

Le marégraphe de Marseille, origine des altitudes continentales françaises et vigie du changement climatique

Jonathan Chenal *

Institut national de l'information géographique et forestière, Ramonville-Saint-Agne
Association « Les amis du marégraphe de Marseille »

Résumé

Le marégraphe de Marseille est à la fois le bâtiment et l'appareil d'observation du niveau de la mer qu'il abrite. Créé en 1885 pour déterminer le niveau moyen de la mer formant l'origine des altitudes continentales françaises, il observe le niveau de la mer depuis cette époque. Classé monument historique et désormais complété d'instruments géophysiques modernes, il forme un observatoire dédié à la géodésie et aux sciences du changement climatique. Sa longue série d'observations témoigne de l'élévation du niveau de la mer dans l'ouest de la Méditerranée, avec une tendance de 1,4 mm/an depuis 1885. Les projections climatiques indiquent que le niveau de la Méditerranée devrait s'élever de plusieurs dizaines de centimètres à plusieurs mètres dans les siècles à venir.

Abstract – The Marseille tide gauge, origin of continental French altitudes and watch of climate change

The Marseille tide gauge is both the building and the device dedicated to observing sea level that it holds. Created in 1885 in order to determine the mean sea level as the datum of the french continental height system, it observes sea level since then. Classified as a historical monument and holding new modern geophysical devices, it is now an observatory dedicated to geodesy and climate change sciences. Its long observations time series gives evidence of sea level rise in Western Mediterranean, with a trend of 1.4 mm/yr since 1885. Climate projections indicate that sea level should continue to rise of several tens of centimeters to several meters in next centuries.



Charles Lallemand, fondateur du marégraphe de Marseille, en habit d'académicien. Crédit : IGN.

Les besoins d'aménagement du territoire requièrent la connaissance précise des altitudes, c'est-à-dire d'une coordonnée verticale exprimée par rapport à une surface de référence. Celle-ci est choisie conventionnellement comme le niveau moyen de la mer. En France, celui-ci a été fixé à Marseille grâce à un marégraphe installé à la fin du XIX^e siècle. Unique en son genre, ses observations quasi continues depuis près de 140 ans en font un observatoire privilégié de l'élévation du niveau de la mer. Cet article retrace les origines et la conception du marégraphe de Marseille, puis les jalons de son histoire, avant d'exposer quelques-unes de ses contributions scientifiques, en particulier liées à l'observation et à la compréhension du changement climatique ; un encadré séparé précise les notions scientifiques associées au niveau de la mer et aux altitudes, et un autre présente l'association « Les Amis du marégraphe de Marseille » qui a pour objet de mieux le faire connaître.

Origines et conception du marégraphe de Marseille

À partir du milieu du XIX^e siècle, les besoins en termes d'adduction et d'évacuation de l'eau ou de développement du transport ferroviaire nécessitent une connaissance précise des altitudes à l'échelle du pays tout entier, avec une origine unique. À cette époque, les cartes d'état-major ont une référence d'altitude propre à chaque feuille, sans cohérence d'ensemble. Pour résoudre ce problème, Paul-Adrien Bourdalouë, ingénieur et topographe, est chargé d'établir un réseau de repères de nivellement à l'échelle de la France, dont l'altitude sera déterminée par rapport à une origine unique fixée conventionnellement à 0,40 mètre au-dessus du zéro de l'échelle de marée du fort Saint-Jean situé à l'entrée du Vieux-Port de

*jonathan.chenal@ign.fr

Marseille, installée en 1840. En 1864, la première assemblée générale de l'Association internationale de géodésie recommande que les origines des systèmes d'altitudes matérialisés par les réseaux de nivellement soient déterminées par l'observation du niveau moyen de la mer.

La dégradation des repères du réseau Bourdalouë conduit à la formation à la fin de la décennie 1870 d'une commission du nivellement général de la France (NGF, qui deviendra un service en 1884) pour moderniser le système d'altitudes français. Cette commission choisit de moderniser également l'origine du système en décidant de créer un observatoire marégraphique dédié, qui s'inscrit dans la longue tradition d'observation du niveau de la mer en France [1]. La commission du NGF décide de conserver Marseille comme origine des altitudes françaises continentales, du fait de l'existence de l'origine du réseau Bourdalouë ; en revanche, elle l'éloigne du Vieux-Port et suit la préconisation de l'ingénieur hydrographe Anatole Bouquet de la Grye et l'installe dans l'anse Calvo, aujourd'hui dans le quartier d'Endoume, le long de la corniche du Président-John-Fitzgerald-Kennedy (figure 1). L'intérêt du choix de la mer Méditerranée tient aussi à la faiblesse de son marnage (amplitude de



Figure 1. Le marégraphe de Marseille vu depuis la corniche du Président-John-Fitzgerald-Kennedy. La porte d'entrée de la galerie est visible à droite de la plateforme, en bas de l'escalier. Crédit : Les Amis du marégraphe de Marseille (2022).

la marée), l'objectif n'étant pas d'observer la marée en tant que telle, mais le niveau moyen de la mer. L'architecture du marégraphe est confiée à Auguste Sebillotte, également à l'origine du phare du Planier, au large de Marseille. Le marégraphe est constitué d'une maison pour le gardien et d'un bâtiment technique organisé sur deux niveaux : un rez-de-chaussée servant de bureau au gardien et destiné à l'installation de l'instrument et une chambre souterraine à laquelle on accède par

un escalier en colimaçon. Dans la chambre souterraine, un puits communique avec la mer par l'intermédiaire d'une galerie dont le rôle est d'éliminer au maximum les effets du clapot, de sorte que le niveau de l'eau dans le puits ne soit pas agité (figure 2). La surface de l'eau dans le puits évolue avec la marée, la surcote atmosphérique et en réponse au changement climatique, sans être perturbée par la houle voire par les vagues pouvant être provoquées par un tremblement de terre.

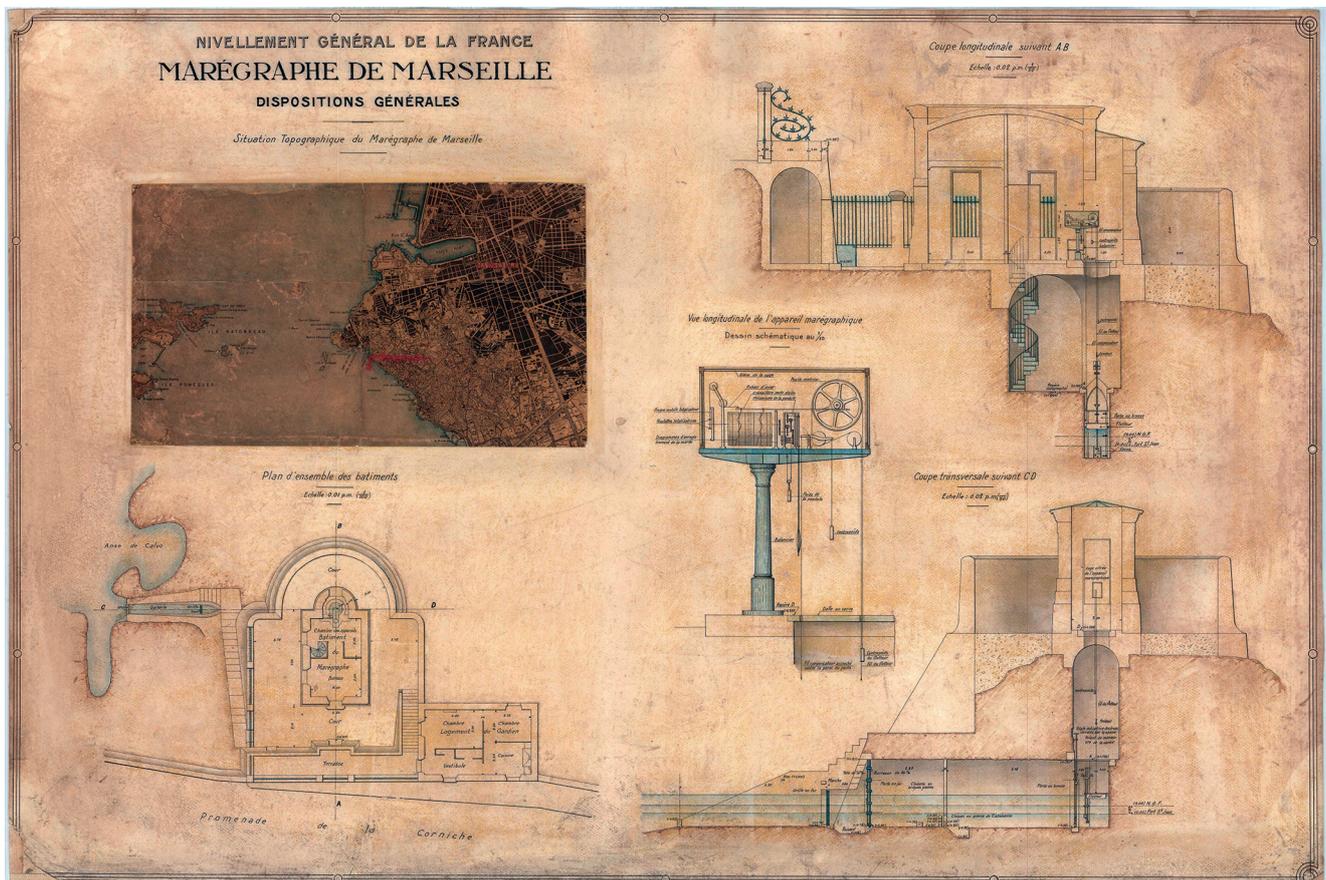


Figure 2. Plan du marégraphe de Marseille réalisé à l'occasion de l'Exposition universelle d'Anvers, en 1930.

L'appareil, également appelé marégraphe, fait l'objet d'échanges entre le secrétaire de la commission du NGF, Charles Lallemand, et l'ingénieur allemand Friedrich Hermann Reitz. Celui-ci a inventé le concept de marégraphe totalisateur, un appareil qui ne se limite pas à l'observation du niveau instantané de la mer (dont la courbe forme un marégramme), mais qui permet d'en déduire quasi immédiatement la moyenne sur un intervalle de temps donné. Reitz avait installé deux marégraphes non pérennes de ce type sur l'île d'Helgoland (1880-environ 1901), en mer du Nord, et à Cadix (1880-1924), en Espagne. C'est grâce à la décision de la commission du NGF de vouloir un observatoire pérenne que le marégraphe de Marseille, avec sa composante totalisatrice, est aujourd'hui unique au monde. La fabrication de l'appareil fut confiée à la maison Dennert et Pape, installée à Altona, à proximité de Hambourg. Il fut envoyé en pièces détachées par bateau à la fin de l'année 1884 et monté par Christian Dennert lui-même, venu expressément à Marseille. L'appareil est composé d'un flotteur de 90 cm de diamètre et de 20 cm d'épaisseur qui évolue verticalement avec le niveau de la mer, guidé par trois rails installés sur les parois du puits (figure 3). Un câble en invar (un alliage de fer et de nickel), fixé au flotteur, transmet le mouvement vertical du flotteur à l'appareil. Ce mouvement vertical est réduit d'un facteur dix et transformé en mouvement horizontal par un système de crémaillère. Le niveau instantané de la mer était tracé en double exemplaire sur des bandes de papier enroulées autour d'un tambour dont la rotation était entraînée par l'horloge de l'appareil. La partie totalisatrice du marégraphe complète ce dispositif avec un jeu de cadrans qui évoluent verticalement le long du bord du tambour en lien avec la crémaillère horizontale. L'incrémentation de ces cadrans est plus ou moins rapide selon leur distance à l'axe de rotation du tambour. Ce dispositif mécanique imaginé par Reitz réalise ainsi de façon continue le calcul de l'intégrale de la courbe du niveau instantané de la mer. La lecture des indications du cadran au début et à la fin d'une période de temps permet le calcul de leur différence et, immédiatement, leur valeur moyenne sur cette période (figure 4).

Les observations du niveau de la mer commencèrent ainsi à partir de 1885. Le niveau moyen de la mer en tant qu'origine des altitudes françaises fut fixé après douze ans d'observations, en 1897. Charles Lallemand avait conscience que cette durée était inférieure au cycle de 18,6 ans associé aux paramètres

astronomiques qui rythment les marées (durée de la précession des nœuds de l'orbite de la Lune), mais les besoins de fixations d'altitudes avec une origine définitive étaient trop pressants pour se permettre d'attendre six années supplémentaires. Le niveau zéro des altitudes ne fut toutefois pas matérialisé dans le puits ; en effet, il était la moitié du temps sous l'eau, ce qui le rendait peu pratique et, de surcroît, il aurait pu exister un risque d'erreur en scellant un repère qui ne soit pas exactement au niveau zéro. Il fut donc choisi d'implanter dans la chambre souterraine un repère dit « fondamental », dont l'altitude fut



Figure 3. Le puits du marégraphe et ses trois rails qui guident le flotteur verticalement. On voit aussi la porte en bronze donnant sur la galerie qui communique avec la mer. Crédit : Les Amis du marégraphe de Marseille (2022).

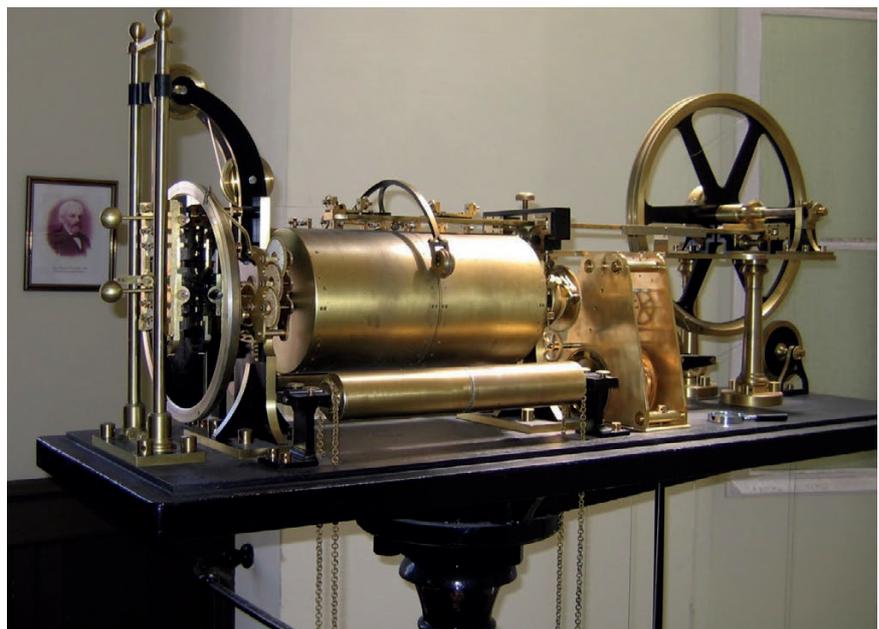


Figure 4. Le marégraphe totalisateur de Reitz installé à Marseille depuis 1885. La crémaillère déroulant le câble attaché au flotteur est à droite de l'image. Le tambour déroulant les bandes sur lesquelles étaient tracés les marégrammes est au centre. Le totalisateur est à gauche. Au fond, à gauche : portrait de Christian Dennert. Crédit : Les Amis du marégraphe de Marseille.

déterminée en cohérence avec les observations de l'appareil, à 1,6597 mètre, 71 millimètres plus bas que l'origine du fort Saint-Jean.

L'observation du niveau de la mer à Marseille fut complétée de relevés de température de l'eau de mer, à l'extérieur du bâtiment, et de température de l'air, à l'intérieur du bâtiment.

Entre continuité des observations et progrès scientifiques, menaces existentielles et résurrection

Une affirmation scientifique jusqu'à l'apogée des années 1960

Charles Lallemand dirigea le service du NGF jusqu'à sa retraite, en 1928. Son œuvre scientifique considérable porta sur le nivellement et l'observation du niveau de la mer, notamment avec l'invention d'un système plus léger et moins cher que le marégraphe totalisateur, le médimarémètre. Il fut élu à l'Académie des sciences, au Bureau des longitudes, et premier président de l'Union géodésique et géophysique internationale créée en 1919, avant de disparaître en 1937.

Conformément au souhait de la commission du NGF et de Lallemand, le marégraphe poursuit ses observations de façon continue après la fixation de l'origine des altitudes qui avait pourtant présidé à sa création. En 1940, à la suite de l'armistice signé en juin 1940, le général Hurault, directeur du Service géographique des armées, transforma cet établissement en institution civile, l'Institut géographique national (IGN, devenu en 2012 Institut national de l'information géographique et forestière), et y intégra le service du NGF ; de fait, le marégraphe de Marseille passa sous la gestion de l'IGN. La libération de Marseille, fin août 1944, fut un moment de brève interruption des observations au marégraphe, et vit la destruction de l'échelle du fort Saint-Jean qui avait servi d'origine au réseau Bourdalouë.

Dans les années 1960, les progrès observationnels et théoriques de la géodésie conduisirent l'IGN, sous l'impulsion de Jean-Jacques Levallois, directeur de la géodésie, à réviser totalement la définition des altitudes utilisées en France, en s'inspirant notamment des concepts proposés par le soviétique Mikhail Molodensky, et à réobserver l'intégralité du réseau de nivellement. L'origine du réseau n'est pas modifiée, mais l'altitude du repère fondamental est ajustée à la valeur de 1,661 mètre. Dans la même décennie, Charles van de Casteele développe au marégraphe de Marseille une méthode de contrôle de l'amplitude et de la phase des observations marégraphiques qui servira ensuite de norme, pour les marégraphes mécaniques, à la commission océanographique internationale de l'Unesco.

Du déclin des années 1980 à la résurrection à l'aube du XXI^e siècle

Néanmoins, l'intérêt pour le marégraphe faiblit dans les années 1980. Le dernier gardien quitte le marégraphe en 1988, ce qui signe l'arrêt de l'enregistrement des marégrammes. Les niveaux moyens continuent toutefois d'être relevés chaque semaine sur les cadrans du totalisateur. La mise sur orbite de la mission d'altimétrie satellitaire Topex-Poseidon à la fin 1992 redonne toutefois un intérêt au marégraphe de Marseille. En 1996, sous l'impulsion de Claude Boucher, le Comité national français de géodésie et géophysique (CNFGG) publie une recommandation de soutien au marégraphe qui encourage notamment le projet d'extraction horaire des hauteurs d'eau à partir des marégrammes,



Figure 5. Le marégraphe côtier numérique aujourd'hui en fonctionnement à Marseille. À gauche, le volant d'ouverture de la porte intérieure de la galerie. À droite, le câble reliant le flotteur au marégraphe mécanique. Crédit : Les Amis du marégraphe de Marseille.

proposé par l'IGN avec la coopération du Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom) et suggère d'équiper le bâtiment d'appareils modernes pour en faire un véritable observatoire. La dégradation des lieux l'année suivante sonne comme un réveil pour la communauté concernée. En 1998, l'observatoire intègre le réseau de marégraphes Ronim géré par le Shom et un premier marégraphe côtier numérique à ultrasons est installé dans le puits (qui sera remplacé par un appareil à onde radar en 2009, voir figure 5), ainsi qu'une station GPS permanente sur le toit du bâtiment technique. Un point de référence de gravimétrie absolue est également implanté au marégraphe.

Désormais véritable observatoire automatisé du littoral, le marégraphe de Marseille est reconnu internationalement : ses données sont diffusées sur le portail du Shom¹ et il est intégré au Système d'observation du niveau des eaux littorales (Sonel), qui détermine les niveaux moyens diffusés par le Service permanent pour le niveau moyen de la mer (PSMSL) [2], et au réseau « core » du Système global d'observation du niveau de la mer (Gloss) de l'Unesco. Enfin, le marégraphe de Marseille est reconnu en 2023 station terrestre d'observation maritime exploitée depuis au moins 100 ans par le XIX^e congrès de l'Organisation météorologique mondiale à Genève.

Parallèlement, la reconnaissance de l'intérêt patrimonial du marégraphe émerge. Ainsi, le bâtiment et l'appareil sont classés monuments historiques en 2002, et les travaux conduits en 2007 ont

1. Les Amis du marégraphe de Marseille

Créée en 2021 sous l'impulsion de l'ingénieur de l'IGN Alain Coulomb, l'association « Les Amis du marégraphe de Marseille² » vise à faire connaître le marégraphe de Marseille, à en valoriser les atouts patrimoniaux, en présenter le rôle d'observatoire moderne et à s'en servir comme d'un levier pour expliquer le changement climatique et la nécessité de s'adapter à ses conséquences, en l'occurrence l'élévation du niveau de la mer. Elle s'appuie depuis sa création sur le soutien de nombreux partenaires institutionnels, ainsi que sur des personnalités reconnues qui ont accepté d'en être membres d'honneur. En lien avec l'IGN, l'association vise à développer des visites du bâtiment.

rendu au bâtiment son aspect d'origine. À la même époque, Alain Coulomb, ingénieur de l'IGN, entame l'étude des archives intégrales du marégraphe qui débouchera sur la publication d'un ouvrage en 2014 (principale source de cet article pour les aspects historiques) [3], et organise, à partir de 2013, au nom de l'IGN, avec le concours du Shom, l'ouverture du marégraphe pour les Journées européennes du patrimoine. Le succès rencontré par ces initiatives auprès du grand public conduisent à la création de l'association « Les amis du marégraphe de Marseille » en 2021 (voir encadré 1) qui est officiellement reconnue en 2022 comme une association d'intérêt général.

1. <https://data.shom.fr/donnees/refmar/MARSEILLE>

2. <https://amis-maregraphe-marseille.fr/>

Quelques contributions scientifiques remarquables

L'observation du niveau de la mer au marégraphe de Marseille a pu être comparée à celle de l'Atlantique par les observations des dénivelées entre les repères fondamentaux associés à d'autres marégraphes. Il est ainsi apparu que le niveau de la mer à Marseille est plus bas d'environ 15 cm que celui observé à Saint-Jean-de-Luz et de 20 cm que celui observé à Brest [4] ; c'est la manifestation de la topographie dynamique, qui est la différence entre le niveau moyen de la mer et l'équipotentielle du champ de pesanteur qui l'approxime le mieux, que l'on appelle géoïde, et dont l'origine réside notamment dans l'existence des courants marins (voir encadré 2).

Aux échelles de temps de la minute à la dizaine de minutes, les observations du marégraphe de Marseille contribuent à l'alerte opérationnelle face au risque de tsunami en mer Méditerranée [5], ainsi qu'à la vigilance météorologique vagues-submersion [6].

L'équipement du marégraphe avec une station GPS (puis GNSS, c'est-à-dire avec les autres systèmes de navigation satellitaire comme le russe Glonass et l'europpéen Galileo) a permis de mesurer le mouvement vertical du support rocheux dont le marégraphe est solidaire et de séparer la part océanique d'élévation du niveau de la mer de celle liée au mouvement du sol. À Marseille, il s'avère que ce mouvement est relativement faible : sur la base de 21 ans de données, Sonel indique une tendance estimée³ à $-0,49 \pm 0,27$ mm/an. Ainsi, si la tendance apparente d'élévation du niveau de la mer est de 1,39 mm/an entre 1960 et 2018 (figure 6), elle apparaît de seulement $0,90 \pm 0,48$ mm/an une fois corrigée de cet effet [7]. Sans considérer l'effet du sol, on observe que le niveau moyen de la mer s'est élevé de 18 cm entre la période 1885-1897, utilisée comme définition de l'origine des altitudes, et la période 1995-2014 qui, certes de longueur différente, forme néanmoins la période de référence pour le niveau de la mer du Groupe international d'experts sur le climat (Giec).

L'analyse de la variabilité multidécadennale de la tendance d'élévation du niveau de la mer à Marseille sur des

périodes de 30 ans montre par ailleurs que celle-ci était inférieure à 1 mm/an avant les années 1920, avant d'augmenter autour de 2 mm/an jusque dans les années 1960. Le niveau de la mer connaît ensuite une légère baisse pendant une vingtaine d'années. Depuis les années 1980, il s'élève à un rythme moyen supérieur à 2,5 mm/an. Sur la période 1885-2022, la tendance

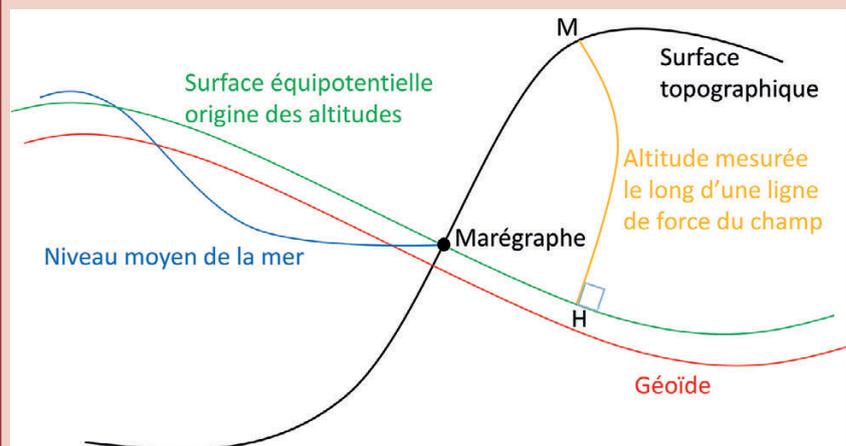
de l'élévation du niveau de la mer est d'environ 1,4 mm/an à Marseille. Si, comme déjà évoqué, le niveau de la mer est plus bas à Marseille qu'à Brest, il s'y élève aussi moins vite, puisque la tendance à Brest est d'environ 1,7 mm/an sur la même période [9].

Si on étudie l'élévation du niveau de la mer en considérant un polynôme de

2. Niveau de la mer et altitudes

L'altitude est une coordonnée géographique associée à tout point situé à proximité de la Terre et mesurée le long d'une ligne de force du champ de pesanteur passant par ce point. En tout point d'une telle ligne de force, on peut définir une surface, dite équipotentielle, qui lui est orthogonale ; l'accélération de la pesanteur g est un vecteur égal à l'opposé du gradient du potentiel, et donc partout tangent aux lignes de force. L'altitude prend donc comme origine une équipotentielle particulière, appelée géoïde, qui est celle qui approxime le mieux le niveau moyen de la mer. Si le niveau moyen de la mer ne forme pas une équipotentielle en raison de l'existence des courants océaniques, c'est

néanmoins l'observation du niveau moyen de la mer sur une période de référence qui forme l'origine des altitudes sur les territoires dotés d'un système d'altitude ; cette origine est donc proche du géoïde, mais rarement équivalente à celui-ci. L'élévation du niveau de la mer déplace le géoïde vers le haut et les transferts de masse associés à celle-ci en modifiant la forme. Néanmoins, une valeur conventionnelle du potentiel de pesanteur adoptée par les organes internationaux comme l'Association internationale de géodésie ou l'Union géodésique et géophysique internationale définissent un géoïde de référence, qui sert de base au projet, à ce jour non encore réalisé, d'unification des systèmes d'altitudes.



Représentation du niveau moyen de la mer observé par un marégraphe, de la surface équipotentielle du champ de pesanteur qui l'approxime au mieux (le géoïde) et de la surface équipotentielle du champ de pesanteur qui fait office de référence pour les altitudes. L'altitude de tout point est mesurée le long d'une ligne de force en tout point perpendiculaire aux équipotentielles du champ de pesanteur.

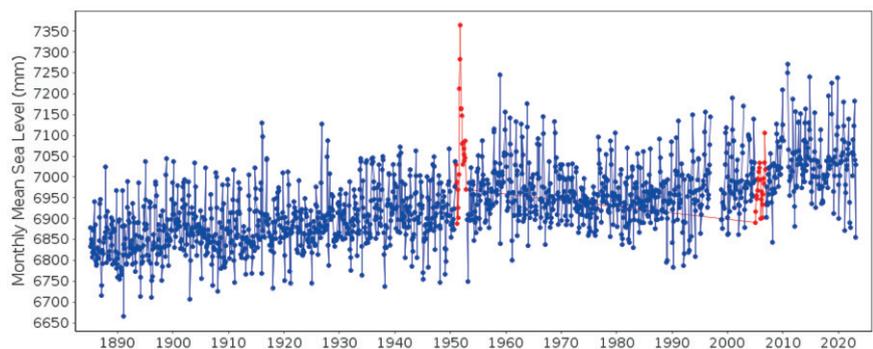


Figure 6. Courbe des observations mensuelles moyennes du niveau de la mer au marégraphe de Marseille diffusées par le Service permanent du niveau moyen de la mer (PSMSL) [2]. Les points rouges correspondent à des observations considérées comme suspectes. Il est à noter que, sur la période couverte par les observations d'altimétrie spatiale, les observations satellitaires et marégraphiques sont en excellent accord [8].

3. <https://www.sonel.org/?page=gps&idStation=735>

degré 2, tenant compte de l'accélération du phénomène, sur des périodes de 60 ans, la tendance apparaît singulièrement plus élevée en début de période que lorsqu'elle est estimée avec un modèle linéaire : elle est autour de 4 mm/an jusque dans les années 1940. Le niveau de la mer baisse d'environ 2 mm/an autour de 1950, avant de remonter jusqu'aux valeurs actuelles supérieures à 2 mm/an, avec une accélération de l'ordre de 1 mm/an par décennie. Néanmoins, sur l'ensemble de la période 1885-2022, on retrouve une tendance de 1,4 mm/an identifiée avec le modèle linéaire et une accélération quasiment nulle [9].

Ces variations ont été analysées, à l'instar de celles du bassin méditerranéen et du niveau global, dans plusieurs études qui se sont appuyées sur la longueur et la qualité inestimables de la série d'observation du niveau de la mer du marégraphe de Marseille. Parmi celles-ci, Calafat *et al.* [10] ont étudié les causes des variations du niveau de la mer dans le bassin méditerranéen. La baisse y est estimée entre 1960 et 1989 à 0,3 mm/an en moyenne et est attribuée de façon dominante à une anomalie positive pluridécennale de pression atmosphérique (effet de baromètre inverse). Sur la période 2000-2018, l'élévation est estimée sur la partie occidentale du bassin à 3,6 mm/an, dominée de façon équivalente à 1,5 mm/an chacune, par la contribution stérodynamique (expansion thermique sous l'effet du réchauffement et modification des courants) et la contribution de masse (fonte contemporaine de l'Antarctique et du Groenland, transferts d'eaux continentales et effets géophysiques associés). Le résidu de l'élévation se répartit entre l'effet de baromètre inverse à 0,2 mm/an et l'ajustement isostatique glaciaire (réponse visco-élastique persistante du manteau de la Terre à la fonte des calottes glaciaires suite à la sortie du dernier maximum glaciaire, il y a 15 000

ans) à 0,3 mm/an. Une autre étude méritant l'attention est celle de Frederikse *et al.* [11] portant sur le bilan du niveau global moyen de la mer depuis 1900. Ils montrent qu'à l'échelle globale la fonte des glaciers continentaux et du Groenland, ainsi que l'expansion thermique, ont dominé l'élévation du niveau de la mer jusqu'au milieu du XX^e siècle. Après la seconde guerre mondiale, la construction des grands barrages a été telle qu'elle a réduit drastiquement la contribution des eaux continentales à l'élévation du niveau de la mer, contrebalançant les effets climatiques à l'origine de son élévation de long terme. Depuis les années 1970, les facteurs dominant l'élévation du niveau global moyen de la mer sont l'accélération de l'expansion thermique et la perte de masse du Groenland. Ainsi, on voit que la baisse du niveau de la mer observée à Marseille dans les années 1950-1960 a des causes atmosphériques régionales distinctes de la pause dans l'élévation observée au niveau global.

La publication du 6^e rapport du groupe I du Giec [12] s'est accompagnée du développement et de la mise en ligne, par la Nasa, d'un simulateur de projections d'élévation du niveau de la mer régional⁴ [13, 14]. Celui-ci propose des projections localisées d'élévation du niveau de la mer jusqu'à 2150 pour les différents scénarios socio-économiques d'émissions de gaz à effet de serre du Giec, avec incertitudes associées, notamment de façon spécifique pour un ensemble de marégraphes dont celui de Marseille (figure 7). À l'instar des projections globales, il apparaît ainsi que le niveau de la mer à Marseille va continuer de s'élever quel que soit le scénario suivi et de façon indistincte du scénario jusqu'environ la moitié du XXI^e siècle. À l'horizon 2100, la plage de valeurs probables (intervalle de confiance 17-83 %) par rapport au niveau de référence moyen sur la période 1995-2014 va de 0,19-0,57 m pour le scénario SSP1-1.9 cohérent avec

un pic de température globale de 1,5 °C à 0,83-1,33 m pour le scénario SSP5-8.5 simulant l'absence de politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre et envisageant les processus mal connus à faible probabilité et à fort impact d'effondrement des calottes glaciaires, notamment de l'Antarctique. Ce dernier scénario signerait toutefois une accélération très importante de l'élévation du niveau de la mer, puisque le même intervalle de confiance passerait, en 2150, à 0,80-4,89 m.

Les incertitudes qui pèsent sur les projections d'élévation du niveau de la mer, tant à Marseille qu'au niveau global, tiennent essentiellement à trois causes ; la première à la variabilité naturelle du climat et du niveau de la mer, la seconde aux politiques climatiques qui seront effectivement suivies, la troisième à la réponse de la Terre à celles-ci. Concernant ce dernier point, les incertitudes pesant sur la sensibilité climatique (c'est-à-dire la réponse de la température à l'élévation de la concentration de gaz à effet de serre) [15] ou la réponse des calottes glaciaires au réchauffement global de l'air et de l'océan contribuent à entacher les projections d'élévation du niveau de la mer de fortes incertitudes. Plus spécifiquement, à Marseille, le marégraphe contribue ainsi tout à la fois à l'observation et à la compréhension du changement climatique, aux causes de l'élévation du niveau de la mer, et forme un indicateur des menaces qui pèsent sur la ville de Marseille et sur les littoraux méditerranéens. Paradoxalement, ce monument historique, vigie du changement climatique et par définition installé à proximité du niveau de la mer, est également menacé, si ce n'est condamné à long terme par l'élévation du niveau de la mer.

Conclusion : l'indispensable adaptation à l'élévation du niveau de la mer

L'adaptation à l'inéluctable montée du niveau de la mer est donc confrontée à des incertitudes importantes, difficiles à faire comprendre aux acteurs concernés, et suppose de regrouper des expertises de disciplines et d'organismes très variés. Elle se heurte de surcroît

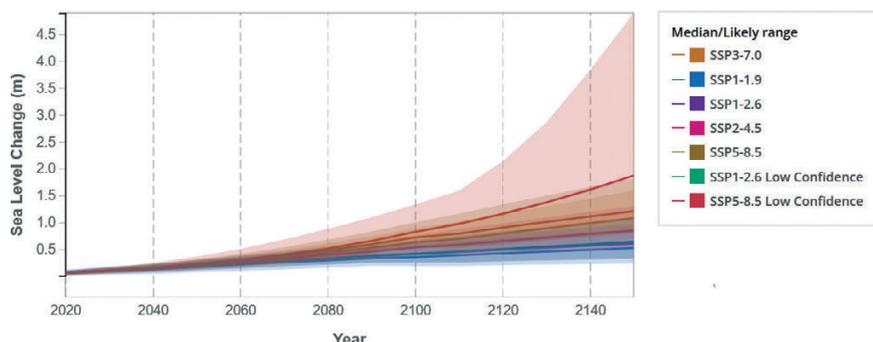


Figure 7. Projections du niveau de la mer à Marseille jusque 2150 pour différents scénarios socio-économiques d'émissions de gaz à effet de serre du Giec (médiane, intervalle probable) par rapport au niveau moyen de la période 1995-2014. Crédit : Giec, Nasa [12-14].

4. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

au fait que les littoraux sont des zones fortement peuplées et aménagées, et que les durées caractéristiques des transformations à opérer se comptent en décennies, alors que le temps pour les engager est de plus en plus réduit, d'autant que l'élévation du niveau de la mer s'accélère. Des services climatiques sont donc requis pour produire, mettre en forme et transférer aux populations et aux décideurs les informations scientifiques utiles à l'aménagement des littoraux dans ce contexte. Des prototypes avancés de tels services existent, par exemple aux États-Unis avec la *Sea level rise task force*, qui réunit des experts de différentes administrations (dont la Nasa, la Noaa et l'USGS) et d'universités, et qui produit des rapports d'expertise et des interfaces en ligne ayant cette vocation. En Europe, les projets H2020 Coclico⁵ et Protect⁶ sont des exemples d'ébauches avancées de ce que pourrait recouvrir un tel service. La préparation

5 . <https://coclicoservices.eu/>

6 . <https://protect-slr.eu/>

du volet « niveau de la mer » du troisième plan national d'adaptation au changement climatique a également été l'occasion de réunir les experts français des différents organismes concernés par ce défi et mettre en place une trajectoire de référence d'adaptation au changement climatique (Tracc).

Le point critique des incertitudes pesant sur les projections peut être attaqué par plusieurs modes. La compréhension des processus associés à la réponse du système Terre peut être améliorée et intégrée aux modèles de calottes polaires et aux modèles de climat. Une autre approche consiste à exploiter les observations d'élévation du niveau de la mer pour contraindre les simulations et rendre les projections conditionnelles aux observations, ce qui suppose un travail de reconstruction longue du niveau de la mer passé, avec une caractérisation des incertitudes associées et une impérative réduction de celles-ci, notamment sur l'infrastructure géodésique aux

différents systèmes d'observations du niveau de la mer [16]. C'est à l'aune de cet impératif que l'on mesure le caractère inestimable des longues séries marégraphiques telles que celle du marégraphe de Marseille.

Remerciements

Je remercie les auteurs des projections pour le développement et la mise à disposition des projections d'élévation du niveau de la mer, leurs agences de financement pour le soutien au développement des projections, et l'équipe Niveau de la mer de la Nasa pour le développement et l'hébergement de l'outil de projection du niveau de la mer du 6^e rapport d'évaluation du Giec.

Je remercie enfin l'éditeur, un relecteur anonyme et le secrétaire d'édition de la revue pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer significativement la précision de cet article.

Bibliographie

- [1] 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 de l'université de la Rochelle.
- [2] Holgate S.J. *et al.*, 2013. New data systems and products at the permanent service for mean sea level. *Journal of Coastal Research*, 29, 493-504.
- [3] Coulomb A., 2014. *Le marégraphe de Marseille. De la détermination de l'origine des altitudes au suivi des changements climatiques : 130 ans d'observation du niveau de la mer*. Presse des Ponts.
- [4] Lavoué S., Jamet O., 2023. Intercomparaison par nivellement de précision de niveaux moyens de la mer aux principaux marégraphes hexagonaux. *XYZ*, 177, 44-48.
- [5] Hébert H., 2023. Retour sur 20 ans de mesures marégraphiques pour la surveillance des tsunamis et l'alerte opérationnelle. *XYZ*, 177, 49-53.
- [6] Jourdan D., Caillaud E., Pasquet A., Michaud H., Paradis D., 2023. Prévision et avertissement du risque de submersion marine : la vigilance vague-submersion. *XYZ*, 177, 54-60.
- [7] Gravelle M. *et al.*, 2023. The ULR-repro3 GPS data reanalysis and its estimates of vertical land motion at tide gauges for sea level science. *Earth System Science Data*, 15, 497-509.
- [8] Prandi P., Ablain M., 2023. Observation du niveau de la mer par altimétrie spatiale. *XYZ*, 177, 29-34.
- [9] Chenal J., 2024. Uncertainties on past and future sea level rise for Marseille and Brest tide gauges. Soumis à Comptes rendus Géosciences.
- [10] Calafat F.M., Frederikse T., Horsburgh K., 2022. The sources of sea-level changes in the Mediterranean Sea since 1960. *J. Geophys. Res. Oceans*, 127, e2022JC019061.
- [11] Frederikse T. *et al.*, 2020. The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, 584.7821, 393-397.
- [12] Fox-Kemper B. *et al.*, 2021. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1211-1362.
- [13] Garner G.G. *et al.*, 2021. IPCC AR6 Sea Level Projections. Version 20210809. Dataset accessed [2024-07-30]
- [14] Kopp R.E. *et al.*, 2023. The Framework for Assessing Changes To Sea-Level (FACTS) v1.0: A platform for characterizing parametric and structural uncertainty in future global, relative, and extreme sea-level change. *Geoscientific Model Development*, 16, 7461-7489.
- [15] Meyssignac B. *et al.*, 2023. Mesurer le déséquilibre énergétique de la planète pour évaluer la sensibilité du climat aux émissions de gaz à effet de serre. *La Météorologie*, 122, 23-30.
- [16] Meyssignac B. *et al.*, 2023. How accurate is accurate enough for measuring sea-level rise and variability. *Nature Climate Change*, 13, 796-803.