de la mer :

$$h_z = (h_s - D) - Z$$

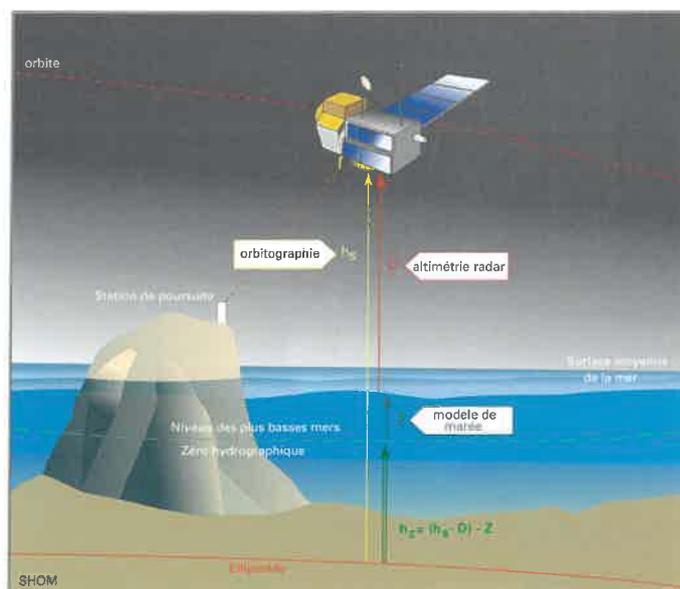


Fig. 3 – Détermination d'une surface globale du zéro hydrographique par le biais de l'altimétrie spatiale.

C'est le modèle de marée qui permet de passer du niveau moyen de la mer au niveau des plus basses mers (grandeur Z). Il convient à ce stade de noter que, suivant le type de modèle utilisé, la relation est établie avec le géoïde ou avec le niveau moyen de la mer selon que le modèle inclut des facteurs hydrodynamiques ou pas. Mais l'approche reste valable et le choix final de la surface intermédiaire pour arriver à notre fin est encore à étudier à la lumière des performances de chacune des options et des avantages que l'on pourrait en tirer pour la réduction des sondages bathymétriques. Rappelons toutefois que l'écart entre le géoïde et la surface de la mer provient principalement des effets dynamiques des courants marins, mais aussi des effets stériques dus à la température et à la salinité de l'eau.

L'objectif est aussi de choisir une réalisation du zéro hydrographique au large qui reste cohérente avec sa réalisation à terre afin d'éviter les discontinuités. La liaison entre les résultats au large et près de la côte peut se faire en prolongeant la surface moyenne de la mer par interpolation entre les points déterminés par altimétrie spatiale et ceux déterminés par marégraphie côtière et GPS. Il faut bien garder à l'esprit dans ce travail que la fonction de transfert entre le signal observé au large par altimétrie et celui qui est observé près de la côte par les marégraphes est loin d'être simple en général.

2. Application à la bathymétrie

La motivation principale de ce qui précède est d'appliquer directement les méthodes GPS de positionnement

aux relevés bathymétriques et d'obtenir avec une précision comparable, sinon meilleure, la hauteur des sondes par rapport à un niveau de référence, le zéro hydrographique, relié à l'ellipsoïde.

La figure 4 montre de façon schématique comment seront exploitées, dans la réduction des relevés bathymétriques, les données GPS et la surface du zéro hydrographique exprimées par rapport à l'ellipsoïde d'un référentiel terrestre.

On en déduit la sonde réduite :

$$S_r = h_z - T$$

$$S_r = h_z - (h_g - C - S)$$

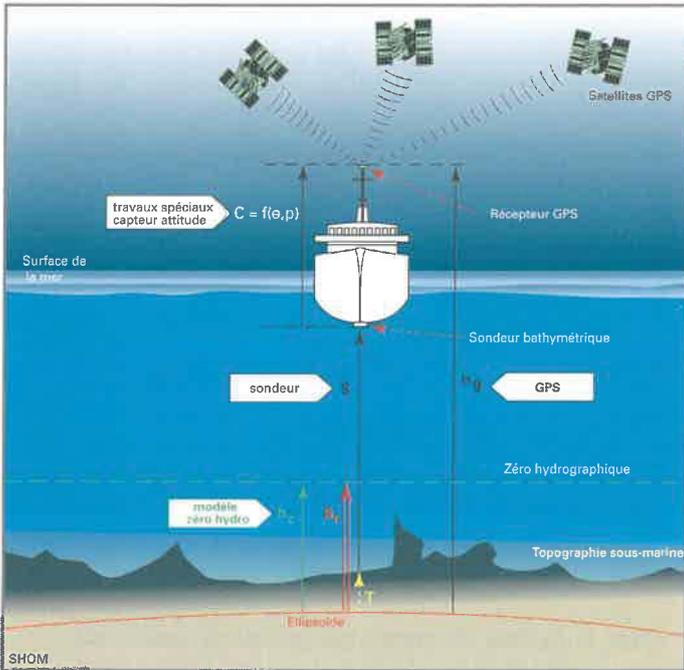


Fig. 4 – Exploitation de la détermination du zéro hydrographique dans un référentiel terrestre pour la réduction des sondages par GPS.

Le GPS et les capteurs d'attitude du navire permettent d'exprimer les sondes au-dessus de l'ellipsoïde du repère de référence terrestre souhaité. Il suffit alors de retrancher la hauteur du zéro hydrographique au point de la sonde, connue par ailleurs dans ce même repère terrestre.

EXPÉRIENCE EN RADE DE BREST

1. Description de l'expérience

La Mission Océanographique de l'Atlantique a procédé en avril 1998 à un essai du récepteur GPS ASHTECH Z12 en mode cinématique temps réel dans la rade de Brest. L'objectif était d'évaluer la possibilité de retrouver la marée à partir de la position verticale d'un porteur flottant localisé par GPS.

Les figures 5 et 6 décrivent le dispositif expérimental déployé en rade de Brest. Deux récepteurs GPS ASHTECH Z12, dotés d'une capacité temps réel, ont été utilisés :

1. la station GPS de référence était installée dans le port de Brest,

2. le second GPS était à bord de la vedette, antenne sur le toit, avec une cadence d'acquisition de 1 seconde.

Une liaison radioélectrique assurait la transmission en temps réel des informations GPS, permettant un positionnement en mode cinématique avec une précision centimétrique par rapport à la station de référence. Pour l'expérience, la cadence d'acquisition du marégraphe côtier numérique (MCN) de Brest était réglée à un enregistrement toutes les 2 minutes.

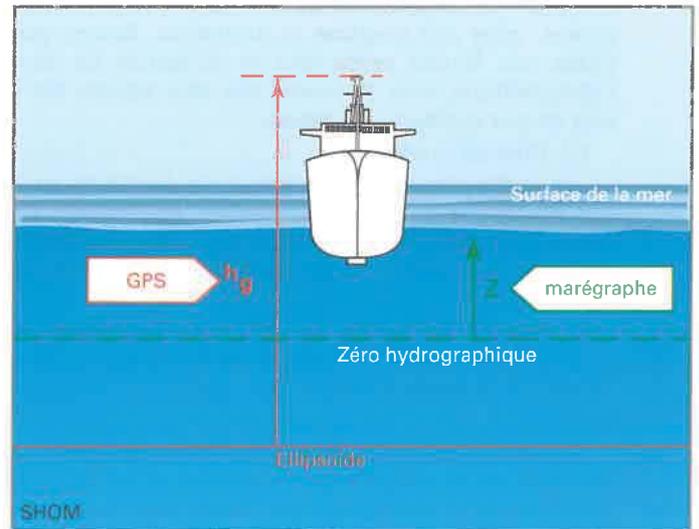


Fig. 5 – Détermination du zéro hydrographique au-dessus de l'ellipsoïde par comparaison au marégraphe du port de référence.

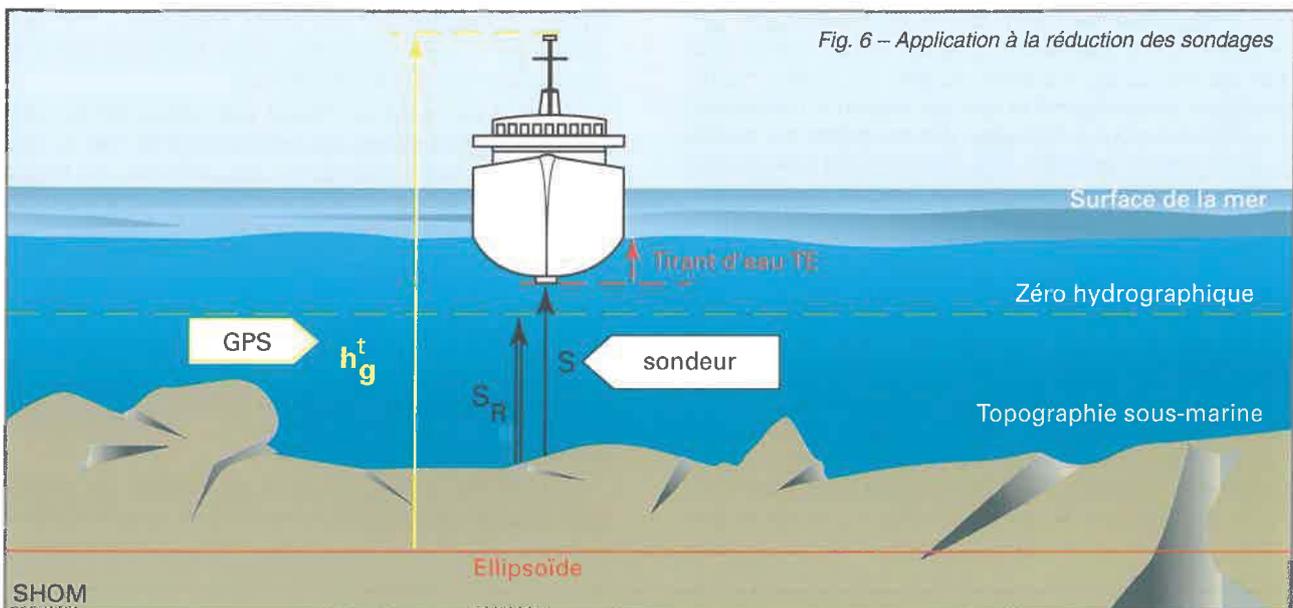


Fig. 6 – Application à la réduction des sondages

2. Analyse des données

Les hauteurs ellipsoïdales déterminées par GPS sont rapportées à la même référence que les observations de marée en comparant à tout instant les différences de leurs résultats respectifs :

$$C_o = h_g - Z$$

Un écart de 2,147 m a été trouvé avec une précision meilleure que 2 cm. Ce résultat a été adopté pour recalibrer les observations GPS. Nous obtenons ensuite la correction de hauteur d'eau par GPS à tout instant au-dessus du zéro hydrographique :

$$Z_g^t = h_g^t - C_o$$

Les sondes réduites sont alors obtenues à partir de la relation suivante :

$$S_r = S + TE - Z_g^t$$

La présence d'un bruit de l'ordre de 7 à 8 cm a conduit à lisser les hauteurs GPS sur deux minutes. Ce bruit a pour origine les mouvements de l'antenne : roulis, tangage, enfoncement dû à la vitesse de la vedette... La marée GPS lissée se présente moins régulière que la marée enregistrée par le MCN. L'analyse des données montre l'influence non négligeable de la vitesse et de l'accélération du porteur, en fonction desquelles la vedette a tendance à s'enfoncer plus ou moins.

Cet enfoncement bien réel de l'antenne GPS est également subi par le sondeur bathymétrique, montrant l'intérêt d'observer la hauteur par GPS. La détermination de la correction de marée par GPS cinématique permet également de compenser l'évolution du tirant d'eau du porteur. L'enfoncement observé dans le cadre de l'essai semble atteindre une dizaine de centimètres lorsque la vedette passe de 0 à 8 nœuds.

3. Résultats de l'essai

En mer, sur une zone géographique restreinte, dans le cas d'un levé portuaire par exemple, on peut considérer constante la différence entre le zéro hydrographique et l'ellipsoïde de révolution du référentiel terrestre.

La hauteur verticale mesurée par GPS cinématique à bord d'une vedette ne représente pas exactement la marée. Au bruit de mesure et aux mouvements de fréquence élevée de l'embarcation, que l'on peut fortement réduire par simple lissage, se superpose notamment l'enfoncement de la vedette en fonction de sa vitesse. Ainsi :

1. la précision de la marée par GPS, une fois réduite et lissée, est estimée à quatre centimètres. Elle est estimée par comparaison à celle des données du marégraphe.

2. la donnée du marégraphe n'intègre pas l'enfoncement de la vedette contrairement à la marée GPS. L'effet peut cependant atteindre la dizaine de centimètres et conduit à une erreur systématique des sondes.

Dans le cas d'un levé bathymétrique portuaire, restreint à une zone de faible étendue, l'utilisation du GPS par conditions de mer favorables semble très prometteuse pour la réduction des sondages. Elle a notamment l'avantage de prendre en compte l'enfoncement de la vedette hydrographique, en même temps que l'effet de la marée. La mise en œuvre passe par un calage préalable de la hauteur de l'antenne GPS par rapport au zéro hydrographique. Il suffit pour cela de réaliser des observations simultanées au GPS et à l'échelle de marée. Le lissage des résultats GPS est par ailleurs nécessaire pour réduire le bruit de mesure.

Dans le cas d'un levé au large ou sur des zones étendues, l'utilisation du GPS nécessite la connaissance du

décalage variable dans l'espace entre le zéro hydrographique et l'ellipsoïde : un modèle permettrait d'utiliser le GPS pour ramener les sondes au zéro hydrographique.

PERSPECTIVES

L'objet de cet article était de faire le point sur les problèmes actuels rencontrés en hydrographie dans la réduction des sondages bathymétriques à une référence verticale particulière, le zéro hydrographique, et de présenter les nouvelles possibilités techniques qui méritent d'être examinées. De nombreuses questions restent encore à étudier pour déterminer les performances des nouvelles approches et pour mettre en place les processus d'application pratique, mais les quelques résultats préalables sont encourageants.

La précision recherchée dans la réduction des sondages est meilleure que la dizaine de centimètres. Les zones d'intérêt premier pour le SHOM couvrent en gros la Manche, le sud de la Mer du Nord et le plateau continental à l'ouest des côtes de France jusqu'aux fonds de 200 m.

Le SHOM se propose d'étudier en partenariat avec le laboratoire LAREG de l'IGN l'utilisation du RGP (Réseau GPS Permanent) afin de déterminer le zéro hydrographique dans l'ITRS en quelques ports de référence de France. Les résultats du projet pilote concernent quatre ou cinq stations en 1999, mais l'objectif est à terme d'appliquer la méthode à l'ensemble des ports de France. Ce projet s'appelle GITAM (GPS ITinérant Appliqué aux Marégraphes).

RÉFÉRENCES

- Boucher C., Z. Altamimi and P. Sillard [1998]** : "Results and Analysis of the ITRF96". IERS Technical Note 24, May 1998.
- G. Marceau, B. Morse, G. Bouchard, R. Santerre, D. Parrot et E. Roy [1996]** : "Application du GPS et l'approche On-The-Fly en temps réel pour les relevés bathymétriques". Lighthouse : Edition 53, Spring 1996, pp. 15-20.
- NIMA [1997]** : "Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems". NIMA Technical Report TR8350.2, Third Edition, 4 July 1997.
- OHI [1996]** : Rapport du "groupe de travail de l'OHI sur les marées". Monaco, 22-25 avril 1996.
- SHOM [1994]** : La lettre du S.H.O.M. aux navigateurs, n° 11, décembre 1994, pp. 6-8.
- SHOM [1998]** : Annales des marées pour l'année 2000. Tome 1 : Ports de référence.
- Simon B. [1990]** : "Calcul de la marée au large pour la correction des sondages", Revue Hydrographique Internationale, Volume LXVII (2), juillet 1990.
- Wells D., A. Kleusberg and P. Vanicek [1996]** : "A Seamless Vertical - Reference Surface". University of New Brunswick Tech. Report # 179, prepared for the Canadian Hydrographic Service, February 1996.
- Wöppelmann G. [1997]** : "Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale". Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, soutenue le 23 juin 1997.