

# Reconstructions du niveau moyen global de la mer à partir de marégraphes

■ Guy WÖPPELMANN

*La longueur et la qualité des mesures du niveau de la mer produites par des marégraphes tels que ceux de Brest et de Marseille permettent d'envisager une reconstitution du niveau moyen global de la mer bien au-delà de l'ère des satellites de précision centimétrique initiée en 1992 avec la mission franco-américaine TOPEX/Poséidon. Certaines reconstructions remontent au XIX<sup>e</sup> siècle, mais la plupart démarrent au début du XX<sup>e</sup> siècle. Dans cet article, nous présentons une palette de reconstructions, parmi les plus citées ou récentes, en notant leur cohérence à partir des années 1970, malgré des stratégies d'analyse différentes développées pour surmonter les difficultés auxquelles se heurte leur élaboration. À partir de 1990, l'accord avec les courbes de moyennes globales obtenues à partir des données des satellites confirme la performance de ces reconstructions. Elles présentent néanmoins des limites, mais il existe des perspectives intéressantes qui émergent.*

### MOTS-CLÉS

Niveau de la mer, marégraphes, changement climatique, tendances à long terme

C'est aussi un point critique dans le succès des activités d'archéologie des données des marégraphes (page 65, Latapy et al.).

### Principaux verrous

La question de la représentativité des variations du volume de l'océan global par des moyennes de données acquises à la côte, même à partir d'un grand nombre de marégraphes, a fait l'objet de débats dans la communauté scientifique. La figure 1 illustre qu'il est en effet possible d'atteindre un excellent accord entre les deux sources indépendantes de mesure de ce niveau global de la mer sur la période commune. Elle montre aussi une bande d'incertitude plus large pour la reconstruction produite à partir des marégraphes [1] que pour les moyennes obtenues par satellites d'altimétrie radar [2].

La figure 2 illustre la question de l'échantillonnage spatial des marégraphes. Elle souligne combien

### Introduction

Le niveau de la mer fait partie des variables essentielles du climat listées par l'Organisation météorologique mondiale<sup>1</sup>. En particulier, l'évolution du niveau moyen global de la mer apparaît comme un indicateur majeur de changements à l'échelle planétaire (page 70, Chenal - Meyssignac). Dans ce contexte, la vue synoptique de la surface des océans par les satellites permet un calcul direct de moyenne globale des données acquises tous les dix jours, même si ces données font l'objet de corrections instrumentales et géophysiques complexes en amont du calcul simple de moyenne (page 29, Prandi - Ablain).

Les marégraphes, en revanche, présentent une vue locale *in situ* du niveau de la mer et la question de leur représentativité du volume de l'océan global se pose d'emblée. En effet, seuls les marégraphes implantés à la côte présentent des séries pluri-

décennales de qualité géodésique, c'est-à-dire dont la référence des mesures est pérenne et localement stable, quels que soient les appareils se succédant en une station donnée. Ce caractère est acquis grâce à un réseau local de repères rattachés par nivellement de précision matérialisant le zéro de la station d'observation.

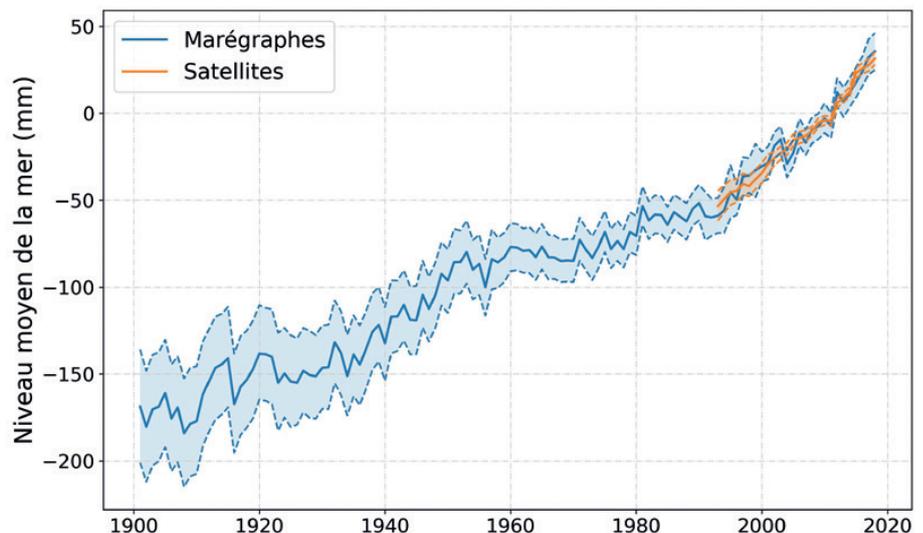


Figure 1. Évolution du niveau moyen global de la mer : en bleu, à partir de marégraphes (reconstruction publiée par Frederikse et al. [1]) et en orange, à partir des moyennes des données des satellites d'altimétrie radar [2].

<sup>1</sup> Pour en savoir plus sur ces variables essentielles du climat, voir : <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>

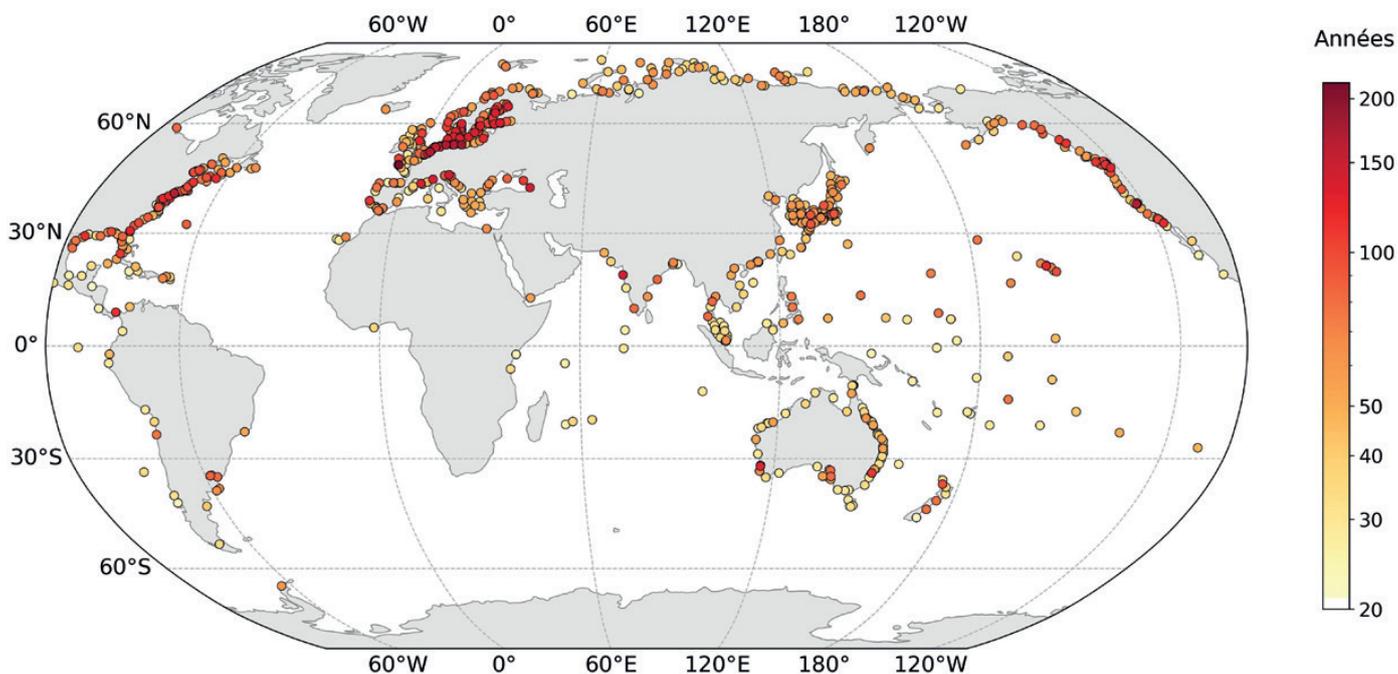


Figure 2. Répartition géographique et durée d'observation des marégraphes, dont les données sont accessibles depuis le Service international du PSMSL [3].

cette question est imbriquée à celle de l'échantillonnage temporel. Le nombre de marégraphes et leur répartition géographique évoluent et se détériorent en remontant le temps dans le passé. C'est un des facteurs principaux de l'élargissement observé dans l'incertitude des reconstructions, mais aussi d'une incertitude toujours inférieure à celle des courbes des moyennes des satellites (figure 1). En revanche, le nombre de points d'observation des satellites et leur répartition géographique restent globalement constants et uniformes.

L'accès aux données des marégraphes est également une difficulté. La vue de la figure 2 est construite à partir des données des marégraphes disponibles au Service permanent du niveau moyen de la mer ou PSMSL [3]. Ce service se trouve sous la double tutelle de l'Association internationale de géodésie (AIG) et de l'Association internationale des sciences physiques de l'océan (AIPSO), soulignant la dimension multidisciplinaire des marégraphes (voir les articles sous-titrés "Les applications" de ce numéro pour un aperçu du caractère multidisciplinaire).

Depuis 1933, le PSMSL est la source principale des études sur l'évolution à long terme du niveau de la mer. La première étude qui s'est appuyée sur les données du PSMSL est publiée dès 1941 par le géologue Beno Gutenberg (1889-1960). Mais cette source précieuse de données dépend de l'effort et de la bonne volonté des organismes opérateurs des marégraphes comme de la politique de leur pays, expliquant en partie des interruptions ou lacunes dans les séries de données disponibles. La France a plutôt été un bon élève du PSMSL, mais aucun organisme n'est à l'abri du manque de ressources ou de clairvoyance des politiques de leurs tutelles.

En 1985, inquiets par le déclin du nombre et de la qualité des données reçues par le PSMSL, les scientifiques proposent un programme mondial sous l'égide de la Commission océanographique (COI) de l'UNESCO, connu sous le sigle GLOSS [4]. (À noter que le sigle ne correspond pas à sa désignation définitive de *Global Sea Level Observing System*.) La France contribue à ce programme par une quinzaine de stations sous la responsabilité d'organismes divers, à tutelle scientifique ou pas. Les différents acteurs français de la marégraphie se retrouvent dans le Service national d'observation SONEL [5] afin d'assurer le relais avec les programmes internationaux et la qualité de cette contribution au

Publication	# de sites	Taux (mm/a) XX <sup>e</sup> siècle	Taux (mm/a) depuis 1970	Taux (mm/a) depuis 1990
Ray & Douglas, 2011	89	1.7 ± 0.1	2.1 ± 0.2	3.2 ± 0.2
Church & White, 2011	230	1.6 ± 0.1	2.3 ± 0.2	3.2 ± 0.3
Jevrejeva et al., 2014	1277	2.0 ± 0.1	1.7 ± 0.1	3.2 ± 0.2
Hay et al., 2015	622	1.3 ± 0.1	2.2 ± 0.1	2.8 ± 0.2
Dangendorf et al., 2017	322	1.2 ± 0.1	2.1 ± 0.2	3.1 ± 0.4
Frederikse et al., 2020	559	1.4 ± 0.1	2.3 ± 0.2	3.2 ± 0.3

Tableau 1. Taux d'élévation estimés à partir des reconstructions du niveau moyen global de la mer de la Figure 3. Les incertitudes correspondent à un intervalle de confiance à 90 %.



niveau des standards exigés par ces programmes<sup>2</sup>.

Outre la pérennité des stations de mesure et la continuité des observations sur des périodes longues pluridécennales, une autre difficulté dans l'utilisation des marégraphes pour élaborer des reconstructions du niveau moyen global de la mer est le déplacement vertical du socle de la terre solide dans lequel ils sont ancrés, plus précisément où les repères qui définissent leur référence sont implantés. C'est la raison pour laquelle la mesure des marégraphes est qualifiée de relative alors que celle des satellites est dite absolue ou géocentrique (page 44, Lavoué - Jamet).

Les déplacements verticaux de la surface de la terre solide, dont la signature à long terme dans les enre-

gistements des marégraphes est similaire à celle des phénomènes océaniques et climatiques, sont nombreux et variés, d'origine géophysique (tectonique, isostatique, volcanique...) ou anthropique (liés à l'extraction de fluides, aux infrastructures portuaires, à leur tassement...). Dans le cas des satellites d'altimétrie radar, seul le phénomène d'ajustement glacio-isostatique est corrigé (page 29, Prandi - Ablain). Les autres sont négligés et sans doute négligeables à l'échelle de l'océan global, mais à l'échelle locale des marégraphes, tous doivent être considérés.

### Stratégies d'analyse

Les stratégies d'analyse visant à surmonter les difficultés évoquées ci-dessus sont variées et diffèrent d'une étude à l'autre [1, 6-10]. Elles se distinguent par les méthodes statistiques ou probabilistes de traitement des données des marégraphes (analyse

en composantes principales, filtrage de Kalman, construction de stations virtuelles, pondération par bassins...) et les nombreuses variantes possibles dans chacune de ces méthodes. Elles diffèrent aussi par les critères de sélection des marégraphes, fondés sur des considérations de couverture spatio-temporelle ou sur le résultat de contrôles de la qualité des données, souvent exigeants et complémentaires de ceux des opérateurs des marégraphes ou des services qui diffusent les enregistrements des marégraphes.

La présence de déplacements verticaux aux marégraphes est parfois aussi un critère de sélection, d'autant que la mesure ou la modélisation de ces déplacements avec une précision inférieure au millimètre par an fait défaut. La stratégie est alors d'écarter ces stations. Notons qu'à ce jour, seul le phénomène d'ajustement glacio-isostatique est modélisé avec une précision suffisante.

Quant à la mesure de ces déplacements, les méthodes de géodésie spatiale ont montré qu'elles étaient capables d'atteindre ce niveau de précision lors des campagnes de réanalyse des mesures et de réalisation du repère de référence terrestre international (ITRF)<sup>3</sup>. La question est davantage celle de déployer les antennes ou balises de géodésie spatiale aux marégraphes (GNSS en particulier) et d'acquérir des mesures sur de nombreuses années, en accord avec l'objectif de surveillance géodésique des marégraphes.

### Performances et limites des reconstructions

La figure 3 présente un échantillon de six reconstructions originales et indépendantes obtenues à partir de marégraphes, parmi les études publiées les plus citées ou récentes. L'accord avec les courbes de moyennes des satellites d'altimétrie radar (exemple de la figure 1) est devenu un critère important de validation, auquel les reconstructions se soumettent pour

<sup>3</sup> Pour en savoir plus sur les réalisations de l'ITRF et les performances des méthodes de géodésie spatiale, voir : <https://itrf.ign.fr/en/homepage>

<sup>2</sup> Pour en savoir plus sur la contribution française au programme mondial GLOSS, voir : <https://www.sonel.org/-Global-Sea-Level-Observing-System,44-.html#id73>

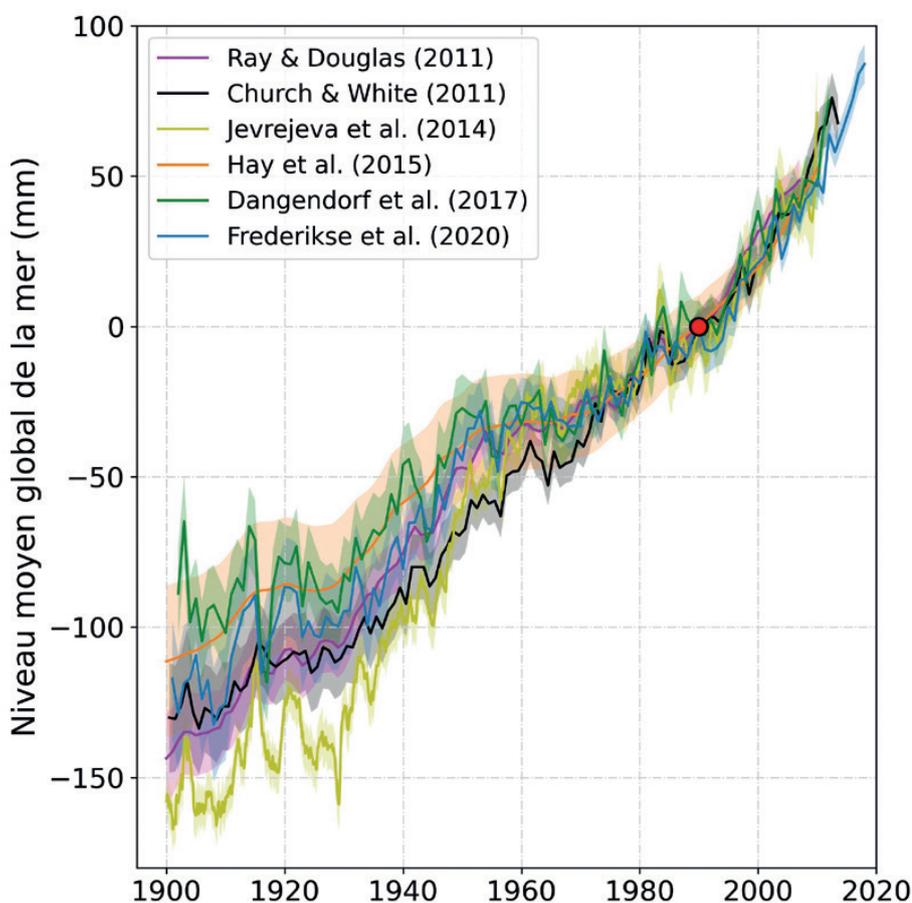


Figure 3. Courbes de reconstructions du niveau moyen global de la mer obtenues à partir de marégraphes [1, 6-10].





avoir une chance d'être publiées dans une revue scientifique. S'il n'est alors pas étonnant qu'elles soient cohérentes depuis 1990, il est intéressant de noter qu'elles le restent sur une période bien plus longue (*figure 3*). C'est seulement lorsqu'on remonte le temps au-delà du milieu des années 1960 que des différences notables apparaissent, parfois au-delà des intervalles d'incertitude suggérant qu'elles sont significatives.

Le *tableau 1* présente les taux d'élévation du niveau moyen global de la mer estimés à partir de chacune des reconstructions sur trois périodes différentes. Les valeurs estimées confirment la cohérence observée dans la *figure 3* depuis 1970, et depuis 1993. En effet, les valeurs obtenues ne sont pas statistiquement différentes (en considérant les intervalles d'incertitude) au sein de chacune de ces deux périodes. Elles sont néanmoins inférieures depuis 1970 par rapport à la période plus récente depuis 1990, indiquant un rythme moyen d'élévation accéléré.

Les taux moyens d'élévation sur le XX<sup>e</sup> siècle sont les plus bas des trois périodes. Il est cependant intéressant de noter que les trois premières études présentent un taux plus élevé que les trois dernières. Un aspect qui distingue ces deux groupes de reconstructions est la manière de corriger les déplacements verticaux des marégraphes. Les trois premières utilisent des modèles d'ajustement glacio-isostatique. Les trois dernières considèrent aussi les autres phénomènes de déplacement de la terre solide, soit en adoptant une approche probabiliste (Hay et al., 2015), soit à partir de mesures de géodésie spatiale (Dangendorf et al., 2017 ; Frederikse et al., 2020).

## Conclusion

Les reconstructions du niveau moyen global de la mer à partir des marégraphes étendent de plusieurs décennies, voire centaines d'années, l'évolution observée depuis 1993 par les satellites d'altimétrie radar. L'accord observé pendant la période commune renforce la confiance dans chacun des systèmes de mesure du niveau

de la mer et des changements qu'ils indiquent, notamment en termes de tendances. Maintenir et confronter de manière systématique et régulière des systèmes de mesure indépendants est une règle d'or en géodésie. L'article de Prandi & Ablain dans ce numéro rappelle l'importance de cet aspect dans le cadre de la validation des données des satellites.

Ces reconstructions trouvent aussi des perspectives d'application nouvelles (*page 70, Chenal - Meyssignac*) pour progresser dans la compréhension des mécanismes à l'origine des changements récents à l'échelle planétaire et, par suite, mieux permettre d'anticiper ceux à venir. Une piste intéressante pour repousser les limites temporelles des reconstructions réside dans l'archéologie des données des marégraphes (expression consacrée par Philip Woodworth, ancien directeur du PSMSL et du programme mondial GLOSS). L'article de Latapy et al. (*page 65*) dans ce numéro présente les activités d'archéologie des données de marégraphes en France et quelques-uns de leurs succès. L'observation des déplacements verticaux des marégraphes par GNSS est une autre piste sérieuse d'amélioration. Les deux études [1, 10], qui considèrent cette observation, disposaient des résultats GNSS pour un tiers des marégraphes de leur reconstruction. Il est assez probable que le nombre et la longueur des séries de mesures GNSS aux marégraphes continuent de progresser et permettent une meilleure prise en compte de ces déplacements de la terre solide. ●

## Contact

Guy Wöppelmann, Laboratoire LIENSs (La Rochelle Université & CNRS), [guy.Woepelmann@univ-lr.fr](mailto:guy.Woepelmann@univ-lr.fr)

## Ressources et références

- [1] Frederikse, T., et al. (2023) "The causes of sea-level rise since 1900". *Nature*, 584: 393-397, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>
- [2] Service PO-DAAC du JPL (NASA) de données des satellites d'altimétrie radar,

produit MEaSUREs, Version 1812, <https://doi.org/10.5067/SLREF-CDRV2>

[3] Service international du niveau moyen de la mer par marégraphes (PSMSL), <https://psmsl.org/>

[4] Programme mondial d'observation du niveau de la mer de l'UNESCO, <https://gloss-sealevel.org/>

[5] Service national d'observation du niveau des eaux littorales (SONEL), <https://www.sonel.org/>

[6] Ray, R.D., & Douglas, B.C. (2011) "Experiments in reconstructing twentieth-century sea levels". *Progress in Oceanography*, 91:496-515, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.07.021>

[7] Church, J.A., & White, N.J. (2011) "Sea-level from the late 19th to the early 21st century". *Surveys in Geophysics*, 32: 585-602, <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>

[8] Jevrejeva, S., et al. (2014) "Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807". *Global and Planetary Change*, 113: 11-22,

[9] Hay, C.C., et al. (2015) "Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise". *Nature*, 517: 481-484, <https://doi.org/10.1038/nature14093>

[10] Dangendorf, S., et al. (2017). "Reassessment of 20th century global mean sea level rise". *PNAS*, 114: 946-951, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1616007114>

## ABSTRACT

In this article we present a panel of global mean sea level reconstructions among the most cited or recent, noting their coherence from 1970 onwards, in spite of the different analysis strategies developed to address the issues associated with the challenge of their production. From 1990 onwards, the agreement with the curves of global averages obtained from satellite altimetry data confirm their performance. Nonetheless, these reconstructions show limitations that we highlight, but interesting perspectives are emerging to mitigate them.