

Synthèse sur la concordance des références altimétriques en Baie du Mont-Saint-Michel

■ Christophe MARGUERIT

Cet article fait le point sur la concordance des références altimétriques en Baie du Mont-Saint-Michel. En particulier, il discute du problème de raccordement des zones de marée et de la difficulté de fixer un zéro hydrographique pour l'établissement des cartes marines et des annuaires de marée.

■ mots clés

zéro de référence
zones de marée

Dans le cadre du programme de recherche européen EUROSAM (European Salt-Marshes Modelling), un modèle numérique bidimensionnel de l'hydrodynamique en baie du Mont-Saint-Michel a été développé. Ce modèle, fondé sur les équations de Barré de Saint-Venant (1887), calcule divers paramètres hydrodynamiques tels que la vitesse du courant et la hauteur d'eau. La justesse de ces calculs dépend, notamment, de la précision de la bathymétrie.

Comme toute mesure, la bathymétrie nécessite un zéro de référence. Un lieu donné se trouve à l'altitude z par rapport à un niveau de référence z_0 . A priori, il n'y a pas de raison de choisir un niveau de référence plutôt qu'un autre. Aussi, suivant les époques, en France comme à l'étranger, les niveaux de référence ont varié et il est donc très difficile, par exemple, de comparer des cartes établies à des époques différentes ou provenant de régions du monde différentes.

En France, les niveaux de référence les plus usités ont été suivant les époques et les applications : le niveau des plus basses mers astronomiques, le zéro hydrographique, le niveau moyen de la mer (NM), le zéro du Nivellement Général de la France (N.G.F.) Bourdalouë, le zéro N.G.F. Lallemand (conservé dans le système d'altitude N.G.F.-I.G.N. 69) et le zéro de l'Institut Géographique National (I.G.N.) 69. Actuellement, seuls subsistent le zéro hydrographique, le niveau moyen de la mer et le zéro I.G.N. 69. Le zéro hydrographique et le niveau moyen de la mer sont les références des travaux hydrographiques (bathymétrie des cartes marines, prédiction de la marée,...). Le zéro I.G.N. 69 est la référence du nivellement terrestre en France métropolitaine Corse exceptée.

Les levés bathymétriques existants pour démarrer la modélisation hydrodynamique de la baie provenaient de sources variées (Service Hydrographique de la Marine, Institut

Géographique National, Société Grenobloise d'Étude et d'Application Hydraulique et Laboratoire d'Évolution des Systèmes Naturels et Modifiés de l'université de Rennes 1). A cette variabilité des sources était liée, comme souvent, une variabilité des zéros de références utilisés pour les mesures. Or, il n'existait jusqu'alors aucun document de synthèse rattachant de façon précise les différentes références altimétriques, terrestres ou marine, au zéro hydrographique en Baie du Mont-Saint-Michel [2]. C'est la raison pour laquelle notre bibliographie se limite à cinq rares documents utilisables, le reste relatant de communications personnelles.

Il résultait de cet état de fait que dans la pratique, les différents auteurs s'arrangeaient de façon empirique pour qu'il n'y ait pas de discontinuité lorsqu'ils utilisaient des données référencées à des zéros altimétriques différents. Aussi, à cause de la sensibilité des écoulements à la forme des bassins, il a été nécessaire d'établir une échelle de concordance précise des références altimétriques en Baie du Mont-Saint-Michel.

Cette synthèse rappelle la définitions des différentes références altimétriques terrestres et marines en les rattachant chaque fois au zéro hydrographique. Elle s'attarde particulièrement sur le problème de l'établissement d'un zéro hydrographique.

Les zéros marins

■ Le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques

Le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques sont deux références intimement liées.

Le niveau des plus basses mers astronomiques est le niveau théorique de l'eau qu'on observerait à basse mer pour la plus forte marée de vive-eau extraordinaire d'équinoxe. En d'autres termes, c'est le niveau théorique en dessous duquel l'eau ne descend qu'exceptionnellement sous l'influence de conditions météorologiques extrêmes (dépressions, etc.).

Le zéro hydrographique, également appelé (en France) zéro du service hydrographique ou zéro des cartes marines, est le niveau de référence commun aux cartes marines et aux annuaires de marée. Lors des premiers nivellements terrestres, il a été utilisé comme niveau de référence.

Selon une recommandation de l'Organisation Hydro-

■ ■ ■ graphique Internationale (O.H.I.), le zéro hydrographique devrait être choisi au voisinage du niveau des plus basses mers astronomiques. Ce choix arbitraire est commode car le marin est pratiquement assuré de disposer d'au moins autant d'eau que ce qui est indiqué sur la carte. Cette préconisation est adoptée depuis peu par les pays membres de l'O.H.I. à l'exception du Japon. Toutefois, dans les faits, sa traduction risque de prendre du temps car de très nombreuses cartes sont à refaire. Ainsi, niveau des plus basses mers astronomiques et zéro hydrographique devraient être deux références d'altitude très proches. Pourtant, il peut exister des différences significatives, parfois de quelques dizaines de centimètres (ex : 40 cm à Calais) entre ces deux niveaux. L'écart s'explique de part la méthode utilisée pour fixer le zéro hydrographique. En effet, le zéro hydrographique d'un lieu est déduit pratiquement de l'analyse harmonique des variations de hauteur d'eau mesurées (marégraphie) en ce lieu pendant une période finie. Cette analyse donne les valeurs des différentes composantes de la marée au port d'observation.

D'après l'O.H.I., pour retenir la hauteur de la plus basse mer, l'idéal serait d'effectuer une prédiction de hauteur d'eau sur une période de 19 ans connaissant ces composantes. Ceci repose sur l'idée répandue que la marée est un phénomène à peu près périodique de période égale à 18,61 ans, période proche de la période chaldéenne (encore appelée Saros)

égale à 18 ans de 365 jours et 15,5 jours. Cette idée est fautive car la situation des astres au bout de chaque période chaldéenne n'est pas strictement la même. Il est donc impossible de prétendre que sur une période finie, quelle qu'elle soit (inférieure ou supérieure à 18,61 ans), on aura observé le niveau des plus basses mers ou des plus hautes mers astronomiques. En d'autres termes, pour que l'écart observé entre le niveau des plus basses mers astronomiques et le zéro hydrographique tendent vers zéro, il faudrait avoir en chaque port des mesures marégraphiques sur une période tendant vers l'infini. Ceci, bien évidemment, est impossible. Il faut donc, si l'on suit les recommandations de l'O.H.I., accepter une certaine imprécision qu'il est difficile de chiffrer (Simon B., 2001a).

Pratiquement, jusqu'alors, les zéros hydrographiques ont été fixés une fois pour toute, à une époque donnée, d'après des observations marégraphiques portant sur des périodes variables suivant les ports, mais si possible au moins égales à l'année. Une fois fixé le zéro hydrographique d'un port est en général conservé même si les observations et/ou les calculs ultérieurs montrent qu'il n'était pas le niveau des plus basses mers. C'est pourquoi il existe des écarts entre le niveau des plus basses mers astronomiques et le zéro hydrographique. Ces écarts varient lentement dans le temps et d'un port à l'autre à mesure que de nouvelles observations viennent préciser la valeur des composantes de la marée et ainsi affiner les prédictions sur le niveau des plus basses mers astronomiques. Exceptionnellement, lorsqu'un écart trop important entre zéro hydrographique et niveau des plus basses mers astronomiques est observé, on réajuste localement le zéro hydrographique. C'est ce qui s'est produit à Brest et à Saint-Nazaire en 1996 où les zéros hydrographiques ont été respectivement rehaussés de 0,50 mètres et abaissés de 0,40 mètres.

A ce premier problème vient s'ajouter celui de la concordance entre les zéros hydrographiques de ports voisins, déterminés à des époques souvent différentes et sur des périodes d'observations marégraphiques différentes. Ce second problème a conduit les hydrographes des années soixante à introduire une nouvelle notion : la zone de marée. Une zone de marée est une région géographique restreinte, liée à un port de référence pour lequel le zéro hydrographique a été fixé comme on l'a vu précédemment. Pour chaque zone de marée, on fixe et on considère géographiquement constant, l'écart entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques. Par exemple, la baie du Mont-Saint-Michel dépend de la zone de marée dont le port de référence est Saint-Malo. Pour l'ensemble du golfe Normand Breton, et donc la baie du Mont-Saint-Michel, l'écart entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques est estimé à 0,21 mètres (figure 1). Mais il apparaît immédiatement, au vu de la façon dont on été déterminés les zéros hydrographiques des ports, qu'il peut exister des discontinuités entre chaque zones de marée. C'est effectivement le cas. Ainsi, dans la pratique, pour assurer la continuité des fonds d'une carte qui chevauche plusieurs zones de marée discontinues,

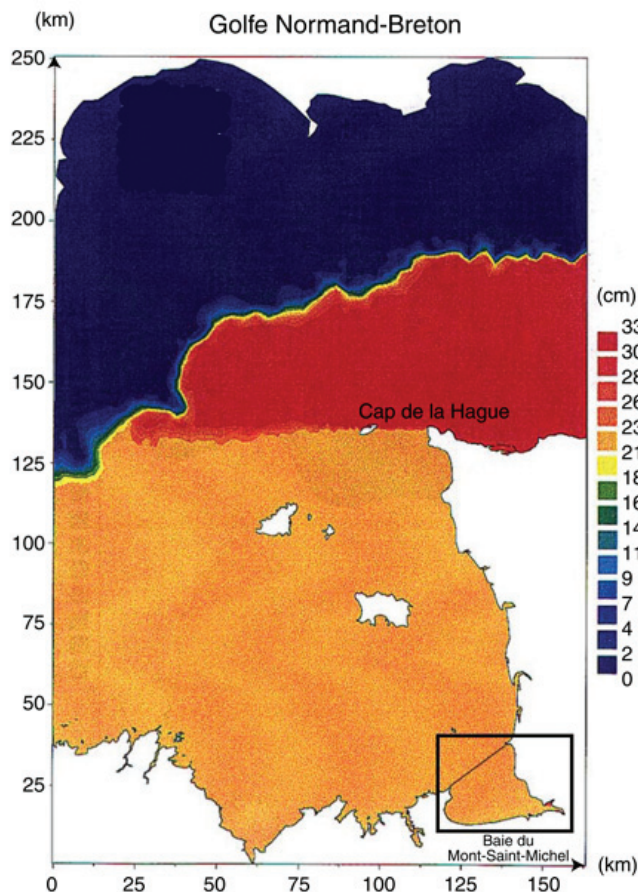


Figure 1

les cartographes s'arrangent empiriquement pour que cela ne se voie pas trop [7]. Toutefois, Bernard S. [6] propose une méthode alternative plus rigoureuse et plus simple à mettre en œuvre pour déterminer non seulement le niveau des plus basses mers astronomiques, mais aussi celui des plus hautes mers et des pleines et basses mers de vive-eau moyenne. Cette nouvelle méthode devrait permettre de supprimer la notion de zones de marée.

■ Le niveau moyen de la mer

Pour comprendre ce qu'est le niveau moyen de la mer, il faut distinguer la marée de la variation de hauteur d'eau réelle qui entrent toutes deux dans son estimation.

La marée est la part de la variation de la hauteur d'eau due uniquement à l'attraction des astres, essentiellement la lune de par sa proximité et le soleil de par sa masse [1]. Elle est prédite, en France, par le Service Hydrographique de la Marine (S.H.O.M.), à l'aide de deux méthodes : la méthode harmonique [4] et la résolution des équations de Navier-Stokes (Navier, 1821 - Stokes 1845).

La variation de hauteur d'eau réelle, observable et mesurable sur le terrain, est la marée corrigée éventuellement par l'influence de phénomènes aléatoires telles que la météorologie, les ondes de tempête, etc.

Le niveau moyen de la mer (NM), est la moyenne des différences entre la hauteur d'eau réelle, et celle due uniquement à la marée, [5] soit

$$NM = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (hr_i - h_i)$$

où m est le nombre de mesures effectuées sur des périodes d'observations relativement longues. NM est donc la moyenne du niveau de la mer s'il n'y avait pas de marée mais simplement une variation de niveau due à l'influence aléatoire des conditions météorologiques. Il correspond donc à une situation moyenne de pression atmosphérique ($\approx 1\,013$ hPa en baie du Mont-Saint-Michel).

Ainsi, NM varie selon les périodes d'observation et la longueur de la mesure. A court terme, on peut observer des variations saisonnières de NM. A plus long terme, le S.H.O.M. a estimé par exemple à 15 centimètres l'augmentation du niveau moyen de la mer à Brest et à Marseille durant le siècle passé, soit en moyenne 1,5 millimètres par an. Mais cette tendance n'est pas continue. Il y eu des diminutions puis des augmentations de niveaux. Les tendances sur dix ans n'ont donc rien de significatif pour le long terme. Les causes de cette augmentation peuvent être multiples : activité anthropique, enfoncement relatif de la croûte terrestre (subsidence), augmentation globale du volume de l'océan, etc.

En baie du Mont-Saint-Michel, NM se trouve 7,58 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2), soit approximativement le demi-marnage de vive-eau exceptionnelles [3].

■ Les zéros terrestres

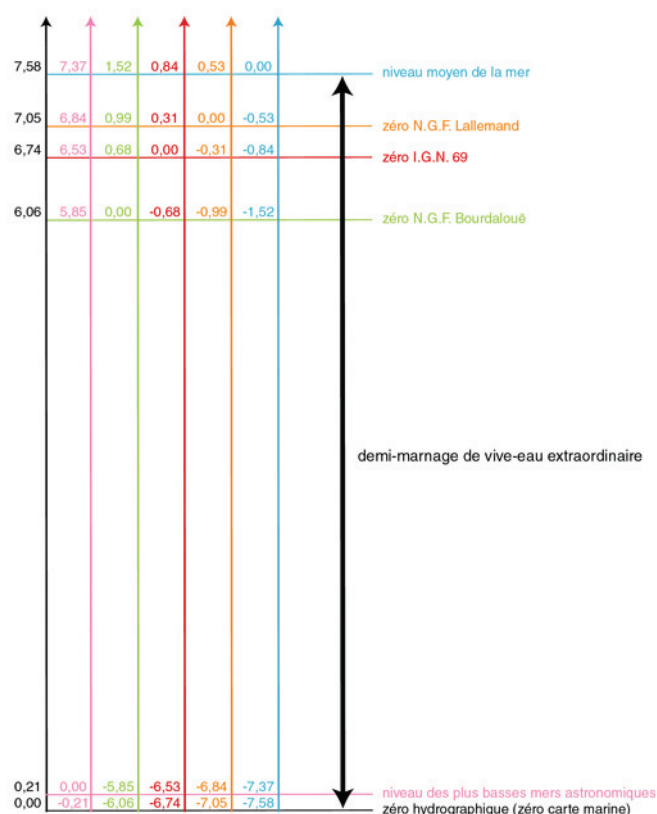


Figure 2

Le zéro N.G.F. Bourdalouë

En 1857, Paul Adrien Bourdalouë, chargé du nivellement général de la France, estime qu'il est nécessaire de disposer d'un niveau de référence identique sur l'ensemble du territoire. Dès 1859, le nivellement des réseaux de base montre que les niveaux moyens de la mer observés dans différents ports de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Océan Atlantique sont plus élevés qu'en Méditerranée. Celle-ci présentant par ailleurs de très faible marnages, il est décidé que le niveau moyen auquel les altitudes N.G.F. devront être rapportées sera celui de la Méditerranée. C'est ainsi que le réseau Bourdalouë est établi par comparaison des différents niveaux moyens de la mer en France de 1857 à 1864.

Le zéro N.G.F. Bourdalouë est officiellement fixé par une décision ministérielle du 13 janvier 1860 comme étant le niveau moyen de la mer à Marseille, c'est à dire la côte 0,40 m de l'échelle des marées en marbre du Fort Saint-Jean. Ce zéro de référence sera utilisé jusqu'en 1890.

En baie du Mont-Saint-Michel, il est situé 6,06 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2).

Le zéro N.G.F. Lallemand

En 1878, le ministère des Travaux Publics décida de jeter les bases d'un nouveau nivellement de la France destiné à reprendre, vérifier et compléter celui de Bourdalouë. A cet effet, en 1884, était créé le service du Nivellement Général de la France, confié à Charles Lallemand. Le réseau primordial Lallemand a été établi de 1884 à 1892 puis complété par celui

- d'Alsace-Lorraine (1920-1922) et enfin par celui de Corse (1926-1931). Les cotes y sont calculées en système orthométrique.

Le zéro N.G.F. Lallemand, dit "Zéro Normal", a été fixé à partir d'observations marégraphiques exécutées à l'observatoire marégraphique situé à l'anse Calvo à Marseille Lallemand d'après des observations du marégraphe du Fort Saint-Jean de Marseille pendant la période du 1^{er} février 1885 au 1^{er} janvier 1897. Ces observations ont permis de fournir un zéro correspondant à la cote 0,329 m de l'échelle de marée du fort St-Jean ; il se trouve donc à par Charles. Il correspond à la côte 0,329 m du marégraphe, soit 71 millimètres en dessous du zéro N.G.F. Bourdalouë. Ce zéro de référence remplace en 1890 le zéro N.G.F. Bourdalouë. Il sera utilisé jusqu'en 1969. Les altitudes sont exprimées dans le système orthométrique.

En baie du Mont-Saint-Michel, le zéro N.G.F. Lallemand est situé 7,05 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2).

Le zéro N.G.F.-I.G.N. 1969

Le réseau primordial I.G.N. 69 a été établi de 1962 à 1969 par l'I.G.N.. Les altitudes y sont exprimées dans le système normal. Ce réseau a conservé au départ le zéro de référence N.G.F. Lallemand. Il est actuellement le réseau de nivellement terrestre officiel en France métropolitaine à l'exclusion de la Corse.

Le calcul dans le système orthométrique des altitudes du réseau N.G.F.-I.G.N. 69 montre, en conservant le même point de départ à Marseille, que la différence entre ces altitudes et celles du réseau N.G.F. Lallemand croissait du sud au nord pour atteindre 60 cm à Dunkerque. En revanche, le calcul des altitudes du réseau N.G.F.-I.G.N. 69 dans les systèmes orthométrique et normal montre un écart n'atteignant que quelques cm et ce en zone de montagne. L'écart entre les deux systèmes d'altitudes N.G.F.-Lallemand et N.G.F.-I.G.N. 1969 est donc très peu lié au changement de type d'altitude mais provient de l'évolution des méthodes opératoires, instrumentales, et de calcul.

Le réseau I.G.N. 69 est régulièrement recalculé (calcul de compensation). Ainsi, les cotes des repères de l'I.G.N. 69 par rapport au Zéro Normal peuvent avoir été modifiées depuis la première détermination de l'altitude des repères en 1969. En baie du Mont-Saint-Michel, le zéro I.G.N. 69 est situé 6,74 mètres au dessus du zéro hydrographique (figure 2).

Conclusion

L'échelle de concordance des références altimétriques proposée dans cette synthèse est actuellement utilisée avec succès par les équipes de recherche françaises travaillant en baie du Mont-Saint-Michel. Elle n'est valable que pour la zone de marée dont le port de référence est Saint-Malo. A long terme, elle pourrait être réajustée en fonction de l'évolution du niveau de la mer, si une référence altimétrique nouvelle n'est pas définie d'ici là. ●

Remerciements

Merci à Monsieur Bernard Simon de l'Établissement Principal du Service Hydrographique de la Marine pour ses conseils et la relecture du présent article.

Christophe MARGUERIT

Muséum National d'Histoire Naturelle - Département Milieux et Peuplements Aquatiques.

Références

- [1] **Courtier M. A.**, Marées, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, (1938), 284 p.
- [2] **Le Rhun J.**, Communication personnelle, Institut Géographique National, Paris, (1999).
- [3] **Pineau M.L.**, Courants de marée dans le golfe Normand-Breton, Rapport d'étude n° 008/97, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, (1997), 88p.
- [4] **Service Hydrographique de la Marine**, Table des marées des grands ports du monde, 540-MJA, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, Paris, (1982), 186p.
- [5] **Service Hydrographique de la Marine**, Communication personnelle, (2000).
- [6] **Simon B.**, Niveaux caractéristiques et coefficient de marée - Calcul direct à l'aide des constantes harmoniques, Rapport d'étude n° 001/01, Éditions du Service Hydrographique de la Marine, (2001a), 30p.
- [7] **Simon B.**, Communication personnelle, Établissement Principal du Service Hydrographique de la Marine, (2001b).

Abstract

Key words : altimetric references/tidal zones

This article looks at the concordance between the altimetric references of the Mont-Saint-Michel Bay. It discusses more particularly the problem of levelling tidal zones and the difficulty to fix a hydrographical zero to establish marine maps and tide-table.