

Le marégraphe de Marseille et ses amis

Alain COULOMB

Je voudrais d'abord afficher mon bonheur de voir se concrétiser ce numéro spécial "Niveau de la mer" et ma reconnaissance vis-à-vis de l'association francophone de topographie, d'avoir bien voulu adhérer pleinement à ce projet et nous offrir les moyens de le réaliser. Le marégraphe de Marseille fait légitimement la fierté des Marseillais parce que "le zéro est à Marseille". Mais les intérêts historiques, scientifiques, culturels, environnementaux et sociétaux du marégraphe dépassent très largement le cadre local. C'est ce que nous allons montrer dans cet article.

Un marégraphe unique au monde

Il existe plusieurs centaines de marégraphe dans le monde, mais celui de Marseille est unique pour de multiples raisons :

- le volume et la qualité de son ensemble immobilier ;
- son site exceptionnel, extérieur au port de Marseille ;
- l'extrême finesse de ses premiers enregistrements graphiques ;
- son appareil mécanique dit totalisateur ;
- ses liens avec le nivellement général de la France ;
- la longueur et la qualité de la série de données du niveau de la mer qu'il a produite (série en cours) ;
- un livre qui lui est consacré ;
- les bâtiments et l'appareil totalisateur sont classés monuments historiques ;
- il est le seul observatoire scientifique de ce type dont le rayonnement est l'objet d'un groupement associatif.

L'origine des altitudes françaises continentales

Le marégraphe de Marseille a été établi en 1883-1884 pour fixer l'origine des altitudes françaises continentales (l'altitude 0). Les mesures ont débuté en février 1885 et les douze premières années de mesure ont été utilisées pour fixer ce zéro le 1^{er} janvier 1897¹.

¹ Pour connaître le mode de fixation de ce zéro, lire par exemple l'article "Le marégraphe de Marseille : mesure, patrimoine, climat", paru en avril 2021 dans la revue d'histoire des techniques e-Phaïtos – article cité en bibliographie et accessible sur https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3766.

MOTS-CLÉS

Marégraphe, Marseille, observatoire, niveau de la mer, changements climatiques

C'est pour cette raison technique et historique que le marégraphe de Marseille est géré par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), à la différence de tous les autres marégraphe français importants, administrés par le Shom, le Service hydrographique et océanographique de la marine².

Cette origine des altitudes fut fixée grâce à un marégraphe mécanique dont le fonctionnement peut ainsi être résumé. Une galerie met en communication la mer avec un puits situé à l'intérieur des bâtiments. Cette galerie permet d'obtenir dans ce puits une surface d'eau calme (on parle d'ailleurs de "puits de tranquillisation") dont l'altitude, moyennée sur un certain laps de temps, est identique à celle du niveau extérieur.

Un flotteur est posé sur l'eau dans ce puits. Sa position évolue en fonction des mouvements verticaux de la mer. Par l'intermédiaire d'un câble métallique, les

mouvements de ce flotteur sont transmis à un instrument qui se trouve à un étage supérieur.

Au moyen de rouages, les mouvements verticaux du flotteur sont transformés en mouvements horizontaux d'une pièce appelée "crémaillère" (une barre entraînant autrefois les organes qui traçaient sur papier le niveau instantané de la mer). Le papier d'enregistrement (le marégramme) était déroulé par un cylindre dont la rotation est régulière (il est mu par une horloge). C'est la combinaison des va-et-vient de la crémaillère et de la rotation du cylindre qui donnaient la courbe sinusoïdale traduisant les variations du niveau de la mer en fonction du temps.

L'intérêt essentiel de cet appareil mécanique réside dans sa partie dite "totalisatrice"³. Cet intégrateur mécanique permet, par une simple division de deux chiffres fournis par l'instrument et dont l'un est proportionnel au temps écoulé, de calculer rapidement, et avec une précision extraordinaire, un niveau moyen de la mer sur une période choisie (figure 1).

³ Pour connaître le mode de fonctionnement du totalisateur (ou autrement dit de la partie totalisatrice), lire par exemple l'article "Le marégraphe de Marseille : mesure, patrimoine, climat", paru en avril 2021 dans la revue d'histoire des techniques e-Phaïtos – article cité en bibliographie et accessible sur https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3766.

² La liste des marégraphe gérés par le Shom est sur <https://data.shom.fr/donnees/refmar/download>.

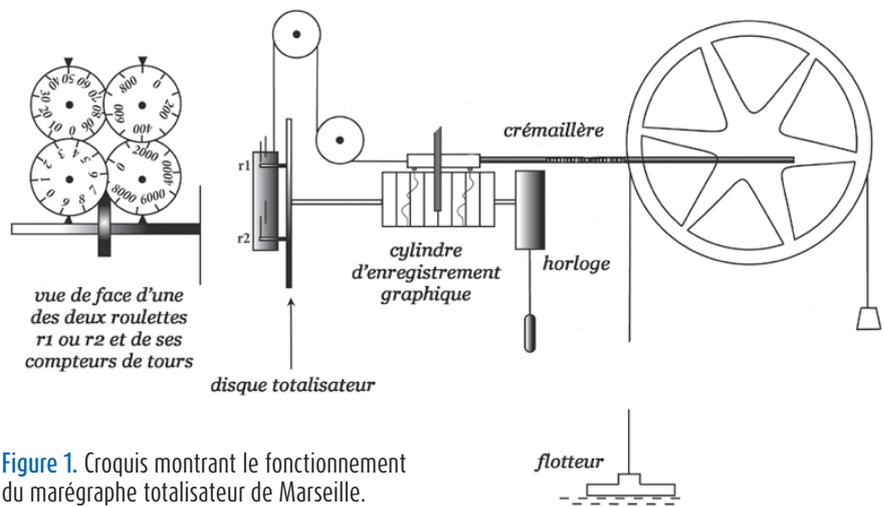


Figure 1. Croquis montrant le fonctionnement du marégraphe totalisateur de Marseille.



Figure 2. Le marégraphe totalisateur de Marseille.

Trois marégraphe totalisateurs furent construits dans les années 1880 : le premier installé sur l'île d'Helgoland dans la mer du Nord, le deuxième à Cadix en Espagne, et le troisième à Marseille. Les deux premiers, non conçus pour durer, disparurent assez rapidement. Celui de Marseille, qui est encore aujourd'hui en parfait état de marche (même si la partie enregistrement papier n'est plus utilisée depuis le départ du dernier gardien en 1988), est donc unique au monde (figure 2).

L'observatoire marégraphe de Marseille a été classé parmi les monuments historiques par un arrêté du 28 octobre 2002.

Un observatoire moderne

Le marégraphe de Marseille est aussi un observatoire moderne du niveau littoral de la mer, intégré dans les programmes nationaux et internationaux de surveillance du niveau des mers.

La série temporelle de Marseille est en cours, et sa qualité actuelle est garantie par deux appareils à la pointe des technologies : un marégraphe côtier numérique appartenant au réseau marégraphe RONIM géré par le Shom⁴ et une station permanente de positionnement satellitaire.

4 <http://refmar.shom.fr/fr/partenaires/producteurs-de-donnees/reseau-maregraphique-ronim>.

Le marégraphe côtier numérique qui équipe actuellement l'observatoire de Marseille fonctionne grâce à des ondes radar. L'instrument mesure le temps de parcours, selon la verticale, d'impulsions électromagnétiques réfléchies par la surface de la mer. Les fichiers des données acquises sont transmis en temps réel au Shom via le réseau téléphonique.

Le marégraphe totalisateur n'en est pas pour autant mis à la retraite. Il est toujours entretenu et, comme le marégraphe numérique, fait l'objet d'un contrôle annuel⁵. Des mesures hebdomadaires y sont constamment effectuées sur sa partie totalisatrice. Le rôle du marégraphe mécanique est d'assurer la continuité de la série de mesures ; il ne faudrait pas que ce qui semble être une hausse du niveau soit en réalité dû à un changement d'appareil ou de technique de mesure.

Les marégraphe de Marseille (mécanique et numérique) mesurent le niveau de la mer par rapport à des repères matériels implantés à l'intérieur des bâtiments. Quand le résultat de ces mesures donne une valeur qui diminue avec le temps, la question qu'il convient de se poser est : que mesure-t-on, une hausse du niveau de la mer, un tassement du point de référence, ou une combinaison de ces deux phénomènes ?

Les informations transmises par les satellites GNSS (*Global Navigation Satellite System*), nom générique des systèmes de navigation satellitaires sur l'ensemble de la planète, peuvent répondre à ces questions. Des séries longues d'observations GNSS, établies au moyen de stations permanentes associées avec les marégraphe, donnent une information sur le mouvement absolu du sol ; les marégraphe renseignent sur les mouvements de la mer relatifs au sol ; la combinaison des deux permet de comprendre le comportement réel du niveau de la mer à l'endroit considéré.

En recevant les signaux émis par les satellites GNSS, l'antenne installée sur le

5 Pour en savoir plus sur ce type de contrôles, lire "Contrôle des marégraphe de Marseille", instruction technique accessible sur https://amis-maregraphique-marseille.fr/?page_id=4686.



Figure 3. L'antenne de la station GNSS du marégraphe de Marseille.

toit du marégraphe de Marseille depuis 1998 (figure 3), couplée à un récepteur qui est à l'intérieur du bâtiment, montre que l'élévation de l'observatoire est nulle sur les 25 dernières années, et donc que la quantité mesurée par les marégraphe de Marseille correspond bien, sur cette période en tous cas, à une élévation du niveau de la mer⁶.

La longueur et la qualité de la série de Marseille

La série de hauteurs d'eau fournie par le marégraphe de Marseille est très longue (138 ans d'observations, pratiquement sans interruption). Les moyennes mensuelles diffusées par le *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL) ne montrent que trois périodes de mauvais fonctionnement durable, en 1951-1952, en 1997-1998 et en 2010⁷.

Le site internet du PSMSL témoigne également de la qualité de la série de hauteurs d'eau produite à Marseille en affichant : "Completeness = 97 %"⁸. Ce critère indique que depuis 1885, le marégraphe de Marseille a fonctionné correctement pendant 97 % du temps, ce qui est tout à fait exceptionnel et remarquable.

6 Pour en savoir plus sur la station GNSS du marégraphe de Marseille : <https://rgp.ign.fr/STATIONS/#MARS>.

7 En 1951, l'installation du flotteur métallique d'un marégraphe de type Brillié à côté du flotteur en cuivre du marégraphe totalisateur, a créé un courant galvanique qui a, par exemple, faussé les résultats des mesures jusqu'à ce que les deux flotteurs soient recouverts de matière plastique en 1952.

8 <https://psmsl.org/data/obtaining/stations/61.php>



La série de Marseille est l'une des plus cohérentes (très peu de changements d'appareils, pratiquement pas de changements dans l'environnement des mesures, etc.).

Pour ces raisons, le marégraphe de Marseille est intégré depuis 1985, comme le marégraphe de Brest, au réseau GLOSS (*Global Sea Level Observing System*)⁹. Ce réseau mondial de marégraphe fut établi sous l'égide de la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO.

Très récemment, la longueur et la qualité des séries produites à Marseille et à Brest ont été des éléments d'appréciation très importants des candidatures de ces deux observatoires à une reconnaissance officielle par l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

Le 24 mai dernier, l'OMM a classé les marégraphe de Brest et de Marseille parmi les "stations terrestres d'observation maritime exploitées depuis au moins cent ans". Cette labellisation souligne que ces deux marégraphe ont une importance particulière, déjà reconnue depuis longtemps par la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO. Dans le contexte des changements climatiques, elle met en avant leur rôle sociétal actuel.

L'association "Les amis du marégraphe de Marseille" est fière d'avoir, en décembre 2021, signalé à l'Administration française l'appel à candidatures publié par l'OMM. Elle est fière d'avoir contribué à montrer que le marégraphe de Marseille répondait à tous les critères pour être lauréat et à avoir collaboré pour que sa candidature puisse être présentée.

Variations passagères du niveau de la mer

Le niveau de la mer dépend notamment de la marée astronomique (l'attraction de la Lune essentiellement), phénomène donnant un résultat bien connu et prédictible, et d'autres phénomènes (météorologiques, clima-

⁹ <https://gloss-sealevel.org/>

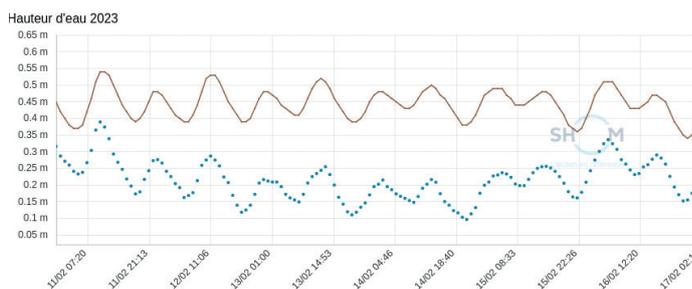


Figure 4. Extrait de la courbe des hauteurs d'eau enregistrées par le marégraphe de Marseille en février 2023 (courbe publiée sur <https://data.shom.fr/>). Entre le 8 et le 25 février, la courbe des hauteurs d'eau réelles (courbe bleue) était à Marseille au-dessous de la courbe des hauteurs d'eau prédites (courbe marron). La décote a atteint 30 centimètres aux environs du 13 février.

tiques, mouvements verticaux de l'écorce terrestre, etc.). Au marégraphe de Marseille, observatoire implanté non loin de l'estuaire du Rhône, les eaux douces provenant de ce fleuve et leur mixage avec les eaux salées de la Méditerranée, peuvent par exemple créer des variations plus ou moins aléatoires du niveau de la mer, à court ou long terme.

Le terme surcote/décote désigne la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule. En d'autres termes, la surcote/décote instantanée est la différence, à un instant t , entre la hauteur d'eau observée et la hauteur d'eau prédite. Il s'agit d'une surcote quand la hauteur d'eau observée est supérieure à la hauteur d'eau prédite ; on parle de décote dans le cas inverse.

À Marseille, port situé au bord d'une mer à faibles marées, l'effet produit sur le niveau de la mer par les variations météorologiques (la pression atmosphérique essentiellement, mais aussi les vents, la pluie, etc.) dépasse assez souvent l'effet produit par les mouvements des astres. Pour illustrer ce phénomène, prenons deux exemples récents.

Au mois de février dernier, nombreux ont été ceux qui se sont étonnés du niveau très bas de la Méditerranée, notamment à Marseille (*figure 4*). Ce niveau était dû principalement à des conditions anticycloniques, caractérisées par une pression atmosphérique très forte dont l'effet était accentué par un épisode de sécheresse très marqué. Au contraire, au mois de juin, les basses pressions atmosphériques ont

donné des niveaux d'eau assez élevés. La surcote a presque atteint 30 cm le 22 juin. Ces épisodes passagers, dus aux conditions météorologiques, ne doivent pas être confondus avec l'élévation du niveau moyen des mers, d'origine climatique.

L'élévation du niveau moyen de la mer à Marseille

Cette dernière est due à deux phénomènes principaux : la fonte des glaces (calottes polaires et glaciers de montagnes) et la dilatation thermique (l'eau chaude occupe un volume plus important que l'eau froide).

Les contributions de ces deux phénomènes varient avec le temps et le réchauffement de la Terre. En première approximation, les effets étaient à peu près équivalents sur la période 1970-2020. Au cours des années les plus récentes, l'élévation est due pour 2/3 à la fonte des glaces et pour 1/3 à l'expansion thermique.

L'élévation anthropique¹⁰ du niveau moyen des mers n'est pas linéaire. Pour le montrer à partir des mesures faites à Marseille, commençons par mentionner l'existence d'un ancien marégraphe implanté pendant 18 mois, entre octobre 1849 et avril 1851, dans le port marseillais de La Joliette.

Les données produites par cet appareil ont été rattachées en 2014 à celles produites par le marégraphe totalisateur situé à environ 3 km de La Joliette. Cette opération a donné lieu à la parution d'un

¹⁰ Anthropique : dû à l'activité humaine.



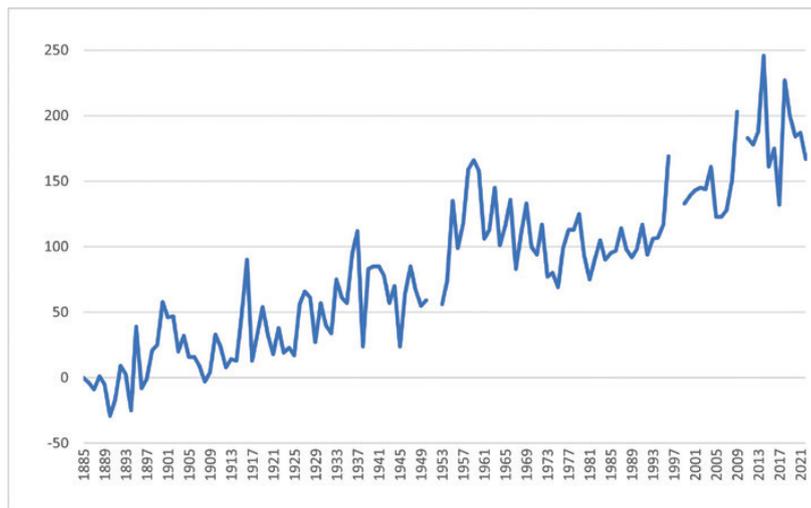


Figure 5. Élévation du niveau moyen de la mer à Marseille entre 1885 et 2022 (mm). Courbe établie à partir des moyennes mensuelles diffusées par le PSMML. On voit sur cette courbe trois interruptions correspondant aux périodes de mauvais fonctionnement évoquées précédemment.

► article dans *"Journal of geodesy"*¹¹. Cet article montre que le rythme d'élévation du niveau de la mer pendant la période 1849-2012 est estimé à 1,1 mm/an.

La courbe établie à partir des moyennes mensuelles établies par le seul marégraphe totalisateur pendant les 100 premières années d'existence de cet appareil (entre 1885 et 1985), donne une vitesse moyenne d'élévation d'environ 1,3 mm/an, légèrement supérieure donc, à celle évoquée ci-dessus (figure 5).

Mais l'accélération est surtout montrée en considérant les mêmes moyennes mensuelles sur les 40 dernières années¹². La vitesse moyenne d'élévation est alors d'environ 2,8 mm/an, qui est plus de deux fois supérieure aux 1,3 mm/an évoqués ci-dessus¹³.

Parfois, des visiteurs du marégraphe de Marseille émettent l'idée que : *"quelques millimètres par an, ce n'est pas grand-*

¹¹ Article de Guy Wöppelmann *"Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 and 1988 and its extension back to 1849-1851"* – article cité en bibliographie et accessible sur https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=4686.

¹² Cette durée de 40 ans est celle qui est la plus communément admise par les scientifiques pour obtenir une tendance robuste et fiable.

¹³ Cette vitesse de 2,8 mm/an (sur la période 1982-2022) est inférieure à celle de 3,2 mm/an (sur la période 1980-2020) qui avait été publiée dans l'article "Les hauteurs d'eau mesurées au marégraphe de Marseille" (n° 171 d'XYZ), car les moyennes annuelles faibles de 2021 et 2022 minimisent cette vitesse.

chose". Qu'ils se détrompent, d'après le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), l'élévation du niveau de la mer pourrait directement menacer plus d'un milliard de personnes d'ici 2050. Il y a urgence à agir. *"Si nous agissons maintenant, nous pouvons encore assurer un avenir durable et vivable pour tous"*. Les mots sont simples et clairs ; ce sont ceux d'Hoesung Lee, président du GIEC. C'est dans ce contexte que la labellisation par l'OMM prend tout son sens. C'est également dans cet esprit que se situent les actions des amis du marégraphe de Marseille.

Les amis du marégraphe de Marseille

L'association "Les amis du marégraphe de Marseille" a été créée en janvier 2021. Elle a pour objet de réunir des personnes physiques ou morales souhaitant agir pour faire mieux connaître le marégraphe de Marseille, son histoire et son intérêt scientifique actuel.

Valoriser les atouts patrimoniaux exceptionnels du marégraphe de Marseille, faire mieux connaître son rôle d'observatoire moderne du niveau de la mer et vulgariser les notions scientifiques liées aux observations qui y sont effectuées, nous conduit inévitablement à participer, avec nos moyens, à l'information sur les changements climatiques et à la nécessité d'agir pour les atténuer et pour s'adapter à leurs conséquences.



Figure 6. Une amie du marégraphe lors de la Fête de la science en octobre 2022. Illustration expérimentale de l'influence de la pression atmosphérique sur le niveau de la mer.

L'association "Les amis du marégraphe de Marseille" a été reconnue comme un organisme d'intérêt général en juin 2022. Cette reconnaissance est pour nous très importante : bien au-delà des avantages fiscaux qu'elle procure, et parce que les mots ont un sens, elle souligne l'intérêt de notre action pour le plus grand nombre de nos concitoyens.

Nos moyens d'action sont nombreux : conférences, articles de presse, stands informatifs (figure 6), interventions en milieu scolaire, réseaux sociaux, visites du marégraphe, etc.

Concernant les visites, nous avons mis en ligne, au mois de mars dernier, une première visite virtuelle des bâtiments du marégraphe¹⁴. Cette visite est complémentaire des visites réelles que nous voulons continuer d'organiser¹⁵. Notre association continue par ailleurs d'explorer d'autres pistes pour la réalisation d'outils encore plus immersifs.

En février 2023, nous avons signé avec l'IGN une convention qui autorise notre association à occuper temporairement le marégraphe pour organiser des visites, sous réserve du classement de cet observatoire en Établissement recevant du public (ERP). Cette demande de classement est en cours ; nous espérons obtenir cet agrément très bientôt. Cela permettra des périodes d'ouverture au

¹⁴ https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=5014

¹⁵ Voir l'article Relevé 2D et 3D du marégraphe de Marseille – XYZ n° 173, décembre 2022.

public plus longues et plus fréquentes que celles connues ces dernières années.

En 2023, nous avons proposé aux Marseillais, entre le 5 et le 30 septembre, à la bibliothèque de l'Alcazar, une exposition de photographies et d'objets relatifs au marégraphe de Marseille.

Un projet de bande dessinée consacrée au marégraphe commence à prendre corps.

Un moyen de communication auquel nous tenons beaucoup est de faire appel à des artistes pour valoriser le marégraphe de Marseille par l'intermédiaire de nos comptes Instagram et Facebook. Nous publions fréquemment sur ces réseaux et, tous les 15 jours environ, nous mettons en avant une œuvre artistique valorisant le marégraphe de Marseille ou sensibilisant à la hausse du niveau moyen des mers et aux changements climatiques. Peintres, poètes, sculpteurs, etc., nous font l'honneur de créer bénévolement dans ce noble but. Nous étions 17 fondateurs en 2021 ; nous sommes aujourd'hui plus de 150 amis passionnés et actifs. Rejoignez-nous ! ●

Contact

Alain COULOMB, président de l'association "Les amis du marégraphe de Marseille", amis.maregraphe@gmail.com

Bibliographie

VINCENT Robert - *Il y a 100 ans, le marégraphe de Marseille* - XYZ n° 73, décembre 1997.

COULOMB Alain - *Le marégraphe de Marseille : patrimoine et modernité* - XYZ n° 118, mars 2009. Pour lire cet article, voir https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=4686

WÖPPELMANN Guy et al. - *Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849-1851* - Journal of geodesy - September 2014. Pour lire cet article, voir https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=4686.

COULOMB Alain - *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* - livre de 640 pages

publié en 2014 aux Presses des Ponts (l'AFT est coéditrice).

XYZ n° 141, décembre 2014 : annonce relative à la parution du livre ci-dessus.

COULOMB Alain - *Le marégraphe de Marseille* - article mis en ligne le 11 janvier 2021 sur le site internet du Bureau des longitudes : <http://bdl.ahp-numerique.fr/focus-instruments-ac-maregraphe-marseille>

COULOMB Alain - *Les amis du marégraphe de Marseille* - XYZ n° 166, mars 2021.

Pour lire cet article, voir la réalisation de mars 2021 sur https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3766

COULOMB Alain - *Le marégraphe de Marseille : mesure, patrimoine, climat* - revue numérique e-Phaistos : <https://journals.openedition.org/ephaistos/8716>.

COULOMB Alain - *Le marégraphe de Marseille et son patrimoine culturel* - revue numérique La Gazette. Pour lire cet article, voir la réalisation du 20 janvier 2022 sur https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3782

COULOMB Alain - *Les hauteurs d'eau mesurées au marégraphe de Marseille* - XYZ n° 171, juin 2022. Pour lire cet article, voir la réalisation du 15 juin 2022 sur https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3782

CLÉDAT Emmanuel - *Relevé 2D et 3D du marégraphe de Marseille* - XYZ n° 173, décembre 2022. Pour lire cet article, voir la réalisation du 15 décembre 2022 sur https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3782

ABSTRACT

The author would like to express his delight at seeing this special "Sea Level" issue come to fruition, and his gratitude to the Francophone Association of Surveying, for having agreed to fully support this project and provide us with the means to make it a reality. The Marseilles tide gauge is a legitimate source of pride for the people of Marseilles, because "zero is in Marseilles". But the historical, scientific, cultural, environmental and societal interests of the tide gauge go far beyond the local context. This is what we're going to show in this article.

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BOSSER Pierre, professeur associé, ENSTA Bretagne, Brest

BOTTON Serge, ingénieur, ENSG, Marne-la-Vallée

CLÉDAT Emmanuel, enseignant-chercheur, ENSG, Marne-la-Vallée

DURAND Stéphane, maître de conférences, ESGT, Le Mans

HULLO Jean-François, dr. ingénieur, EDF, Paris

KOEHL Mathieu, maître de conférences, INSA Strasbourg

LEQUEUX James, astronome émérite à l'Observatoire de Paris

MAINAUD DURAND Hélène, ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique, ingénieur topographe, CERN Genève

MOPIN Irène, ingénieur recherche, ENSTA Bretagne, Brest

MOREL Laurent, professeur des universités, ESGT, Le Mans

PANTAZIS N. Dimos, professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent, directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier, ingénieur, traducteur, Sarreguemines

ROCHE Stéphane, professeur, Université Laval, Québec

TOUZÉ Thomas, dr. ingénieur géomètre, EDF, Grenoble

TROUILLET Michel, ingénieur topographe, Lyon

Font partie du comité de lecture les membres du comité de rédaction et la rédaction (la directrice des publications et son adjoint, le rédacteur en chef et son adjoint), voir la liste en page sommaire.