



Avant-propos

Cette fiche a été rédigée dans le cadre du Groupe de travail « Tempêtes et submersions historiques » et plus particulièrement au sein du sous-groupe « Types de données » réunissant plusieurs organismes, et dont l'objectif est de mutualiser les informations de tempêtes et de submersions marines historiques. Cette fiche relative aux référentiels verticaux fait partie d'un catalogue de données pour accompagner et comprendre la base de données relative aux tempêtes historiques. Cet état de l'art pourrait nécessiter d'être complété en fonction de besoins ou applications particulières.

L'élaboration de cette fiche, fruit d'un travail collaboratif et pluridisciplinaire, a été pilotée par Gaël André (Shom) et Franck Mazas (Artelia)

Nous remercions également ici l'ensemble des personnes ayant collaboré avec leurs contributions écrites et/ou leurs relectures : Aurélie Maspataud (BRGM) et Sabine Cavellec (Cerema).

Les termes suivis d'un astérisque * sont définis dans un glossaire spécifique associé au catalogue de données.

Résumé

Cette fiche présente les principaux référentiels verticaux intéressant le niveau marin et la submersion marine. Dans un premier temps, la distinction entre les systèmes géodésiques et les systèmes altimétriques est exposée. Dans un second temps, les principales catégories de référentiels verticaux sont discutées : référentiels globaux (ITRF, WGS84...), référentiels terrestres (RGF93, NGF-IGN69...) et référentiels maritimes (CM, ZH), ainsi que les modes de conversion de l'un à l'autre.



Caractéristiques de la donnée

Définition

Préalable important : il est crucial de distinguer la notion de niveau ou de cote altimétrique*, c'est-à-dire une position verticale, de celle de hauteur ou de profondeur*, c'est-à-dire une distance verticale.

Un niveau est ainsi toujours rattaché à un référentiel altimétrique* (**Figure 1**), autrement dit la composante verticale d'un système de coordonnées, combinant une origine (le zéro altimétrique), une direction (la verticale) et un sens (vers le haut ou vers le bas). Ainsi, la valeur d'un niveau est entièrement dépendante du référentiel altimétrique retenu.

En revanche, une hauteur est la distance verticale entre deux niveaux : ainsi de la hauteur d'un ouvrage entre sa crête et son pied, de la hauteur d'eau entre le niveau de la surface libre et la cote des fonds, etc. De ce fait, la valeur d'une hauteur définie est invariante et totalement indépendante du référentiel altimétrique retenu.

Exemple : considérant un niveau marin à + 4 m ZH et un fond à - 1 m ZH, la hauteur d'eau (profondeur) est de (+ 4) - (- 1) = 5 m. Si le ZH est situé 3 m sous le zéro terrestre IGN69, le niveau de la mer, respectivement du fond, est de + 1 m IGN69, resp. - 4 m IGN69, mais la hauteur d'eau reste égale à (+ 1) - (- 4) = 5 m.

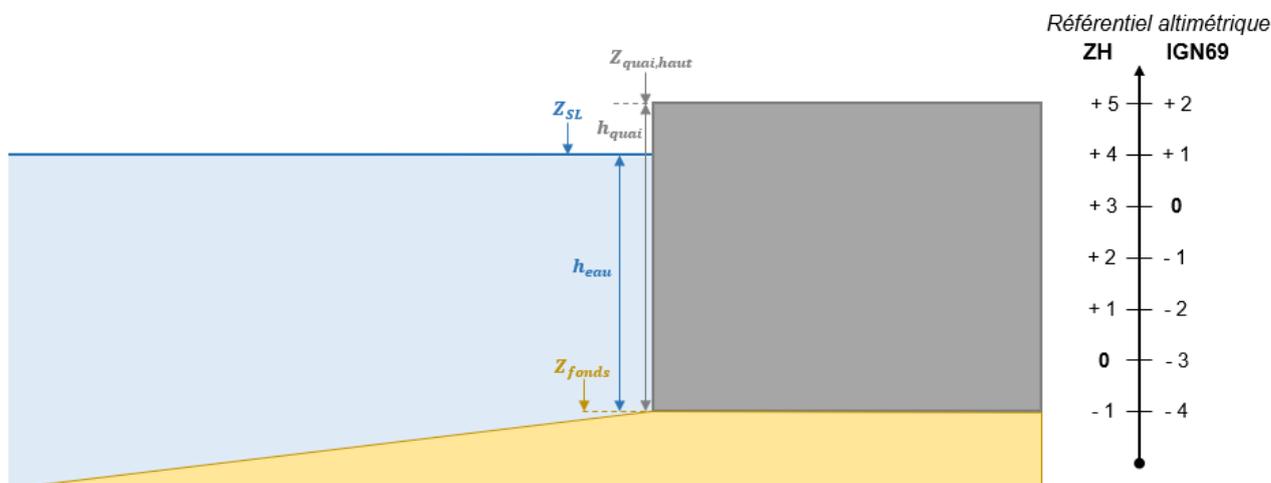


Figure 1 – Référentiels altimétriques en vigueur.

Recommandation : toujours accompagner la valeur d'un niveau ou d'une cote altimétrique par son unité (mètres, pieds...) suivi du référentiel considéré. Pour plus de clarté, on peut également systématiser l'emploi du signe '+' pour les valeurs positives : + 2,47 m ZH ; - 3,18 m IGN69...

Note : le Shom parle usuellement de mesure de la hauteur d'eau, considérant qu'il fournit une hauteur d'eau au-dessus du Zéro Hydrographique (ZH). En réalité, c'est bien le niveau de la mer qui est mesuré (par lecture d'une échelle à marée, par marégraphe à flotteur ou par capteur ultrasonique), néanmoins le terme historique de « hauteur d'eau » perdure toujours.



REFERENTIELS VERTICAUX

Systèmes de coordonnées, référentiels géodésiques et référentiels altimétriques

Système de coordonnées*

La localisation mathématique d'un objet dans un système de référence terrestre nécessite un système de coordonnées tridimensionnel (X, Y, Z) . Généralement, on utilise principalement un système de coordonnées cartésiennes ou un système de coordonnées curvilignes (sphériques).

Référentiels géodésiques*

En géodésie, la position d'un point est définie par une surface mathématique de référence : un ellipsoïde de révolution. Cette surface, définie par ses demi-grand axe a et demi-petit axe b , est définie de façon à approcher au plus près le géoïde (voir plus loin), ou plus simplement dit, la surface terrestre.

On parlera alors de *hauteur ellipsoïdale* pour la distance h entre le point considéré et le pied de la normale à l'ellipsoïde, et les *référentiels géodésiques* consistent notamment en la définition d'un ellipsoïde bien choisi et de son point fondamental.

Référentiels altimétriques*

En revanche, la notion d'*altitude** s'entend d'un point de vue énergétique plutôt que géométrique : pour gagner en altitude, il faut fournir un travail contre la pesanteur. Ce choix permet donc que « l'eau coule vers le bas ». Pour un *référentiel altimétrique*, la surface de référence est issue du champ gravitationnel de la Terre : il s'agit du *géoïde**, la surface équipotentielle qui définit le mieux la forme de la Terre et notamment suit au plus près le niveau moyen des océans.

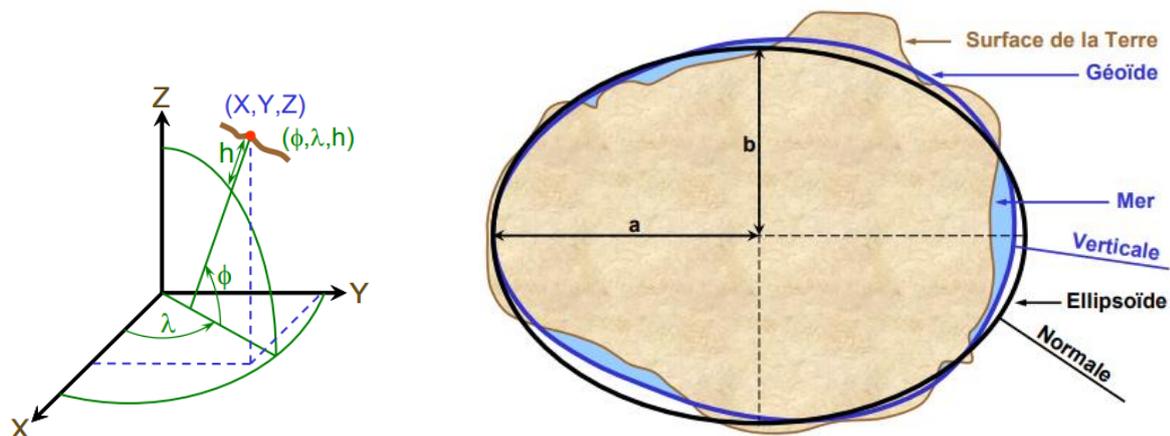


Figure 2 - Gauche : systèmes de coordonnées cartésien et curviligne, droite : ellipsoïde et géoïde

Une surface équipotentielle* est l'ensemble des points où le potentiel gravitationnel W (en m^2/s^2) est constant. La différence de potentiel entre deux surfaces le long de la verticale s'écrit $dW = -gdH$. Une analogie simple à la relation pesanteur / potentiel de pesanteur / équipotentielle est la relation pente / altitude / courbe de niveau en topographie.

Le géoïde est donc la surface équipotentielle la plus proche du niveau moyen des océans (Figure 3). Elle est très irrégulière (forme de « patatoïde ») et ses ondulations de part et d'autre de l'ellipsoïde peuvent atteindre jusqu'à cent mètres. L'altitude est ainsi définie par rapport au géoïde, mais sa détermination précise nécessite des mesures et reste soumise à des incertitudes.



REFERENTIELS VERTICAUX

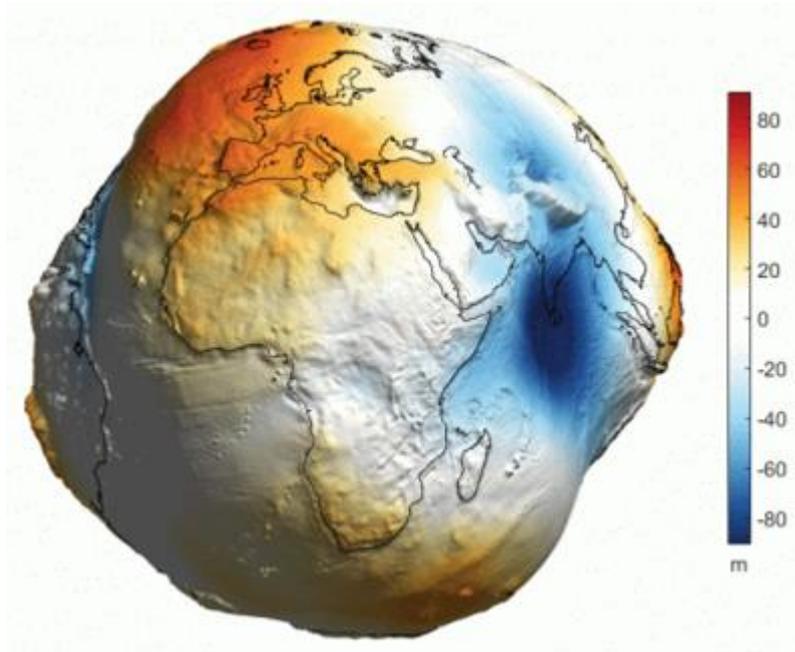


Figure 3 - Vue (très) exagérée de la position du géoïde par rapport à l'ellipsoïde (en m) : en rouge les zones où le géoïde est au-dessus de l'ellipsoïde, en bleu les zones où il est en-dessous

Enfin, l'altitude étant déterminée vis-à-vis de la pesanteur et non de façon géométrique, et le non-parallélisme des surfaces équipotentielles empêchant toute correspondance (un écart donné de potentiel W ne correspond pas à une hauteur donnée), diverses définitions de l'altitude existent, notamment l'*altitude normale*, l'*altitude orthométrique* et l'*altitude orthométrique normale*. Ainsi, avec un même modèle de géoïde, plusieurs valeurs d'altitudes peuvent être fournies.

Plus de précisions sur la définition et le calcul des altitudes peuvent être trouvées sur le site de l'IGN¹.

Généralités

On peut distinguer trois grandes catégories de référentiels (géodésiques ou altimétriques) intéressant la mesure du niveau d'eau et les enjeux de submersion marine :

- les référentiels globaux, à l'échelle de tout ou partie du globe terrestre ;
- les référentiels terrestres nationaux ou régionaux, à l'échelle d'un pays ou d'un territoire, historiquement rattachés aux travaux de cartographie du territoire émergé ;
- les référentiels maritimes, historiquement rattachés aux travaux hydrographiques : levés bathymétriques et enjeux de navigation.

Référentiels globaux

Comme décrit plus haut, les référentiels globaux sont généralement de type géodésique (rattachés à un ellipsoïde défini mathématiquement et donc parfaitement connu). Des référentiels altimétriques globaux sont possibles mais beaucoup plus compliqués à définir, du fait de la connaissance nécessaire du champ gravitationnel global.

¹ https://geodesie.ign.fr/index.php?page=precision_altitudes



REFERENTIELS VERTICAUX

À titre d'exemple, on présente ci-dessous trois systèmes géodésiques, qui regroupent un ellipsoïde propre, un méridien origine (zéro des longitudes) et une unité d'angle (degré ou grade).

Système géodésique	Ellipsoïde	Demi-grand axe a	Demi-petit axe b	Aplatissement $f = \frac{a-b}{a}$	Origine	Unité
ED50	Hayford 1909	6 378 388,0	6 356 911,946 1	1/297,000 000	Potsdam	Degré
ITRF	IAG GRS 1980	6 378 137,0	6 356 752,314	1/298,257 222 101	Greenwich	Degré
WGS84	WGS84	6 378 137,0	6 356 752,314 140	1/298,257 223 563	Greenwich	Degré

Référentiels altimétriques terrestres

Historiquement, un référentiel altimétrique terrestre est établi à l'échelle d'un pays, ou d'un territoire contigu d'un pays (territoire métropolitain, territoire d'outre-mer...), pour les travaux de topographie. Le choix est alors fait de définir l'altitude par rapport au niveau moyen de la mer, mesuré en un lieu donné et sur une époque donnée.

Au fil du temps, cette référence verticale peut être amenée à évoluer, de même que le nivellement du territoire (gain de précision des mesures altimétriques), voire la définition même de l'altitude.

Système altimétrique et nivellement

Le Nivellement Général de la France (NGF) constitue un réseau de repères altimétriques disséminés sur le territoire métropolitain. Les repères altimétriques permettent de déterminer l'altitude en chaque point du territoire².

En NGF/IGN69, l'altitude zéro (NGF 0) de référence a été déterminée à partir des observations marégraphiques réalisées au marégraphe de Marseille entre le 1er février 1885 et le 1er janvier 1897 et se situe à la cote 0,329 m de l'échelle de marée du fort Saint-Jean, ou 1,661 m sous le repère fondamental situé sous le local du marégraphe. Le type d'altitude est l'altitude normale (contre un type d'altitude orthométrique pour le précédent réseau Lallemand).

En Corse, le système d'altitude est le NGF/IGN78 dont l'origine a été établie à partir des observations marégraphiques réalisées au Marégraphe d'Ajaccio entre 1912 et 1937.

Lorsque l'altitude est fournie dans le précédent réseau Lallemand, il est nécessaire d'utiliser des grilles de conversion ortho-normales pour obtenir l'altitude dans le référentiel altimétrique en vigueur³. L'écart entre les altitudes Lallemand et les altitudes IGN69 augmente du sud vers le nord et peut atteindre près de 60 cm à Dunkerque.

Référentiels géodésiques nationaux

En plus des systèmes de référence géodésique globaux, en fonction de la zone géographique du lieu, différents systèmes de référence géodésiques locaux doivent être utilisés. En France, ceux-ci sont définis légalement par l'Arrêté du 5 mars 2019 portant application du Décret n° 2019-165 du 5 mars 2019 relatif au système national de référence de coordonnées. Les différents systèmes géodésiques légaux (locaux) utilisés en France et dans les territoires d'outre-mer sont des systèmes statiques (c.à.d. s'affranchissant des

² https://geodesie.ign.fr/index.php?page=reseaux_nivellement_francais#titre1

³ <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>



REFERENTIELS VERTICAUX

mouvements des plaques tectoniques), listés ci-dessous (**Tableau 1**). Ces systèmes sont définis par rapport à une réalisation de l'ITRS à une époque donnée.

Tableau 1 - Systèmes légaux de référence de coordonnées (Arrêté du 5 mars 2019) et équivalence ITRF

Lieu	Nom système local	Équivalence ITRF
Guyane	RGFG95	ITRF93@1995
Saint-Pierre et Miquelon	RGSPM06	ITRF2000@2006
Mayotte	RGM04	ITRF2000@2004
Nouvelle Calédonie	RGNC91-93	ITRF90@1989
Polynésie	RGPF	ITRF92@1993
Antilles	RGAF09	ITRF2005@2009
Réunion	RGR92	ITRF91@1993
France	RGF93 (v2b)	ETRF2000@2019

Le Réseau Géodésique Français 1993 (RGF93) utilisé en France métropolitaine a été créé parallèlement au déploiement du système GPS, pour pallier une inadéquation de plus en plus importante du réseau géodésique en usage en France (la "Nouvelle Triangulation de la France" ou NTF). Une grille fournissant les paramètres de transformation entre NTF et RGF93 est fournie par l'IGN⁴.

Relations entre un référentiel géodésique et un référentiel altimétrique

Des surfaces de conversion permettant le passage d'un référentiel géodésique à un référentiel altimétrique existent.

En France, les grilles de conversion altimétrique fournies par l'IGN permettent de convertir les hauteurs ellipsoïdales en altitudes⁵. En France continentale, la surface de conversion altimétrique en vigueur est la surface RAF20.

Référentiels altimétriques maritimes

Le zéro hydrographique (ZH)*, appelé aussi cote marine (CM)*, est le niveau de référence commun aux cartes marines et aux niveaux marins, à partir duquel sont comptées d'une part les profondeurs portées sur les cartes marines et d'autre part les niveaux marins prédits et observés. C'est, en quelque sorte, l'équivalent en mer de la surface de référence des altitudes à terre.

Il est choisi en France au voisinage du niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA*), sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement. Par conséquent, le niveau marin se situant quasiment toujours au-dessus du ZH, la cote des fonds exprimée en ZH peut être interprétée comme une profondeur (hauteur d'eau) minimale, ce qui est très utile pour la navigation. Dans d'autres pays, le choix a été fait de se référer au niveau moyen ou au niveau moyen des basses mers. Cependant, l'Organisation

⁴ <https://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/gr3df97a.txt>

⁵ <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>



REFERENTIELS VERTICAUX

Hydrographie Internationale a recommandé le choix d'un zéro des cartes marines proche du niveau PBMA.

Zones de marée* et relation de concordance

Les zéros hydrographiques des ports français ont généralement été adoptés indépendamment les uns des autres. Il en résulte que l'écart entre le zéro hydrographique et le niveau des plus basses mers astronomiques peut varier entre deux zones de marée différentes.

Il existe actuellement 13 zones de marées distinctes en France métropolitaine, rattachées chacune à un port de référence où le zéro hydrographique est déterminé à partir des observations marégraphiques (Figure 4).

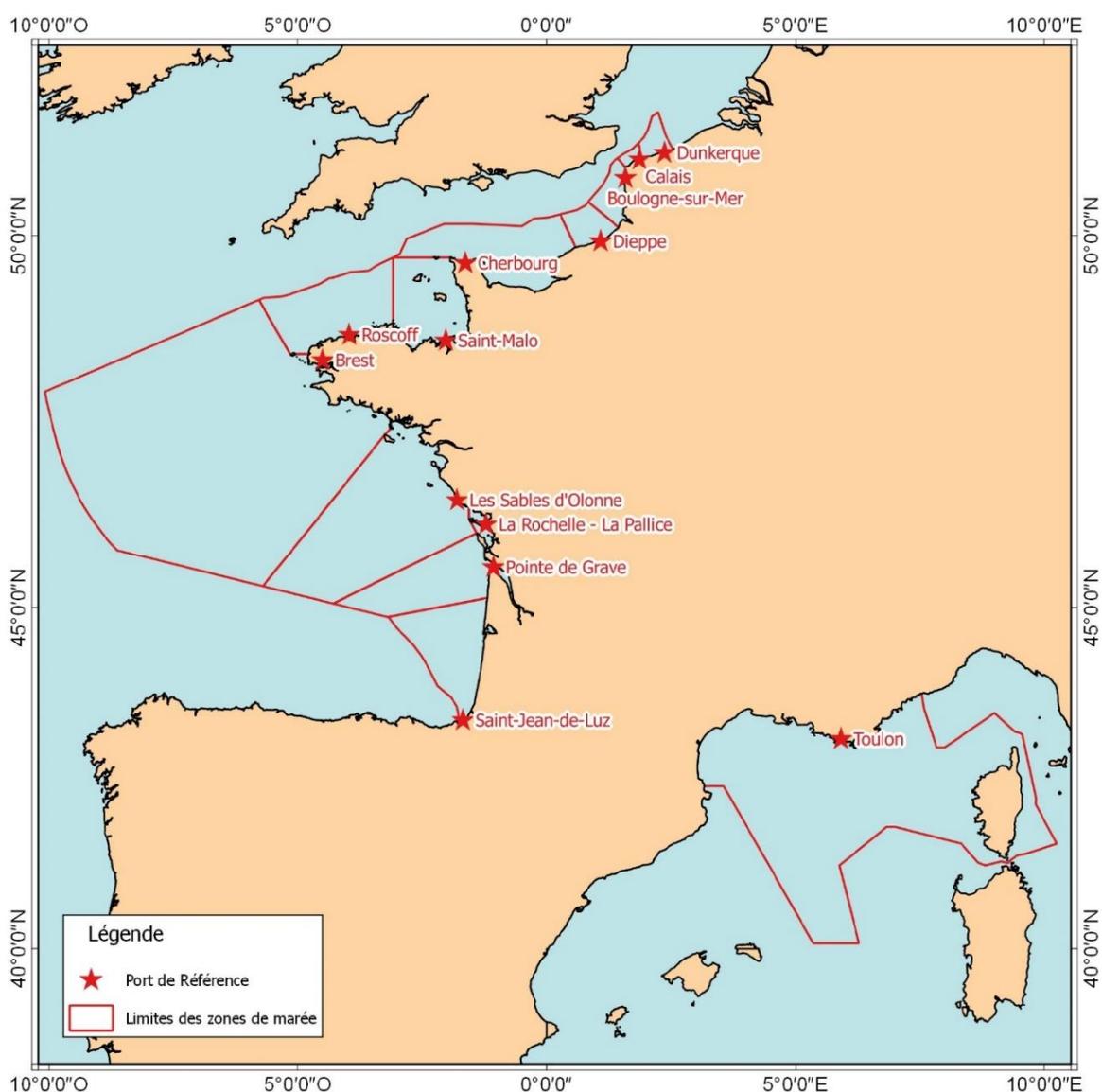


Figure 4 - Carte des zones de marée sur les côtes françaises métropolitaines

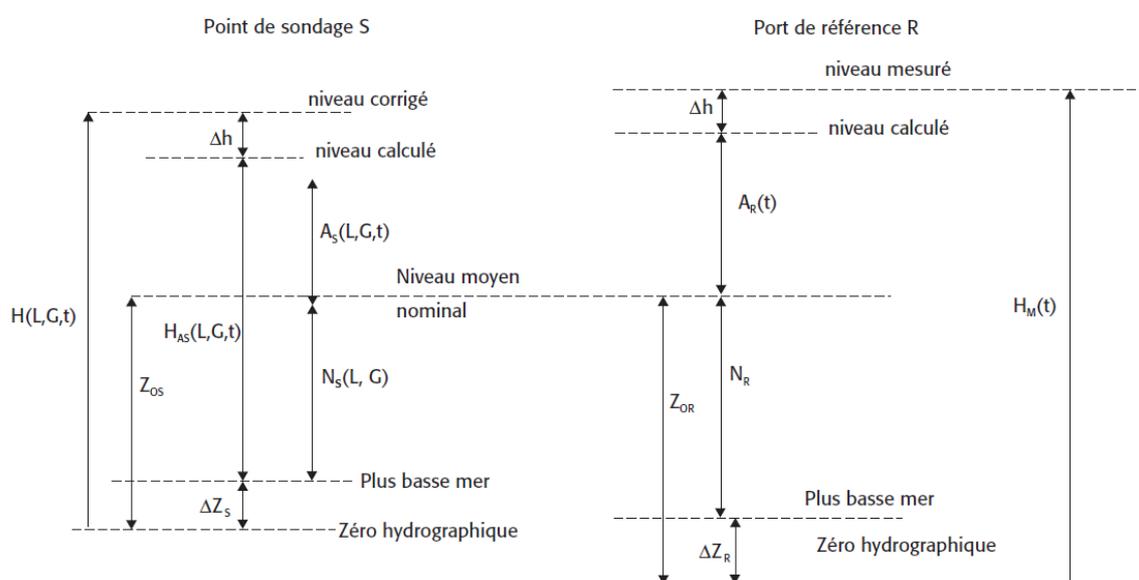


REFERENTIELS VERTICAUX

Une relation de concordance permet de déterminer, en chaque point de la zone de marée, le zéro hydrographique en accord avec celui du « port de référence », tel que :

$$\frac{\Delta Z_S}{\Delta Z_R} = \frac{N_S}{N_R}$$

Où N_S et N_R sont les niveaux moyens rapportés au niveau des plus basses mers (PBMA) et ΔZ_S et ΔZ_R la cote du niveau des plus basses mers rapportée au zéro hydrographique, respectivement au point de sondage et au port de référence.



Sur le long terme, le gain en précision des mesures marégraphiques peut amener à redéfinir le zéro hydrographique au port de référence, cette modification sera répercutée sur toute la zone de marée. Par exemple, le ZH a été modifié en 1996 à Brest et à Saint-Nazaire ; il est donc important de s'assurer que le ZH n'a pas été redéfini depuis la date de la mesure considérée.

Relations entre le référentiel maritime et les référentiels globaux ou nationaux

Le long du littoral, on peut passer du référentiel altimétrique maritime (ZH / CM) au référentiel altimétrique terrestre (par ex. IGN69). En France, le Shom publie et met à jour les Référentiels Altimétriques Maritimes (RAM) qui fournissent la cote du zéro hydrographique dans le système altimétrique terrestre légal aux ports de référence et secondaires (Figure 5).



REFERENTIELS VERTICAUX

Cas des marées de type semi-diurne

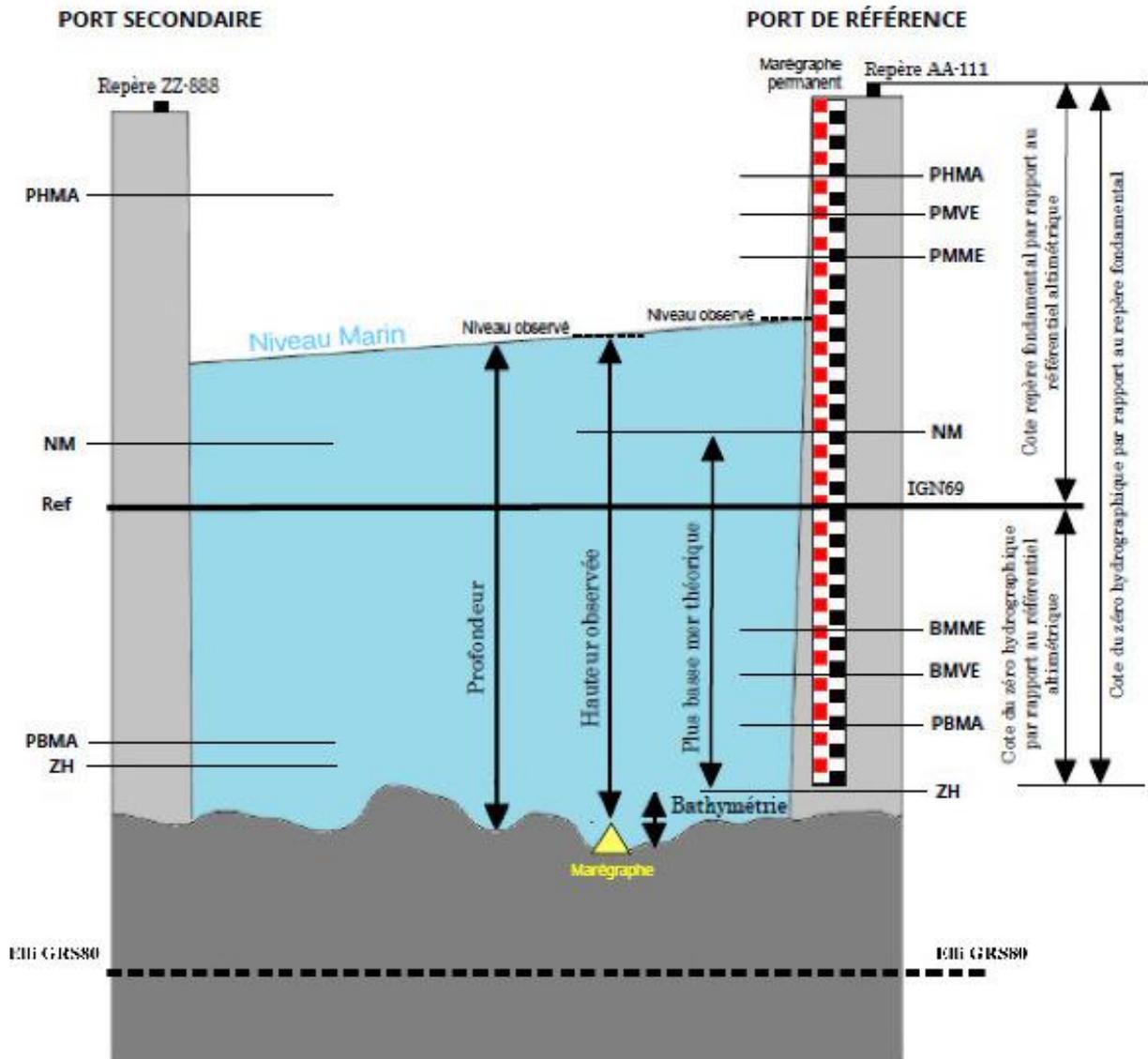


Figure 5 - Schéma récapitulatif des niveaux de marée (type semi-diurne)

Plus au large, les systèmes altimétriques terrestres ne sont plus définis. On peut alors se référer aux systèmes géodésiques globaux. Ainsi, le produit BathyElli contient la réalisation surfacique de la hauteur ellipsoïdale de la référence verticale maritime Zéro Hydrographique.



REFERENTIELS VERTICAUX

Incertitudes et limites

Les systèmes altimétriques reposent sur des estimations et des modèles du champ de gravité qui est imparfaitement connu.

De plus, les opérations de nivellement terrestres sont également soumises à des incertitudes de mesures, de même que les mesures GNSS pour la détermination de la hauteur ellipsoïdale.

Enfin, les repères des référentiels altimétriques peuvent bouger du fait des mouvements du sol : se référer à la fiche "Mouvement verticaux du sol" correspondante.

Organisme(s) clés / en jeu

Shom (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine)

IGN (Institut Géographique National)

EPSG : <https://epsg.org/home.html>

GGOS (Global Geodetic Observing System)

Sources, vecteurs de diffusion/de porter à connaissance

Références Altimétriques Maritimes (RAM) du Shom, visualisables et téléchargeables sur <https://diffusion.shom.fr/references-altimetriques-maritimes-ram.html>

Grilles de conversion altimétrique - Géodésie – IGN. <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>

Surfaces BATHYELLI v2.1. <https://diffusion.shom.fr/donnees/references-verticales/surfaces-bathyelli-v2-1.html>

Autres usages de la donnée

Les autres usages de la donnée qui peuvent être cités sont les travaux portant de manière générale sur la bande littorale, notamment en termes de géomorphologie, de risques côtiers (érosion, submersion marine) et portant sur la modélisation hydrodynamique. Le travail à l'interface terre-mer nécessite bien souvent d'utiliser des données topographiques et bathymétriques, de sources hétérogènes et exprimées dans des référentiels verticaux différents, nécessitant d'opérer des conversions altimétriques entre les différentes sources de données (par exemple entre référentiel maritime et référentiel terrestre).



Références clés

<https://geodesie.ign.fr/>

<https://geodesie.ign.fr/?page=glossaire>

<https://ggos.org/about/org/fa/unified-height-system/>

<http://www.euref.eu/symposia/2016SanSebastian/01-05-Alberts.pdf>

http://www.euref.eu/symposia/book2000/P_99_115.pdf

Références altimétriques maritimes (RAM) Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée, édition 2022, Shom.

<https://diffusion.shom.fr/donnees/references-verticales/references-altimetriques-maritimes-ram.html>

Pour aller plus loin

Guide sur les référentiels géodésiques et altimétriques au Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec, Juin 2010.

https://mern.gouv.qc.ca/documents/territoire/guide_sur_les_referentiels.pdf

Conversion altimétrique RGF93-IGN69 - Correction des altitudes GPS en France. Conseil National de l'Information Géographique, Groupe de Travail Permanent « Positionnement Statique et Dynamique », Février 2000. http://bazar.perso.free.fr/Files/Other/DOCUMENTATION/topo/conv_alti%20IGN93-RGF69.pdf

Fiches en lien

Fiche « Mouvements verticaux du sol »

Fiche « Prédiction de marée »



REFERENTIELS VERTICAUX

