



# MESURES DU NIVEAU MARIN

## 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, capitaliser les connaissances et expertiser les données associées à des événements historiques.

Cette fiche relative à la mesure du niveau marin fait partie d'un catalogue de données pour accompagner et comprendre la base de données relatives 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 piloté par *Gaël André, Nathalie Giloy et Alexa Latapy (Shom)*.

Nous remercions également ici l'ensemble des personnes ayant collaboré avec leurs contributions écrites et/ou leurs relectures : *Sabine Cavellec (Cerema), Lise Bardet (IRSN), Aurélie Maspataud (BRGM), Emmanuelle Athimon (ISEN Caen), Gérard Doligez (Météo-France)*.

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

## Résumé

La marégraphie se rapporte, sans distinction dans le temps, aux instruments (échelles de marée, échelle flottante, marégraphe mécanique, marégraphe numérique), aux observatoires, aux mesures (registres papiers, marégrammes, fichiers numérisés) et à la description du phénomène des marées.

Dans cette fiche, un historique des différents appareils et supports de données utilisés au cours du temps pour mesurer le niveau de la mer est présenté. Une méthodologie non exhaustive des traitements nécessaires est également détaillée, notamment concernant la validation des données brutes. Pour les données les plus anciennes, un important travail de sauvetage est nécessaire avant de les valider et de les exploiter pour réaliser diverses analyses (calcul des niveaux moyens et des tendances d'évolution, analyse des événements extrêmes, évolution des caractéristiques de marée, etc.).



# MESURES DU NIVEAU MARIN

## Caractéristiques de la donnée

### Définition

La mesure du niveau marin\* revient à mesurer les variations du niveau de la mer sur des échelles de temps allant de quelques heures à quelques années. Cette fluctuation du niveau marin est la manifestation de deux phénomènes qui se superposent :

- La marée astronomique\*, phénomène déterministe pouvant être prédit (voir **fiche « Prédiction de marée »**). La marée\* correspond au mouvement à l'allure périodique du niveau de la mer, dont l'origine est l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil.
- Les mouvements aléatoires, d'origine essentiellement météorologiques et océaniques (houles\*, vagues\*), mais parfois telluriques (tsunamis), appelés surcotes\*-décotes\*.

*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.*

### Moyen(s) d'acquisition

L'observation marégraphique consiste à enregistrer le niveau marin mesuré, pour un site donné, en fonction du temps. Les techniques d'enregistrement ont évolué, depuis la transcription manuscrite de hauteurs lues, en passant par le tracé de courbes analogiques jusqu'à la technique actuelle d'enregistrement direct sur support numérique. Avec l'arrivée des enregistrements numériques, de nombreux marégraphes\* ont vu le jour (pression, ultrason, radar), mais seul le marégraphe à radar, sera présenté dans cette fiche, pour de multiples raisons :

- Utilisation la plus fréquente en France ;
- Incertitude de mesure beaucoup plus faible que celle des autres systèmes ;
- Plus grande facilité d'installation ;
- Peu d'entretien nécessaire du matériel.

Pour être le plus exhaustif possible, les données altimétriques spatiales du niveau de la mer, disponibles depuis les années 90, sont également succinctement présentées afin de lister l'ensemble des données disponibles à ce jour.

### L'échelle de marée

Les premières mesures de marée réalisées à Brest au 17<sup>ème</sup> siècle ont été effectuées à l'aide d'une échelle de marée afin de relever durant la journée les heures et niveaux des pleines et basses mers.

L'échelle de marée est donc la source des premières données marégraphiques et reste un élément essentiel de l'observatoire de marée encore à ce jour (cf. Section « Un observatoire de marée type ») car elle constitue la seule source de mesure directe du niveau de la mer.



# MESURES DU NIVEAU MARIN

L'échelle de marée est une règle verticale généralement adossée à un quai. La graduation est formée de deux bandes de carreaux de 10 cm de côté, alternativement rouges et noirs (Figure 1 gauche). Le niveau de l'eau est lu au centimètre près en interpolant à vue dans le carreau. Les niveaux d'eau sont relevés soit à chaque pleine mer/basse mer soit à un pas de temps plus régulier (15min, 1h) et sont retranscrits dans des journaux appelés des « registres de marée » (Figure 1 droite).

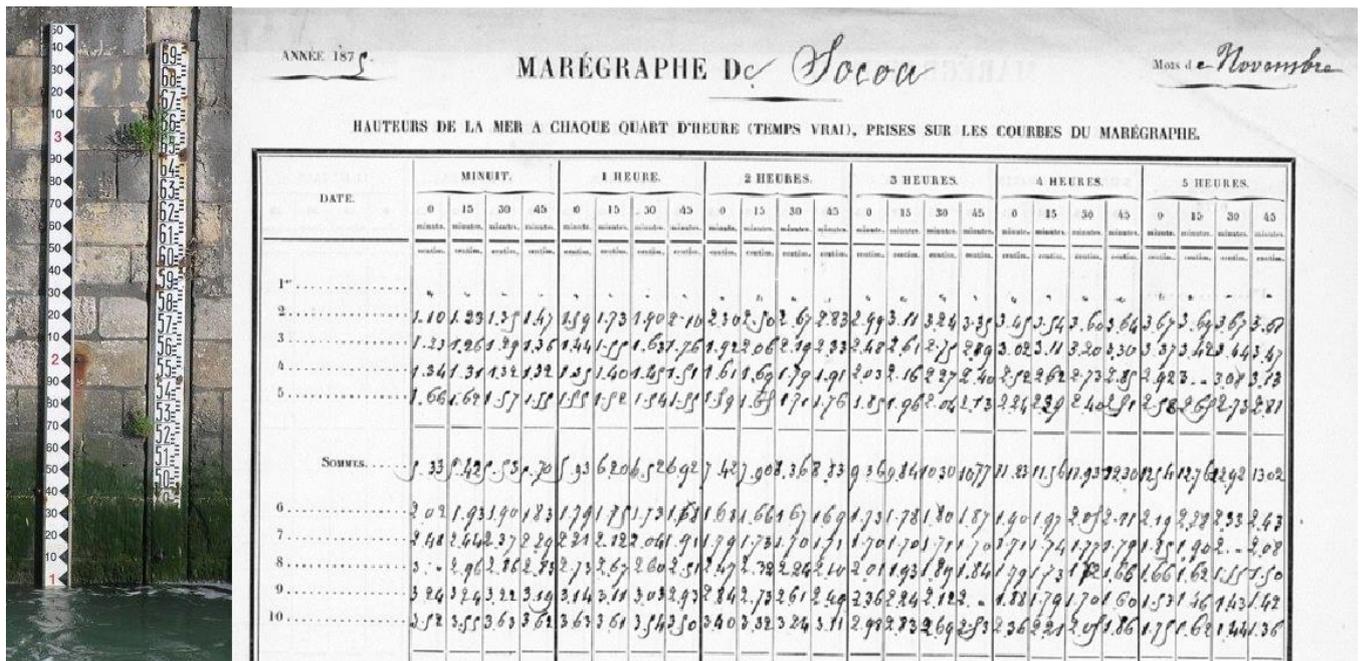


Figure 1 - Exemple d'une échelle de marée (gauche). Crédits : Shom ; exemple d'un registre de marée : observations toutes les 15 minutes effectuées à Socoa (Saint-Jean-de-Luz) en Novembre 1875 (droite). Source : archives du Shom.

## Les marégraphes à flotteur ou marégraphes « analogiques »

Le marégraphe sert à enregistrer les mouvements verticaux de la surface de la mer. Le premier marégraphe à flotteur a été mis au point par l'ingénieur hydrographe Chazallon et reste encore aujourd'hui la source de la plupart des observations disponibles. En 1859, il y en a une dizaine en fonction sur le littoral français. À partir des années 1990, les marégraphes à flotteurs sont progressivement remplacés par des marégraphes numériques (à ultrason puis radar).

Le fonctionnement du marégraphe à flotteur (Figure 2) repose sur le principe suivant : les variations de hauteur subies par le flotteur sont transmises via un système de câbles, de poulies et d'engrenages et transformées en déplacements vertical d'un stylet sur une feuille de papier enroulée sur un tambour entraîné par un système d'horlogerie qui lui fait faire un tour en 24h. Les feuilles de papier enregistrant les hauteurs d'eau sont appelées des « marégrammes\* ».

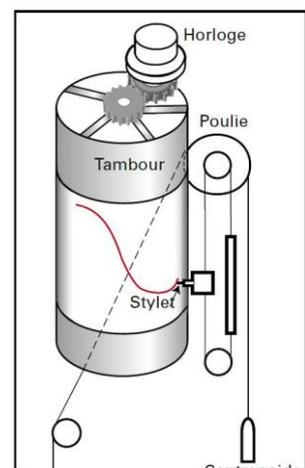


Figure 2 - Principe du marégraphe à flotteur (source : Shom)



# MESURES DU NIVEAU MARIN

Le flotteur est placé dans un puits de tranquillisation relié à l'extérieur par un conduit situé au-dessous du niveau des plus basses mers. Le puits a pour but d'amortir les oscillations rapides telles que les vagues ou la houle.

## Les marégraphes numériques radars



Figure 3 - Marégraphe KHRONE Optiwave déployé à Sainte-Marie (La Réunion) - RONIM (Crédits SHOM, Noé Poffa, octobre 2011).

La mesure du niveau d'eau par ondes radars commence à apparaître à la fin des années 1980. La France est l'un des premiers pays à en généraliser son utilisation au début des années 2000 (Figure 3). Son principe de fonctionnement est le suivant : le marégraphe calcule la différence de fréquence entre la fréquence d'émission actuelle et la fréquence reçue par le capteur après réflexion du signal sur l'eau qui est directement proportionnelle à la distance. Cette fréquence différentielle est convertie en un spectre de fréquence par transformation de Fourier. La distance est ensuite calculée à partir du spectre.

Pour les observations côtières, l'avantage de l'utilisation de ce type de radars est de présenter une célérité constante (celle de la lumière) permettant une mesure de hauteur insensible sur de courtes distances aux conditions environnementales. Ces marégraphes répondent à toutes les exigences de précision, mais leur installation et leur étalonnage peuvent s'avérer délicats. Une structure au-dessus de l'eau, est nécessaire pour permettre le pointage vertical du transducteur.



# MESURES DU NIVEAU MARIN

## Un observatoire de marée type

L'observatoire de marée est une installation composée d'un ou plusieurs instruments de mesure (échelle de marée, marégraphe) et d'un ensemble de repères de nivellements destinés à conserver les niveaux de référence. Ce dispositif permet d'acquérir des hauteurs d'eau calées par rapport à un niveau de référence. En France, ces données sont rapportées au zéro hydrographique\* ou zéro des cartes marines\*.

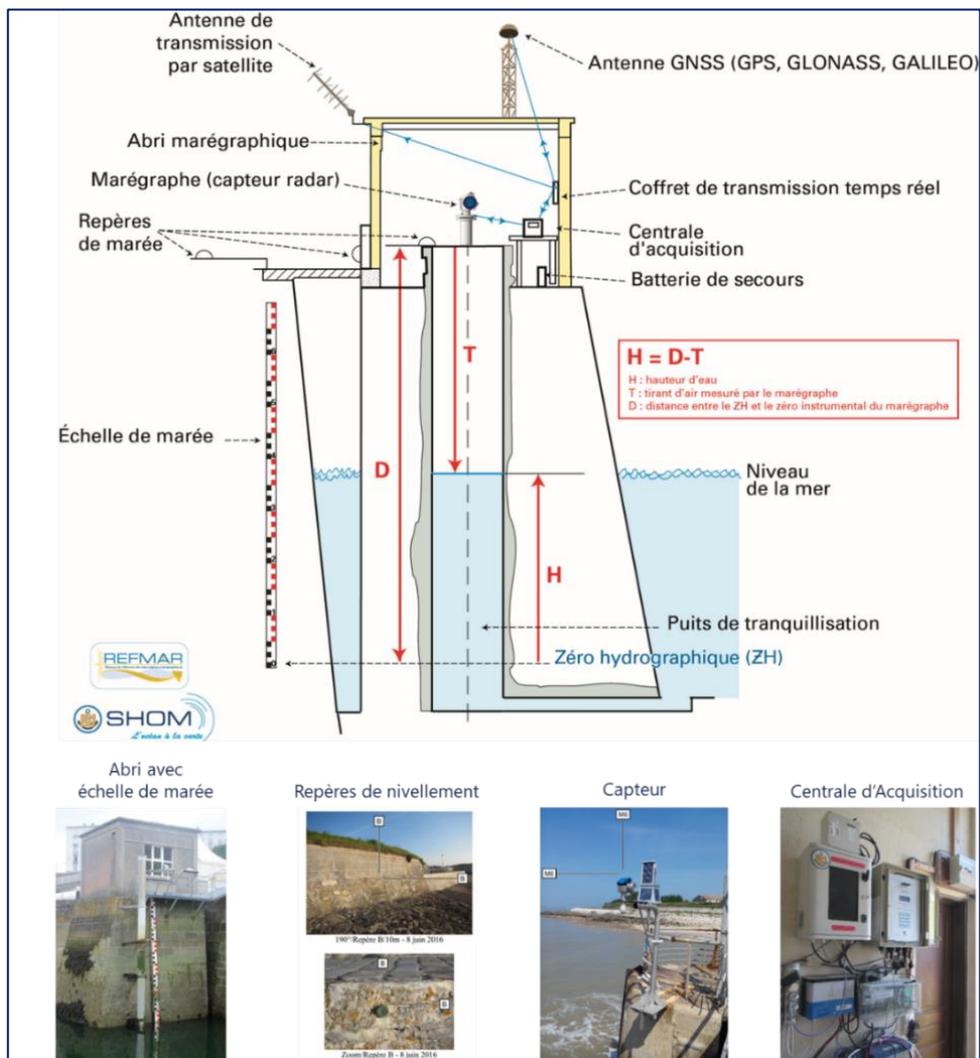


Figure 4 - Exemple d'un observatoire de marée idéal.



# MESURES DU NIVEAU MARIN

## Données altimétriques spatiales

Depuis les années 90, les mesures du niveau de la mer par altimétrie spatiale complètent les données marégraphiques. Bien qu'initiées dans les années 70, les mesures ayant une précision suffisante ont débuté en octobre 1992 avec le lancement des satellites TOPEX/Poséidon et Jason. Dès lors, 11 satellites altimétriques, fournissent des mesures du niveau des mers quasi globales (jusqu'à  $\pm 82^\circ$  de latitude). Malgré cette relative courte période d'acquisition, les données altimétriques ont l'avantage de couvrir quasiment l'ensemble du globe, contrairement aux marégraphes qui sont limités aux zones côtières (exceptions faites des capteurs installés sur les plates-formes offshore) mais qui ont, par contre, une couverture temporelle parfois conséquente.

## Traitements nécessaires

Quel que soit l'origine des données envisagées, les mesures marégraphiques sont généralement échantillonnées à intervalles réguliers. Occasionnellement, un enregistrement peut contenir des lacunes en raison d'un dysfonctionnement du marégraphe ou d'erreurs de transmission (pour les appareils récents), ou de données aberrantes ou des modifications du niveau de référence provoquées par une modification du zéro effectif du marégraphe (Commission océanographique intergouvernementale ; COI, 2016).

Le premier contrôle qualité du niveau de la mer repose sur l'inspection visuelle des données enregistrées et des résidus (différence entre les observations et les prédictions), particulièrement utiles pour détecter les défauts instrumentaux tels que les erreurs de synchronisation, les décalages verticaux et les pics ou anomalies (Shennan et al., 2015). Une autre approche du contrôle de la qualité, qui ne nécessite pas de comparaison avec les prédictions de marée, consiste à effectuer une comparaison croisée entre plusieurs capteurs d'observation du niveau d'eau, par exemple les enregistrements d'un site voisin (également connue sous le nom de "*buddy checking*"). Pour plus d'informations sur le traitement des données marégraphiques et les contrôles qualités, se référer à COI (2020, 2016).

## Choix du référencement vertical

Le niveau marin peut être exprimé par rapport à deux référentiels : le niveau absolu et le niveau relatif (cf. RAM\* Référentiel Altimétrique Maritime<sup>1</sup>).

Lorsque l'on observe un niveau de la mer par rapport à un référentiel terrestre, on parle de niveau marin relatif. Ce référentiel peut être un simple repère à terre, ou alors une échelle de marée – référencée également par rapport à un repère terrestre (voir *fiche « Référentiels verticaux »*). Cependant, la mesure reste relative, car le socle sur lequel se situe ce repère est susceptible de bouger verticalement, sous l'effet de processus naturels (rebond isostatique, mouvement tectonique bref et rapide comme des séismes), ou liés à des activités anthropiques (extraction d'eau souterraine entraînant une subsidence) (*Figure 5*).

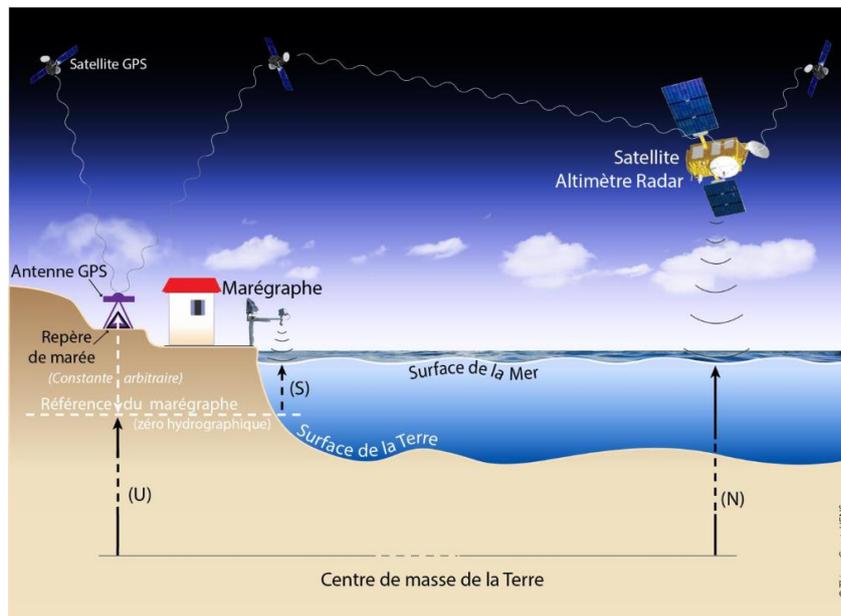
La transposition du niveau marin relatif à un référentiel absolu et global permet de comparer ces différentes observations relatives. Ainsi, le niveau de rattachement n'est plus un repère visible mais un repère fixe et indépendant des mouvements terrestres. Depuis les années 1990 et le développement de la géodésie

<sup>1</sup> <https://diffusion.shom.fr/donnees/references-verticales/references-altimetriques-maritimes-ram.html>



# MESURES DU NIVEAU MARIN

spatiale, des systèmes internationaux de référence terrestre (ITRS<sup>2</sup> *International Terrestrial Reference System* ou WGS84) dont l'origine est le centre de la masse terrestre, sont utilisés pour exprimer les coordonnées d'un point sur un ellipsoïde dans un repère géodésique de référence. La **Figure 5** présente les deux référencements possibles. De nos jours, l'installation d'un marégraphe est généralement associée à la pose d'une station GNSS à proximité, les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe peuvent être rattachés en hauteurs ellipsoïdales et donnent ainsi des niveaux marins absolus<sup>3</sup>.



**Figure 5 - Description schématique d'une station marégraphe co-localisée avec un récepteur GNSS pour la détermination de la hauteur ellipsoïdale du niveau de la mer et pour la mesure des mouvements verticaux du sol. La mesure du niveau de la mer par l'altimétrie par rapport au géoïde\* est également représentée (crédits : Thierry Guyot, LIENSs).**

## Calcul des niveaux moyens

Afin d'estimer un niveau moyen, un filtrage sur les données permet de s'affranchir de certaines oscillations hautes-fréquences (Simon, 2007). En effet, le choix d'une moyenne arithmétique sur une durée de 24h présente l'inconvénient de ne pas filtrer correctement les signaux de période inférieure à la journée, en particulier ceux de la marée pour lesquels une durée de 24h50 serait plus adaptée. Afin de moyenniser les niveaux d'eau à l'échelle d'une journée lunaire, il faut donc utiliser des filtres passe-bas comme par exemple les filtres W25, Doodson, Munk, Godin ou Demerliac. Ainsi, plus le nombre de niveaux d'eau horaire pris en compte dans le calcul est grand, plus le filtre est efficace dans la réduction des effets de la marée, mais plus son application sera limitée dans le cas d'observations marégraphe contenant des lacunes. Le filtre de Demerliac est un bon compromis recommandé par le SHOM pour le calcul des niveaux moyens journaliers (NMj) (Demerliac, 1973). Ce filtre moyenne le niveau d'eau en prenant en compte les mesures disponibles sur 3 jours (soit 72 h). Chacune des mesures va être pondérée d'un coefficient (présenté en Tableau 8.3 dans l'ouvrage de Simon (2007)).

<sup>2</sup> <https://www.iers.org/iers/en/DataProducts/ITRS/itrs.html>

<sup>3</sup> [http://refmar.shom.fr/fr/applications/maregraphiques/niveaux\\_moyens\\_des\\_mers](http://refmar.shom.fr/fr/applications/maregraphiques/niveaux_moyens_des_mers)



# MESURES DU NIVEAU MARIN

Pour calculer les niveaux moyens mensuels (NMm), une simple moyenne arithmétique des NMj (minimum 15 jours de données disponibles) est effectuée. De la même manière, les niveaux moyens annuels (NMa) sont obtenus en moyennant les NMm, pondérés par le nombre de jours pour lesquels des mesures ont été faites (minimum 11 NMm par an) (Holgate *et al.*, 2013).

## Méthode de calcul des tendances d'évolution

De manière générale, la régression linéaire est communément utilisée pour calculer des tendances d'évolution du niveau de la mer, à l'échelle mondiale et régionale, malgré l'existence de phénomènes non linéaires (Church and White, 2011 ; Frederikse *et al.*, 2020 ; Jevrejeva *et al.*, 2006 ; Steffelbauer *et al.*, 2022 ; Woodworth *et al.*, 2009 ; Zhang and Church, 2012). En 2015, le service international PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*) a changé sa méthode de calcul en utilisant les niveaux mensuels plutôt qu'annuels pour l'estimation des tendances. De plus, comme les observations des séries ne sont pas totalement indépendantes les unes des autres, le PSMSL propose une méthode plus élaborée basée sur un modèle stochastique généralisé de Gauss-Markov<sup>4</sup> pour améliorer les incertitudes sur les tendances, en tenant compte de l'autocovariance des données.

Par ailleurs, vue l'accélération de la hausse du niveau de la mer observée sur les dernières décennies plusieurs auteurs utilisent d'autres méthodes de calcul de tendance, tels que des régressions quadratiques, de Décomposition Modale Empirique (EMD) (Dangendorf *et al.*, 2019; Ezer *et al.*, 2015; Jevrejeva *et al.*, 2006; Visser *et al.*, 2015). Pour réduire l'influence de la variabilité interannuelle, il est également possible d'appliquer différentes techniques de lissage, telles que des moyennes mobiles, différents filtres passe-bas ou en corrigeant des indices climatiques (tels que ENSO - *El Niño-Southern Oscillation* - dans la région Pacifique) (White *et al.*, 2014). Pour détecter les points d'inflexion, une autre approche est d'effectuer des analyses du spectre singulier (SSA) (Moore *et al.*, 2005).

## Niveaux marins historiques – Data Rescue

### Données systématiques

Les mesures historiques du niveau de la mer étaient initialement en format papier et donc difficilement exploitables, car non numérisées pour une grande partie. Dans ce contexte, un important travail de « *Data rescue* », ou sauvetage des données historiques, est initié depuis les dernières décennies afin d'inventorier, de sauvegarder ces nombreuses données historiques et de permettre leur exploitation (Latapy *et al.*, 2022).

Le travail de « *Data rescue* » se décompose en 3 actions principales :

- La recherche des données et d'archives documentaires,
- La digitalisation/numérisation\* des données,
- La mise en cohérence des données et leur validation.

<sup>4</sup> <https://www.psmsl.org/products/trends/methods.php>



# MESURES DU NIVEAU MARIN

La réalisation d'un inventaire le plus exhaustif possible (lieu de mesure, période, type de documents/données, etc.) de l'ensemble des données analogiques disponibles est primordial afin de permettre l'estimation de leur potentiel scientifique. La difficulté de ce travail réside dans le fait que ces documents historiques ont été disséminés au cours du temps et ne sont donc pas concentrés en un lieu unique (Pouvreau, 2008).

Une fois les documents identifiés, ils doivent être dématérialisés pour permettre leur sauvegarde et ainsi pérenniser les informations qu'ils contiennent. En fonction du type de mesures (registres de marée ou marégrammes), la procédure de numérisation ne sera pas la même (pour plus d'informations sur la méthodologie, se référer à Latapy *et al.* (2022)). À l'issue de leur numérisation, les données doivent être validées. Cette étape a pour objectifs de rendre la série reconstruite cohérente en temps (généralement exprimée en TU) et en hauteur (généralement rapportée au zéro hydrographique) et de qualifier les mesures inédites en fonction de leur qualité.

Ce type de données sert de base à de nombreuses applications, notamment dans le domaine de la compréhension des conséquences du changement climatique ou pour le soutien aux politiques publiques de la mer et du littoral. En effet, les informations contenues dans ces documents intéressent de nombreux acteurs scientifiques et institutionnels, qu'il s'agisse de mettre en place des modèles d'évolution à long terme ou de connaître les événements passés afin d'améliorer la prévention des risques littoraux (études statistiques des niveaux extrêmes, retour d'expériences (REX) sur les tempêtes, etc.).

## Données ponctuelles

En l'absence de données continues d'observations marégraphiques, également appelées données systématiques, il est possible d'estimer des niveaux d'eau ponctuels à partir de sources écrites historiques. Avant d'utiliser ces données, une estimation de leur fiabilité est nécessaire (Athimon *et al.*, 2022) (**voir Fiche « Sources historiques écrites »**). Ces données ponctuelles permettent par exemple d'identifier un événement de submersion marine et sa localisation et/ou l'infrastructure côtière touchée. Il existe alors plusieurs cas de figure, notamment :

1. Une hauteur d'eau est clairement indiquée dans la source cf. **Figure 6**.

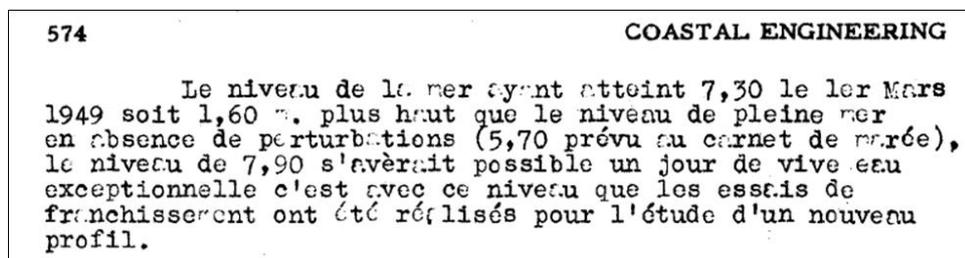


Figure 6 - Extrait de Le Gorgeu & Guitonneau, 1954 (Gorgeu & Guitonneau, 1954)

Le niveau marin indiqué doit être transposé dans le référencement actuel, soit au ZH soit au 0 NGF. Une hauteur exacte peut alors être donnée.



# MESURES DU NIVEAU MARIN

2. Une indication de dépassement d'ouvrage ou d'infrastructure est mentionnée dans la source, cf. **Figure 7**, il est nécessaire d'estimer la hauteur de l'ouvrage dont il est question. Des plans de localisation, des plans ou esquisses d'ouvrages portuaires disponibles dans les archives peuvent donner des indications sur ces hauteurs d'ouvrages.

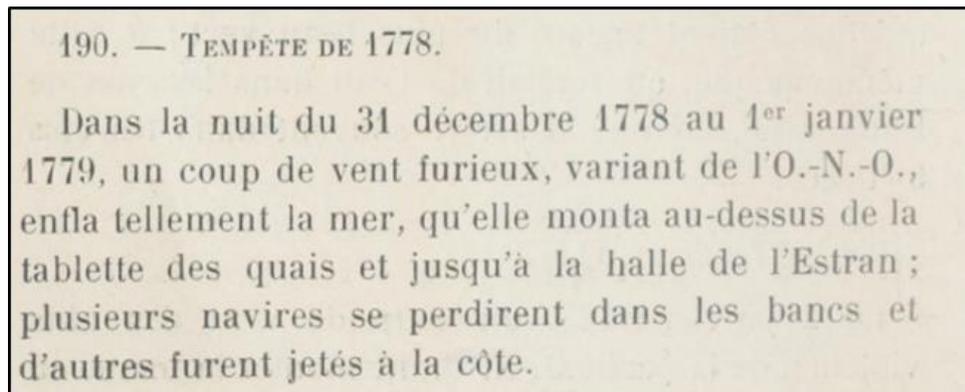


Figure 7 - Extrait de Caillez, M., 1912

Ces données reconstruites historiques ponctuelles sont généralement associées à des incertitudes, qui peuvent être combinées ou non en fonction des données disponibles, en particulier :

$\Delta$  : les documents complémentaires n'ont pas permis de lever le doute sur l'unité de mesure utilisée dans le document ou le 0 de référence de l'époque par exemple.

T : les documents disponibles ont permis de reconstruire un niveau d'eau pour une période antérieure ou postérieure à l'événement

S : les documents disponibles ont permis de reconstruire un niveau d'eau pour une localisation qui n'est pas la localisation exacte touchée.

Une hauteur d'eau minimale peut parfois être donnée, lorsque les documents indiquent seulement un niveau de dépassement.

Pour plus d'informations, se référer à : Athimon, 2020 ; Athimon *et al.*, 2022 ; Giloy *et al.*, 2019.



# MESURES DU NIVEAU MARIN

## Incertitudes et limites

Pour les mesures actuelles, les marégraphes radars du réseau RONIM<sup>5</sup> du Shom répondent aux standards internationaux avec une précision verticale inférieure au centimètre.

Pour les mesures historiques reconstruites, les incertitudes peuvent avoir différentes origines et être dues :

- aux équipements et procédures utilisés pour effectuer la mesure (échelle de marée, marégraphe à flotteur/radar) ;
- à des erreurs induites par l'opérateur (lecture ou retranscription de l'échelle de marée) ;
- à des erreurs induites lors de la numérisation ;
- à l'évaluation du zéro du marégraphe ;
- à l'observatoire ou aux conditions météorologiques (suspicion de déphasage ou d'envasement du puits de tranquillisation).

Toutes ces incertitudes sont considérées comme indépendantes les unes des autres. Néanmoins à l'heure actuelle, il est encore difficile d'attribuer une incertitude à ces mesures. L'enjeu actuel consiste à identifier, intégrer et modéliser les incertitudes en fonction de leur origine.

Par ailleurs, des incertitudes supplémentaires peuvent s'ajouter liées à des erreurs systématiques causées par exemple les changements dans le port qui affectent le niveau moyen de la mer ou des erreurs instrumentales. Pour plus de détails sur les difficultés d'utilisation des marégraphes pour les études du niveau de la mer (Araújo et al., 2013; Hannah, 2011; Pugh, 2004)

## Organisme(s) clés / en jeu

### Données de niveaux marins systématiques :

**Service hydrographique et océanographique de la marine (Shom)\***

**Global Sea Level Observing System (GLOSS)\***

**University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC)\***

**British Oceanography Data Center (BODC)\***

**Global Extreme Sea Level Analysis (GESLA)\***

### Données de niveaux moyens :

**Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL)\***

<sup>5</sup>Réseau d'Observation du Niveau de la Mer : <http://refmar.shom.fr/fr/partenaires/producteurs-de-donnees/reseau-maregraphique-ronim>



# MESURES DU NIVEAU MARIN

Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)\*

Archivage, Validation et Interprétation des données satellites océanographiques (AVISO)

## Sources, vecteurs de diffusion/de porter à connaissance

Le **GIEC** (*Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*, en anglais) (<https://www.ipcc.ch/>) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

Les évaluations et les différents rapports publiés par ce groupe sont principalement fondés sur des publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue. Concernant l'évolution du niveau de la mer et les projections futures (en fonction de différents scénarios), il est possible de consulter en ligne les rapports suivants :

- l'AR5 (the 5th Assessment Report) fournit une évaluation complète de la base scientifique physique du changement climatique depuis 2007 : AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC
- le SROCC (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing climate) se focalise spécifiquement sur les océans et la cryosphère : Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate — (ipcc.ch)
- l'AR6 (the 6th Assessment Report) reprend les bases de l'AR5 avec les nouvelles études et publications publiées depuis 2007 : Climate Change 2021: The Physical Science Basis (ipcc.ch)

## Autres usages de la donnée

Utilisation des données :

- Calcul des composantes harmoniques et la prédiction de marée
- Estimation des surcotes marines
- Réseaux d'alerte tsunamis / vigilance vagues submersion (VVS)
- Calibration des données altimétriques avec mesures marégraphiques
- Aide à la gestion côtière
- Calcul de l'évolution du niveau marin
- Retour d'expériences sur les événements tempétueux
- Rapports Catastrophes Naturels (phénomènes liés à l'action de la mer)



## Références clés

- Araújo, I.B., Bos, M.S., Bastos, L.C., Cardoso, M.M., 2013. Analysing the 100year sea level record of Leixões, Portugal. *Journal of Hydrology* 481, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.019>
- Athimon, E., 2020. Etablir la fiabilité des sources historiques: une nouvelle méthode accessible aux non-initiés. Presented at the Wébinare sur les Tempêtes et Submersions historiques, BRGM.
- Athimon, E., Giloy, N., Sauzeau, T., Andreevsky, M., Frau, R., 2022. Quantification of Historical Skew Surges: Challenges and Methods, in: Gourbesville, P., Caignaert, G. (Eds.), *Advances in Hydroinformatics*, Springer Water. Springer Nature, Singapore, pp. 159–174. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1600-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1600-7_10)
- Church, J.A., White, N.J., 2011. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surv Geophys* 32, 585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>
- COI, 2020. Quality Control of in situ Sea Level Observations: A Review and Progress towards Automated Quality Control, Vol. 1. Paris, UNESCO.
- COI, 2016. Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer, Volume V : marégraphe radar. Paris Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO.
- Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F.M., Marcos, M., Piecuch, C.G., Berk, K., Jensen, J., 2019. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nat. Clim. Chang.* 9, 705–710. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>
- Demerliac, A., 1973. Le niveau moyen de la mer, calcul du niveau journalier. Shom.
- Ezer, T., Haigh, I.D., Woodworth, P.L., 2015. Nonlinear Sea-Level Trends and Long-Term Variability on Western European Coasts. *Journal of Coastal Research* 32, 744–755. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00165.1>
- Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L., Adhikari, S., Parkes, D., Humphrey, V.W., Dangendorf, S., Hogarth, P., Zanna, L., Cheng, L., Wu, Y.-H., 2020. The causes of sea-level rise since 1900. *Nature* 584, 393–397. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>
- Giloy, N., Hamdi, Y., Bardet, L., Garnier, E., Duluc, C.-M., 2019. Quantifying historic skew surges: an example for the Dunkirk Area, France. *Nat Hazards* 98, 869–893. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3527-1>
- Haigh, I.D., Marcos, M., Talke, S.A., Woodworth, P.L., Hunter, J.R., Haugh, B.S., Arns, A., Bradshaw, E., Thompson, P., 2021. GESLA Version 3: A major update to the global higher-frequency sea-level dataset.
- Hannah, J., 2011. The difficulties in using tide gauges to monitor long-term sea level change. *Survey Quarterly* 300, 19.
- Holgate, S.J., Matthews, A., Woodworth, P.L., Rickards, L.J., Tamisiea, M.E., Bradshaw, E., Foden, P.R., Gordon, K.M., Jevrejeva, S., Pugh, J., 2013. New data systems and products at the permanent service for mean sea level. *Journal of Coastal Research* 29, 493–504.



# MESURES DU NIVEAU MARIN

- Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J.C., Holgate, S., 2006. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 111. <https://doi.org/10.1029/2005JC003229>
- Latapy, A., Ferret, Y., Testut, L., Talke, S., Aarup, T., Pons, F., Jan, G., Bradshaw, E., Pouvreau, N., 2022. The data rescue process in the context of sea level reconstructions: an overview of the methodology, lessons learned, up-to-date best practices and recommendations. Manuscript submitted for publication.
- Moore, J.C., Grinsted, A., Jevrejeva, S., 2005. New tools for analyzing time series relationships and trends. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 86, 226–232. <https://doi.org/10.1029/2005EO240003>
- Pouvreau, N., 2008. Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest (PhD thesis). Université de La Rochelle.
- Pugh, D., 2004. *Changing sea levels: effects of tides, weather and climate*. Cambridge University Press.
- Shennan, I., Long, A.J., Horton, B.P., 2015. *Handbook of sea-level research*. John Wiley & Sons.
- Simon, B., 2007. *La marée océanique côtière*, Institut Oceanographique. ed, Synthèses.
- Steffelbauer, D.B., Riva, R.E.M., Timmermans, J.S., Kwakkel, J.H., Bakker, M., 2022. Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea. *Environ. Res. Lett.* 17, 074002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac753a>
- Visser, H., Dangendorf, S., Petersen, A.C., 2015. A review of trend models applied to sea level data with reference to the “acceleration-deceleration debate.” *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120, 3873–3895. <https://doi.org/10.1002/2015JC010716>
- White, N.J., Haigh, I.D., Church, J.A., Koen, T., Watson, C.S., Pritchard, T.R., Watson, P.J., Burgette, R.J., McInnes, K.L., You, Z.-J., Zhang, X., Tregoning, P., 2014. Australian sea levels—Trends, regional variability and influencing factors. *Earth-Science Reviews* 136, 155–174. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.011>
- Woodworth, P.L., White, N.J., Jevrejeva, S., Holgate, S.J., Church, J.A., Gehrels, W.R., 2009. Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales. *Int. J. Climatol.* 29, 777–789. <https://doi.org/10.1002/joc.1771>
- Zhang, X., Church, J.A., 2012. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL053240>

## Fiches en lien

***Fiche « Prédiction de marée »***

***Fiche « Surcote »***

***Fiche « Sources et données historiques »***

***Fiche « Référentiels verticaux »***



# MESURES DU NIVEAU MARIN

