



Les activités de reconstruction marégraphique en France

■ Alexa LATAPY - Inge VAN DEN BELD - Frédéric PONS - Nicolas POUVREAU

Dans le contexte actuel de changement climatique, l'apport de séries temporelles du niveau de la mer, pluridécennales à séculaires, se révèle primordial pour mieux appréhender les risques côtiers futurs. En France, de nombreuses observations systématiques du niveau de la mer au moyen de marégraphes mécaniques ont été initiées dès le milieu du XIX^e siècle. Pour exploiter ces données, il est d'abord nécessaire de numériser ce patrimoine scientifique et culturel et de valider les nouvelles données. Dans ce contexte, des actions de "data archeology" ou de reconstruction de séries historiques marégraphiques ont été entreprises au Shom depuis plusieurs décennies. Cette initiative répond aux recommandations du programme GLOSS (Global Sea Level Observing System) sur la sauvegarde des mesures historiques du niveau de la mer. Ainsi, de nombreuses séries temporelles ont été rallongées de plusieurs dizaines d'années de mesures pour de nombreux ports du littoral métropolitain. Cet article présente la méthodologie appliquée dans le cadre des projets de reconstruction marégraphique, les reconstructions réalisées au Shom sur les façades françaises soumises à forts marnages avec un volet s'intéressant aux observations historiques acquises en mer Méditerranée.

MOTS-CLÉS

Reconstruction marégraphique, niveau de la mer, océanographie, marée

Introduction

L'étude du changement climatique global et son influence sur les variations du niveau marin, qu'il s'agisse de l'évolution du niveau moyen de la mer ou de l'évolution des événements extrêmes, constituent un enjeu sociétal fort (IPCC, 2013). Depuis les années 1990, les données altimétriques satellitaires permettent d'avoir une vision globale de ces changements et rendent compte de l'hétérogénéité spatiale des variations du niveau marin (Cazenave & Llovel, 2009). Les technologies embarquées pour réaliser ces études et les traitements appliqués aux données ne cessent de s'améliorer, mais il est toujours nécessaire de croiser ces mesures avec les observations issues des marégraphes ponctuels, particulièrement dans les zones côtières (Cipollini et al., 2017).

De plus, les données altimétriques ne couvrent que les 30 dernières années. Les mesures effectuées à l'aide de marégraphes sont donc pratiquement les seules données disponibles rensei-

gnant sur l'évolution du niveau marin, à l'échelle des décennies, voire des siècles passés.

Lorsqu'on s'intéresse aux variations du niveau de la mer, il est admis qu'au moins 60 ans d'enregistrements sont raisonnables pour filtrer les influences des effets atmosphériques à grande échelle (Douglas, 1991), d'où la nécessité d'avoir des séries temporelles de niveau d'eau les plus longues et les plus continues possibles.

Organisme référent pour l'observation du niveau de la mer, le Shom possède une expertise et un patrimoine unique dans le domaine de la marégraphie remontant à plusieurs siècles. En France, les premières mesures remontent au XVII^e siècle à Brest et se sont généralisées au cours du XIX^e siècle avec la création du premier réseau d'observation marégraphique national (Pouvreau, 2008) géré par le Dépôt des cartes et plans de la Marine (ancêtre du Shom). Malgré cet important héritage scientifique, la majorité de ces mesures n'est pas exploitée, car toujours sous forme papier. Dans ce contexte, et à l'instar

de nombreuses institutions étrangères (Hogarth et al., 2020 ; Talke & Jay, 2017), un important travail est entrepris au Shom depuis le début des années 2000 afin d'inventorier, de sauvegarder ces nombreuses données historiques et de permettre leur exploitation.

C'est dans ce cadre et avec ce besoin de données numériques horaires que l'IGN a entrepris, en collaboration avec le Shom, l'extraction, depuis 1885, des hauteurs d'eau en fonction du temps des marégrammes du marégraphe totalisateur de Marseille. Ce partenariat a confirmé la nécessité de posséder l'expertise "marégraphique" pour la réalisation des phases de contrôle et de validation des données nouvellement numérisées (Philippe, 2003).

Ce projet et d'autres visent à pérenniser l'ensemble des documents historiques stockés dans les archives afin d'améliorer la connaissance de l'évolution du niveau moyen des mers. Cette initiative s'inscrit dans une démarche plus internationale et répond aux recommandations du programme *Global Sea Level Observing System* (GLOSS) mené par la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, sur la valorisation des observations "archéologiques" du niveau de la mer (Bradshaw et al., 2015).

Le présent article a pour objectif de présenter la méthodologie de reconstruction marégraphique et d'illustrer diverses applications à travers les réalisations récentes du Shom sur les façades françaises soumises à forts marnages avec un volet s'intéressant aux archives marégraphiques acquises en mer Méditerranée¹.

¹ NDLR : Les marégraphes des grands ports avaient comme principale finalité historique opérationnelle de permettre l'accès aux quais des navires selon leur tirant d'eau, c'est pourquoi la conservation des observations n'a pas toujours été jugée comme importante, les volets scientifiques pouvant avoir peu d'impact sur les personnels chargés de l'entretien technique.



Le processus de sauvetage des données

Inventaire

La première étape essentielle à ce processus de sauvetage des données historiques est la réalisation d'un inventaire le plus exhaustif possible (lieu de mesure, période, type de documents...) de toutes les informations disponibles, afin d'estimer leur potentiel technique. Les documents recherchés peuvent être classés en deux catégories :

- mesures du niveau de la mer : enregistrements du niveau de la mer, soit sous la forme de registres de marée, soit sous la forme de marégrammes. Les registres des marées sont des données tabulées (manuscrites ou typographiées) avec des enregistrements horaires, quotidiens ou mensuels (figure 1a). Les maré-

grammes représentent directement le signal de marée sur un document papier et sont générés par des marégraphes à flotteur (figure 1b). Ces mesures peuvent avoir des origines très différentes et peuvent provenir d'observations continues de marégraphes fixes, de données de campagne, de levés hydrographiques, de campagnes à court terme pour le génie civil, des levés scientifiques et des levés portuaires, de registres écrits des marées hautes et basses ;

- données auxiliaires et métadonnées : tous les documents complémentaires qui peuvent renseigner sur la mesure (emplacement du site, références verticales, changements d'équipement...). Des investigations sont également menées sur les types et modèles de marégraphes utilisés, les mécanismes d'enregistrement, la réduction des

données, l'étalonnage, le nivellement géodésique, la mesure de paramètres environnementaux supplémentaires à la station marégraphique (données météorologiques par exemple), et la disponibilité de notes techniques, d'entretien et de traitement. Afin de pouvoir exploiter ces données, il est essentiel de réunir les informations sur les repères verticaux historiques pour un observatoire marégraphique et de pouvoir retracer leurs rattachements au réseau d'altitude légal.

De par son histoire, le Shom dispose d'importantes archives techniques, notamment dans le domaine de la marégraphie, mais il en existe d'autres. Grâce à son rôle de référent de l'observation du niveau de la mer, le Shom a référencé, avec le concours des producteurs de données, de nouveaux centres d'archives spécifiques.

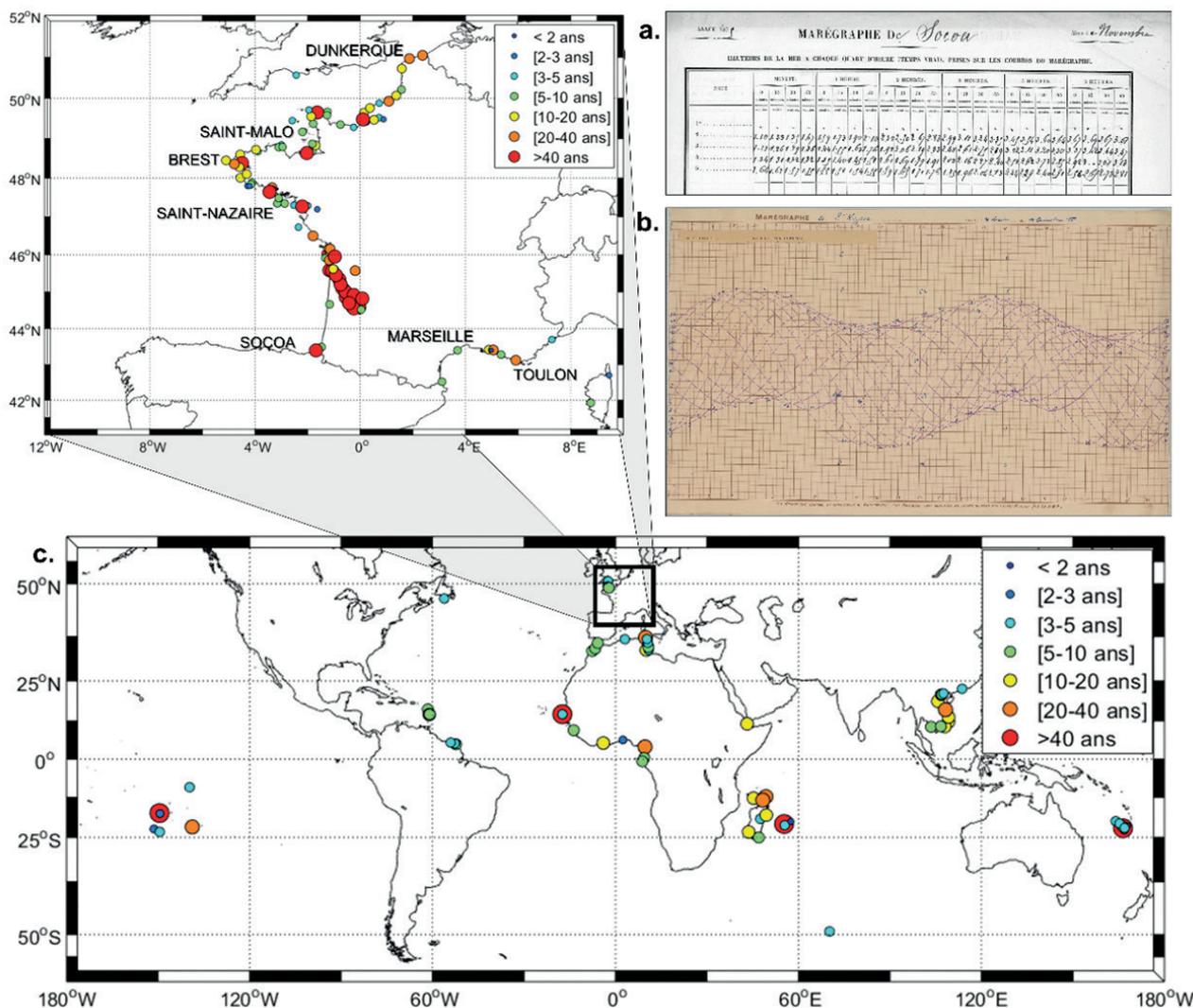


Figure 1. a) Exemple de registres de marée à Socoa (St-Jean-de-Luz, France) en novembre 1875 (source : Shom) ; b) exemple de carte de marée de St-Nazaire enregistrée en novembre 1956 (source : Shom) ; c) vue partielle de la distribution spatiale des données.

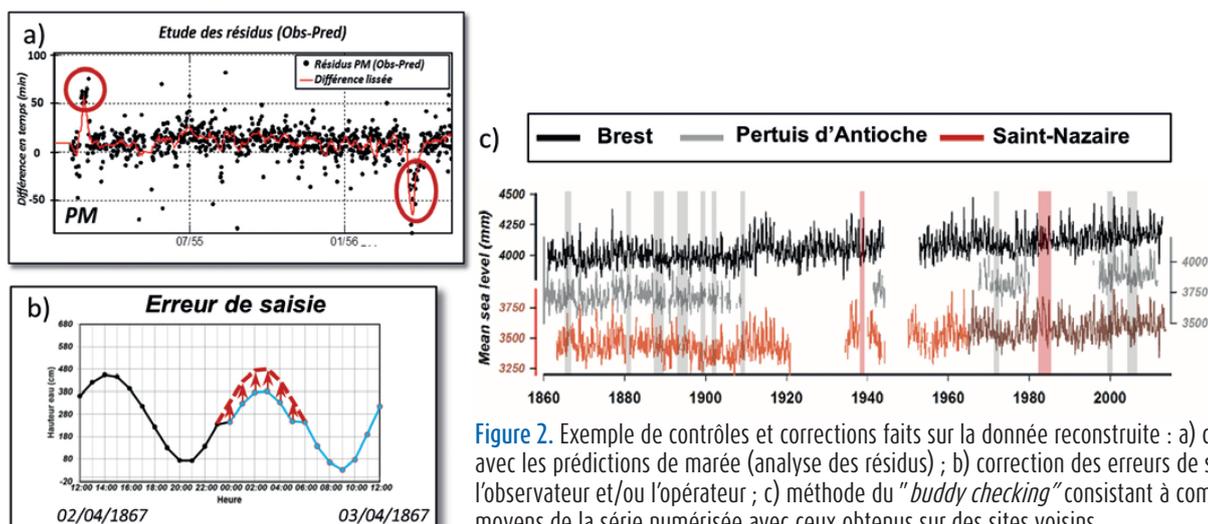


Figure 2. Exemple de contrôles et corrections faits sur la donnée reconstruite : a) comparaison avec les prédictions de marée (analyse des résidus) ; b) correction des erreurs de saisie faites par l'observateur et/ou l'opérateur ; c) méthode du "buddy checking" consistant à comparer les niveaux moyens de la série numérisée avec ceux obtenus sur des sites voisins.

À ce jour, plus de 60 000 documents ont été identifiés et inventoriés (figure 1c) dont environ 70 % ont déjà été numérisés. Malgré tout, il reste encore des milliers de documents à inventorier et à numériser suivant les recommandations internationales (*Intergovernmental Oceanographic Commission/UNESCO*, 2020). Plus de la moitié des observations inventoriées se rapporte à des ports français (environ 300 sites) ; l'autre moitié concerne des mesures plus ponctuelles et porte sur des stations réparties sur l'ensemble du globe (environ 240 sites) (figure 1c)².

■ Processus de numérisation et de validation

Une fois les documents identifiés, ils doivent être dématérialisés et numérisés afin d'extraire les données utiles. Ce processus de numérisation varie en fonction du type de document considéré. Les registres de marée sont en général manuellement numérisés alors que l'extraction des informations contenues sur des marégrammes peuvent se faire de manière semi-automatique. Au Shom, le logiciel NUNIEAU, développé et mis à disposition gratuitement par le CEREMA³ (Ullmann et al., 2005), est utilisé. Il permet d'extraire les mesures de niveau d'eau en fonction du temps. Pour plus d'informations sur la méthodologie de numérisation, se référer à Latapy et al. (2022).

Après avoir été numérisées, ces données doivent être validées. Dans un

premier temps, l'objectif est de rendre la série reconstruite cohérente en temps (exprimée en temps universel [UTC]) et en hauteur (généralement rapportée au zéro hydrographique [ZH] ou zéro des cartes marines). Les métadonnées identifiées lors de la phase d'inventaire sont ici cruciales, car elles permettent de connaître précisément les différents niveaux, ou références, utilisés comme zéro instrumental du marégraphe.

Une fois cette étape réalisée, des contrôles qualité sont effectués sur les données nouvellement numérisées afin d'identifier des sauts verticaux et/ou temporels (figure 2a) ou des erreurs de saisie (figure 2b).

Il est également possible d'intercomparer les données inédites (figure 2c) avec des séries temporelles existantes à proximité. En effet, les stations proches sont globalement soumises aux mêmes conditions atmosphériques de grande échelle, permettant une bonne corrélation des variations journalières et mensuelles du niveau de la mer entre les sites proches. Cette comparaison permet de mettre en évidence des périodes pour lesquelles la qualité des données est potentiellement suspecte. Ces différentes étapes de validation permettent d'attribuer une étiquette qualité sur chaque mesure de hauteur d'eau reconstruite.

De plus, pour certains observatoires, des mesures météorologiques ont été effectuées en parallèle des mesures marégraphiques. Ces mesures peuvent également faire l'objet d'une numérisation. L'utilisation de mesures de pression atmosphérique permet de calculer l'effet du baromètre inverse (Pugh & Woodworth, 2014) et d'identifier

l'influence des tempêtes sur le niveau de la mer. Le couplage de ces mesures physiques permet de confirmer ou d'infirmes les niveaux d'eau reconstruits.

Applications et projets réalisés

Les séries de données reconstruites et validées donnent accès à de nombreuses applications. À partir de séries de données pluridécennales à séculaires, il est possible de dégager des tendances locales d'évolution du niveau de la mer à moyen et long terme. Plus généralement, elles donnent accès à une meilleure connaissance du phénomène de marée en permettant l'étude des caractéristiques des marées, telles que l'évolution des pleines et basses mers, du marnage et des composantes harmoniques (Haigh et al., 2020).

En outre, les séries de données reconstruites permettent aussi de redécouvrir des tempêtes historiques. La prise en compte de ces valeurs extrêmes, non quantifiées jusqu'à présent, permet d'améliorer les estimations des niveaux extrêmes (Bulbeau et al., 2015 ; Saint Criq et al., 2022). Certains événements tempétueux identifiés sont par la suite analysés au sein du Groupe de travail pluridisciplinaire "Tempêtes et submersions historiques" (GT-TSH) dont l'objectif est de collecter et d'expertiser tous types d'informations sur les événements tempétueux et submersions marines historiques (Giloy et al., 2021).

Les longues séries temporelles permettent de mesurer les tendances à long terme du niveau de la mer pour un site ; ainsi, elles permettent une

² Un inventaire détaillé est disponible sur : <https://refmar.shom.fr>

³ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/logiciel-numerisation-enregistrements-graphiques-niveaux-eau>



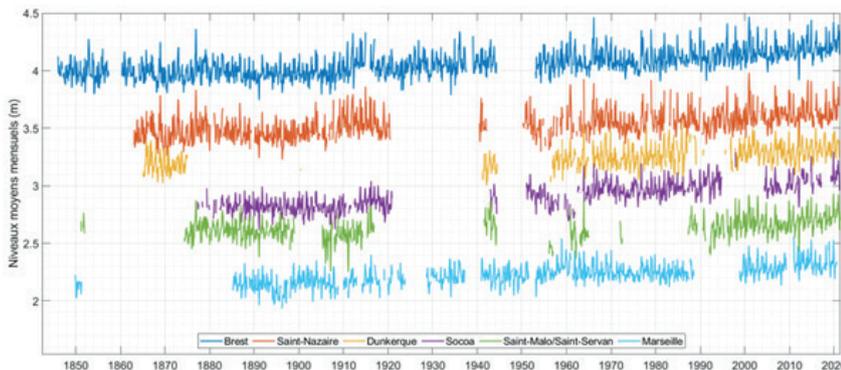


Figure 3. Évolution du niveau mensuel moyen de la mer à Brest, Saint-Nazaire, Dunkerque, Socoa, Saint-Malo/Saint-Servan et à Marseille. Les séries de niveaux moyens ont été décalées verticalement pour des raisons graphiques.

meilleure évaluation des risques. Ces dernières années, devant la nécessité de disposer de longues séries de mesures marégraphiques, de nombreux projets de "reconstruction" ont vu le jour (*figure 3*), et ont permis de compléter de plusieurs dizaines d'années de données les séries existantes de stations situées le long des façades françaises Atlantique (Pouvreau, 2008 ; Gouriou, 2012 ; Ferret, 2016 ; Khan et al., 2023), de la Manche (Van Den Beld et al., 2022), de la mer du Nord (Latapy, 2020), mais aussi en mer Méditerranée (Philippe, 2003 ; Wöppelmann et al., 2014).

Données marégraphiques historiques sur la façade métropolitaine méditerranéenne

Les longues séries de données sont majoritairement associées aux observatoires marégraphiques historiques hérités du Dépôt des cartes et plans de la Marine. Pour les besoins hydrographiques de l'époque, les efforts de mesure étaient majoritairement concentrés le long du littoral ouest et nord de la métropole. Néanmoins, des sites comme Marseille et Toulon se démarquent, disposant d'observations dès le XIX^e siècle.

Le marégraphe de Marseille abrite un appareil unique au monde, classé monument historique en 2002. C'est également un observatoire moderne de surveillance du niveau des mers intégré au réseau RONIM opéré par le Shom. Les marégrammes de Marseille ont fait l'objet d'une numérisation et analyse financées par l'IGN au début des années 2000. Grâce à ces observations, une série séculaire quasi complète du niveau de la mer à cadence horaire depuis 1885 a pu être réalisée. Elle est complétée par 2 ans d'observations en 1850-1851 (*figure 3*).

À Toulon, un observatoire marégraphique a été implanté en 1844 avec des premières mesures continues sur la deuxième moitié du XIX^e siècle (*figure 4*). Ces mesures n'ont pas encore été exploitées à ce jour, mais une fois traitées, elles permettraient d'étendre d'une quarantaine d'années la série existante.

Par ailleurs, des observations plus récentes ont fait l'objet d'un important travail de numérisation en 2007 pour initier la réalisation de PPRL⁴ du Languedoc-Roussillon (Pons, 2007). Ce travail a permis d'exploiter plusieurs dizaines d'années de mesures pour seize stations maritimes et lacustres du golfe

4 PPRL : Plan de prévention des risques littoraux.

du Lion, utilisées dans le cadre d'études statistiques et d'analyse d'événements extrêmes.

Conclusions

Les plus anciennes observations systématiques du niveau de la mer ont été observées à la fin du XVII^e siècle en France. Héritier de ce patrimoine, le Shom dispose aujourd'hui d'un grand nombre de mesures historiques du niveau de la mer. La sauvegarde de ces mesures anciennes est essentielle, car une meilleure évaluation du passé peut aider à mieux comprendre le présent et à mieux appréhender le futur. Des efforts conséquents sont déployés pour partager ces archives scientifiques grâce à la tenue à jour d'un inventaire et de sa diffusion en ligne sur refmar.shom.fr sans oublier la mise en ligne des séries marégraphiques reconstruites sur data.shom.fr.

Cet article rappelle les efforts déployés pour trouver, cataloguer et pérenniser les mesures marégraphiques historiques. Ces nouvelles données disponibles sur le niveau de la mer sont une clé pour comprendre les changements océaniques en lien avec les modifications des systèmes côtiers depuis les derniers siècles. Des exemples de reconstructions réalisées ces dernières années par ou avec la collaboration du Shom ont été présentés avec un focus particulier sur les stations marégraphiques françaises remarquables déployées sur la façade méditerranéenne avec les sites de Marseille et de Toulon.

La reconstruction systématique de ces séries de niveaux de mer permettra également d'identifier des événements de surcotes qui n'ont pas été quantifiés jusqu'à présent sur le littoral français et fournir ainsi des éléments essentiels pour l'étude séculaire des niveaux extrêmes. ●

Contacts

Alexa Latapy, alex.latapy@shom.fr,
Inge Van Den Beld, inge.van.den.beld@shom.fr,
Nicolas Pouvreau, nicolas.pouvreau@shom.fr,
Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom)



Figure 4. Synthèse sous forme de chronogramme des mesures marégraphiques disponibles à Toulon (en noir : les documents papier scannés ; en gris : les documents papier non scannés ; en bleu : les données en format numérique ; en rose : les données inventoriées dans d'autres centres d'archives).



Frédéric Pons, frederic.pons@developpement-durable.gouv.fr, Cerema - Direction Méditerranée

Références

- Bradshaw, E., Rickards, L., & Aarup, T. (2015). *Sea level data archaeology and the Global Sea Level Observing System (GLOSS)*. *GeoResJ*, 6, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.005>
- Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., & Garcin, M. (2015). *How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels : Application to the Xynthia event at La Rochelle (France)*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1135-1147. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1135-2015>
- Cazenave, A., & Llovel, W. (2009). *Contemporary Sea Level Rise*. *Annual Review of Marine Science*, 2(1), 145-173. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081105>
- Cipollini, P., Calafat, F. M., Jevrejeva, S., Melet, A., & Prandi, P. (2017). *Monitoring sea level in the coastal zone with satellite altimetry and tide gauges*. *Integrative Study of the Mean Sea Level and Its Components*, 35-59.
- Douglas, B. C. (1991). *Global sea level rise*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C4), 6981-6992. <https://doi.org/10.1029/91JC00064>
- Ferret, Y. (2016). *Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire (27 SHOM/DOPS/HOM/MAC/NP)*. Shom. <http://refmar.shom.fr/documents/10227/194658/Reconstruction+serie+maregraphique+Saint-Nazaire+par+Yann+Ferret+2016.pdf>
- Giloy, N., members of the Working Group, & "Historical Storms and Floodings". (2021). *Multidisciplinary expertise of historical information for the characterization of water levels during storm and coastal flooding events*. *Proceedings of the 9th EuroGOOS International Conference*. 3-5 May, Brest, France. EuroGOOS 2021, Brest, France.
- Gouriou, T. (2012). *Évolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime* [PhD thesis, La Rochelle]. <http://www.theses.fr/2012LAROS361>
- Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J. A. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D. A., Jänicke, L., Lee, S. B., Müller, M., Schindelegger, M., Talke, S. A., Wilmes, S.-B., & Woodworth, P. L. (2020). *The Tides They Are a-Changin' : A comprehensive review of past and future non-astronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications*. *Reviews of Geophysics*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>
- Hogarth, P., Hughes, C. W., Williams, S. D. P., & Wilson, C. (2020). *Improved and extended tide gauge records for the British Isles leading to more consistent estimates of sea level rise and acceleration since 1958*. *Progress in Oceanography*, 184, 102333. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102333>
- Intergovernmental Oceanographic Commission/UNESCO. (2020). *Workshop on Sea Level Data Archaeology* (Workshop Reports No. 287, p. 47).
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boshung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CB09781107415324>
- Khan, M. J. U., Van Den Beld, I., Wöppelmann, G., Testut, L., Latapy, A., & Pouvreau, N. (2023). *Extension of high temporal resolution sea level time series at Socoa (Saint Jean-de-Luz, France) back to 1875*. *Earth System Science Data Discussions*, 1-23. <https://doi.org/10.5194/essd-2022-443>
- Latapy, A. (2020). *Influence des modifications morphologiques de l'avant-côte sur l'hydrodynamisme et l'évolution du littoral des Hauts-de-France depuis le XIX^e siècle* [Thèse de doctorat, Université Littoral Côte d'Opale]. <http://www.theses.fr/2020DUNK0554>
- Latapy, A., Ferret, Y., Testut, L., Talke, S., Aarup, T., Pons, F., Jan, G., Bradshaw, E., & Pouvreau, N. (2022). *Data rescue process in the context of sea level reconstructions : An overview of the methodology, lessons learned, up-to-date best practices and recommendations*. *Geoscience Data Journal*. <https://doi.org/10.1002/gdj3.179>
- Philippe, V. (2003). *Étude critique des observations du marégraphe de Marseille réalisée par le service de Géodésie et nivellement de l'Institut géographique national*. *Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA, spécialité Topographie*.
- Pons, F. (2007). *Digitalisation de signaux ou d'étangs du golfe du Lion* (p. 182). CETE Méditerranée.
- 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]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00353660/document>
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-Level Science : Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press.
- Saint Crieg, L., Gaume, E., Hamdi, Y., & Ouarda, T. B. (2022). *Extreme Sea Level Estimation Combining Systematic Observed Skew Surges and Historical Record Sea Levels*. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR030873.
- Talke, S., & Jay, D. (2017). *Archival Water-Level Measurements : Recovering Historical Data to Help Design for the Future*. Civil and Environmental Engineering Faculty Publications and Presentations. https://pdxscholar.library.pdx.edu/cengin_fac/412
- Ullmann, A., Pons, F., & Moron, V. (2005). *Tool kit helps digitize tide gauge records*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 86(38), 342-342. <https://doi.org/10.1029/2005EO380004>
- Van Den Beld, I., Kermaol, R., Latapy, A., Pouvreau, N., Vrignaud, C., Michaud, H., & Fraboul, C. (2022). *PAPI d'intention Saint-Malo - Axe 1 - Action 1.11 - Livrable 3 : Fourniture de la série reconstruite des hauteurs d'eau à Saint-Malo après le contrôle, la validation et la mise en cohérence des données numériques*. Shom.
- Wöppelmann, G., Marcos, M., Coulomb, A., Míguez, B. M., Bonnetain, P., Boucher, C., Gravelle, M., Simon, B., & Tiphaneau, P. (2014). *Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849-1851*. *Journal of Geodesy*, 88(9), 869-885.

ABSTRACT

In the current context of climate change, the contribution of multi-decadal to secular sea level time series is essential for a better understanding of future coastal hazards. In France, systematic observations of sea level using mechanical tide gauges have been carried out since the mid-19th century. To process these data, it is first necessary to digitize this scientific and cultural heritage and validate the new data. In this context, data archaeology activities have been undertaken at Shom for several decades. This initiative responds to the recommendations of the GLOSS (Global Sea Level Observing System) program for the preservation of historical sea level measurements. As a result, numerous time series have been extended by several decades of measurements for many ports along the French coast. This article presents the methodology used in sea level data archaeology projects, and the ones carried out by the Shom French coasts that have high tidal ranges, with a special focus on historical observations acquired in the Mediterranean Sea.