

# LE MARÉGRAPHE DE MARSEILLE

## Le zéro des cartes, l'altitude et le niveau de la mer

par Alain Coulomb

Ancien ingénieur hors classe des travaux géographiques et cartographiques de l'État,  
Président de l'association « Les amis du marégraphe de Marseille »  
amis.maregraphe@gmail.com

---

Tous les utilisateurs de cartes sont familiarisés avec les notions de point coté (point auquel on a attribué une altitude) et de courbe de niveau (ligne reliant des points de même altitude). Mais comment a été déterminée l'origine des altitudes en France continentale ? Le marégraphe de Marseille a été construit à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle dans ce but précis. Son existence est donc liée à la technique du nivellement de précision, ensemble d'opérations chiffrées qui permettent de traduire le relief. L'évoquer conduit plus généralement à parler de géodésie, science qui mesure la forme et les dimensions de la Terre. En termes de représentation du territoire, les travaux de géodésie et de nivellement interviennent en amont des travaux cartographiques. Le marégraphe de Marseille n'est pas seulement un lieu chargé d'histoire, c'est également une station de surveillance équipée d'appareils modernes. C'est un observatoire essentiel des programmes nationaux et internationaux d'observation du niveau des mers, niveau à la fois dépendant et révélateur des changements climatiques. Le marégraphe de Marseille est enfin un lieu de vulgarisation scientifique dont l'activité mérite d'être conservée et développée.

### Introduction

Cet article a pour objectif de mieux faire connaître le marégraphe de Marseille, observatoire du niveau de la mer qui présente une double dualité. Il est à la fois unique au monde et intégré dans des réseaux de surveillance comprenant des centaines d'installations de même type. Il est à la fois un monument historique et un observatoire moderne, dont le principal intérêt actuel est lié au suivi de l'un des effets majeurs des changements climatiques : l'élévation de plus en plus rapide du niveau moyen des mers.

Le marégraphe de Marseille a été construit pour fixer l'origine des altitudes françaises continentales. Cet article précise donc la notion d'altitude, dont les aspects théoriques sont assez compliqués mais dont les applications pratiques suscitent un intérêt marqué chez de nombreuses personnes. Il explique les liens qui unissent et différencient les différentes références verticales. Il traite ensuite du marégraphe de Marseille et de l'observation du niveau de la mer. Il aborde succinctement les changements climatiques et leurs effets sur le niveau de la mer. Il fait enfin mieux connaître l'association Les amis du marégraphe de Marseille, créée pour valoriser cet observatoire et vulgariser les notions que nous venons de citer.

### La notion d'altitude

Les auteurs du *Petit Larousse* définissent très simplement, voire de manière simpliste, l'altitude d'un point de la surface terrestre comme « l'élévation verticale de ce point au-dessus du niveau de la mer ». À l'Institut national de l'information géographique

et forestière (IGN), l'altitude d'un point est définie comme « la coordonnée par laquelle on exprime l'écart vertical de ce point à une surface de référence proche du géoïde ».

Un géoïde est une surface équipotentielle du champ de pesanteur, autrement dit une surface sur laquelle l'eau ne coule pas, une surface sur laquelle une bille ne roule pas, une surface horizontale. Or l'horizontale est la perpendiculaire à la verticale, qui est définie comme la direction du fil à plomb. Sur Terre, le fil à plomb est soumis à la loi universelle de la gravitation, décrite en 1687 par Isaac Newton dans l'ouvrage *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Newton décrit la gravitation comme une force responsable de la chute des corps et du mouvement des corps célestes, et de façon générale, de l'attraction entre des corps ayant une masse.

En première approximation, sur Terre, le fil à plomb est attiré vers le centre de l'énorme masse de notre planète. Mais la Terre n'a pas une composition homogène : il existe dans sa croûte et son manteau des masses plus ou moins denses qui dévient la direction du fil à plomb. Or si la verticale est déviée, sa perpendiculaire horizontale l'est aussi, ce qui affecte par conséquent la forme du géoïde.

Le géoïde est défini comme une surface équipotentielle du champ de pesanteur coïncidant « au mieux » avec le niveau moyen des mers. En raison des variations de la masse volumique de l'eau, des vents et des courants dominants, des variations de pression atmosphérique, la surface moyenne des mers n'est pas une surface équipotentielle. D'autre

part, la façon dont le géoïde coïncide au mieux avec la surface moyenne des océans est ambiguë. Il s'ensuit que le géoïde ne peut pas être défini de manière univoque. Pour définir un géoïde, on peut convenir qu'il contient un point particulier, par exemple le niveau moyen enregistré par un marégraphe pendant une période donnée. Historiquement, parce qu'elle supporte leurs embarcations et malgré tous ses mouvements, la mer présente une surface que les marins ont logiquement utilisé comme référence depuis très longtemps. Sur terre, il en a été tout autrement ! La mer est considérée dès le XIX<sup>e</sup> siècle, comme une surface de niveau ; mais pour des raisons pratiques, elle est encore très peu utilisée comme surface de référence pour les opérations de nivellement. Quand les travaux sont éloignés du littoral, il est d'usage de fixer un plan de comparaison local. Bien souvent, le plan de comparaison est choisi au-dessus des points à coter. Ainsi, par exemple, « Sa Majesté ayant résolu de faire conduire à Versailles la meilleure eau pour boire que l'on pouvait trouver dans les lieux circonvoisins », l'abbé Jean Félix Picard (1620-1682) est chargé par Louis XIV d'étudier les possibilités de réalisation d'un aqueduc permettant d'amener l'eau de la Loire au château. En habile courtisan, Picard choisit d'exprimer les cotes issues de ses nivellements par rapport au rez-de-chaussée de la demeure royale.

Puis des besoins d'unification commencent à se faire sentir. L'ingénieur Jean Antoine Fabre (1749-1834), auteur d'un « Traité complet sur la théorie et la pratique du nivellement », écrit par exemple : « il serait nécessaire que le gouvernement fixât une seule et même ligne de niveau, ou plutôt une même et seule superficie horizontale dont la position fût connue et à laquelle on rapportât toutes les opérations de nivellement (...). Avec la moindre attention, on voit que la nature nous l'offre dans la superficie des eaux de la mer ». Fabre poursuit même son raisonnement en indiquant que la Méditerranée présente une surface plus stable que l'Océan et que, par conséquent, c'est la superficie de cette dernière mer qu'il faut prendre pour terme de comparaison.

Avec l'extension des travaux d'aménagement du territoire d'ampleur nationale, par exemple l'apparition du réseau des lignes de chemin de fer, et en parallèle à l'établissement de la carte d'État-major, le

besoin d'un nivellement général de la France se fait de plus en plus sentir. Les nombreux progrès techniques amenés par Paul Adrien Bourdalouë (1798-1868) dans l'art du nivellement rendent économiquement et techniquement possible son établissement<sup>1</sup>. Cela se traduit dans le vocabulaire : jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle, la donnée altimétrique chiffrée est désignée par les termes hauteur, élévation ou plus souvent cote ; le nom altitude est absent de la 6<sup>ème</sup> édition du *Dictionnaire de l'Académie*, éditée en 1835 ; l'altitude apparaît dans la littérature technique à partir du moment où l'on envisage le premier nivellement général de la France.

De nos jours, l'appellation « Nivellement général de la France » est générique et concerne trois réseaux de nivellement de grande ampleur qui se sont succédé sur le sol de la France continentale :

- Entre 1857 et 1864, Bourdalouë établit un premier réseau national de nivellement. L'origine de ce réseau est le trait 0,40 m de l'échelle de marée du Fort Saint-Jean à Marseille. Les documents anciens semblent montrer que les calculs de Bourdalouë ne font pas intervenir de mesures de pesanteur (ce paramètre est par la suite pris en compte pour obtenir des altitudes plus rigoureuses)<sup>2</sup>.
- Dès 1878, le ministère des Travaux publics décide de poursuivre l'œuvre de Bourdalouë. Le travail est confié à un service public dirigé par Charles Lallemand (1857-1938). L'origine de ce nouveau réseau est déterminée à l'issue d'observations du niveau de la mer réalisées au marégraphe de Marseille entre 1885 et 1897 (fig. 1). Les altitudes dites orthométriques de ce réseau prennent en compte des valeurs de pesanteur théorique<sup>3</sup>.
- Entre 1962 et 1969, l'IGN (à l'époque Institut géographique national) remet en état le réseau de base, en conservant l'origine du réseau NGF/Lallemand. Aujourd'hui encore, le système de référence vertical officiel est le NGF/IGN69, basé sur ces observations de nivellement faites dans les années 60 (il y a aussi un réseau NGF/IGN78 établi en Corse en 1978, dont l'origine est le niveau moyen de la mer à Ajaccio). Les nouvelles altitudes étant de type normal, elles prennent en compte un modèle utilisant des mesures de pesanteur réelle.

1 Voir <http://bdl.ahp-numerique.fr/focus-acteurs-ac-bourdalouë>.

2 En cartographie, ce premier nivellement général de la France et l'adoption d'une origine unique permettent d'établir plus finement les courbes de niveau, lignes d'intersection de plans horizontaux avec le relief du terrain, ou lignes formées par des points situés à la même altitude. A l'époque, ces courbes sont relevées point par point, sur le terrain.

3 Charles Lallemand est le premier à tenir compte de la pesanteur terrestre pour réaliser le nivellement général de la France qui porte son nom. Toutefois, la difficulté de la mesurer le conduit à se contenter de l'intégrer dans les calculs d'altitudes par l'intermédiaire d'un modèle.

Les différences entre le réseau NGF/Lallemand et NGF/IGN1969 progressent vers le Nord (les altitudes NGF/IGN69 sont supérieures aux altitudes NGF/Lallemand, de 60 cm à Dunkerque et d'environ 33 cm à Paris).

Le nivellement est utile pour tous les travaux d'aménagement du territoire. Pour rattacher précisément ses chantiers à la référence verticale nationale, le géomètre utilise des repères de nivellement implantés par l'IGN. Un repère de nivellement est un élément métallique dont l'altitude est déterminée avec une précision millimétrique. Plusieurs centaines de milliers de repères sont répartis sur le territoire national. Leurs données descriptives sont accessibles par le moyen d'une fiche signalétique consultable et téléchargeable sur internet (<http://geodesie.ign.fr> et sur <https://www.geoportail.gouv.fr>). Pour compléter ces deux sites et satisfaire l'utilisateur mobile opérant sur le terrain, l'IGN a développé l'application Géodésie de poche, également téléchargeable<sup>4</sup>.

Il existe de nombreux types de repères de nivellement (médaillon, Bourdalouë, console, etc.). Certains repères comportent des plaquettes où peuvent figurer un matricule ou une altitude. Ces renseignements, s'ils présentent parfois un intérêt esthétique et patrimonial, ne sont plus d'actualité dans la plupart des cas. Pour connaître le matricule et l'altitude d'un repère de nivellement, il est indispensable de consulter sa fiche signalétique. Une plaquette en aluminium est fixée au centre des repères de type médaillon dont l'altitude a été déterminée ou contrôlée récemment (fig. 2). Dans un but d'information d'un public non technicien, une altitude arrondie au mètre est fournie sur cette plaquette. Un repère qui n'est pas muni de plaquette n'est pas un repère abandonné. Il est aussi utile qu'un repère disposant d'une plaquette et doit faire l'objet des mêmes mesures de conservation.

## L'origine des altitudes en France continentale

### Le marégraphe totalisateur de Marseille

L'instrument historique qui équipe l'observatoire marégraphique de Marseille est le résultat d'une collaboration intellectuelle de plus de six mois entre l'ingénieur allemand Heinrich Reitz, concepteur de ce type d'appareil, et l'ingénieur français Charles Lallemand, directeur du service du Nivellement général de la France, commanditaire de l'instrument.

Cette collaboration visait en permanence l'excellence sans négliger l'esthétique. Reitz écrivait par exemple à Lallemand : « afin que le surveillant ait à tout moment conscience de l'importance de cet appareil et prenne minutieusement soin de toutes les pièces », l'instrument doit « afficher une certaine élégance ». Sur un autre courrier, il insistait en ces termes : il est « indispensable que l'appareil inspire le respect au contrôleur ; ceci contribue (...) à ce que l'appareil soit utilisé avec le plus grand soin ».

Cet appareil a été entièrement rénové en juin 2018. Les 10 000 pièces qui le composent sont presque toutes en laiton (fig. 3).

Les bâtiments du marégraphe de Marseille ont été construits en 1883 pour fixer l'origine des altitudes françaises continentales (l'altitude 0). C'est pour cette raison technique et historique que le marégraphe de Marseille est géré par l'IGN, à la différence de tous les autres marégraphes français importants, administrés par le Shom, le Service hydrographique national (ancien Service hydrographique et océanographique de la Marine).

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 (fig. 4).

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 (fig. 5). 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. Véritables ouvrages d'art, ceux-ci sont

4 <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=geodesie-poche>.

L'intérêt essentiel de cet appareil mécanique réside dans sa partie dite totalisatrice. Le marégraphe mécanique de Marseille est dit totalisateur parce qu'il fait en permanence des sommes de niveaux d'eau, lisibles sur les cadrans représentés à gauche de la figure 5.

Avant l'invention d'un tel système, le niveau moyen de la mer sur une période donnée pouvait être déterminé soit par un lourd calcul arithmétique, soit en mesurant sur les marégrammes, au moyen d'un planimètre, l'aire formée par la courbe du niveau de la mer, l'axe des temps et les deux droites figurant les bornes de la période considérée. De cette seconde façon, le résultat était obtenu beaucoup plus rapidement que par le calcul mais il manquait un peu de précision. Le marégraphe totalisateur remplace tout ce travail par une simple division de deux chiffres fournis par l'instrument et dont l'un est proportionnel au temps écoulé. Comme cette détermination directe se fait sans l'intermédiaire d'un diagramme, on obtient une précision extraordinaire, bien supérieure à celle obtenue avec un planimètre.

Le totalisateur est un intégrateur mécanique. Son mécanisme se compose d'un chariot porte-roulettes porté par deux perches verticales et d'un disque vertical en verre disposé sur le même axe que le cylindre d'enregistrement (et qui tourne à la même vitesse). Le chariot est relié à l'extrémité de la crémaillère par un mince ruban de platine, qui, en s'infléchissant sur deux poulies, transforme le mouvement de va-et-vient horizontal de la crémaillère en un mouvement vertical alternatif de translation (quand le niveau de la mer descend, le chariot monte et inversement).

Deux roulettes en agate sont en contact avec le disque de verre et leur mouvement est créé par la rotation régulière du disque. Par un système d'engrenages, le mouvement de ces roulettes commande celui de cadrans gradués. L'incrément de leurs graduations dépend de la hauteur d'eau ; elle est d'autant plus rapide que le cadran va vers l'extérieur du disque (en vertu de la proportionnalité de la vitesse avec la distance à l'axe de rotation), et d'autant plus lent qu'il va vers l'axe de rotation. C'est une manière de traduire mécaniquement les vitesses variables des changements du niveau de la mer (vitesse lente à l'étalement, vitesse plus ou moins rapide en marée montante ou descendante).

Ainsi, si entre deux instants  $t_0$  et  $t_1$  ( $t_1 > t_0$ ), on mesure deux graduations  $g_0$  et  $g_1$  sur les cadrans du totalisateur, la graduation moyenne est simplement  $(g_1 - g_0) / (t_1 - t_0)$ . Mathématiquement, le totalisateur détermine l'intégrale de la fonction analogique qu'est

le niveau de la mer, dont on déduit immédiatement la moyenne (Coulomb, 2014).

Pour éviter les erreurs et détecter les mauvais fonctionnements, il y a deux roulettes en contact avec le disque entraîné par l'horloge ; elles mesurent la même quantité. Chaque roulette  $r_1$  et  $r_2$  est équipée de 4 cadrans (un pour les unités, un pour les dizaines, un pour les centaines et un pour les milliers). Le temps écoulé est aussi lisible sur l'instrument, notamment au bord du disque de verre.

Reitz fait construire ses instruments par Johann Christian Dennert (1829-1920) et son collègue Martin Pape (1834-1884). Dennert et Pape assemblent trois marégraphes totalisateurs. Le premier est 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, disparaissent assez rapidement. Celui de Marseille, amené sur place dans cinq caisses transportées par le steamer *Hamburg* et installé sur la Corniche par Christian Dennert en janvier 1885, est 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). Il est donc unique au monde.

L'arrêté du 28 octobre 2002 considère d'ailleurs que « la conservation du Marégraphe de Marseille (Bouches-du-Rhône) présente au point de vue de l'histoire un intérêt public en raison de l'importance de cette réalisation au regard de l'évolution des procédés de mesure scientifiques ». Il classe l'observatoire (l'ensemble immobilier, l'appareil et les installations techniques) parmi les monuments historiques. Le volume et la qualité de l'ensemble immobilier du marégraphe de Marseille sont en effet eux aussi, pour un observatoire de ce type, uniques au monde.

## La fixation de l'origine du réseau NGF/Lallemand, devenue ensuite celle du réseau NGF/IGN69

Les ingénieurs du Service du nivellement général de la France calculent des moyennes mensuelles du niveau de la mer mesuré par le marégraphe totalisateur. Puis ils établissent la moyenne de ces moyennes. En traçant un graphique représentant les variations de cette dernière valeur depuis l'origine des observations, ils constatent que cette valeur oscille, en s'en rapprochant, autour d'une branche de courbe paraissant être une hyperbole équilatère<sup>5</sup>. En 1897, ils choisissent comme zéro du nivellement

5 Une hyperbole est dite équilatère si ses deux asymptotes sont orthogonales.



Figure 1 : Les bâtiments du marégraphe de Marseille - © Alain Coulomb



Figure 2 : Repère de nivellement de type médaillon - © IGN

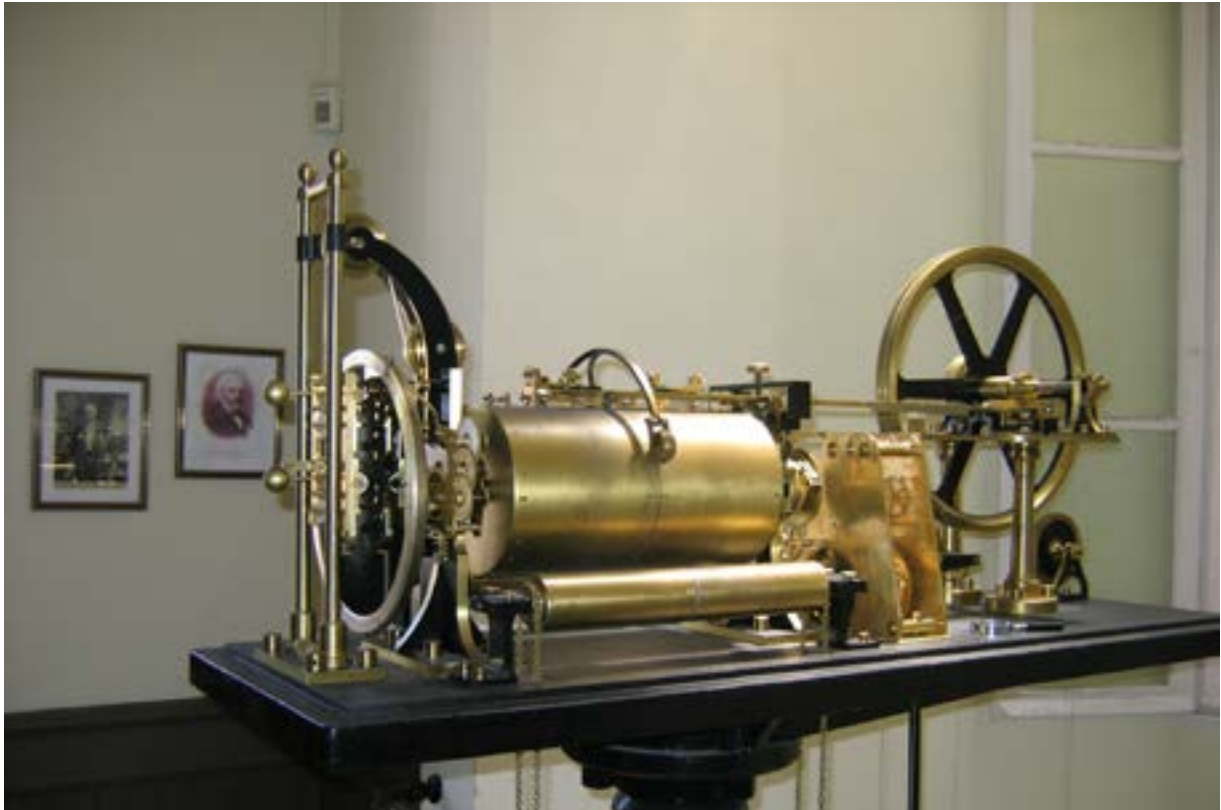


Figure 3 : Le marégraphe totalisateur de Marseille - © Alain Coulomb

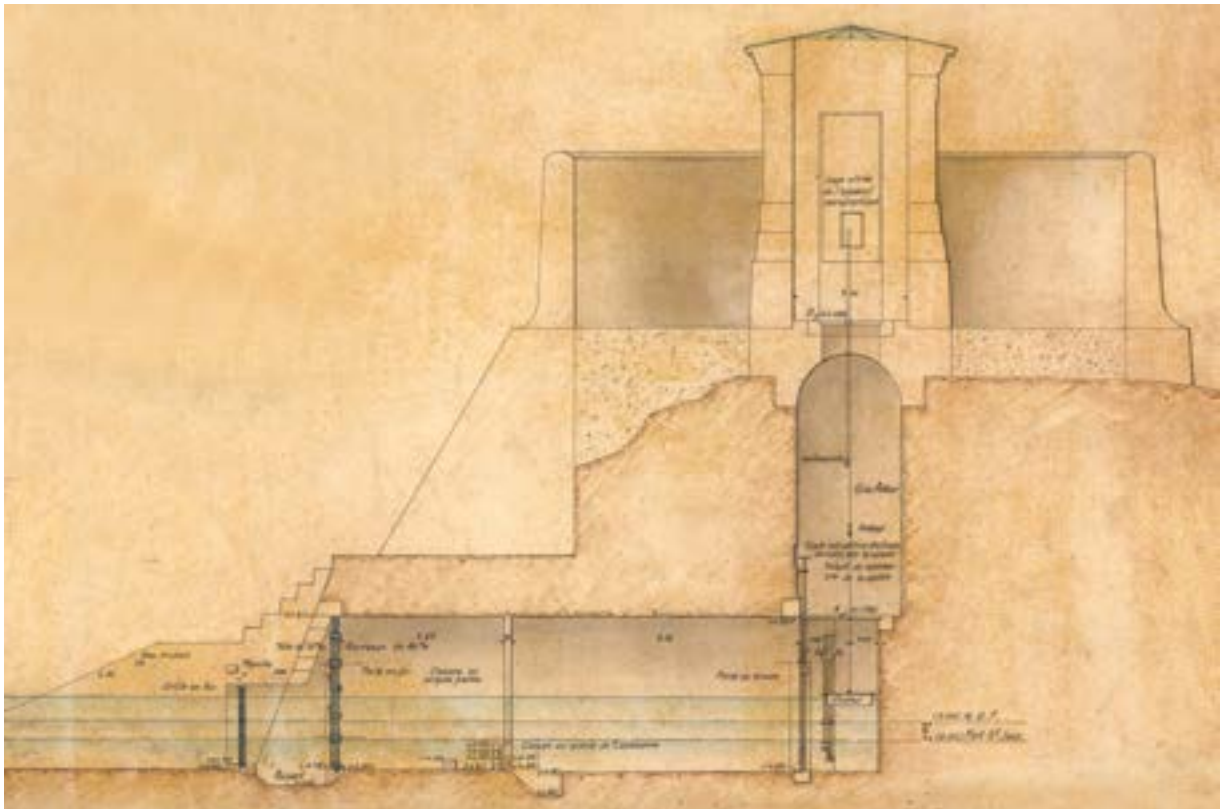


Figure 4 : Extrait d'un plan dessiné pour l'exposition internationale d'Anvers en 1930

général de la France l'asymptote horizontale de cette hyperbole, vers laquelle le niveau semble tendre de plus en plus (fig. 6).

Il convient donc de noter que le zéro du NGF n'est donc pas, comme certains auteurs l'ont parfois écrit, la simple moyenne arithmétique des niveaux relevés entre le 1<sup>er</sup> février 1885 et le 1<sup>er</sup> janvier 1897, mais il en est cependant extrêmement proche. Le zéro NGF/Lallemand, devenu ensuite le zéro NGF/IGN69, est établi exactement à 71 millimètres au-dessous du zéro de Bourdalouë.

## Qualités du zéro fixé au marégraphe de Marseille

Le zéro fixé en 1897 est purement conventionnel : on aurait pu choisir un autre lieu ou une autre période et le résultat aurait pu être sensiblement différent.

Il est immuable, ou en tous cas il a été immuable jusqu'à nos jours : on sait que le niveau moyen actuel de la Méditerranée à Marseille n'est plus le même qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle ; on ne change pas pour autant les altitudes des repères de nivellement. Cela ne servirait pas à grand-chose : d'un point de vue opérationnel, ce qui est utile, ce n'est pas l'altitude de chaque point, c'est la différence de niveau qui existe entre les différents points. Un changement de référence verticale aurait en outre de nombreux inconvénients, parmi lesquels figurent l'obligation de mettre à jour les très nombreux documents cartographiques, établis sur du papier ou numériques.

Le zéro de 1897 est enfin peu pratique car il n'est pas matérialisé (pas de trait gravé, pas de repère scellé au niveau 0) et il est difficile d'accès (dans un puits). C'est pour cette raison qu'existe la notion de repère fondamental.

## Le repère fondamental du nivellement français continental

Un repère fondamental est un repère de nivellement (point physique et matériel) qui sert de point de départ pratique aux mesures et aux calculs de toutes les altitudes d'un réseau de nivellement. L'altitude d'un point fondamental est en général fixée conventionnellement à partir des observations d'un marégraphe dont il est proche.

Le repère fondamental de Marseille est à 1,661 m au-dessus du zéro de 1897. Il est scellé dans le bâtiment du marégraphe, dans des conditions particulièrement favorables de stabilité et de conservation. Il est constitué par un rivet en bronze dont la calotte supérieure est recouverte d'un alliage

très dur de platine et d'iridium. Ce rivet est scellé dans un bloc cylindrique de granit, lui-même incrusté dans le rocher calcaire qui forme le promontoire sur lequel le marégraphe est construit (fig. 7).

Ce point n'a pas été scellé volontairement à 1,661 m d'altitude. Il a été implanté en 1883, au moment de la construction des bâtiments. Pendant 12 ans, on a ensuite mesuré le niveau de la mer par rapport à ce repère supposé fixe et l'on a calculé que le niveau moyen pendant ces 12 ans était à 1,661 m au-dessous de sa calotte supérieure. En adoptant ce niveau moyen comme altitude 0, l'altitude du repère fondamental devenait donc 1,661 m. Plutôt que de dire que le point fondamental est à 1,661 m au-dessus du zéro, on peut dire que le zéro est à 1,661 m au-dessous du point fondamental.

Comme la Suisse n'a pas de littoral maritime, le zéro de Marseille est aussi celui des altitudes suisses, mais le nivellement Suisse a son propre point fondamental, implanté à Genève sur un rocher appelé Pierre du Niton.

## Liens entre zéro des altitudes et zéro hydrographique

Le zéro des altitudes, établi à Marseille à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, s'applique à toute la France continentale. Sur ce même territoire, le zéro hydrographique, qui est en quelque sorte l'équivalent en mer de la surface de référence des altitudes à terre, n'est pas unique.

Le zéro hydrographique (ZH) est le niveau de référence commun aux cartes marines et aux niveaux marins, à partir duquel sont comptés d'une part les profondeurs indiquées sur les cartes marines et d'autre part les niveaux marins prédits et observés (OHI, 2010). Pour garantir la sécurité de la navigation, et conformément aux recommandations de l'Organisation hydrographique internationale, le ZH est choisi en France au voisinage du niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA), sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement. Par conséquent, la sonde exprimée sur la carte marine peut être interprétée par le navigateur comme une profondeur (hauteur d'eau) minimale.

Les ZH des ports français ont généralement été adoptés indépendamment les uns des autres. Il en résulte que l'écart entre le ZH et le niveau des plus basses mers astronomiques peut varier entre deux zones de marée différentes. Il existe actuellement 13 zones de marées distinctes en France métropolitaine, rattachées chacune à un port de référence où le

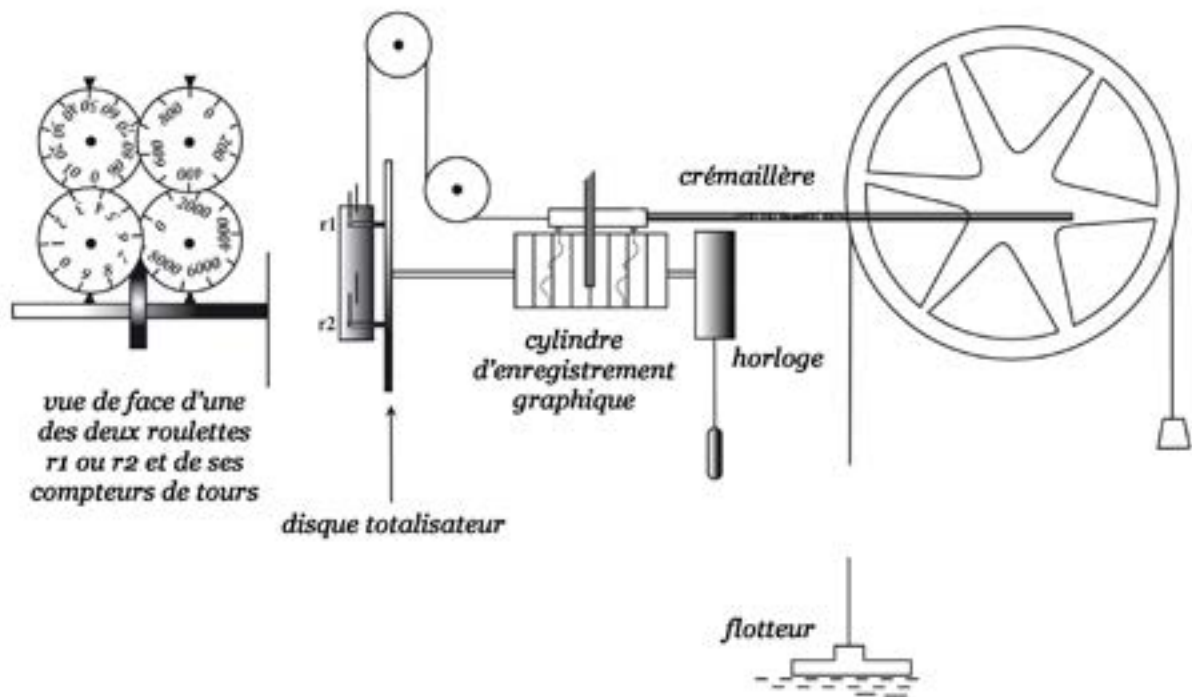


Figure 5 : Croquis montrant le fonctionnement du marégraphe totalisateur de Marseille



Figure 6 : Fixation du zéro des altitudes françaises continentales -  
 © Alain Coulomb. En rouge, la variation du niveau moyen de la mer, depuis le 3 février 1885 jusqu'au 1er janvier 1897 ; en jaune, l'hyperbole équilatère dessinée par les ingénieurs du NGF



ZH a été historiquement déterminé à partir des observations marégraphiques.

Pour chaque site français de mesure du niveau de la mer (observatoire de marée), le Shom tient à jour et diffuse le produit Références altimétriques maritimes (RAM) ou cotes des zéros hydrographiques par rapport aux systèmes de référence altimétriques légaux (NGF/IGN69 par exemple). À Marseille, le zéro NGF/IGN69 est supérieur de 0,329 m au zéro hydrographique.

Pour chaque observatoire de marée, le Shom entretient aussi une fiche descriptive. Parmi les renseignements présents sur cette fiche figurent notamment la localisation les repères de nivellement proches de l'appareil de mesure, leur élévation par rapport au zéro hydrographique, si possible leur altitude, etc.

Le long du littoral, il y a un recouvrement des référentiels altimétriques maritime (ZH) et terrestre (par exemple NGF/IGN69). Ce recouvrement permet notamment le programme national Litto3D® qui vise à produire un modèle numérique altimétrique de référence, continu terre-mer et précis, sur la frange du littoral métropolitain et ultramarin. Ce produit réalisé en commun par le Shom et l'IGN met en œuvre des moyens de levés par lasers aéroportés (LIDAR), permettant de mesurer les profondeurs dans les zones d'éstran difficilement accessibles, en complément des sondeurs multifaisceaux embarqués à bord des navires. Litto3D® décrit la bande littorale :

- en mer, jusqu'à l'isobathe 10 m et au plus jusqu'à 6 milles marins des côtes ;
- sur terre, jusqu'à l'altitude +10 m et à au moins 2 km à l'intérieur des terres.

## L'observation du niveau des mers

### La modernité du marégraphe de Marseille

#### Le marégraphe côtier numérique

Sur proposition du Conseil national français de géodésie et de géophysique (CNFGG), et de manière à mieux répondre aux spécifications internationales, l'IGN a, en juillet 1998, équipé l'observatoire de Marseille d'un marégraphe côtier numérique (MCN). Ce premier marégraphe numérique fonctionnant avec des ondes acoustiques a été remplacé par un instrument plus moderne en avril 2009 (fig. 8).

Celui-ci 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 régulièrement transmis au Shom via le réseau téléphonique.

L'implantation d'un marégraphe est en effet souvent liée à des activités maritimes et la plupart des marégraphes français sont gérés par le Shom, opérateur en France du Réseau d'observation du niveau de la mer (RONIM) constitué de 50 observatoires du niveau de la mer<sup>6</sup>.

Jusqu'en 1998, les moyennes mensuelles et annuelles collectées par le *Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)*, service scientifique international créé en 1933, étaient établies à partir des données fournies par le marégraphe totalisateur installé en 1885<sup>7</sup>. Depuis 1998, les données transmises au PSMSL sont celles du MCN.

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 étalonnage annuel. Des mesures hebdomadaires y sont constamment effectuées, en parallèle des mesures faites par le marégraphe numérique. Le rôle du marégraphe mécanique est d'assurer la continuité des données de niveau de la mer (il ne faudrait pas que ce qui semble être une hausse du niveau soit en réalité due à un changement d'appareil ou de technique de mesure).

### La station GNSS permanente

Les marégraphes 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 tels que GPS (États-Unis) ou Galileo (Union européenne), peuvent répondre à ces questions. En recevant les signaux émis par les satellites GNSS, l'antenne GNSS installée sur le toit du marégraphe depuis 1998 (fig. 9), couplée à un récepteur qui est à l'intérieur, détermine les mouvements absolus du bâtiment.

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

7 <https://www.psmsl.org/>.



*Figure 7 : Le point fondamental du réseau de nivellement français continental dans la salle souterraine du marégraphe de Marseille - © Les amis du marégraphe de Marseille*



*Figure 8 : L'émetteur du marégraphe numérique de l'observatoire de Marseille - © Alain Coulomb*

Dans le domaine altimétrique, l'exploitation des mesures GNSS rencontre deux difficultés :

- Les signaux GNSS traversent la troposphère, où l'humidité de l'air ralentit leur progression (on parle de délai troposphérique). Ce retard est difficile à estimer précisément car cette humidité est très variable dans le temps.
- Les systèmes GNSS déterminent des hauteurs au-dessus d'une forme mathématique de la Terre : un ellipsoïde. Ils ne donnent pas directement une altitude (élévation au-dessus du géoïde). On passe de la hauteur ellipsoïdale (mesurée par GNSS) à l'altitude par l'intermédiaire d'une grille de conversion. Sur le territoire français continental, la grille de conversion altimétrique en vigueur s'appelle RAF18b. Elle permet de déterminer des altitudes par observations GNSS avec une précision centimétrique (1 cm à 95%), à condition d'utiliser des méthodes GNSS précises et de se rattacher précisément à la référence géodésique RGF93, dont l'accès est facilité par l'existence du réseau GNSS permanent (RGP)<sup>8</sup>.

Néanmoins, malgré ces deux difficultés, des séries longues d'observations GNSS, établies au moyen de stations permanentes associées avec les marégraphes, offrent des résultats dont la précision est du même ordre que celle de la marégraphie. Les GNSS donnent une information sur le mouvement absolu du sol, les marégraphes sur les mouvements de la mer relatifs au sol, l'association des deux types de mesures a pour but de connaître le comportement absolu du niveau de la mer à l'endroit considéré.

## La numérisation des marégrammes de Marseille

La sauvegarde des données fournies entre 1885 et 1988 par les marégrammes de Marseille (dont le papier se détériore avec le temps) et l'exploitation de ces données par des moyens informatiques a nécessité leur conversion sous un format compatible avec les ordinateurs. Ce travail colossal de numérisation de 1 200 marégrammes a été effectué entre 1996 et 2001, grâce à une action concertée de l'IGN et du Shom.

### Des reconnaissances internationales

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 PSMSL ne montrent que 3 périodes de mauvais fonctionnement durable, en 1951-1952, en 1997-1998 et en 2010 (fig. 10).

Le site internet du PSMSL témoigne également d'une autre façon de la qualité de la série de hauteurs d'eau produite à Marseille en affichant : *Completeness* = 97%. 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. La série de Marseille est également l'une des plus cohérentes (très peu de changements d'appareils, pratiquement pas de changements dans l'environnement des mesures, etc.).

La longueur et la qualité de la série temporelle de Marseille ont d'abord attiré l'attention de la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO qui a mis en œuvre un réseau mondial permanent d'observatoires du niveau de la mer connu sous le nom de *Global Sea Level Observing System* (GLOSS). Depuis 1985, les marégraphes de Brest (300 ans de mesures) et de Marseille (138 ans de mesures) sont intégrés à GLOSS, réseau composé de plusieurs centaines de marégraphes formant une ossature autour de laquelle se rattachent des projets plus denses, régionaux ou nationaux comme RONIM.

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 marégraphes de Brest et de Marseille parmi les « stations terrestres d'observation maritime exploitées depuis au moins cent ans » (fig. 11). Cette labellisation souligne que ces deux marégraphes 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, dont nous évoquerons les actions au paragraphe 5, est fière d'avoir, en décembre 2021, signalé à l'Administration française l'appel à candidature 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 collaboré pour que sa candidature puisse être présentée.

## L'élévation du niveau moyen de la mer à Marseille et sur l'ensemble du Globe

La longueur et la cohérence de la série de Marseille permet donc d'établir des tendances d'élévation particulièrement robustes et fiables.

<sup>8</sup> <http://rgp.ign.fr>.



Figure 9 : L'antenne GNSS actuelle du marégraphe de Marseille - © Alain Coulomb



Figure 10 : Élévation du niveau de la mer à Marseille établie à partir des moyennes mensuelles calculées et validées par le PSMSL

L'élévation 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 article dans *Journal of geodesy* (Woppelmann *et al.*, 2014). 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.

Mais l'accélération est surtout montrée en considérant les mêmes moyennes mensuelles sur les 40 dernières années<sup>9</sup>. 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-dessus.

A l'échelle de la planète, l'élévation du niveau de la mer est également en accélération. Pendant la période 1901-1990, le taux d'élévation du niveau marin moyen mondial était d'environ 1,35 mm/an. Sur la période 1993-2018, l'élévation du niveau marin atteignait environ 3,25 mm/an. Le niveau moyen de la mer « a augmenté plus rapidement depuis 1900 qu'au cours de tout le siècle précédent, au moins au cours des trois derniers millénaires »<sup>10</sup>.

En outre, dans la plupart des régions dans le monde, les niveaux extrêmes de la mer augmentent de façon cohérente avec cette élévation du niveau marin moyen, favorisant les submersions marines, l'érosion des côtes et les intrusions salines. Cette étude globale du niveau de la mer est essentiellement effectuée grâce à deux sortes d'outils : des marégraphe, dont nous avons déjà largement parlé, et des satellites océanographiques, déployés depuis le début des années 90 et dont le rôle est aujourd'hui très important<sup>11</sup>.

L'altimétrie satellitaire est fondée sur la mesure de la hauteur instantanée de la mer à l'aide d'un émetteur/récepteur d'ondes radar embarqué sur un satellite artificiel. Cette technique a changé le regard porté sur

la dynamique océanique en permettant l'observation de l'océan global. Les mesures, réalisées de manière continue depuis maintenant 30 ans, permettent notamment de construire des indicateurs climatiques comme le niveau moyen global de la mer.

Les satellites altimétriques permettent de mesurer avec une grande précision et stabilité l'évolution du niveau moyen des mers. Cette technique fournit d'une part une couverture quasiment complète du domaine océanique et très bien échantillonnée temporellement (tous les 10 jours). D'autre part, la mesure du niveau de la mer est absolue, c'est-à-dire indépendante des mouvements de la croûte terrestre, contrairement à la mesure marégraphe, mesure relative du niveau de la mer par rapport au sol.

## Les changements climatiques

### Les raisons de l'élévation du niveau moyen des mers

Grâce aux gaz à effet de serre (GES) présents naturellement dans l'atmosphère (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, etc.), la Terre (atmosphère incluse) absorbe une partie de l'énergie qu'elle reçoit du Soleil, le reste étant renvoyé vers l'espace. Ce phénomène naturel, appelé effet de serre, rend la vie possible sur Terre : sans lui, la température moyenne de notre planète serait en effet de l'ordre de -18°C. Ces GES, notamment leur concentration dans l'atmosphère, jouent donc un rôle important dans la régulation du climat ; et la modification de la teneur en GES dans l'atmosphère est de nature à altérer le bilan énergétique du système climatique terrestre.

Or les activités humaines sont également à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère : la combustion d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et la déforestation tropicale dégagent du dioxyde de carbone ; les décharges, l'agriculture, l'élevage et l'industrie dégagent du méthane ; l'industrie, l'agriculture, notamment par l'utilisation d'engrais, dégagent du protoxyde d'azote ; d'autres activités humaines dégagent des gaz fluorés.

Depuis l'ère industrielle, les concentrations mondiales de gaz à effet de serre émis par les activités humaines ont cru de façon notable. Sur ce sujet, la progression de la science climatique permet au GIEC de prendre « moins de pincettes » qu'il y a quelques

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

10 Sixième rapport du GIEC, groupe de travail 1, chapitre 9, 2021.

11 Pour en savoir plus, voir par exemple <https://cnes.fr/fr/un-peu-de-vulgarisation-laltimetrie>.



Figure 11 : Diplôme décerné par l'Organisation météorologique mondiale



Figure 12 : Stand informatif dans le cadre de la Fête de la science à Istres - © Alain Coulomb

années. « Les augmentations des concentrations de gaz à effet de serre (GES) bien mélangés dans l’atmosphère, observées depuis environ 1750, résultent, sans équivoque, des activités humaines », écrit-il désormais<sup>12</sup>.

« En 2019, les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, principal gaz à effet de serre, ont atteint 410 parties par million (ppm), un niveau inégalé depuis au moins deux millions d’années », indique-t-il encore<sup>13</sup>. Même constat pour les concentrations de méthane et de protoxyde d’azote : « en 2019, elles étaient plus élevées qu’à tout autre moment depuis au moins 800 000 ans », indique encore le GIEC<sup>14</sup>.

L’effet de serre s’amplifie donc et avec lui la part de l’énergie solaire absorbée par la Terre. L’augmentation de l’énergie qu’elle emmagasine a des impacts sur les grands équilibres qui régissent le climat actuel (augmentation de la température de l’atmosphère et des océans, etc.). Les conséquences sont nombreuses ; l’élévation du niveau moyen des mers n’est que l’une d’entre-elles. Comme cette élévation est donc un phénomène qui est essentiellement dû à l’activité humaine, on la qualifie d’anthropique<sup>15</sup>.

Les causes de cette élévation sont aujourd’hui bien connues. Elles relèvent de deux phénomènes principaux : la fonte des glaces (calottes polaires et glaciers de montagnes) et la dilatation (ou expansion) 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 du niveau moyen ne peut pas raisonnablement être arrêtée (les projections montrent que le niveau marin continuera à s’élever pendant des siècles, notamment en raison de la réponse lente des

calottes de glace au réchauffement climatique). Mais sa vitesse dépendra des émissions de gaz à effet de serre et de la réponse des calottes de glace au réchauffement climatique. Ainsi, des politiques courageuses et ambitieuses, limitant les émissions de gaz à effet de serre de manière massive et immédiate, peuvent apporter des bénéfices importants pour l’adaptation côtière, en rendant possibles de nombreuses options.

## Un aperçu cartographique des risques liés à l’élévation du niveau des mers

Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) ambitionne d’être l’établissement de référence pour la gestion des risques qui relèvent de sa compétence, qu’ils soient d’origine naturelle ou anthropique. Parmi ceux-ci figurent les risques côtiers : submersions marines (tempêtes, cyclones, tsunamis), recul du trait de côte, y compris en prenant en compte les effets des changements climatiques. Les inondations côtières qui en découleront sont une source de préoccupation majeure car de nombreuses villes ou infrastructures sont situées à proximité des rivages ou dans des zones de faible altitude. D’après le GIEC, « l’élévation du niveau de la mer pourrait directement menacer plus d’un milliard de personnes d’ici 2050 »<sup>16</sup>.

Pour faciliter l’adaptation aux changements climatiques, le BRGM propose une plateforme web ouverte contenant notamment une cartographie interactive des zones basses exposées à l’élévation du niveau de la mer. Ce démonstrateur s’appuie sur une analyse précalculée de la topographie pour identifier, à très haute résolution, les zones qui pourraient être soumises à la submersion marine sous l’effet de l’élévation du niveau de la mer. Il a pour objectif l’évaluation rapide des impacts du changement climatique pour la submersion marine, en amont d’études plus précises.

Concrètement, l’utilisateur de cette plateforme peut faire varier l’élévation du niveau de la mer entre 0 et 4 mètres, avec un pas de 50 centimètres, et visuali-

12 Résumé à l’attention des décideurs, présentant les principales conclusions de la contribution du groupe de travail 1 au volume 1 du sixième rapport du GIEC, chapitre A.1.1, 2021.

13 La partie par million (ppm), beaucoup utilisée en sciences, est la fraction valant 10<sup>-6</sup>, c’est-à-dire un millionième. Les taux de concentration en GES sont souvent exprimés en ppm. En revanche, les quantités émises sont formulées en milliards de tonnes.

14 Résumé à l’attention des décideurs, présentant les principales conclusions de la contribution du groupe de travail 1 au volume 1 du sixième rapport du GIEC, chapitre A.1.1, 2021.

15 L’adjectif anthropique qualifie un paysage, un sol, un relief dont la formation résulte essentiellement de l’activité de l’homme. Le terme anthropocène, qui signifie « ère de l’humain », désigne une nouvelle époque géologique qui aurait débuté avec la révolution industrielle, quand l’influence de l’être humain sur la géologie et les écosystèmes est devenue la contrainte dominante, devant toutes les autres forces naturelles qui avaient prévalu jusque-là. La notion d’anthropocène est très discutée mais ce concept est de plus en plus utilisé dans les médias et la littérature scientifique. Face aux défis posés par le changement climatique, et pour représenter les conséquences de l’empreinte humaine sur le territoire français, l’IGN, cartographe du service public, a d’ailleurs pris l’initiative de publier annuellement l’atlas *Cartographier l’anthropocène*.

16 Sixième rapport du GIEC, volume 2, chapitre 3, 2022.

ser, à différentes échelles cartographiques, les zones exposées, qui apparaissent en rouge<sup>17</sup>.

## La valorisation du marégraphe de Marseille

L'ensemble immobilier du marégraphe de Marseille appartient à l'État qui, par convention, le met à disposition de l'IGN pour « mettre en œuvre l'infrastructure géodésique nationale, entretenir la référence géographique et altimétrique du territoire français, valoriser la culture et la technique des sciences géomatiques (notamment en ouvrant le site au public) ». L'intérêt culturel du marégraphe de Marseille et de son ouverture au public sont donc inscrits dans le document qui lie l'État et le gestionnaire du site.

### Les actions de valorisation de l'IGN

En 2013, année où Marseille fut capitale européenne de la culture, le marégraphe fut pour la première fois ouvert au public dans le cadre des Journées européennes du patrimoine. Entre 2013 et 2021, il a reçu la visite de plus de 10 000 personnes. Durant la même période, la valorisation du marégraphe a pris d'autres formes : conférences, interventions dans les médias, etc. Toutes ces actions ont été menées au nom de l'IGN<sup>18</sup>.

Depuis 2021, cet organisme continue de valoriser le marégraphe de Marseille ; citons par exemple les importants travaux de rénovation des bâtiments du marégraphe qui ont eu lieu à la fin de l'année 2022 et au début de l'année 2023, ou la constitution du dossier envoyé à l'Organisation météorologique mondiale pour le classement du marégraphe en « station terrestre d'observation maritime exploitée depuis au moins cent ans ». La cérémonie organisée par l'IGN le 15 septembre 2023 pour célébrer la rénovation des bâtiments et la labellisation par l'OMM a donné lieu à de nombreux articles et reportages dans la Presse écrite, radiophonique et télévisée.

### Les actions de l'association Les amis du marégraphe de Marseille

L'association Les amis du marégraphe de Marseille a été créée en janvier 2021 pour « réunir des personnes physiques ou morales souhaitant agir pour la mise en valeur, la promotion, le renom et le rayonnement du marégraphe de Marseille ».

Une de ses toutes premières démarches fut de

contacter des personnalités afin de leur demander d'être membres d'honneur de cette association. Presque toutes les personnalités contactées ont répondu favorablement, souvent avec enthousiasme. Ces membres d'honneur sont des scientifiques de renom (Anny Cazenave, ingénieure émérite au Centre national d'études spatiales (CNES), membre de l'Académie des Sciences en France et aux États-Unis ; Jean Jouzel, climatologue, ancien membre du GIEC ; etc.) et des personnalités connues et reconnues dans plusieurs domaines (le maire de Marseille ; Stéphane Bern ; S.A.S. le prince Albert II de Monaco, etc. ).

L'association Les amis du marégraphe de Marseille compte aussi de très nombreux partenaires, dont certains sont très prestigieux (l'IGN, le Shom, l'Académie des sciences, l'Académie de marine, etc.).

Elle regroupe un public issu de milieux différents, passionné par le projet qu'elle porte. Parmi ses membres figurent Aix-Marseille-Université, le Shom, l'Ordre des géomètres-experts, l'Association francophone de topographie. Elle bénéficie d'un très fort ancrage local, très positif car c'est localement que sont menées la plupart de ses actions événementielles. Mais elle compte aussi des adhérents dans de nombreux autres départements français, ainsi qu'en Suisse. Ceci traduit l'universalité de ses raisons d'être.

Celles-ci consistent à : 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 sont réalisées en son sein. Conséquence des orientations précédentes, l'association participe, avec ses moyens, à l'information sur les changements climatiques et à la nécessité d'agir pour les atténuer et pour s'adapter à leurs conséquences.

Les amis du marégraphe de Marseille utilisent tous les moyens à leur disposition pour réaliser ces objectifs : stands informatifs (fig. 12), conférences, articles de presse, participation à des événements comme la Fête de la science, interventions en milieu scolaire, etc. D'autres moyens de valorisation sont développés ci-dessous.

### La visite du marégraphe

Le marégraphe de Marseille présente beaucoup d'atouts pour faciliter la valorisation de la culture et des techniques géodésiques et océanographiques. Cette activité, mise en œuvre avec un grand succès

17 <https://sealevelrise.brgm.fr/slr/#lng=0.26000;lat=46.60430;zoom=6;level=0.0;layer=0>

18 Durant la même période, une action personnelle a abouti à la publication du livre *Le marégraphe de Marseille* (Coulomb, 2014).



depuis plus de 10 ans, mérite d'être maintenue, soutenue, modernisée et développée.

En février 2023, fut signée une convention où l'IGN autorise Les amis du marégraphe de Marseille à « occuper temporairement le marégraphe pour organiser des visites », sous réserve du classement de cet observatoire en Établissement recevant du public (ERP). Ce classement, espéré depuis de nombreuses années, devrait être effectif dans quelques mois. Il permettra des périodes de visites plus longues et plus fréquentes.

En complément de ces visites réelles (fig. 13), Les amis du marégraphe de Marseille proposent une visite virtuelle<sup>19</sup>. L'outil a été réalisé par un groupe d'élèves ingénieurs de l'École nationale des sciences géographiques (ENSG) qui forme notamment une partie du personnel de l'IGN. L'association continue par ailleurs d'explorer d'autres pistes pour la réalisation d'outils encore plus immersifs.

En amont de cette visite virtuelle, les élèves de l'ENSG ont réalisé une modélisation 3D des bâtiments du marégraphe (intérieur et extérieur) qui pourrait être utile dans de futurs travaux de restauration, mais aussi, pourquoi pas, pour servir de cadre à un jeu vidéo (Clédat, 2022).

## Une exposition sur le marégraphe et ses amis

En septembre 2023, ont été exposés à la bibliothèque de l'Alcazar à Marseille des images commentées, et des objets relatifs au marégraphe de cette ville. Une visite de cette exposition, commentée par un ami du marégraphe, a été captée pour une mise en ligne sur la chaîne YouTube des bibliothèques de Marseille<sup>20</sup>.

## Un dossier de référence sur le niveau de la mer

L'Association francophone de topographie (AFT), membre de notre association, édite une revue technique qui s'appelle XYZ. Un numéro spécial de cette revue sera consacré en décembre 2023 au niveau de la mer. Le tirage habituel d'XYZ sera augmenté, pour que 200 exemplaires de ce numéro spécial soient fournis gratuitement à des enseignants qui en feront la demande.

## Les réseaux sociaux

Les amis du marégraphe ont un compte Facebook et un compte Instagram<sup>21</sup>. Ils publient tous les 4 jours. Les abonnés à ces publications sont de plus en plus nombreux (1 085 abonnés sur Instagram fin octobre). Cela fait partie des indicateurs qui prouvent que l'adhésion aux idées de l'association est très large et que la voie qu'elle emprunte est une voie digne, pertinente et juste.

Un autre indicateur est l'adhésion d'artistes (peintres, poètes, sculpteurs, etc.) à ses actions de communication. Ils sont de plus en plus nombreux à coopérer avec elle bénévolement. Cela concrétise une de ses orientations qui est de « favoriser la création et la diffusion d'œuvres numériques, culturelles, scientifiques ou artistiques, dédiées au marégraphe ».

## Un jour au marégraphe

La longue et riche histoire du marégraphe de Marseille est racontée dans un livre de 640 pages, richement illustré (Coulomb, 2014).

L'association Les amis du marégraphe de Marseille offre une autre façon de la découvrir, au moyen de récits très courts (de l'ordre d'une page et demie), accompagnés d'au-moins une image, et se rapportant chacun, quand celui-ci est connu, à un jour particulier.

Deux fois par mois, « Un jour au marégraphe » raconte un épisode de la vie du marégraphe de Marseille, diffusé sous forme d'un fichier PDF<sup>22</sup>

## Une bande dessinée

L'un des nombreux projets des amis du marégraphe de Marseille est de valoriser cet observatoire au moyen d'une bande dessinée. Grâce à une subvention municipale, les premières planches de cet ouvrage pourraient être dessinées en 2024.

## Conclusion

Pour plusieurs raisons historiques et patrimoniales, le marégraphe de Marseille, classé monument historique, est un observatoire du niveau de la mer unique au monde. Il fait pour cela légitimement la fierté des Marseillais.

19 <https://amis-maregraphe-marseille.fr/wp-content/plugins/visite-virtuelle/maregraphe/maregraphe.html>.

20 <https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=chaine+youtube+des+biblioth%C3%A8ques+de+marseille+mar%C3%A9graphe&mid=BE2257E4C27AA5FE0F63BE2257E4C27AA5FE0F63&FORM=VIRE>.

21 <https://www.facebook.com/people/Amis-du-mar%C3%A9graphe-de-Marseille/100077119913671/> et <https://www.instagram.com/amis.maregraphe/?hl=fr>.



*Figure 13 : Des visiteurs au marégraphe de Marseille - © Alain Coulomb*

Mais il n'est pas seulement un lieu chargé d'histoire ; il est aussi une station de surveillance de haute qualité, qui a produit (et qui continue de produire) une série de mesures de hauteur d'eau d'une longueur et d'une qualité exceptionnelle.

Pour cette raison précise, en 1985, il a été intégré, avec le marégraphe de Brest, au programme international d'observation du niveau des mers GLOSS. Pour la même raison, ces deux marégraphes viennent d'être labellisés par l'Organisation météorologique mondiale. Céleste Saulo, la nouvelle secrétaire générale de l'OMM, élue en juin 2023, quelques semaines après le classement des deux marégraphes français, espère donner une nouvelle impulsion à cette organisation face aux changements climatiques. Et c'est bien là le principal intérêt actuel du marégraphe de Marseille, qui réside dans sa participation à la compréhension, au suivi et à l'anticipation des changements climatiques.

Le marégraphe de Marseille n'est pas seulement marseillais ; il n'est pas seulement français ; son intérêt sociétal est planétaire.

Il doit être ouvert au public le plus largement possible, en tenant compte des contraintes liées à la topographie du lieu et aux règles de sécurité qui en découlent. Plus largement, les actions de valorisation engagées depuis quelques années méritent d'être amplifiées et rendues plus innovantes. Dans ce but, de nombreuses personnes d'horizons différents, conscientes du fait que le marégraphe de Marseille présente un intérêt spécifique et remarquable, sont regroupées au sein d'une association reconnue comme très active où, quelle que soit sa sensibilité, scientifique, patrimoniale, artistique, locale, écologique, solidaire ou curieuse, chacun est le bienvenu. Pour contacter l'association Les amis du marégraphe de Marseille : [amis.maregraphe@gmail.com](mailto:amis.maregraphe@gmail.com).

## Bibliographie

Clédat E., décembre 2022, « Relevé 2D et 3D du marégraphe de Marseille » *revue XYZ* n°173.

Coulomb A., mars 2009, « Le marégraphe de Marseille : patrimoine et modernité », *revue XYZ* n°118. Voir [https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page\\_id=4686](https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=4686)

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*, Presses des Ponts & Chaussées.

Coulomb A., janvier 2021, « Le marégraphe de Marseille », article mis en ligne le 11 janvier 2021 sur le site internet du Bureau des longitudes : <http://hdl.ahp-numerique.fr/focus-instruments-ac-maregraphe-marseille>

Coulomb A., mars 2021, « Les amis du marégraphe de Marseille », *revue XYZ* n°166. Voir [https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page\\_id=3766](https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3766)

Coulomb A., avril 2021, « Le marégraphe de Marseille : mesure, patrimoine, climat », *revue numérique e-Phaistos* : <https://journals.openedition.org/ephaistos/8716>.

Coulomb A., janvier 2022, « Le marégraphe de Marseille et son patrimoine culturel », *revue numérique La Gazette*. Voir [https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page\\_id=3782](https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3782)

Coulomb A., juin 2022, « Les hauteurs d'eau mesurées au marégraphe de Marseille », *revue XYZ* n°171. Voir [https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page\\_id=3782](https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=3782)

OHI, 2010, *Résolutions de l'Organisation hydrographique internationale*, publication M-3, 2<sup>ème</sup> édition.

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. Voir [https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page\\_id=4686](https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=4686)

Woppelmann G., Marcos. M., Coulomb A., *et al.*, septembre 2014, "Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849-1851", *Journal of Geodesy*. Voir [https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page\\_id=4686](https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=4686)