

Observation du niveau marin *in situ*

Les réseaux et les technologies

■ Claire FRABOUL - Laurent TESTUT

Le niveau de la mer est une variable qui est au cœur de nombreuses applications. Véritables vigies du niveau des mers, les marégraphes permettent d'observer et d'enregistrer les variations du niveau de la mer en réponse aux différents phénomènes, qu'ils soient dus au changement climatique (élévation du niveau moyen des mers), d'origine météorologique (tempêtes, ouragans...) ou sismique (tsunami...).

MOTS-CLÉS

Marégraphe, radar, GNSS, bouée, RONIM, GLOSS

Historiquement, les mesures du niveau de la mer se sont développées pour répondre aux besoins de l'hydrographie afin d'assurer la sécurité de la navigation, d'affiner la connaissance et la prédiction du phénomène de marée. C'est dans ce contexte que le réseau de marégraphe du Shom (Service hydrographique national), RONIM, a été initié. Plus récemment, de nouveaux intérêts sont apparus afin que les politiques publiques maritimes et littorales puissent appréhender les impacts du changement climatique et mettre en place des suivis opérationnels. Les mesures du niveau de la mer, en temps réel, sont primordiales pour le système d'alerte tsunami comme pour la vigilance vagues-submersion. Ces mesures sont également essentielles pour la recherche, avec notamment l'estimation des statistiques des niveaux extrêmes, ainsi que les études sur les évolutions globales et locales du niveau de la mer.

Les matériels et technologies utilisés ont donc évolué au cours du temps afin de répondre au mieux aux différents intérêts servis par l'observation de la marée : de l'échelle de marée en passant par les marégraphes à flotteur, puis avec l'arrivée des premiers marégraphes numériques utilisant des capteurs ultrasons pour aboutir aujourd'hui à des marégraphes utilisant la technologie radar. Ces améliorations technologiques sont permanentes et nous voyons aujourd'hui de nouvelles technologies émerger avec des mesures réalisées par l'exploitation des

signaux GNSS. Dans cet article, nous présentons très brièvement les réseaux d'observations marégraphiques à l'échelle mondiale et nationale, ainsi que les différentes technologies utilisées pour la mesure des niveaux d'eau.

Le programme mondial GLOSS

L'observation du niveau des mers est coordonnée au niveau international par le programme mondial GLOSS (*Global Sea Level Observation System*). Ce programme a pour objectif de coordonner et distribuer des observations *in situ* du niveau de la mer de haute qualité, pouvant servir toutes les applications de ces observations. Le programme GLOSS a été créé par la Commission océanographique intergouvernementale

(COI) de l'UNESCO en 1985 et regroupe actuellement plus de 90 nations à travers le monde. Il assure la coordination des réseaux mondiaux et régionaux d'observation du niveau de la mer et s'appuie sur ses membres pour définir les directives et maintenir des observations du niveau de la mer de haute qualité. Ainsi, pour qu'un marégraphe puisse être utilisé dans le cadre du programme GLOSS, il faut qu'il permette de mesurer le niveau instantané de la mer avec une précision centimétrique en toutes circonstances (c'est-à-dire, quels que soient le niveau de la marée et le temps qu'il fait, qu'il y ait des vagues et des courants ou non...).

Le programme GLOSS contribue au Système mondial d'observation de l'océan (GOOS ou *Global Ocean Observation System*), grâce au développement progressif du réseau de mesure du niveau de la mer, aux systèmes d'échange et de collecte de données et à la préparation de produits relatifs au niveau de la mer.

Il convient de noter que la COI n'a pas les moyens financiers de construire ou d'entretenir ce type de réseau d'observation. Le succès du programme GLOSS

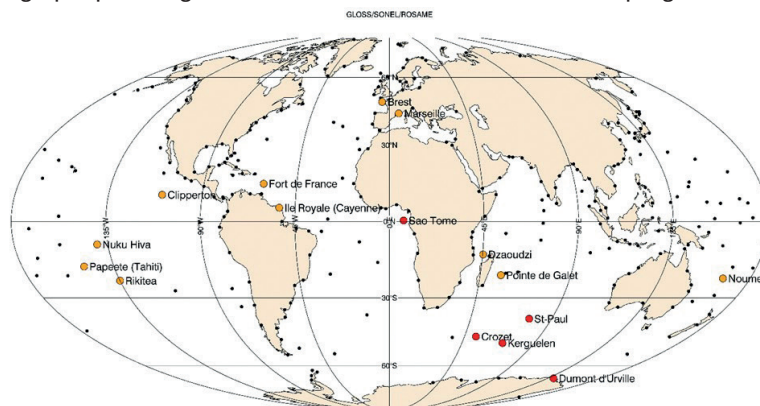
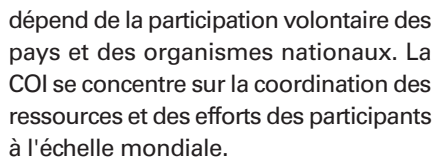


Figure 1. Réseau de marégraphes du programme mondial GLOSS et contribution française : Brest (GLOSS n° 242), Clipperton (165), Crozet (21), Dumont d'Urville (131), Dzaoudzi/Mayotte (96), Kerguelen (23), Fort de France/Martinique (204), Marseille (205), Pte des Galets/La Réunion (17), Saint-Paul (24), Nouméa/Nelle Calédonie (123), Nuku Hiva/Marqueses (142), Cayenne (202), Papeete (140), Rikitea/Gambiers (138). Les quatre stations en rouge de cette carte sont une contribution importante à GLOSS dans les régions polaires et constitue le réseau ROSAME de l'INSU.



La figure 1 montre la répartition des quelques 300 stations marégraphiques qui constituent l'ossature globale (core network) du programme GLOSS à l'intérieur de laquelle s'articulent des réseaux régionaux et locaux plus denses.

Le réseau RONIM

Le Shom observe la marée depuis des siècles. L'observatoire de Brest est l'un des plus anciens au monde et dispose de 300 ans d'observations (N. Pouvreau – 2008). Cependant, le réseau RONIM, tel qu'il existe aujourd'hui, n'a été initié qu'en 1992, quand une quinzaine de marégraphes étaient présents, avec pour objectif d'acquérir sur l'ensemble des côtes de France des données marégraphiques de bonne qualité et de longue durée. En effet, les besoins en mesures marégraphiques permanentes de bonne qualité sont essentiels pour les applications suivantes :

- informations des hauteurs d'eau en temps réel (sécurité nautique, hydrographie) ou en temps différé (hydrographie, déclaration de catastrophe naturelle) ;
- prédiction de marée ;
- détermination des limites physiographiques (laisse de basse mer, laisse de pleine mer, niveaux extrêmes) ;
- détermination des niveaux de référence (zéros hydrographiques), etc. ;
- élévation du niveau des mers ;
- calage des données d'altimétrie satellitaires.

Ainsi, afin de remplir ces différents objectifs, le réseau RONIM s'est densifié pour atteindre 27 marégraphes en 2007 (23 en Métropole et 4 outre-mer). De nouvelles technologies sont également apparues avec la mise en place des premières liaisons temps réel en 2005.

Les besoins d'observation se sont encore renforcés pour répondre au fort développement des politiques publiques françaises en matière de prévention des risques de submersion marine. Le Centre national d'alerte aux tsunamis (CENALT)

Le Réseau d'Observation
du Niveau de la Mer
RONIM

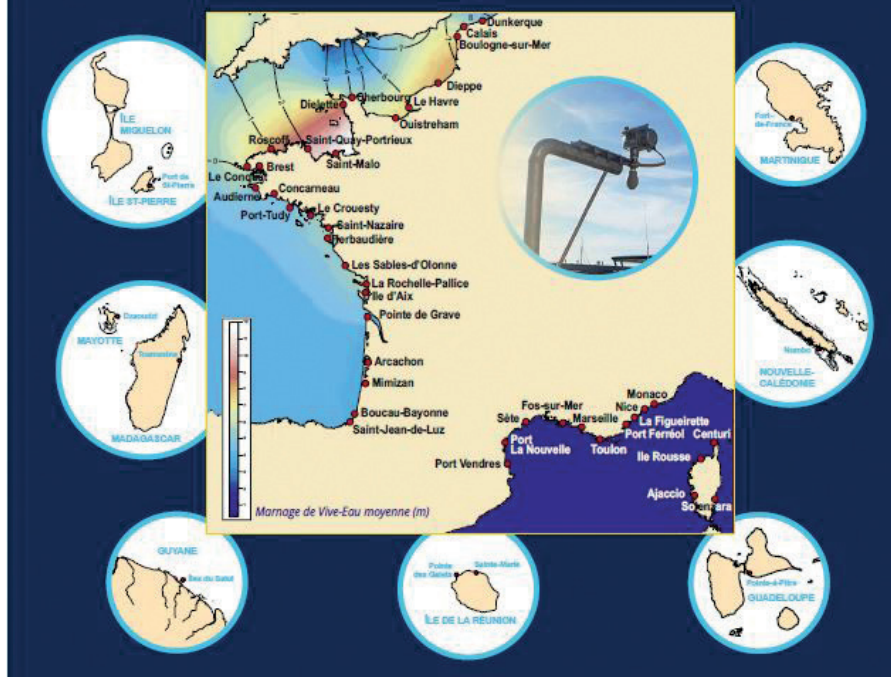


Figure 2. Le réseau d'observation du niveau de la mer, RONIM.

a été mis en place après le tsunami de 2004 en Indonésie . Le dispositif de vigilance vagues-submersion a été mis en place après la tempête Xynthia en 2010. En conséquence, l'infrastructure nationale d'observations du niveau des mers RONIM a ainsi pu être complétée d'observatoires nouveaux et/ou de moyens de transmission de données temps réel redondés (liaisons internet et/ou satellite sur le système mondial de télécommunication [SMT]). Aujourd'hui, RONIM se compose de 50 stations, voir figure 2.

Ce réseau a été développé de façon à répondre aux exigences décrites dans le manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer publié par l'UNESCO/COI en 2016. Les observatoires du réseau RONIM sont équipés de capteurs radar, et disposent également d'un capteur météorologique mesurant notamment la pression atmosphérique. La plupart des marégraphes sont équipés d'un double système de transmission en temps réel (internet et satellite) afin de pallier au mieux un problème de transmission de données dans l'objectif de servir les besoins des systèmes opérationnels qui reposent sur ce réseau.

La cadence d'acquisition est de 1 Hz. Les données échantillonnées à 1 Hz sont moyennées à une minute et transmises par internet vers le site data.shom.fr et vers le site *Sea Level Station Monitoring Facility* de l'IOC (COI en français) avec une latence de cinq minutes (www.ioc-sealevelmonitoring.org). Les messages satellites sont cadencés toutes les six minutes. Ces données se trouvent également sur le site de l'IOC. Les données acquises à 1 Hz sont également moyennées à dix minutes et sont récupérées une fois par jour et transmises sur data.shom.fr. Tous les trimestres, les données dix minutes validées et les données horaires validées sont transmises sur data.shom.fr.

L'électronique du réseau se faisant un peu vieillissante, RONIM a bénéficié entre 2021 et 2023 d'une jouvence qui a permis de changer l'ensemble des centrales d'acquisition, de remplacer les capteurs météorologiques et de mettre à niveau les routeurs de transmission de données. Par ailleurs, un logiciel de supervision a également été développé dans l'optique de pouvoir mieux gérer le réseau à distance et de pouvoir réaliser des opérations de maintenance. Ces

opérations ont permis d'améliorer les taux de disponibilité de la donnée.

Certaines stations du réseau sont également équipées de système de positionnement GNSS. Cette instrumentation supplémentaire a pour objectif d'être en mesure de déterminer les mouvements verticaux de la croûte terrestre permettant de calculer les tendances absolues d'évolution du niveau moyen des mers à partir des tendances relatives calculées à partir des observations. La colocalisation avec une station GNSS est une recommandation du programme GLOSS. Le Service national d'observation SONEL (www.sonel.org), financé par l'état au travers de son infrastructure de recherche littorale et côtière (ILICO : www.ir-ilico.fr) est en charge, pour le programme GLOSS, de collecter au niveau mondial les stations GNSS colocalisées aux marégraphes et de fournir des estimations de mouvements verticaux du sol basées sur l'analyse des séries temporelles GNSS.

Les technologies d'observation

■ Les marégraphes RADAR

Les marégraphes radar sont apparus de la fin des années 1990 au début des années 2000 et se sont assez vite imposés dans les réseaux marégraphiques. Cet engouement s'explique par le fait qu'ils sont aussi faciles à utiliser et à entretenir que les capteurs acoustiques, sans leur principal inconvénient, à savoir, leur forte dépendance vis-à-vis de la température de l'air. Par ailleurs, du point de vue de la gestion, cette technologie présente un certain nombre d'avantages par rapport aux techniques précédentes, notamment au regard de la facilité d'installation et du fait qu'il s'agit en règle générale de dispositifs extrêmement fiables qui ne nécessitent d'entretien qu'après plusieurs années d'utilisation. S'ajoutent à cela des coûts relativement faibles et des travaux d'ingénierie nécessaires à leur installation relativement simples par rapport à d'autres systèmes. En outre, les signaux de sortie sont souvent compatibles avec les centrales d'acquisition existantes sur les marégraphes côtiers

numériques, rendant la mise à jour du capteur compatible avec l'électronique en place. En effet, les instruments sont fournis avec le matériel et le logiciel nécessaires pour convertir les mesures radar en hauteur du niveau de la mer. La principale contrainte est que la consommation d'énergie peut être relativement importante dans les systèmes radar s'ils sont utilisés en continu dans un mode d'échantillonnage rapide. Les moyennes sont généralement calculées sur des périodes de quelques secondes à quelques minutes.

Principe de fonctionnement :

Il existe deux principaux types de marégraphes radar : les radars à modulation de fréquence d'onde entretenue (FMCW ou radar à onde continue) et les radars à impulsion. Les deux sont basés sur la réflexion du signal radar à l'interface air/eau, mais là où on mesure un temps de trajet avec les radars à impulsion, on mesure une différence de fréquence en FMCW.

Dans le cas des radars à impulsion, on mesure le temps de parcours aller et retour de courtes impulsions (en général évaluées en picosecondes) entre l'émetteur et la cible. La distance est obtenue après correction de la vitesse de la lumière et en divisant le résultat par deux. Les impulsions se présentent sous forme de petites salves d'ondes. Le nombre d'ondes et la longueur de l'impulsion dépendent de la durée de la pulsation et de la fréquence porteuse utilisée. Un délai suffisant entre les pulsations est requis pour permettre la réception de l'écho avant l'émission de l'impulsion suivante.

Les capteurs FMCW n'émettent pas d'impulsion de fréquence, mais un signal continu modulé linéairement en

fréquence entre deux fréquences définies f_1 et f_2 .

La *figure 3* montre, que dans ce cas, c'est la différence de fréquence df 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 d . Cette fréquence différentielle est convertie en un spectre de fréquence par transformation de Fourier. La distance est ensuite calculée à partir du spectre. Cette méthode a l'avantage d'offrir une résolution plus précise nécessitant cependant une puissance de calcul plus importante.

La distance calculée par le capteur radar est convertie en un signal numérique lui-même ramené par la centrale d'acquisition en une hauteur d'eau référencée par rapport au zéro hydrographique de l'observatoire.

■ Les nouvelles technologies d'observation du niveau des mers

Depuis quelques années, il est devenu possible de mesurer le niveau de la mer à l'aide de techniques émergentes basées sur le GNSS. Ces systèmes d'observation ont bénéficié des progrès réalisés dans le traitement des données GNSS. En particulier, le développement du positionnement précis ponctuel (PPP) GNSS en mode cinématique qui permet une précision centimétrique sans qu'il soit nécessaire d'utiliser une station de référence. Certains de ces nouveaux systèmes sont présentés ici. Ils fournissent des mesures complémentaires, souvent conçues pour des objectifs et des lieux particuliers. Profitant de la colocalisation du GNSS avec les marégraphes, les signaux radio GNSS, réfléchis par la surface de la mer,

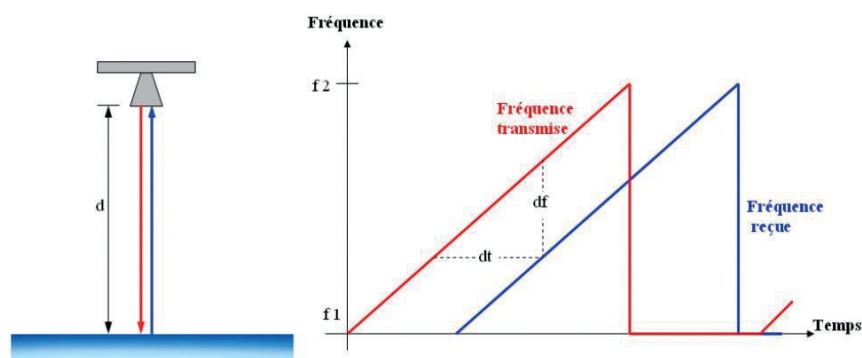


Figure 3. Schéma du principe fondamental du marégraphes radar. refmar.shom.fr



ont été utilisés récemment pour estimer le niveau moyen de la mer côtière, avec des différences moyennes journalières de quelques centimètres par rapport aux marégraphes conventionnels (Larson et al., 2013). La technique de réflectométrie GNSS fournit un système alternatif d'observation du niveau de la mer côtière avec des avantages importants : le niveau moyen de la mer côtière est mesuré directement dans un cadre géocentrique cohérent avec l'altimétrie satellitaire ; il ne nécessite pas d'étalonnage *in situ* ; la liaison verticale entre l'antenne GNSS et un marégraphe proche peut être effectuée à distance et en continu, c'est-à-dire qu'elle permet de surveiller la stabilité du zéro du marégraphe (Santamaría-Gómez et Watson, 2016). Avec les nouvelles constellations GNSS cette technique a amélioré la précision et les taux d'échantillonnage, maximisant ainsi les avantages de la colocalisation avec les marégraphes.

Un autre exemple est l'utilisation du GNSS sur des dispositifs flottants, qui est apparue avec la naissance de l'altimétrie précise par satellite et la nécessité subséquente d'étalonner les données *in situ*. Ces données ont permis d'estimer le biais absolu du système altimétrique embarqué sur satellite, ce qui est essentiel pour contrôler sa stabilité à long terme et évaluer les tendances du niveau de la mer. Les premières bouées GNSS ont été développées pour la calibration

absolue de TOPEX/Poséidon. Depuis, de nombreuses conceptions différentes ont été proposées pour assurer une mesure centimétrique du niveau de la mer et réduire les limitations inhérentes au système (figure 4), telles que la facilité et la durée du déploiement, la quantification de la hauteur du centre de phase de l'antenne GNSS au-dessus de la ligne de flottaison et l'inclinaison de l'antenne par rapport à la verticale. Les résultats d'une inter-comparaison de différents modèles de bouées GNSS réalisée sur l'île d'Aix (côte ouest de la France) en 2012 ont montré que ces dispositifs sont capables de mesurer la hauteur absolue du niveau de la mer avec une précision de l'ordre du centimètre, ce qui est comparable à la précision du marégraphe radar de référence (André et al., 2013). Les bouées GNSS sont désormais régulièrement utilisées sur des sites d'étalonnage dédiés à l'altimétrie par satellite, tels que l'île de Corse en mer Méditerranée. Elles sont également utilisées pour la caractérisation et l'étalonnage des erreurs des marégraphes. ●

Contacts

Claire Fraboul, Shom, claire.fraboul@shom.fr
Laurent Testut, LIENSs, I
aurent.testut@univ-lr.fr

Références

André G., Martín Míguez B., Ballu V., Testut L., Wöppelmann G., 2013. *Measuring Sea*

Level with GPS-Equipped Buoys : A Multi-Instruments Experiment at Aix Island. The International Hydrographic Review. <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/22826>.

Larson, K. M., Löfgren J. S., Haas R., 2013. *Coastal Sea Level Measurements Using a Single Geodetic GPS Receiver*. Advances in Space Research 51 (8) : 1301-10. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>.

OHI, 2010 : *Résolutions de l'Organisation hydrographique internationale*, publication M-3, 2^e édition. GLOSS : <https://gloss-sealevel.org/>.

UNESCO/COI : *Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer*. Volumes I à V. Manuels et guides 14.

REFMAR : <http://refmar.shom.fr>.

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*. Thèse de doctorat – Université de La Rochelle, 468 p.

Poffa N., Enet S., Kerinec J.-C., équipe projet RONIM, 2012. *Evolution instrumentale des marégraphes du réseau RONIM*. JNGCGC, Cherbourg g, pp. 611-618.

Martin Miguez B., Le Roy R., Wöppelmann G., 2008 : *The Use of Radar Tide Gauges to Measure Variations in Sea Level along the French Coast*. Journal of Coastal Research, vol 24, 4C, pp. 61-68.

Simon B., 2007 : *La Marée - La marée océanique et côtière*. Édition Institut océanographique, 434 p.

Santamaría-Gómez A., Watson C., 2017 : *Remote Leveling of Tide Gauges Using GNSS Reflectometry : Case Study at Spring Bay, Australia*. GPS Solutions 21 (2) : 451-59. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0537-x>.

ABSTRACT

Sea level is a variable in the center of many applications. Tide gauges are genuine sea level watchdogs, enabling the community to observe and record sea level variations in response to various phenomena, whether due to climate change (rise in mean sea level), meteorological (storms, hurricanes) or seismic (tsunamis). In this article, we are presenting tide gauge observation networks worldwide and in France, as well as the different technologies used to measure water levels.

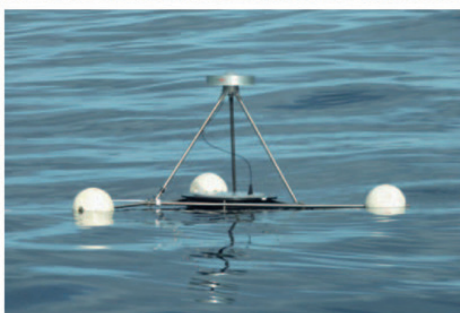
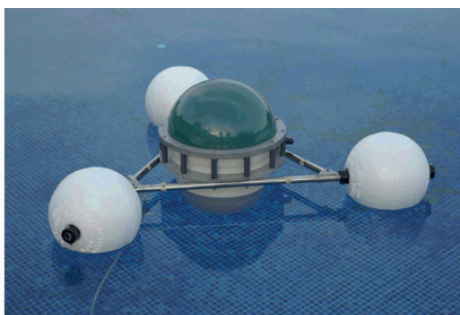
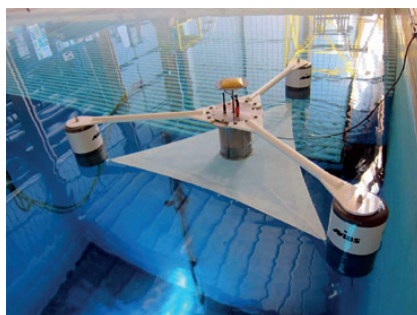


Figure 4. Différents systèmes de mesure du niveau marin par bouées GNSS.