

xvz

aft
association francophone de topographie



n° 177

Numéro spécial

Niveau de la mer



**MAINTENANT
DISPONIBLE
À LA LOCATION !**

p.yx

*FIER
D'ÊTRE
FRANÇAIS*

INCLUS

- Récepteur Full GNSS
- Abonnement au service TERIA
- Abonnement au service TERIASat*
- Carte SIM Multi-opérateurs
- Contrôleur Android
- Logiciel de topographie APLITOP TcpGPS
- Canne + Poignée polyvalente
- Caisse de transport résistante IP68

*dans la zone de couverture opérationnelle

Alerte Info : Les perturbations ionosphériques sont de plus en plus importantes.
Suivez l'activité en temps réel grâce à l'application iTERIA.



Conditions de location :
contact@reseau-teria.com
01 71 16 21 70



SOMMAIRE

Directeur des publications

Tania Landes
Professeure des universités INSA de
Strasbourg

Directeur des publications adjoint

Flavien Viguier
Ingénieur topographe, SNCF

Rédaction et administration XYZ

73 avenue de Paris
94165 Saint-Mandé Cedex
Tél. +33 (0) 1 43 98 84 80

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière
Ingénieur topographe, retraité

Rédacteur en chef adjoint

Flavien Viguier

Comité de rédaction

André Bailly
Ingénieur géomètre ETP, retraité
Françoise Duquenne
Ingénieur général des Ponts honoraire
Ghyslain Ferré
Enseignant en topographie, ESGT Le Mans
Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg
Michel Kasser
Professeur des universités, retraité
Jean-Pierre Maillard
Géomètre-expert foncier, retraité
Emmanuel Natchitz
Ingénieur géomètre, ESITC Paris
Elodie Sissler
Enseignant en topographie et foncier,
Lycée Dorian

Publicité

Samuel Guillemain - Tél. 06 72 12 08 97
communication@aftopo.org

Conception et maquette

Dorothee Picard

Imprimerie Decombat

5 bis rue Gustave Eiffel
BP 90449 - 15004 Aurillac Cedex
Tél. 04 71 63 44 60
Fax 04 71 64 09 09



Dépôt légal

4^e trimestre 2023 ISSN 0290-9057
Tirage de ce numéro : 1 000 ex

CPPAP : 0324 G 80866

Abonnement pour les agences

Contactez info@aftopo.org pour tarifs

Adhésion à l'AFT comportant

l'abonnement et le téléchargement
gratuit du PDF. Visitez
http://www.aftopo.org/
rubrique Pour adhérer

Vente au numéro Téléchargez le PDF
pour 17 € ou achetez le numéro papier
pour 25 € contact info@aftopo.org

Membre du Syndicat de la presse
culturelle et scientifique (SPCS)

L'AFT n'est pas responsable des opinions
émises dans les conférences qu'elle organise
ou les articles qu'elle publie.

Tous droits de reproduction ou d'adaptation
strictement réservés.

Couverture : La corniche Kennedy et les bâtiments
du marégraphe de Marseille © Karim Abada.



La revue XYZ est éditée par l'association francophone de topographie

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres)

Membre de la FGF (Fédération des géomètres francophones)

73 avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé Cedex - Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

Courriel : info@aftopo.org - Site Internet : <http://www.aftopo.org>

Éditorial 3

Infotopo

- > Les informations de la profession
Philippe SABLAYROLLES 4

Manifestation

- > Atlas de l'anthropocène 2023
Jean-Pierre MAILLARD 7
- > Reims, hôte de la 6^e édition
des GeoDataDays
Jean-Pierre MAILLARD 8
- > Retour sur la 20^e édition des Journées
de la topographie
Hélène MACHER 9
- > Colloque OGE 2023
Qualification de la data : le rôle grandissant
du géomètre-expert à l'ère digitale
Tania LANDES 10

Courrier des lecteurs

- > Un cadeau pour l'AFT 12

NIVEAU DE LA MER

Introduction

- > Le marégraphe de Marseille et ses amis
Alain COULOMB 13
- > Historique de la marégraphie
Nicolas POUVREAU 19

Technologies utilisées

- > Observation du niveau marin *in situ*
Les réseaux et les technologies
Claire FRABOUL - Laurent TESTUT 25
- > Observation du niveau de la mer par
altimétrie spatiale
Pierre PRANDI - Michael ABLAIN 29

Les applications

- > La marégraphie pour l'hydrographie
Gaël ANDRÉ - Alexa LATAPY
Nathalie GILOY 35
- > Le système d'assainissement de Marseille
face à la montée du niveau de la mer
Nicolas HESSE - Amaury PERRIN
Christine NÈGRE - Dominique LAPLACE 41
- > Intercomparaison par nivellement de
précision de niveaux moyens de la mer
aux principaux marégraphes hexagonaux
Sylvain LAVOUE - Olivier JAMET 44
- > Retour sur 20 ans de mesures
marégraphiques pour la surveillance
des tsunamis et l'alerte opérationnelle
Hélène HÉBERT 49
- > Prévision et avertissement du risque

de submersion marine : la Vigilance
vagues-submersion

Didier JOURDAN - Éric CAILLAUD

Audrey PASQUET - Héloïse MICHAUD

Denis PARADIS 54

Le long terme

- > Reconstructions du niveau moyen global
de la mer à partir de marégraphes
Guy WÖPPELMANN 61
- > Les activités de reconstruction
marégraphique en France
Alexa LATAPY - Inge VAN DEN BELD -
Frédéric PONS - Nicolas POUVREAU 65
- > Des émissions de gaz à effet de serre
à l'élévation du niveau de la mer :
contraindre la dynamique du bilan
d'énergie planétaire par la géodésie
spatiale
Jonathan CHENAL - Benoît MEYSSIGNAC . 70



- > L'élévation du niveau de la mer et les
risques côtiers
Gonéri LE COZANNET 74
- > Apport de la gravimétrie absolue
à l'estimation du niveau des mers
Marie-Françoise LEQUENTREC-LALANCETTE .. 78

Art et géométrie

- > Alain Le Boucher : le Luchrone de Reims
Jean-Max Llorca : la fontaine de la
solidarité
Jean-Pierre MAILLARD 84

Ouvrages

- André BAILLY 86

Foncier international

- > Faut-il radicalement changer de paradigme
face à l'inexorable montée des eaux
et à la modification du littoral ?
Claire GALPIN 88-

Pour la recherche de nos annonceurs, consulter
la p. 87

PROCHAIN XYZ - n° 178
Campagne de mesures inédites
pour l'étude des bienfaits des arbres
sur le climat de trois rues à Strasbourg

LA CARTOGRAPHIE MOBILE PAR LEICA GEOSYSTEMS

Expérience. Accompagnement. Innovation.



PEGASUS BACKPACK
L'ORIGINAL



PEGASUS OFFICE
AUTONOME. INTELLIGENT.
SIMPLIFIÉ.



PEGASUS TRK100
LE NOUVEAU STANDARD
POUR TOUS



Leica
Geosystems

leica-geosystems.fr
Contact : commercial@leica-geosystems.fr

Le niveau de la mer augmente-t-il ?

Un message a été partagé sur un réseau social par un groupe de négation au changement climatique le 4 septembre dernier : *"...il n'y a eu AUCUNE AUGMENTATION de la VITESSE de l'élévation du niveau de la mer (élévation qui a lieu depuis la dernière période glaciaire)".*

Le message comprend six graphiques basés sur des données provenant du *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL) qui recueille et analyse des données à long terme provenant d'une collection mondiale de marégraphes.

Le site AAP Factcheck réplique¹.

"L'affirmation selon laquelle il n'y a pas eu d'augmentation du taux d'élévation du niveau des mers est fausse. Des experts confirment que le niveau des mers a augmenté au cours des dernières décennies et que le rythme s'est accéléré en raison du réchauffement climatique. Ces mêmes experts affirment que les auteurs du message utilisent des données aux graphiques mal étiquetés provenant d'une petite sélection de marégraphes de l'hémisphère nord pour faire valoir, à tort, un point de vue plus large sur l'élévation générale du niveau de la mer."

Dans ce numéro spécial, une collaboration de l'Association des amis du marégraphe de Marseille et de l'AFT, le lecteur pourra, lui-même, se faire une idée, aussi scientifique que précise, du phénomène. En effet, l'élévation de plus en plus rapide du niveau moyen de la mer est un des indicateurs des changements climatiques anthropiques. Ce numéro aborde donc, grâce à un panel de spécialistes, les techniques de la mesure, du marégraphe aux méthodes spatiales et GNSS puis les corrections de ces mesures pour les rendre indépendantes des mouvements terrestres. Ces technologies s'appuient sur des réseaux collaboratifs nationaux et mondiaux, qui enregistrent des données, les stockent, les analysent, fabriquent des produits dérivés et les mettent à disposition des utilisateurs. Si la mesure du niveau de la mer nous alerte sur son élévation générale, elle est aussi nécessaire à de nombreuses applications, telles que celles liées à la sécurité des biens et des personnes en milieu côtier (dimensionnement d'ouvrages, alertes aux submersions et tsunamis). La reconstruction des données historiques sera abordée, comme nécessaire à la compréhension du phénomène. De même, les autres sciences et techniques, nivellement de précision, gravimétrie, étude de l'équilibre énergétique planétaire, confortent, en précision et en compréhension, les mesures marégraphiques.

Mais quelles sont les valeurs publiées sur l'élévation globale du niveau de la mer ?

La NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)² nous renseigne : *"Le niveau moyen de la mer s'est élevé d'environ 21 à 24 centimètres depuis 1880. L'élévation du niveau de l'eau est principalement due à la combinaison de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires et de l'expansion thermique de l'eau de mer à mesure qu'elle se réchauffe. En 2022, le niveau moyen mondial de la mer était supérieur de 101 millimètres à celui de 1993, ce devient la moyenne annuelle la plus élevée jamais enregistrée par satellite (de 1993 à aujourd'hui). Le niveau moyen mondial des océans a augmenté de 3,6 millimètres par an entre 2006 et 2015, soit 2,5 fois le taux moyen de 1,4 millimètre par an pendant la majeure partie du XX^e siècle. D'ici la fin du siècle, le niveau moyen mondial de la mer devrait s'élever d'au moins 0,3 mètre par rapport aux niveaux de 2000, même si les émissions de gaz à effet de serre restent relativement faibles au cours des prochaines décennies."* Puisse ce numéro spécial d'XYZ aider à bien comprendre les phénomènes qui font évoluer le niveau de la mer et inciter à s'engager dans la lutte contre ces changements.

Bernard Flacelière, vice-président, rédacteur en chef.

Alain Coulomb, président de l'Association des amis du marégraphe de Marseille.

PS Le conseil de l'AFT et la rédaction d'XYZ vous souhaitent une très bonne année 2024 et vous donnent rendez-vous au 19^e forum de la topographie le jeudi 28 mars à Gembloux en Belgique (page 34).

¹ <https://www.aap.com.au/factcheck/post-deeply-wrong-about-rate-of-rising-sea-level/>

² <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>



■ Retour sur le FIG 2023

La 34^e édition du Festival international de Géographie (FIG) de Saint-Dié-des-Vosges s'est déroulée du 29 septembre au 1^{er} octobre 2023. Comme chaque année, l'Afigéo a été le partenaire organisateur de l'Espace Géonumérique, une vitrine tout public offerte à la découverte du potentiel de la géomatique.

Des entreprises, institutions publiques, collectivités, associations, une quinzaine, se sont retrouvées dans l'espace exposants où, à l'appui des stands de chacune, des démonstrations d'applications innovantes, des animations et échanges ont eu lieu tout le long du festival. L'Afigéo a remercié les intervenants pour leur capacité à présenter de façon pédagogique des aspects parfois techniques de la géomatique et des usages opérationnels.

Le public, une nouvelle fois au rendez-vous tout au long des trois jours, était composé d'étudiants en géographie, d'enseignants d'histoire-géographie, mais aussi d'intervenants présents sur le FIG et de visiteurs curieux des usages de la géographie numérique.

► <https://www.afigeo.asso.fr/retour-sur-un-week-end-geo-numerique-et-cartographique-au-fig-de-saint-die-du-29-sept-au-1er-oct/>

■ Rejoindre la communauté d'utilisateurs LiDAR HD sur Osmose, plateforme des communautés professionnelles de l'État

Dans le domaine cartographique, vous êtes professionnel ou institutionnel ? Vous travaillez à partir de données et services issus d'acquisitions LiDAR HD sur des cas d'usage précis (prévention des risques d'inondations, gestions forestières et agricoles, urbanisme, etc.) et souhaitez échanger, partager, réfléchir, collaborer avec d'autres utilisateurs ? N'attendez plus et venez rejoindre la communauté d'utilisateurs LiDAR HD : c'est l'espace d'échanges privilégié pour monter en compétences sur des thématiques bien définies. Concernant l'aspect technique, la communauté s'appuie sur la plateforme OSMOSE, outil développé par la DINUM.

Un outil complet et modulable : Animez vos communautés autour d'une pratique, d'un projet, d'une équipe, d'une direction... La plateforme Osmose vous permet de composer votre espace collaboratif avec les fonctions qui vous intéressent : blog, partage de documents, espaces d'échanges, calendrier, gestion de tâches, wiki...

<https://osmose.numerique.gouv.fr/>

Exemple d'informations échangées sur Osmose : Atelier LiDAR HD : QGIS 332, les nouvelles fonctionnalités de traitements de nuages de points.

<https://www.youtube.com/watch?v=-PFxeWg-CzM>



■ 16^e campagne de mesure du mont Blanc

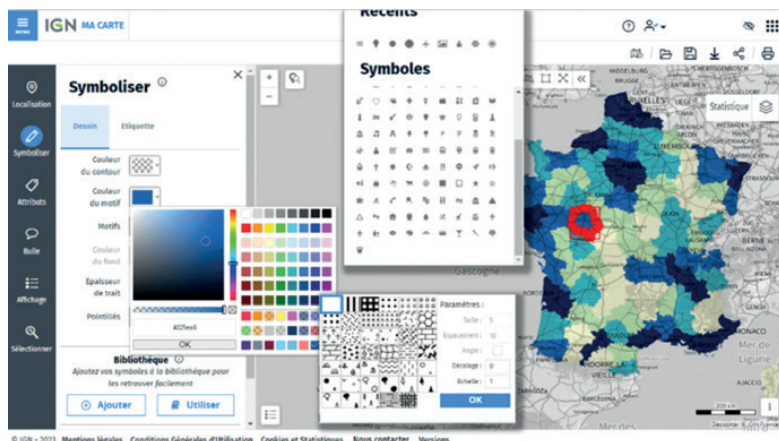
Les 14 et 15 septembre derniers, une équipe de plus de 20 personnes (géomètres-experts et guides) a réalisé l'ascension du mont Blanc pour effectuer les mesures du dôme. Une expédition sur 2 500 m de dénivelé, tout en transportant un stock de matériel lourd. Arrivés vers 13 h sur le toit de l'Europe occidentale, les membres de l'expédition y sont restés un peu plus de deux heures pour réaliser les mesures avec du matériel de type GNSS. Nouveauté cette année, un drone a permis des relevés photogrammétriques.

À la publication des résultats, le mont Blanc a perdu 2,22 m par rapport à la mission précédente de 2021. Le sommet culmine maintenant à 4808,59 m.

Cf : "Mesure du mont Blanc", revue Géomètre, n° 2217.



■ Créez des cartes personnalisées en quelques clics et partagez-les



Ma Carte, outil en ligne de création et de publication de cartes, ouvert et mis à disposition de tous par l'IGN, s'enrichit de nouvelles fonctionnalités. Destiné aux citoyens comme aux acteurs publics, et prochainement accessible sur cartes.gouv.fr, il permet de réaliser et diffuser simplement des cartes à partir de ses propres données.

Une nouvelle version plus intuitive et puissante :

L'interface a été revisitée pour rendre la prise en main de **Ma Carte** plus intuitive et faciliter l'accès à l'ensemble des données du Géoportail de l'IGN. Les utilisateurs peuvent également effectuer des superpositions de données, soit en ajoutant leurs propres données à la main, soit à partir d'un jeu de données préexistant.

► Pour plus d'informations : <https://macarte.ign.fr/>

■ WALTOP2.0, le dictionnaire topographique (en Wallonie)

Le dictionnaire topographique Waltopo permet une uniformisation des levés et mesures topographiques en Wallonie, au bénéfice de l'ensemble des opérateurs. Il offre également un modèle d'échange de données.

Le dictionnaire porte sur plus d'une centaine d'objets linéaires et une centaine d'objets ponctuels répertoriés par thème (Construction, Équipement, Hydrographie, Occupation du sol, Relief, Réseau ferroviaire et Voirie). Il se présente sous la forme d'un catalogue de fiches reprenant, outre leur description, les instructions pour lever et mesurer les objets du monde réel visibles sur le terrain (bords de voiries, pieds de façades, équipements...).

► Pour plus d'informations : <https://geoportail.wallonie.be/waltopo>

■ 1 million de visiteurs pour Cosquer Méditerranée

Objectif atteint ce mardi 19 septembre 2023 à 15 h !

30 ans après la découverte de la grotte préhistorique sous la mer dans les profondeurs des calanques marseillaises par le plongeur Henri Cosquer, le fac-similé créé par la société Kléber Rossillon a conquis le cœur du public en se frayant une place de choix dans le paysage culturel et touristique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Depuis son ouverture il y a 15 mois, Cosquer Méditerranée a accueilli un public régional à 63 % dont 50 % de Marseillais, 25 % de visiteurs de toute la France et 12 % de touristes étrangers.

Un succès également auprès des scolaires avec 7 % d'élèves accueillis depuis l'ouverture, essentiellement de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. <https://www-iogp-org.cdn.ampproject.org/c/s/www.iogp.org/blog/geomatics/iogp-publishes-industry-guidelines-for-seawater-pressure-to-depth-conversions/amp/>

Cf : "Relevés de la grotte Cosquer : la grotte, les premiers relevés, un monument et une histoire chaotiques", Bertrand CHAZALY, Revue XYZ, n° 168.

■ Les nouveaux services de Galiléo

Plus de vingt ans après le lancement du premier satellite de la constellation, le système de positionnement européen Galileo propose un ensemble de services aux utilisateurs allant bien au-delà de la géolocalisation.

Le service principal offert par Galileo (service ouvert/open service ou OS) permet le positionnement et la synchronisation. Adapté en particulier aux applications grand public comme la téléphonie mobile ou les systèmes de navigation automobile, il est accessible librement et gratuitement et est en général utilisé conjointement avec d'autres systèmes de positionnement par satellite, principalement GPS.



► https://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/geodinfo/GeodInfo_2023-09-Gempop.pdf

■ Un monument de 1 400 tonnes déplacé et 6 tunneliers en action



C'est une opération inédite en France : le 31 août 2023, le Monument à la Gloire des Combattants de la Haute-Garonne a été déplacé de 35 m. Il sera remis à sa place dans quatre ans. Un chantier hors norme pour permettre la construction de la station François Verdier de la Ligne C du métro toulousain.

Un colosse de pierre déplacé sur 35 m : Plus connu des Toulousains sous son nom d'usage de "monument aux morts", le Monument à la Gloire des Combattants de la Haute-Garonne – son appellation exacte – est une œuvre architecturale

consacrée aux soldats du département morts lors des conflits du XX^e siècle.

Installé depuis près d'un siècle (1928) sur les allées Forain François-Verdier, au carrefour de la rue de Metz et de la Halle aux Grains, ce colosse de pierre de 1 000 tonnes, 15 m de haut, 17 m de long et 12 m de largeur a été déplacé de 35 m, après avoir pivoté sur lui-même de 90°. Il restera positionné sur le terre-plein central des allées pendant quatre ans.

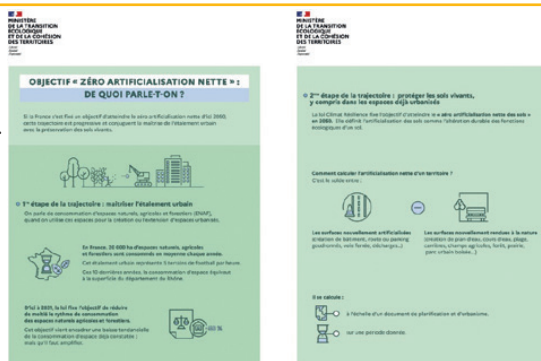
La ligne C du métro embarquera ses voyageurs fin 2028. Vingt et une stations sur un parcours de 27 km entre Colomiers, Blagnac, Toulouse et Labège. Six tunneliers vont entrer en action et avanceront au rythme de 200 m par mois. Ils porteront tous des prénoms féminins en hommage à des femmes qui ont marqué l'histoire toulousaine.

► Pour plus d'informations : <https://metropole.toulouse.fr/actualites/un-monument-de-1-400-tonnes-deplace>

■ Les enjeux du ZAN

Les enjeux de la politique publique "Zéro artificialisation nette" sous forme d'infographies. Le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires a produit six infographies permettant de comprendre l'objectif Zéro artificialisation nette et ses enjeux.

► Pour plus d'informations : <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/zero-artificialisation-nette-infographies-pour-comprendre>





■ L'IOGP publie des directives industrielles pour les conversions de la pression de l'eau de mer en profondeur



Le positionnement vertical constitue un défi persistant dans l'industrie pétrolière et gazière offshore. La détermination précise de la distance verticale dans l'eau de mer est une tâche complexe impliquant plusieurs variables dynamiques. Cette récente publication du Comité de géomatique vise à fournir une approche volontaire et standardisée pour la détermination de la profondeur ou de

la hauteur à partir des observations de pression de l'eau de mer, un sujet pour lequel il n'existe actuellement aucune spécification technique à l'échelle de l'industrie.

► Pour plus d'informations :

<https://www.iogp-org.cdn.ampproject.org/c/s/www.iogp.org/blog/geomatics/iogp-publishes-industry-guidelines-for-seawater-pressure-to-depth-conversions/amp/>

Agenda des manifestations

■ Les 23 et 24 janvier 2024, 51^e congrès ATEC ITS France, Beffroi de Montrouge, Paris, <https://congres.atec-its-france.com/>

■ Du 29 au 31 janvier, 6th InfraBIM Open, Palais de la Bourse, Lyon <https://www.infrabimopen.com/>

■ Du 18 au 20 mars, Colloque G2 géodésie marine, sous-marine et côtière, La Rochelle <https://lienss.univ-larochelle.fr/>

■ Du 21 au 24 mars, 148th congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Campus Condorcet à Aubervilliers <http://cths.fr/co/index.php>

■ Le 28 mars, Forum de l'AFT, Agro-Bio Tech de Gembloux, Université de Liège, Belgique

<https://www.aftopo.org/>

■ Les 3 et 4 avril, BIM World Jumeaux Numériques, Paris Expo - Porte de Versailles - <https://bim-w.com>

■ Trigonométrie, baromètre, satellites, horloge atomique... Comment mesure-t-on le mont Blanc depuis 1685 ?

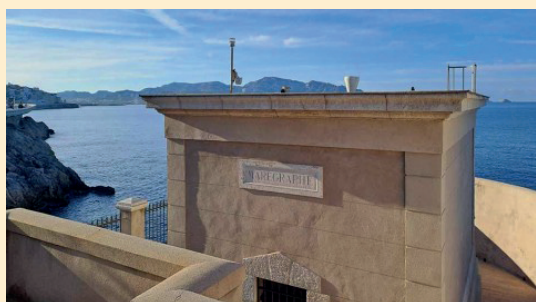


1685. Sur les rives du lac Léman, deux frères mathématiciens ont installé leurs instruments de mesure : un quart de cercle vertical, un demi-cercle horizontal ainsi que des quadrants astronomiques. Jean-Christophe et Nicolas Fatio estiment, avec un simple calcul de trigonométrie

reprenant l'angle de visée entre le sommet et l'horizontale, le point culminant du sommet qu'ils appellent la "montagne maudite".

► Pour plus d'informations : <https://www.lefigaro.fr/sciences/trigonometrie-barometre-satellites-horloge-atmique-comment-mesure-t-on-le-mont-blanc-depuis-1685-20231005>

■ Le marégraphe de Marseille rénové et reconnu station d'observation marine à long terme par l'Organisation météorologique mondiale



Après trois mois de travaux de rénovation sous l'égide d'un architecte du patrimoine, le marégraphe de Marseille, construit en 1885, a repris ses mesures de l'élévation du niveau de la Méditerranée, qui ont permis, en 1897, de déterminer le niveau zéro des altitudes françaises. Emmanuelle

Prada-Bordenave, présidente du conseil d'administration de l'IGN, et le vice-amiral Lionel Mathieu, commandant de la Marine à Marseille, qui représentait l'amiral Nicolas Vaujour, président du conseil d'administration du Shom, ont célébré la fin de ce chantier et la reconnaissance internationale du marégraphe en tant que station d'observation marine centenaire et station d'observation à long terme par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) avec la pose d'une plaque inaugurale ce 15 septembre 2023.

► Pour plus d'informations : <https://www.ign.fr/espace-presse/le-maregraphe-de-marseille-renové-et-reconnu-station-dobservation-marine>

■ Référentiel et cartographie de l'archéologie parisienne

Cette carte interactive présente près de 2 000 découvertes archéologiques réalisées à Paris. De nombreuses sources de données ont été analysées, allant des mentions de découvertes anciennes des XVII^e et XVIII^e siècles jusqu'aux rapports d'opérations archéologiques préventives les plus récents.

Les archives de Théodore Vacquer – premier archéologue parisien (fin du XIX^e siècle) – conservées à la Bibliothèque Historique de la Ville de Paris, constituent le fonds le plus important pour documenter l'évolution de la ville de Paris. Deux autres ouvrages de référence alimentent la carte et ont été indexés : la Carte archéologique de Paris établie en 1971 par Michel Fleury et la Carte archéologique de la Gaule consacrée à Paris, publié en 1998 par Didier Busson.

► Pour plus d'informations : <https://fnp.huma-num.fr/adws/app/3298f631-53ea-11eb-91f3-dfc85aa511ba/>



Atlas de l'anthropocène 2023

Centre d'information, de documentation, d'exposition d'urbanisme et d'architecture de la capitale, de la métropole parisienne, le pavillon de l'Arsenal à Paris s'est trouvé être un lieu on ne peut plus adapté à l'accueil de la présentation, par l'IGN le 4 octobre, de l'édition 2023 de l'atlas de l'anthropocène. Cette année l'ouvrage est en effet consacré à l'occupation des sols dont la rareté croissante a été soulignée.

Aux moyens de la production et du traitement d'informations géographiques, l'IGN contribue à lutter contre le dérèglement climatique et à la réussite de la transition écologique. C'est le sens de l'initiative prise par l'institut de s'obliger à publier annuellement l'atlas *Cartographier l'anthropocène*, un ouvrage de référence qui procède de la richesse de ses données et de celles de ses partenaires. L'atlas permet de visualiser les conséquences de l'empreinte humaine sur le territoire, avec une approche du temps réel plus performante.

Publiée ce même 4 octobre, l'édition 2023 traite de l'occupation des sols sous trois points de vue : historique, aménagement du territoire et environnemental. Cet atlas met en évidence l'influence des choix politiques relatifs à la consommation de l'espace naturel et de sa recomposition : les choix du passé et la façon dont ils ont modelé le territoire national et les choix récents qui répondent aux nouvelles problématiques.

Le point de vue historique permet de prendre du recul et d'examiner les effets qu'ont eues les décisions du passé sur l'occupation du sol : reconquête de la forêt, aménagements multiples, remembrement ou encore aménagement urbain. L'atlas 2023 rappelle comment l'IGN a continuellement mis ses données à la disposition des décideurs publics au travers de divers inventaires, bases de données et observatoires, tout spécialement le référentiel national d'occupation

Suivi de l'occupation des sols (OCS GE) Lyon 2020.

des sols à grande échelle (OCS GE), ce dernier permettant en particulier de calculer l'artificialisation du sol et de la suivre dans le temps. Avec l'OCS GE, animé par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT) au service des politiques d'aménagement, les collectivités territoriales à tous leurs échelons peuvent croiser les données et définir leur politique d'urbanisme. Par exemple, elles peuvent identifier les zones perméables, imperméables, les espaces naturels, agricoles, artificialisés et comparer les surfaces dont l'occupation du sol a évolué entre deux dates. Dans le cadre de l'OCS GE, l'IGN travaille avec le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) et l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) afin de préciser les contours de l'objectif de "zéro artificialisation nette" (ZAN) à l'horizon 2050 défini par la loi climat et résilience. Pour accélérer la réalisation du référentiel OCS GE, l'IGN a recours à l'intelligence artificielle (IA) pour couvrir la France entière, soit 16 000 milliards de pixels d'orthophotographies à traiter.

Le point de vue aménagement s'attache au paysage français qui résulte des transformations culturelle et économique. Il est le reflet des priorités et intérêts d'époques différentes. Aujourd'hui, la lutte contre l'étalement urbain et l'artificialisation des sols rend plus encore nécessaire la densification

des villes et leur reconstruction sur elles-mêmes. À cette fin, en répondant de mieux en mieux à l'attente des utilisateurs, le Géoportail de l'IGN constitue un outil de premier ordre. La ZAN qui implique désormais de traiter les sujets logement et développement des bassins d'activité économique avec sa contrainte doit générer une véritable évolution des mentalités et des modèles de société.

Le point de vue environnemental valorise une connaissance de l'occupation des sols qui permet de structurer un territoire résilient face aux conséquences des bouleversements climatiques, que ce soit la raréfaction de l'eau douce, la sécheresse, la propagation des incendies et les épisodes d'inondations. La modélisation 3D, en cours de préparation, qui va créer les jumeaux numériques, facilitera le jeu des simulations des projets d'aménagement tels l'énergie renouvelable, l'évaluation du niveau ou du débit d'eau en rivière, la fonte des glaciers, le recul du trait de côte, la croissance des forêts, la consommation urbaine des sols, etc.

Ce faisant, avec ses partenaires, l'IGN s'investit dans la constitution de référentiels souverains en intégrant l'usage des technologies de pointe (données spatiales, IA, jumeaux numériques). Une belle feuille de route. L'atlas de l'anthropocène 2023 est accessible à l'adresse : <https://www.ign.fr/atlas-des-cartes-de-lanthropocene-2023-occupation-sols>. ●

Jean-Pierre Maillard



©IGN

Reims, hôte de la 6^e édition des *GeoDataDays*

■ Jean-Pierre MAILLARD

Les GeoDataDays 2023 (GDD – en français les Journées nationales géonumériques) se sont déroulées les 13 et 14 septembre au centre des congrès de Reims. La manifestation géomatique annuelle organisée par l'Association française pour l'information géographique (AFIGEO) et le média DécryptaGéo, au service de la même information, poursuit son tour de France.

Après Poitiers en 2022 et avant Nantes en 2024, les GDD ont cette année fait étape dans la capitale de la Champagne. La ville, comme beaucoup d'autres collectivités publiques et acteurs privés, est impliquée dans le partenariat DataGrandEst. Ce centre de ressources en information géographique (CRIGE)¹, mis en œuvre par l'État en région, la région Grand Est et nombre de ses membres qui développent la coopération en matière de production, de partage et de valorisation de données du territoire, ont été mobilisés pour la circonstance. De même, plusieurs partenaires nationaux ont soutenu les GDD au premier rang desquels le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT) d'autant que l'animation de la communauté géomatique sert le programme du gouvernement d'une

1 cf. XYZ n° 176, rubrique Géomatique



Construire l'information géographique de demain

France nation verte, dans son volet chantier numérique des données. La réussite a été au rendez-vous puisque 1 200 participants ont été accueillis sur les deux jours, 80 exposants ont contribué au salon professionnel et de nombreux débats, conférences, ateliers ont été proposés aux présents avec autant d'intervenants.

Le site www.geodatadays.fr rend largement compte et récapitule tout ce qu'il faut savoir sur l'édition 2023. Il convient de s'y reporter tant le programme était fourni.

Toutefois, entre autres, la présence de l'IGN et celle de l'ENSG ont été remarquées. Pour sa part, par des démonstrations en avant-première, l'IGN a présenté le futur guichet cartographe du service public cartes.gouv.fr. De même ont été commentées les dernières avancées du programme LiDAR HD sur le suivi de l'occupation des sols et celles faisant suite à la diffusion récente en *open data* des premiers nuages de points classés. Par ailleurs, le réseau Datalliance lancé en juin 2023, ouvert aux partenaires publics et privés, qui met les données au service des politiques publiques de la transition écologique, a également été mis

en avant. À titre d'exemple, la première datalliance, relative à l'identification des panneaux photovoltaïques au sol et conduite par la société NamR, a été citée.

Le salon des GDD a réuni tous les acteurs publics et privés qui comptent dans le domaine géomatique, que ce soit pour la production des données ou leur traitement. Dans sa partie village spatial, la présence du programme *Connect by CNES* a valorisé toutes les différentes propositions de la technologie spatiale au service des acteurs économiques et territoriaux, sans oublier la société civile. À l'opposé du village spatial, comment ne pas voir l'attraction du stand de L'Europe vue ciel qui exposait l'avion *Green Observer*, quand bien même la commission de sécurité lui a coupé les ailes. Comme ses concurrents, l'Europe vue du ciel défend les offres de service de l'acquisition de données géographiques maintenant bornées par les drones et les satellites. À côté, on a pu remarquer dans le village des associations, la présence de l'AFT et autres associations invitées, comme celle du monde académique avec les projets étudiants "Challenges Geodata".

En offrant deux distractions pour le plaisir des yeux, l'aspect culturel n'a pas été oublié. On a ainsi pu découvrir les *CryptoPlanets* de Christophe Tritz, une série de cartographies imaginaires en 3D situées dans l'une ou l'autre des 88 constellations visibles depuis la Terre. *A contrario*, un retour sur le passé a proposé une sélection de cartes anciennes provenant d'une exposition "La Champagne à la carte", récemment présentée à la bibliothèque rémoise Carnegie, un parcours entre Moyen Âge et XIX^e siècle.

La communauté géomatique s'est aussi retrouvée lors d'une soirée festive au caveau Castelnau, car il eut été regrettable de passer à Reims sans goûter au champagne.

Rendez-vous aux GDD 2024 à Nantes qui, n'en doutons pas, seront porteurs de novations géonumériques en tout genre. ●



Green Observer atterri au premier niveau du centre des congrès de Reims.

Retour sur la 20^e édition des Journées de la topographie

■ Hélène MACHER

Les Journées de la topographie (JDT) 2023 se sont déroulées du 20 au 22 septembre 2023 à l'INSA Strasbourg sur le thème criminalistique et topographie. Retour sur la 20^e édition de cet évènement.

Soutenances des Projets de fin d'études (PFE) des étudiants

Comme chaque année, les JDT (figure 1) ont mis en avant les soutenances des PFE, dernière étape du parcours qui conduit au diplôme d'ingénieur en topographie. Pendant les trois journées, 38 étudiants ont soutenu leur projet devant un public composé d'étudiants, de membres de leur famille et de professionnels. Retrouvez les vidéos de synthèse des PFE réalisées par les étudiants en scannant le QR code ci-dessous.



Figure 2. Salon des exposants des Journées de la topographie 2023.

Le traditionnel salon des exposants

Le salon des exposants est un lieu d'échanges privilégiés entre les étudiants et les professionnels (figure 2). Les entreprises ont exposé leurs matériels et solutions logicielles et proposé des offres de stages et d'emploi.



Figure 1. Bannière des Journées de la topographie 2023.

Pour rester dans le thème des journées, criminalistique et topographie, le salon des exposants a mis en scène un jeu d'enquête permettant d'explorer les stands tout en résolvant un crime. Nous avons également eu le plaisir d'accueillir pendant le salon l'Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale (IRCGN) ainsi que la police scientifique.

Une conférence sur le thème "Criminalistique et topographie"

La conférence des JDT avait pour thème cette année "Criminalistique et topographie" (figures 3 et 4). Ce thème original peut paraître au premier abord surprenant mais, dans le cadre de l'analyse

d'une scène de crime, des techniques d'acquisition et de traitement utilisées en topographie sont employées par des services scientifiques de la police et de la gendarmerie. L'objectif est de pouvoir positionner dans l'espace les différents indices de la scène. Plusieurs experts ont présenté les techniques d'acquisition de données topographiques utilisées pour les scènes de crime : Hervé Daudigny, spécialiste 3D – criminalistique – *Forensic science* à l'Université de Lausanne ; le lieutenant-colonel Christophe Lambert, chef du département Signal image parole, IRCGN ; Delphine Rainoldi, ingénieure de police technique et scientifique, cheffe du Service régional de police technique et scientifique (SRPTS) 67, direction zonale de police judiciaire Est.



Figures 3 et 4. Conférence sur le thème "Criminalistique et topographie".

Les Journées de la topographie ont fêté leurs 20 ans !

Les JDT ont fêté cette année leurs 20 ans en même temps que l'INSA Strasbourg. Cet événement de la rentrée à l'INSA Strasbourg attire chaque année de 150 à 200 participants sur trois jours et a vu son succès grandir au fil des années. Les visiteurs des JDT 2023 ont pu se replonger dans ces 20 années. Les affiches et les thèmes des éditions précédentes étaient affichés pendant les trois journées.

De nombreux acteurs ont contribué au succès des Journées de la topographie. Un grand merci aux étudiants, aux enseignants, aux diplômés (figure 5), au service communication, aux graphistes, aux services technique et administratif, aux présidents de jury, aux conférenciers, aux partenaires, aux professionnels et aux nombreux visiteurs ! Remerciements particuliers à Tania Landes, ensei-



Figure 5. Félicitations aux étudiantes et étudiants diplômés !

gnante en topographie, qui a créé et géré cet événement jusqu'en 2019 et à Véronique Zeller, responsable du service communication, qui a développé la communication notamment grâce au cahier des résumés. À bientôt pour une nouvelle édition des JDT ! Pour ne rater aucune

information sur les Journées de la topographie, abonnez-vous au blog de la topographie : <http://topographie.insa-strasbourg.fr/sujet/journees-de-la-topographie/> et rejoignez-nous sur notre page LinkedIn : <https://www.linkedin.com/showcase/topographie-insa-strasbourg> ●

MANIFESTATION

Colloque OGE 2023

Qualification de la data : le rôle grandissant du géomètre-expert à l'ère digitale

"Le mauvais sort a été conjuré", furent les premiers mots de bienvenue de Bertrand Clergeot en ouverture du colloque. Prévu le 26 janvier, remis au 23 mars, puis reporté au 19 octobre en raison des grèves, le colloque préparé de longue date par la Commission expertise de la mesure, dont M. Clergeot était alors le président, a enfin pu se tenir à Paris.

Sur le thème "Qualification de la data : le rôle grandissant du géomètre-expert à l'ère digitale", le colloque a attiré beaucoup de géomètres-experts et de nombreux étudiants venus des trois écoles ESGT, ESTP et INSA Strasbourg, sur invitation



Figure 1. Présentation du déroulé de la journée en ouverture du colloque par Christian Rouaix, secrétaire du Conseil supérieur de l'OGE.

de l'OGE. Prévu initialement au CNAM, il s'est finalement tenu dans les locaux de La Grande Crypte, 69 bis rue Boissière, dans le 16^e arrondissement. Le discours d'ouverture a aussi donné l'occasion à Bertrand Clergeot, arrivé

en fin de mandat, d'informer officiellement le public de la nomination d'Olivier Minot à la présidence de la Commission expertise de la mesure de l'Ordre des géomètres-experts. Celui-ci a souligné l'importance du thème du



Figure 2. Commission expertise de la mesure de l'OGE, de droite à gauche : Olivier Minot, Joseph Pascual, Bertrand Clergeot, accompagnés des membres géomètres-experts et enseignants la composant.

colloque, la qualification de la donnée constituant depuis toujours un axe stratégique majeur pour la profession de géomètre-expert, et que les années à venir mettront en exergue.

Christian Rouaix, secrétaire du Conseil supérieur de l'OGE et président du Conseil régional de Toulouse a présenté le déroulé de la journée avec un programme très dense et très riche (figure 1), puisqu'il aura donné la parole à 17 intervenants.

La matinée a été consacrée à la présentation des technologies d'acquisition de la donnée. Chacune des présentations s'est articulée en deux parties : tout d'abord un état de l'art pointant les avantages et inconvénients de chaque technologie, puis une ouverture vers des perspectives d'évolution. Les technologies d'acquisition concernaient LiDAR, caméras, radar, sonar, GNSS, centrale inertielle. Certains capteurs sont utilisables individuellement, mais souvent ils équipent un même système pour répondre au besoin de cartographie mobile, via des méthodes de couplage qui ont également été rappelées. Si certaines notions étaient connues de l'assemblée, beaucoup ont pris une dimension particulière du fait de l'idée judicieuse de faire intervenir un binôme pour chaque technologie. En effet, généralement, un géomètre-expert et un enseignant de l'une des trois écoles ont partagé le temps de parole et ont

complété leurs points de vue. Par conséquent, l'approche pratique et l'approche théorique étaient réunies dans un même thème et se nourrissaient mutuellement. Après un buffet "déjeunatoire", l'après-midi s'est poursuivi sur le thème des traitements. En effet, si la donnée semble de plus en plus "facile" à acquérir, le stockage de ces informations volumineuses pose question, de même que le temps nécessaire à leur traitement, qui semble constituer la partie immergée de l'iceberg.

Notamment, ont été soulignés les limites de l'exercice et les pièges à éviter concernant l'acquisition et la modélisation de données hétérogènes. De même, les impacts de la combinaison et de l'assemblage de données hétérogènes ont été illustrés. Ensuite, trois géomètres-experts ont partagé leur retour d'expérience et

présenté des cas pratiques en milieu bâti, rural et industriel.

Pour clore cette journée riche en enseignements et en retours d'expériences, Bertrand Clergeot et Olivier Minot (figure 2) ont insisté sur l'importance de qualifier la donnée et du rôle crucial du géomètre-expert, ainsi que de la place de l'institution au regard de cette problématique. L'historique des 20 dernières années, depuis la directive INSPIRE à la semi-automatisation de l'acquisition, en passant par les feux du BIM, met en évidence les risques de perte de maîtrise par les professionnels face à un flux ininterrompu de data, annoncé comme bientôt supervisé par l'IA. Enfin, le président du Conseil supérieur de l'OGE, Joseph Pascual, a clos le colloque.

Pour conclure, nous retiendrons que "grâce à son expertise d'acquisition, de traitement et de qualification de la donnée, ainsi que la confiance légitime qui lui est accordée par les juges, la profession de géomètre-expert est très bien positionnée pour garantir l'exactitude et la précision des mesures dans un monde où la donnée est facilement accessible et interprétable", comme le souligne Olivier Minot en écho à ce colloque (<https://www.geometre-expert.fr/actualite/pas-de-mesure-fiable-sans-donnee-qualifiee/>)

Les étudiants, accompagnés de leurs enseignants (figure 3), ont eu grand plaisir à participer à cette journée colloque et à prendre conscience des valeurs qui animent l'Ordre et le métier de géomètre-expert, que certains élèves rejoindront sûrement en sortant de l'école. ●

Tania Landes, INSA Strasbourg



Figure 3. Élèves de 4^e année ingénieurs de l'INSA Strasbourg, invités par l'OGE, accompagnés de leurs enseignants.

Un cadeau pour l'AFT

Il n'est pas du tout habituel que l'association reçoive compliments et encouragements par écrit, encore moins un cadeau. Et pourtant, cet été, un colis en provenance du Burkina Faso s'est mêlé au courrier. Il contenait une sculpture qui fait désormais l'émerveillement de tous ceux qui passent au bureau où elle s'impose à la vue.

David Ouedraogo, géomètre-expert-immobilier de son pays, fidèle adhérent et lecteur d'XYZ en a fait le présent, produit d'une commande à l'intention de l'AFT. Il l'a confiée à Rasmané Ouedraogo, plus connu sous le nom de Raso, un artiste burkinabé né en 1968 à Ouagadougou. Il lui a demandé de faire une proposition en rapport avec les domaines qui entrent dans les champs scientifique et technique couverts par l'association. Leur concertation a conduit à retenir l'idée d'une représentation de la Terre qui, en montrant leur raison d'être, renvoie aux disciplines



Le globe terrestre de Raso

concernées et aux articles s'y rapportant constituant le sommaire des XYZ. Le globe terrestre de Raso est une pièce en bronze réalisée à cire perdue, une

technique ancestrale dont l'utilisation artisanale perdure partout dans le monde. L'œuvre s'inscrit dans un volume de 15 cm x 15 cm x 30 cm. Les continents aux contours schématiques apparaissent dorés et, pour les souligner, ils sont entourés d'une mer noire. Les méridiens et les parallèles sont aussi esquissés. N'en déplaise à Galilée, la Terre de Raso ne tourne pas sur elle-même, mais cela peut grandement se justifier, puisque la création magnifie le monde à topographier, indépendamment de sa rotation.

L'AFT remercie vivement David Ouedraogo pour son aimable attention et salue le travail de Raso. ●

JPM

N.B. : à toutes fins utiles, les lecteurs portant intérêt à l'œuvre d'art peuvent se rapprocher de David Ouedraogo à l'adresse : davidoue@yahoo.fr

RIEGL VQ-840-GL

SCANNER LASER TOPO-BATHYMÉTRIQUE LÉGER



- faible poids (9,8 kg)
- idéal pour l'utilisation sur drone
- fonctionne avec un laser vert permettant de pénétrer dans l'eau jusqu'à plus de 2 profondeurs Secchi
- fréquence de mesure 50 kHz - 200 kHz
- centrale inertielle (INS) et appareil photo numérique intégrés

POUR DES LEVÉS DE HAUTE RÉOLUTION
DES ZONES LITTORALES ET FLUVIALES



VIDÉO :
RIEGL LIDAR
TOPO-BATHY-
MÉTRIQUE

www.riegl.com

Découvrez l'ensemble de la gamme de capteurs
et systèmes RIEGL LiDAR www.riegl.com



newsroom.riegl.international



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 marégraphes 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 marégraphes 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.

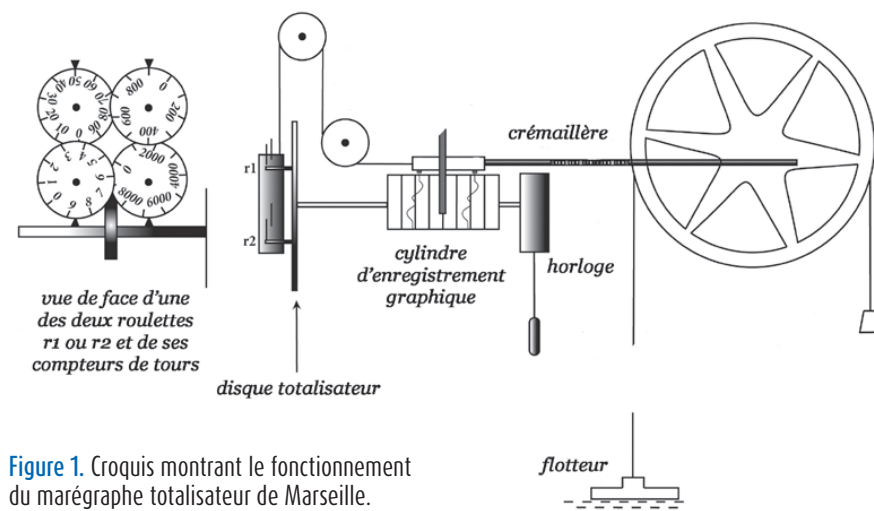


Figure 1. Croquis montrant le fonctionnement du marégraphe totalisateur de Marseille.



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 marégraphique 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 marégraphique 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-maregraphe-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 marégraphes 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 marégraphes de Brest et de Marseille parmi les "stations terrestres d'observation maritime exploitées depuis au moins cent ans". 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" 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/>

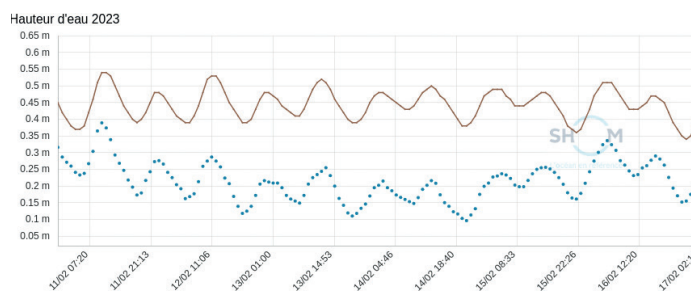


Figure 4. Extrait de la courbe des hauteurs d'eau enregistrées par le marégraphe de Marseille en février 2023 (courbe publiée sur <https://data.shom.fr/>). Entre le 8 et le 25 février, la courbe des hauteurs d'eau réelles (courbe bleue) était à Marseille au-dessous de la courbe des hauteurs d'eau prédites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



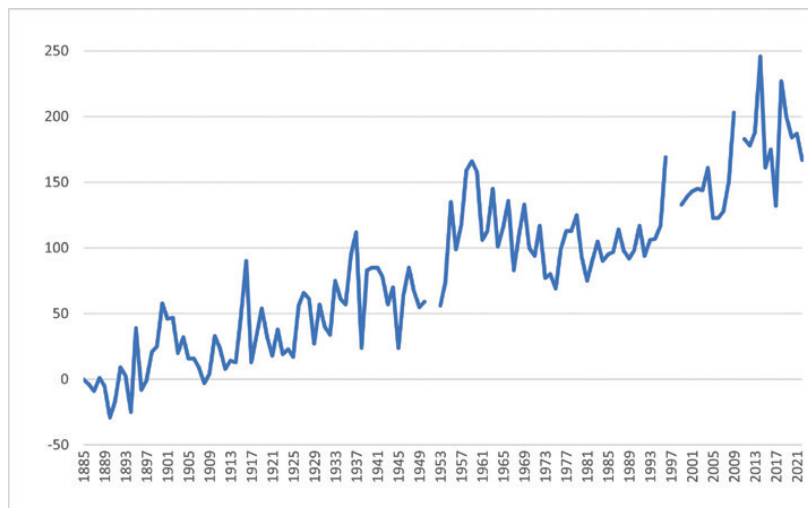


Figure 5. Élévation du niveau moyen de la mer à Marseille entre 1885 et 2022 (mm). Courbe établie à partir des moyennes mensuelles diffusées par le PSMSL. On voit sur cette courbe trois interruptions correspondant aux périodes de mauvais fonctionnement évoquées précédemment.

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-Phaïstos : <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.



Bulletin d'adhésion 2024

à retourner à l'AFT par courrier ou courriel sauf inscription par Internet

Les adhésions s'entendent par année civile entière.

Les démissions sont à adresser à l'AFT et prennent effet en fin de l'année en cours.

☐ **Je souhaite adhérer à l'Association francophone de topographie et souscrire l'abonnement à la revue XYZ au tarif TTC de 50 €, tarifs TTC valables pour la France et pour l'étranger**

- ☐ technicien ou enseignant, si règlement sur compte personnel, ou étudiant, ou chômeur, ou retraité 10 € + 50 € = **60 €**
- ☐ cadre ou personne morale, et pour tout règlement émanant d'une administration ou d'une entreprise 45 € + 50 € = **95 €**
- ☐ Le règlement se fait :
- ☐ par carte bancaire, via notre site Internet www.aftopo.org (seulement depuis un pays à monnaie transférable)
 - ☐ par chèque émis en France à l'ordre de l'AFT, accompagné de ce bulletin dûment rempli
 - ☐ par virement IBAN FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048 – BIC : PSSTFRPPPAR sans omettre d'adresser le bulletin dûment rempli par courrier ou courriel

☐ **L'abonnement à la revue XYZ sans adhésion à l'AFT est à souscrire en passant par l'intermédiaire d'une agence d'abonnement, le tarif est de 100 € TTC pour la France et de 103 € pour l'étranger.**

☐ **Je souhaite adhérer à l'AFT sans abonnement à la revue XYZ, au tarif de 50 €**

Le règlement se fait uniquement par chèque émis en France à l'ordre de l'AFT ou par virement IBAN FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048 – BIC : PSSTFRPPPAR sans omettre d'adresser le bulletin dûment rempli par courrier ou courriel

☐ **Je fais un don à l'AFT, avec reçu fiscal, d'un montant de : _____ €**

Le règlement se fait par chèque ou par virement selon les modalités ci-dessus

☐ **Je vous adresse** un bon de commande afin de recevoir une facture au préalable

☐ **Je désire recevoir un reçu après règlement**

M/Mme Nom : _____ Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal : [][][][][][] Ville : _____ Pays : _____

Tél. : [][][][][][][][][][][][][][][][] Portable : [][][][][][][][][][][][][][][][]

Courriel : _____

Date / /

Signature

Historique de la marégraphie

■ Nicolas POUVREAU

Le dictionnaire de l'Académie française¹, à l'instar des autres dictionnaires ou encyclopédies, ne propose pas de définition pour la marégraphie. La marégraphie trouve son origine dans l'instrument qui mesure le niveau de la mer, le marégraphe. C'est d'ailleurs cette épigraphe Marégraphe qui est inscrite depuis 1883 sur la façade du célèbre bâtiment que tous les Marseillais connaissent sous ce nom. Avant de dresser une épistémologie de la marégraphie en nous arrêtant dans les années 1990, avec la naissance du réseau de marégraphes RONIM géré par le Shom, faisons un point sur l'étymologie de la marégraphie et ses déclinaisons.

MOTS-CLÉS

Marégraphie, instrumentation, marégraphe, marées, hydrographie, évolution du niveau marin

Petite étymologie de la marégraphie

■ Maréomètre, maréographe et marégraphe

L'instrument de mesure de la hauteur de la mer, introduit en France en 1840 par l'ingénieur hydrographe A. M. R. Chazallon, est d'abord baptisé maréomètre, "ou mécanisme à noter de lui-même les mouvements de la mer"². L'appellation maréomètre disparaît début 1844 des correspondances de Chazallon au profit du maréographe, "instrument décrivant les diverses phases de la marée"³. L'usage de maréographe, s'efface à son tour en 1849. L'instrument se nomme désormais marégraphe comme l'explique l'ingénieur hydrographe : je l'ai "dénommé marégraphe parce qu'il trace la courbe des marées".

■ Une définition de la marégraphie

Marégraphie, marégraphique sont régulièrement usités par la communauté s'intéressant aux mesures du niveau de la mer. Étymologiquement, le mot marégraphie est composé de deux racines : le préfixe "maré" qui vient du latin mare se traduisant par la

mer et le suffixe "graphie" provenant du grec *graphein*, écrire. L'ensemble donne : écrire la mer. La marégraphie traduit donc la représentation écrite du mouvement de la mer. Étrangement, les premières définitions de la marégraphie sont récentes.

Simon (2007) définit ainsi la marégraphie : "par son étymologie, le terme marégraphie se rapporte à la description du phénomène de marée et aux instruments qui, par leurs mesures, en ont permis une meilleure connaissance". Cette définition élargit la précédente en englobant, en plus des mesures, les méthodes d'acquisition ainsi que la physique générant les marées. Wöppelmann (2007), la complète en ajoutant que la marégraphie "mériterait une extension aux autres phénomènes qui affectent aussi la grandeur mesurée par les marégraphes". Il y englobe aussi l'archéo-marégraphie, "la préhistoire de la marégraphie, l'époque antérieure à la mesure automatique" que l'on découvre avec l'apparition du "data archaeology" dans les travaux de Woodworth (1999a, 1999b). Le data archaeology⁴ est aujourd'hui, l'une des composantes de la marégraphie.

Historique des instruments marégraphiques

Lorsqu'on observe la mer, il semble facile d'en mesurer ses variations.

4 <https://gloss-sealevel.org/data-archaeology> (consultée le 24 juillet 2023)

Pourtant la mesure de la hauteur de la mer est délicate dès lors qu'on recherche la précision. À compter du XVII^e siècle, plusieurs protocoles sont diffusés à l'usage des observateurs de marée (Pouvreau, 2008). Différents instruments, depuis la simple échelle de marée jusqu'aux capteurs modernes (Jan & al, 2022) sont imaginés, conçus, installés et utilisés pour mesurer la hauteur de la mer.

■ L'échelle de marée

L'échelle de marée est l'instrument historique utilisé pour mesurer la hauteur de la mer (Pouvreau, 2008). Elle plonge dans l'eau de manière à être en communication permanente avec l'eau en un emplacement convenablement protégé du clapot et de la houle. Plusieurs supports, comme l'illustre la figure 1, ont été utilisés pour fabriquer des échelles de marée : bois sculpté (XVIII^e – milieu XIX^e siècle), pierres gravées (milieu XVIII^e – XIX^e siècle), par exemple celle en marbre installée au fort Saint-Jean à Marseille en 1840 (Coulomb, 2014), porcelaine ou tôle émaillées (fin XIX^e – milieu XX^e siècle), plastique (depuis les années 1950-60). Cette évolution est liée à des aspects pratiques comme l'explique par exemple Chazallon (1854b). Ce dernier proscrit les échelles de marée en bois, sujettes au pourrissement et à l'effacement des graduations. Il souhaite au contraire que les échelles soient pérennes afin d'éviter de les remplacer trop souvent et de devoir perdre, lors de cette opération, le zéro de l'échelle. Il soumet à l'usure deux modèles d'échelle. La première est taillée dans de la lave du Vésuve et l'autre est fabriquée en porcelaine. Deux ans après, la première échelle est illisible à cause du développement biologique, tandis que la seconde reste intacte et lisible grâce à son nettoyage aisé. Les ports se couvrent alors d'échelles en porcelaine avant d'être remplacées à leur tour, au milieu du XX^e siècle, par des échelles en plastique, matériau imputrescible et facilement lavable.

1 <https://www.academie-francaise.fr/> (consultée le 24 juillet 2023)

2 Chazallon. Rapport du 5 août 1840, sur les observations des marées, au vice-amiral Halgan, directeur du Dépôt des cartes et plans de la Marine. AN MAR/10/JJ/503.

3 Chazallon. Rapport du 15 décembre 1843, sur l'intérêt d'étudier les marées, au même vice-amiral Halgan. Archives Shom.



Suivant l'époque où l'usage qui en est fait, la graduation des échelles diffère, suivant que l'échelle peut être lue de très près (divisions rapprochées) ou, au contraire, qu'elle doit être lue de loin (divisions en décimètre). L'échelle de marée est aujourd'hui encore, le

seul instrument qui permet d'avoir, en la lisant, la hauteur d'eau instantanée. Dans le manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer publié par l'UNESCO/COI en 2016, les échelles de marée sont toujours utilisées pour le contrôle des capteurs numériques.

Figure 1. Échelle de marée de l'île d'Aix en plexiglass - Altuglas™, instrument composant l'observatoire marégraphique RONIM de l'île d'Aix.



© N. Pourreau 2022

■ Le marégraphe à flotteur

Le marégraphe à flotteur est un appareil destiné à enregistrer automatiquement les variations du niveau de la mer. Il se compose de deux parties principales : un appareil enregistreur et un système destiné à transmettre à cet appareil les mouvements du niveau. C'est à l'ingénieur anglais H. R. Palmer que l'on doit cette invention, présentée par Lubbock dans *Philosophical transaction of the Royal Society of London* en mars 1831. L'instrument, encore à l'état de plan, n'a pas de nom (figure 2). Il est alors présenté comme le *graphical register of tides and winds*. L'article laisse entendre que l'instrument doit être installé dans des zones estuariennes et que la mesure de l'influence fluviale semble tout autant recherchée que celle de la marée. L'instrument est construit et les premières mesures de hauteur d'eau sont acquises à Sheerness (estuaire de la Tamise), du 6 au 21 septembre 1831 (Cartwright, 1999).

Chazallon reprend à son compte, au début des années 1840, les principes de fonctionnement du marégraphe de Palmer, en modifiant le rapport de réduction de la courbe (de Jouffroy, 1853). Il confie la construction de ses marégraphes à Wagner Neveu, horloger de haute précision (Chazallon, 1844).

La figure 3 situe les six parties composant le marégraphe à flotteur.

Le Service hydrographique, puis le Shom, ont utilisé les marégraphes à flotteur entre 1844 et 2011, date de remplacement du dernier appareil

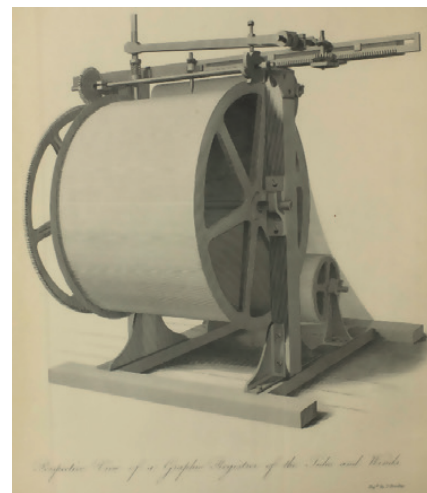


Figure 2. Représentation du marégraphe issue de l'article de Palmer, 1831.

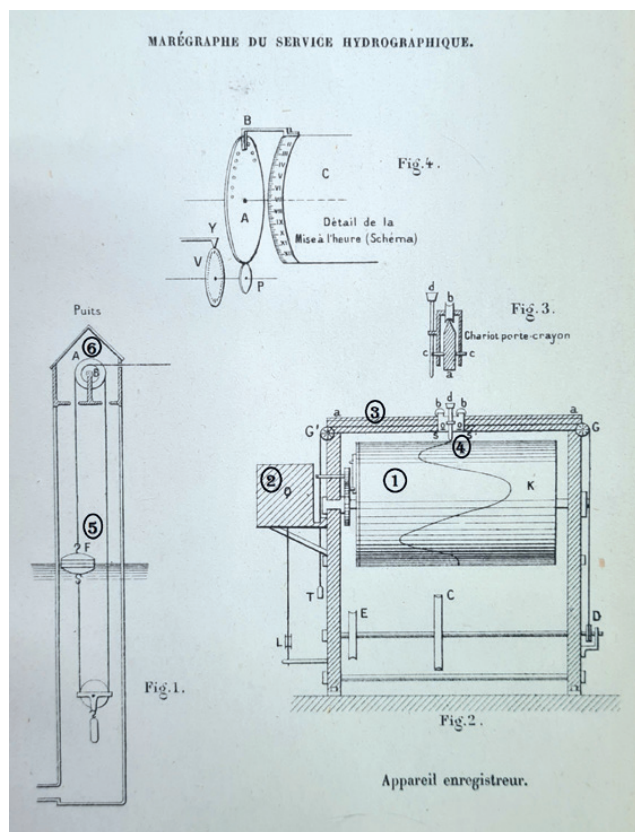


Figure 3. Principe de fonctionnement du marégraphe d'après la Planche 2 de l'ouvrage de Rollet de l'Isle (1905). Les numéros entourés sur la figure correspondent à :
 ① tambour du marégraphe recevant la feuille de papier sur laquelle sera tracée les courbes du niveau de la mer, dit marégramme ;
 ② mécanisme d'horlogerie faisant tourner le tambour ;
 ③ règle sur laquelle roule le chariot suivant la hauteur de la mer ;
 ④ chariot porte-crayon roulant sur la règle ;
 ⑤ flotteur se trouvant dans le puits de tranquillisation ;
 ⑥ systèmes de deux poulies permettant la réduction de la hauteur d'eau entre l'observation et l'enregistrement.

mécanique officiant à Port-Tudy (île de Groix) par un capteur radar⁵.

■ Les marégraphe à pression

Le fonctionnement des marégraphe à pression ou capteur de pression est le suivant : un réservoir d'air est plongé dans la mer à un niveau inférieur au niveau le plus bas qu'elle puisse atteindre. Les variations de la pression de l'air contenu dans ce réservoir

sont proportionnelles aux variations de la hauteur de l'eau au-dessus de lui et sont transmises à l'enregistreur (Simon, 2007).

Les premiers marégraphe à pression sont des marégraphe pneumatiques. Ils apparaissent à la fin du XIX^e siècle. Cette technologie est peu utilisée en France sauf par le service maritime de la Gironde (l'actuel grand port maritime de Bordeaux) ou durant quelques mois au port de Marseille (Coulomb, 2014) qui utilisent un marégraphe à pression basé sur un principe peu différent : le marégraphe à bulles (*figure 4*).

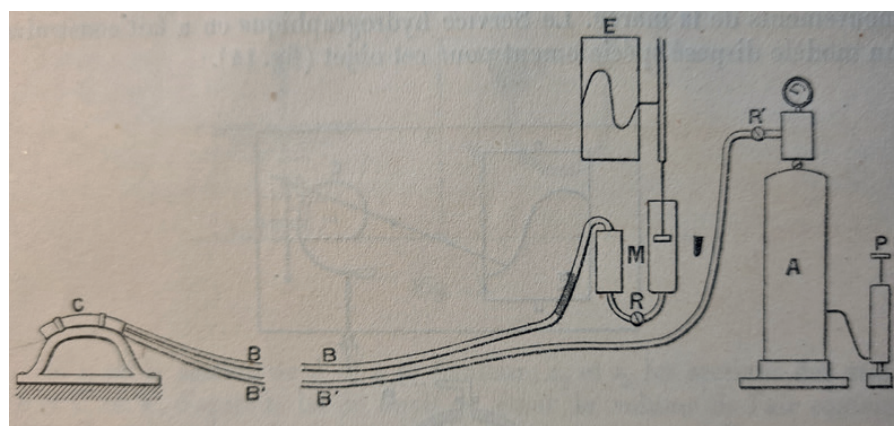


Figure 4. Principe de fonctionnement du marégraphe à bulles d'après la figure 15 de l'ouvrage de Rollet de l'Isle (1905).

L'appareil récepteur se compose d'un tube C fixé au fond de la mer ; il est ouvert à l'une de ses extrémités et, par l'autre, est mis en communication avec deux tubes B et B'. Le tube B aboutit à un manomètre à mercure M dans l'une des branches duquel se déplace un flotteur dont les mouvements sont transmis au stylet qui trace la courbe des variations de hauteur de la mer sur le cylindre enregistreur E ; le tube B' communique avec un détendeur d'air en relation avec un réservoir A contenant de l'air sous pression. Au moyen du robinet R' on règle l'arrivée d'air jusqu'à l'extrémité du tube C de façon que cet air s'échappe bulle à bulle : dans ces conditions, la pression en ce point est toujours égale à la pression atmosphérique augmentée de la hauteur d'eau au-dessus de C. Le réservoir A est rechargé à l'aide de la pompe à main P. L'effet de la houle peut être atténué en ouvrant plus ou moins le robinet R (Rollet de l'Isle, 1905).

L'évolution technologique a permis l'essor de capteurs de pression autonomes et de faibles dimensions, en particulier les jauges de contrainte et les quartz piézoélectriques. Des marégraphe posés sur le fond (marégraphe dits "de fond") sont très utilisés en hydrographie, soit pour mesurer la hauteur de marée à proximité des lieux de sondage, soit pour déterminer les conditions aux limites de modèles numériques de marée ou de courant sur une zone déterminée du plateau continental (Simon, 2007).

■ Le médimarémètre

Alors qu'il était attaché à la Commission du nivellement général de la France, Charles Lallemant invente le médimarémètre, instrument très économique, afin de multiplier les mesures du niveau moyen de la mer sur les côtes françaises. Le premier médimarémètre est installé au marégraphe de Marseille en 1885. Le principe de fonctionnement est simple. Un long tube parfaitement étanche est fixé verticalement le long d'un quai. Sa base inférieure est composée d'un vase poreux, en communication permanente avec la mer. Ce vase poreux ou plongeur doit être immergé en permanence, y compris lors des plus basses mers astronomiques. Le plongeur joue un

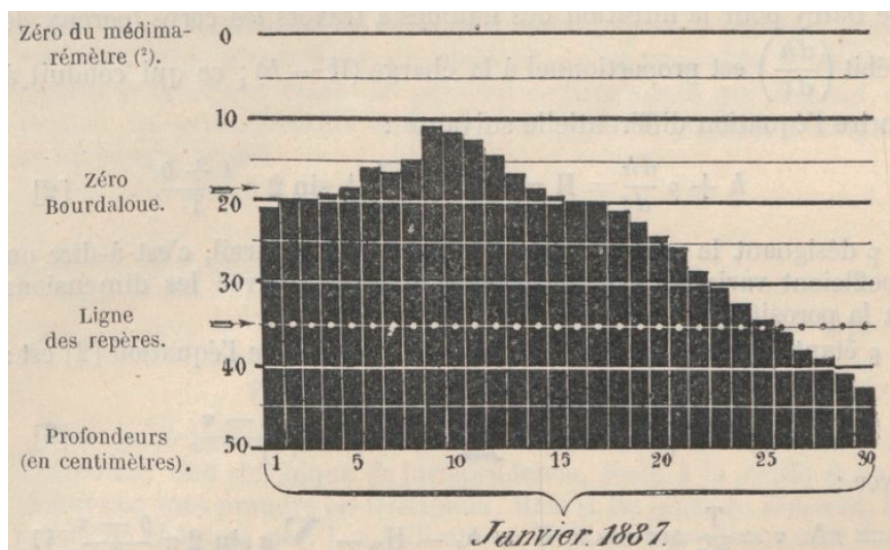


Figure 5. Médimarémètre de Marseille. Variations du niveau journalier diurne en janvier 1887. D'après la figure 139 de Lallemant, 1891.

double rôle : filtrer les impuretés de l'eau et empêcher un engorgement trop rapide de la cloison poreuse.

On fait glisser à l'intérieur du long tube, jusqu'à une butée, une sonde graduée, formée d'un tube mince en cuivre où l'on a préalablement fixé une bande de papier sensibilisé qui noircit au contact de l'eau. Une ou deux secondes après qu'elle soit arrivée en butée, l'opérateur retire la sonde et obtient le niveau moyen de la mer, en regard de la limite du noir sur le papier (Lallemant, 1891 & Coulomb, 2014). En alignant les bandes, on obtient des diagrammes permettant d'avoir l'évolution du niveau moyen journalier (figure 5).

Lallemant (1910) et Vignal (1945) montrent les limites des mesures obtenues par cet appareil. Bessero (1985) confirme que les moyennes obtenues avec les médimarémètres ne peuvent être exploitées, à cause de l'usure de la porcelaine altérant son rôle de filtrage.

Brève épistémologie de la marégraphie

Le besoin de mesurer le niveau de la mer est intimement lié à la connaissance scientifique pouvant en être faite et aux applications en découlant au fil des siècles, avec pour les plus anciennes : théorie et prédiction de la marée, hydrographie, détermination du zéro des altitudes terrestres, surveillance de l'évolution du niveau moyen de la mer et plus récemment :

calibration des satellites altimétriques, niveaux extrêmes et surcotes, modèles de prédiction et systèmes d'alerte aux tsunamis et vigilance vagues-submersion. Certaines de ces applications sont détaillées ci-dessous.

■ Théories et prédiction de la marée

Les premières observations du niveau de la mer ont avant tout un objectif scientifique : faire avancer les connaissances sur les théories et la prédiction de la marée. Gouye et de La Hire publient, en 1701, le premier mémoire français sur *La manière d'observer dans les ports le flux et reflux de la mer*. Les savants ont besoin de mesures de hauteur d'eau afin de les confronter aux théories des marées d'alors. Il est d'ailleurs surprenant de lire dans ce mémoire que l'on cherche à vérifier les théories singulières de Descartes (1644) plutôt que celles de Newton (1687), pourtant plus récentes (Pouvreau, 2008), mais qui se heurtent à cette époque à la grande hostilité des savants installés en Europe continentale (Deparis, 2015). Descartes (1644) défend l'idée de l'origine lunaire des marées. La Lune et la Terre sont chacune entourées d'un grand tourbillon. La pression exercée par le tourbillon de la Lune sur celui de la Terre est transmise à la surface de la planète bleue et génère les marées (Simon, 2007).

La théorie de la gravitation de Newton (1687) est la première réellement plau-

sible. L'origine des marées réside dans l'attraction exercée sur les molécules des mers, d'une part par la Lune en raison de sa proximité, d'autre part par le Soleil en raison de sa masse. Trois propriétés remarquables des marées sont expliquées grâce à cette théorie : la période fondamentale de 12 heures lunaires, la relation entre l'amplitude et les phases de la Lune et l'inégalité diurne. Cette théorie statique ne permet pas d'expliquer l'âge de la marée, les vives eaux lors de la syzygie ou l'importance des amplitudes observées le long des côtes (Simon, 2007).

L'introduction du potentiel générateur de la marée par Laplace (1793) et son développement dans le traité de mécanique céleste (1799) précise les conditions de validité de la théorie newtonienne tout en posant le cadre aux développements de la prédiction des marées (Durand-Richard, 2016). Ce savant est le premier à traiter la marée comme un problème de mouvement de masses d'eau : la marée observée en un point est le résultat de la superposition des ondes élémentaires arrivant de tous les points des océans et qui, chacune sur son trajet, a rencontré des conditions de propagation différentes. Ces ondes peuvent évidemment interférer entre elles, renforçant ou au contraire atténuant certaines fréquences (Simon, 2007).

■ Hydrographie

La fin du XVIII^e siècle voit l'émergence opérationnelle de la mesure du niveau de la mer, en lien avec la mise en place de méthodes modernes d'élaboration des cartes marines. Jusqu'alors, les cartes de navigation étaient composées d'empilements d'informations disparates rassemblées et compilées par le Dépôt des cartes et plans de la Marine, l'ancêtre du Shom. Les sondes (mesure de la profondeur de la mer en un instant et un lieu donné) n'étaient pas corrigées des effets de la marée (Godet, 2023 ; Mair Rawsthorne, 2020). Beautemps-Beaupré, le "père de l'hydrographie moderne", révolutionne, en 1808, la procédure d'acquisition et de traitement dans ses *Méthodes pour la levée et la construction des cartes et plans hydrographiques* et l'améliore en 1829. Chaque mesure de sonde doit



Figure 6. Évolution du niveau moyen de la mer à Brest (Pouvreau, 2008, mis à jour en 2022).

pouvoir être associée à une observation de hauteur d'eau. Durant chaque campagne en mer, des observateurs de marée lisaient sur des échelles de marée, durant la journée de travail, les hauteurs de la mer. L'association des mesures de hauteur d'eau avec les mesures des sondes permettait de corriger chaque profondeur mesurée des effets de la marée et de rapporter l'ensemble des sondes à une même référence commune, à savoir la hauteur de la plus basse mer mesurée durant la campagne hydrographique. La détermination et la conservation des repères de marée est alors documentée et matérialisée sur les sites d'observation (Pouvreau, 2008). Même si les techniques ont évolué, les mesures marégraphiques sont toujours indispensables pour corriger les levés hydrographiques réalisés par le Shom.

■ Surveillance de l'évolution du niveau moyen de la mer

D'après Simon (2007), un usage bien établi en marégraphie convient de nommer niveau moyen de la mer "*le résultat d'une opération sur les hauteurs mesurées tendant à éliminer la marée astronomique*". Le calcul des niveaux moyens (journalier, mensuel et annuel) de la mer, peut s'effectuer de différentes manières. SONEL, consortium regroupant deux EPA (IGN & Shom) et deux laboratoires de recherche (LEGOS et LIENSs), calculent et diffusent, pour la France, les niveaux moyens de la mer relatifs ou absolus (corrigés des mouvements verticaux de la croûte terrestre).

L'évolution du niveau de la mer est l'un des indicateurs emblématiques

des rapports du GIEC (Fox-Kemper & al, 2021). Cet indicateur s'appuie notamment sur les observations marégraphiques passées reconstruites. Héritière d'une longue histoire marégraphique, la France dispose d'atouts uniques pour les activités de *data archaeology* avec : de nombreuses mesures anciennes conservées dans les archives et inventoriées ; une expérience sur la dématérialisation des données et la vectorisation des hauteurs d'eau ; une expertise des méthodologies et instruments d'acquisition historiques ; une pratique des contrôles des mesures marégraphiques.

Ce travail, couplant histoire et science, permet aujourd'hui de suivre, par exemple, l'évolution du niveau moyen de la mer à Brest depuis le règne de Louis XIV, il y a plus de 300 ans (figure 6).

Conclusions

La marégraphie est une discipline étendue et multiple : étendue, car elle couvre une longue période temporelle de plusieurs siècles ; multiple, car la marégraphie concerne aussi bien les applications qui sont liées à cette discipline (théories et prédiction de marée, hydrographie, références verticales, niveau moyen de la mer, etc.) que les techniques de mesure du niveau de la mer (échelle de marée, marégraphes à flotteur ou à pression, capteurs électroniques). De la simple échelle de marée aux instruments mécaniques, tous ont fait l'objet d'adaptation et d'évolution grâce au génie humain confronté à l'expérience du terrain.

La marégraphie lie intimement les méthodes et les mesures de hauteur de la mer avec les applications qui en sont faites. Impossible en effet de vérifier une théorie sans mesures ou de calculer des prédictions de marée sans observations.

Enregistrer une mesure marégraphique, c'est obtenir une observation unique et non reproductible. C'est avoir une hauteur d'eau affectée de la marée et tous les autres éléments environnants : météorologie (pression atmosphérique, direction et sens du vent, houle, seiche, etc.), mouvements du sol (déplacements verticaux de la croûte terrestre où repose l'instrument de mesure, séismes tsunamigènes, etc.), climatologie avec l'augmentation du niveau moyen de la mer (chaleur de l'océan, perte de masse des glaciers et calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique). L'intérêt de rechercher les enregistrements passés est donc d'autant plus précieux, car unique en fournissant des clefs de compréhension sur les effets du changement climatique sur les mers et océans. ●

Contact

Nicolas Pouvreau,
nicolas.pouvreau@shom.fr,
expert niveau de la mer au Shom,
chercheur associé au Centre François Viète
d'épistémologie et d'histoire des sciences et
des techniques (EA 1161) – UBO Brest.

Bibliographie

Beautemps-Beaupré C. (1808). *Méthodes pour la levée et la construction des cartes et*



plans hydrographiques. Imprimerie Royale, Paris, 96pp.

Beautemps-Beaupré C., P. Daussy (1829). *Exposé des travaux relatifs à la reconnaissance hydrographique des côtes occidentales de France*. Imprimerie Royale, Paris, 124 p.

Bessero G. (1985). *Cours de marées*, 2 vols. EPSHOM, Brest. ISBN Vol. I 2-11-080573-0, Vol II 2-11-08574-9.

Cartwright D. E. (1999). *Tides: a scientific history*. Cambridge University Press, Cambridge, 292 p.

Chazallon R. (1844c). *Annuaire des marées des côtes de France*. Publié au Dépôt de la Marine, Paris.

Chazallon R. (1854a). *Note sur la marée solaire de Brest* (Extrait d'une lettre de M. R. Chazallon, ingénieur-hydrographe de la Marine, à M. Elie de Beaumont). CRAS, tome 38, pp. 1149-1153.

Chazallon R. (1854b). *Note sur l'oscillation du niveau d'équilibre des mers ; réflexions sur les échelles de marée*. (Extrait d'une lettre de M. R. Chazallon, ingénieur-hydrographe de la Marine, à M. Elie de Beaumont). CRAS, tome 39, pp.111-116.

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, ISBN : 978-2-85978-481-2, 633 p.

Deparis V. (2015). *La théorie des marées d'Isaac Newton. Cahiers François Viète. Épistémologie, Histoire, Sciences & Techniques*. II-5, p. 19-31. doi :10.4000/cahierscfv.3009

Descartes R. (1644). *Principes de la Philosophie*. Amstelodami, apud Ludovicum Elzevirium, In-4°, 310 p.

Durand-Richard M.-J. (2016). *De la prédiction des marées : entre calcul, observations et mécanisation (1831-1876)*. Cahiers François Viète, II-8/9, pp. 105-135. doi.org/10.4000/cahierscfv.2535.

Fox-Kemper, B. & 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. & al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211-1362, doi:10.1017/9781009157896.011.

Godet N. (2023). *Rebattre les cartes : l'élaboration de l'information hydrographique du dépôt des cartes, plans, journaux et mémoires concernant la navigation au Service hydrographique de la Marine 1720-1950*. Thèse de doctorat. Universités de Poitiers et de Bretagne Occidentale, 552 p.

Gouye T. (s.j.), P. de La Hire (1701). *Mémoire de la manière d'observer dans les ports le flux et reflux de la mer*, MHARS 1701 (Paris 1743), hist., pp. 12-13.

Jan G., B. Pérez Gómez & al. (2022). *Sea Level Measurement*. In: Daponte P., G. B. Rossi, V. Piscopo (eds). *Measurement for the Sea*. Springer Series in Measurement Science and Technology. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-82024-4_10

Jouffroy A. de (1853). *Dictionnaire des inventions et découvertes anciennes et modernes, dans les sciences, les arts et l'industrie*. Tome second, publié par Migne, Paris, 710 p.

Lallemand C. (1910). *Sur une erreur systématique de la détermination du niveau moyen de la mer, à l'aide du médimarémètre*. CRAS, tome 150, pp. 265-268.

Lallemand (1891). *Le médimarémètre, nouvel appareil pour la détermination du niveau moyen de la mer*. L'Astronomie, vol. 10, pp. 302-306.

Laplace P.-S. de, (1799). *Traité de mécanique céleste, Tome 1, livre 4*. Imprimerie de Crapelet, Paris.

Laplace P.-S. de (1789). *Mémoire sur le flux et reflux de la mer*. Mémoire de l'Académie des Sciences, MHARS 1789 (Paris 1793), mém., pp. 45-181.

Le Chatellier (1849). *Rapport fait par M. e Chatellier, au nom du comité des arts mécaniques, sur le marégraphe de M. Chazallon, construit par M. Wagner*. Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale. N° DXL, juin 1849, pages 244-246.

Mair Rawsthorne H. (2020). *De la sonde à la carte. Une campagne hydrographique au XVIII^e siècle dans le golfe de Gascogne : analyse historique et traitement des données obtenues*. Mémoire de Master 2, UBO.

Newton I. (1687). *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Imprimatur S. Pepys, Reg. soc. præses. Julii 5. 1686, Londini, 510 p.

Palmer H. R. (1831). *Description of graphical register of tides and winds*. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 121 (1831), pp. 209-213, doi :10.1098/rstl.1831.0013

Pouvreau N. (2008). *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*. Thèse de doctorat – Université de La Rochelle, 468 p.

Rollet de l'Isle (1905). *Observation, étude et prédiction des marées*. Publication du Service hydrographique de la marine, n° 13-155, 287 p.

Simon B. (2007). *La marée océanique côtière*. Collection "Synthèse", ed. Institut océanographique, ISBN 978-2-903581-32-9, 433 p.

UNESCO/COI (2016). *Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer, Volume V : Marégraphes radar*. Paris, Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (COI Manuels et Guides No 14, vol. V ; JCOMM Rapport Technique No 89), 106 p.

Vignal J. (1945). *Altération des ondes transmises dans un médimarémètre, due à l'entraînement d'eau par la sonde*. CRAS, vol. 220, pp. 648-650.

Wöppelmann G. (2007). *Géodésie et niveau de la mer*. Dossier d'habilitation à diriger des recherches, Université de La Rochelle, 193 p.

Woodworth P.L. (1999a). *A study of changes in high water levels and tides at Liverpool during the last two hundred and thirty years with some historical background*. Proudman Oceanographic Laboratory Report, N° 56, 62 p.

Woodworth P.L. (1999b). *High waters at Liverpool since 1768: the UK's longest sea level record*. Geophysical Research Letters vol. 26, pp. 1589-1592.

ABSTRACT

The Académie française dictionary, like other dictionaries and encyclopedias, does not offer a definition for tide gauge (marégraphie). As we'll explain later, tide gauges technicians have their origins in the instrument that measures sea level, the tide gauge. Since 1884, this epigraph MARÉGRAPHE has been inscribed on the façade of the famous building, a name familiar to all Marseilles residents. Before taking a look at the epistemology of tide gauges, stopping in the 1990s with the birth of the RONIM network of tide gauges managed by the Shom, let's take a look at the etymology of tide gauges (marégraphie) and their variations.

Observation du niveau marin *in situ*

Les réseaux et les technologies

■ Claire FRABOUL - Laurent TESTUT

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

MOTS-CLÉS

Marégraphe, radar, GNSS, bouée, RONIM, GLOSS

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

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

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

Le programme mondial GLOSS

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

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

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

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

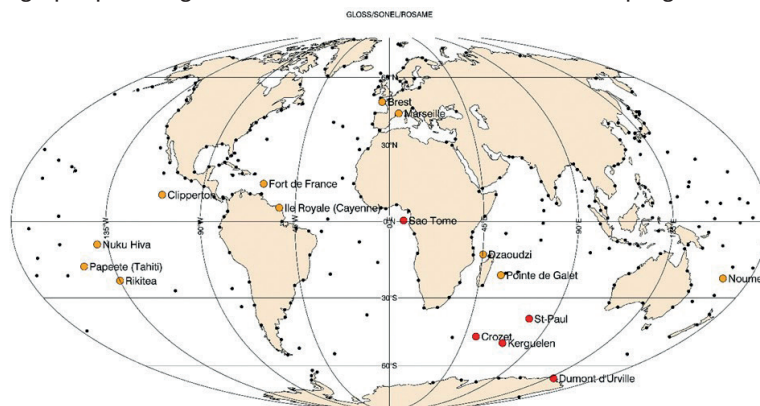
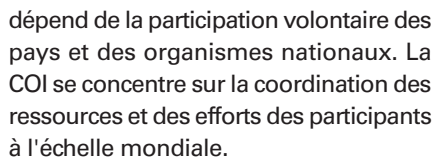


Figure 1. Réseau de marégraphes du programme mondial GLOSS et contribution française : Brest (GLOSS n° 242), Clipperton (165), Crozet (21), Dumont d'Urville (131), Dzaoudzi/Mayotte (96), Kerguelen (23), Fort de France/Martinique (204), Marseille (205), Pte des Galets/La Réunion (17), Saint-Paul (24),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



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

Le réseau RONIM

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Les technologies d'observation

■ Les marégraphes RADAR

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

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

Principe de fonctionnement :

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

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

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

fréquence entre deux fréquences définies f_1 et f_2 .

La *figure 3* montre, que dans ce cas, c'est la différence de fréquence df entre la fréquence d'émission actuelle et la fréquence reçue par le capteur, après réflexion du signal sur l'eau, qui est directement proportionnelle à la distance d . Cette fréquence différentielle est convertie en un spectre de fréquence par transformation de Fourier. La distance est ensuite calculée à partir du spectre. Cette méthode a l'avantage d'offrir une résolution plus précise nécessitant cependant une puissance de calcul plus importante.

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

■ Les nouvelles technologies d'observation du niveau des mers

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

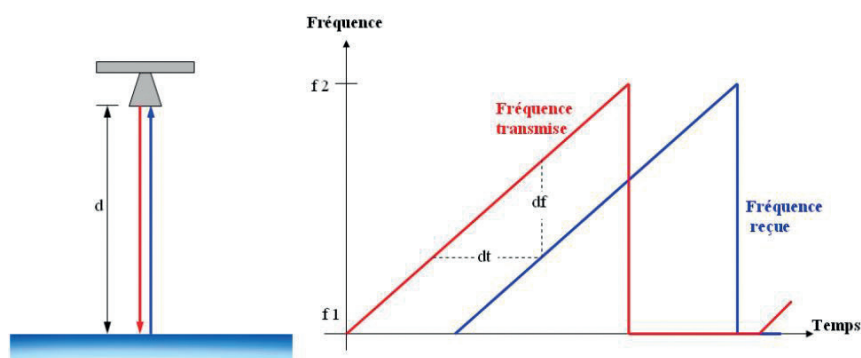


Figure 3. Schéma du principe fondamental du marégraphes radar. refmar.shom.fr



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

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

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

Contacts

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

Références

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

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

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

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

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

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

Pouvreau N., 2008 : *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*. Thèse de doctorat – Université de La Rochelle, 468 p.

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

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

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

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

ABSTRACT

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

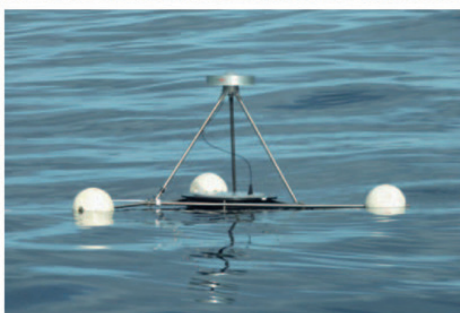
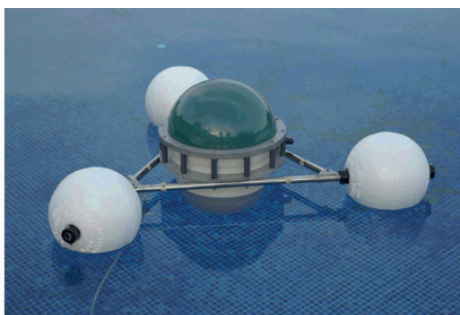
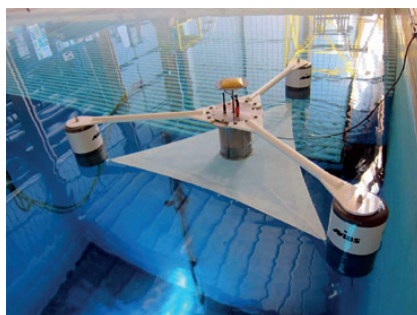


Figure 4. Différents systèmes de mesure du niveau marin par bouées GNSS.



Observation du niveau de la mer par altimétrie spatiale

■ Pierre PRANDI, Michael ABLAIN

L'altimétrie radar par satellite est une technique de télédétection permettant, entre autres, de mesurer la topographie de la surface de l'océan. Des observations quasi globales et continues depuis trente ans permettent de construire des indicateurs climatiques et de mesurer la hausse du niveau moyen global de la mer avec une incertitude de 0,3 mm/an. Le caractère synoptique des observations révèle également des dynamiques régionales particulières, liées à la distribution de la chaleur dans l'océan.

MOTS-CLÉS

Altimétrie par satellite, niveau de la mer, climat

Depuis le début de la décennie 90, les observateurs du niveau de la mer disposent d'une nouvelle technique : l'altimétrie par satellite. 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 dix 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 marégraphique, mesure relative du niveau de la mer par rapport au sol.

L'aventure de l'altimétrie par satellite commence dès 1973 avec le radar S-193 embarqué sur la station américaine SkyLab. La précision est faible (métrique), mais le fonctionnement du concept instrumental est ainsi validé. SEASAT, lancé en juin 1978 embarque un altimètre dérivé de S-193 avec un objectif de précision de 10 cm. Cette mission, qui n'opère que pendant 105 jours, réalise la première démonstration de l'intérêt de l'altimétrie pour l'océanographie.

La mission altimétrique TOPEX/Poséidon lancée en août 1992 et développée conjointement par le CNES en France et la NASA, est la première mission ayant permis d'atteindre le niveau de performance requis pour mesurer l'évolution du niveau moyen global de la mer. TOPEX/Poséidon a été suivi par plusieurs satellites altimétriques avec une excellente stabilité destinés à surveiller l'océan sur le long terme : Jason-1 en 2001, puis Jason-2 en 2008, Jason-3 en 2016 et plus récemment (fin 2020), la mission Sentinel-6 Michael Freilich. Au total, 16 satellites altimètres ont été lancés depuis TOPEX/Poséidon en incluant les missions ERS (SARAL/Altika) et plus récemment, les missions Sentinel-3 (A et B).

Principe de fonctionnement d'un altimètre

Le principal instrument emporté par le satellite altimétrique est un radar altimètre qui mesure la distance entre le satellite et la surface instantanée de la mer à partir du temps de parcours aller-retour de l'onde radar (figure 1). Ce radar émet un signal à très haute fréquence à la verticale du satellite en direction de la surface des océans et reçoit en retour l'écho réfléchi par la mer. L'analyse de l'écho radar permet d'extraire une mesure très précise du temps de trajet aller-retour entre le satellite et la surface de la mer, ainsi que de la hauteur des vagues et de la vitesse du vent. Ce temps est ensuite transformé

en distance par simple multiplication avec la vitesse de la lumière, vitesse à laquelle se propagent les ondes électromagnétiques émises. En moyennant sur une seconde les distances estimées, on obtient une mesure très précise de la distance satellite-océan.

L'altitude du satellite au-dessus de l'ellipsoïde de référence est déterminée en temps différé par un calcul d'orbite précis, qui nécessite un modèle complet des forces agissant sur le satellite, ainsi que des mesures très précises de distances et de vitesses relatives entre celui-ci et des stations géodésiques au sol. Ces mesures de poursuite reposent sur des systèmes de localisation : DORIS comprenant un réseau de balises au sol émettant en direction du satellite, la télémétrie laser entre des stations au sol et le satellite, ainsi que des mesures GPS entre la constellation des satellites GPS et des récepteurs embarqués sur le satellite. En s'appuyant sur des modèles des forces agissant sur le satellite (gravité de la Terre, attraction de la Lune, du Soleil et des autres planètes, freinage de l'atmosphère, pression de radiation solaire, marées terrestres et océaniques, etc.), une trajectoire théorique du satellite est calculée et recalée en permanence en utilisant les mesures de poursuite. Ce processus permet de déduire à tout instant la trajectoire exacte du satellite, soit son altitude par rapport à l'ellipsoïde de référence, et donc la hauteur de la mer. La hauteur de la surface de l'océan au-dessus de l'ellipsoïde de référence se déduit par différence entre la composante radiale de l'orbite et la distance altimétrique.

L'hypothèse de propagation des ondes radar à la vitesse de la lumière est fautive dans l'atmosphère. Il est donc nécessaire d'appliquer un certain nombre de corrections à la distance altimétrique pour compenser différents effets ralentissant la propagation des ondes radar. Les ondes électromagnétiques sont ralenties pendant leur traversée dans l'atmosphère à cause des





électrons contenus dans l'ionosphère, de la présence d'air et de la vapeur d'eau présente dans la troposphère (en dessous de 15-20 km). En général, le satellite emporte un radiomètre qui mesure le contenu en vapeur d'eau de la troposphère afin de corriger la mesure "altimétrique" de l'allongement apparent de la distance satellite-surface de la mer causé par la présence d'eau lors de la traversée du signal dans la basse atmosphère. La correction dite "ionosphérique" est aussi généralement basée sur l'analyse du signal radar dans deux bandes de fréquences différentes, sinon sur un modèle d'ionosphère.

D'autres corrections concernent l'état de surface de la mer et certains effets géophysiques que l'on souhaite corriger pour extraire le signal recherché, comme les marées océaniques ou la réponse de l'océan au forçage par la pression atmosphérique et le vent. Pour ces autres corrections, on utilise des modèles dont certains sont eux-mêmes issus de l'observation altimétrique, comme celui des marées océaniques (processus itératif classique en Sciences de la Terre, qui consiste à améliorer les quantités inconnues par étape, chacune à son tour, en utilisant à chaque étape les meilleures estimations des autres variables).

La quantité qui intéresse l'océanographe est la hauteur de mer par rapport au géoïde, appelée topographie dynamique (*dynamic topography* sur la figure 1). C'est en effet cette quantité qui contient l'information sur la circulation océanique totale. Le géoïde correspond à la topographie qu'aurait un océan au repos sous le seul effet de la gravité. Cette surface présente des creux et des bosses permanents reflétant les variations de l'attraction terrestre d'un point à l'autre de la Terre, causées par les différences des masses à l'intérieur du globe solide et par la topographie des fonds marins. On suppose en première approximation qu'il s'agit d'une composante qui ne varie pas dans le temps (les échelles temporelles de variations liées à la dynamique interne de la Terre sont considérées comme infiniment longues pour les applications océanographiques de l'altimétrie). Les fines échelles du géoïde sont mal résolues et l'on utilise en pratique une méthode indirecte

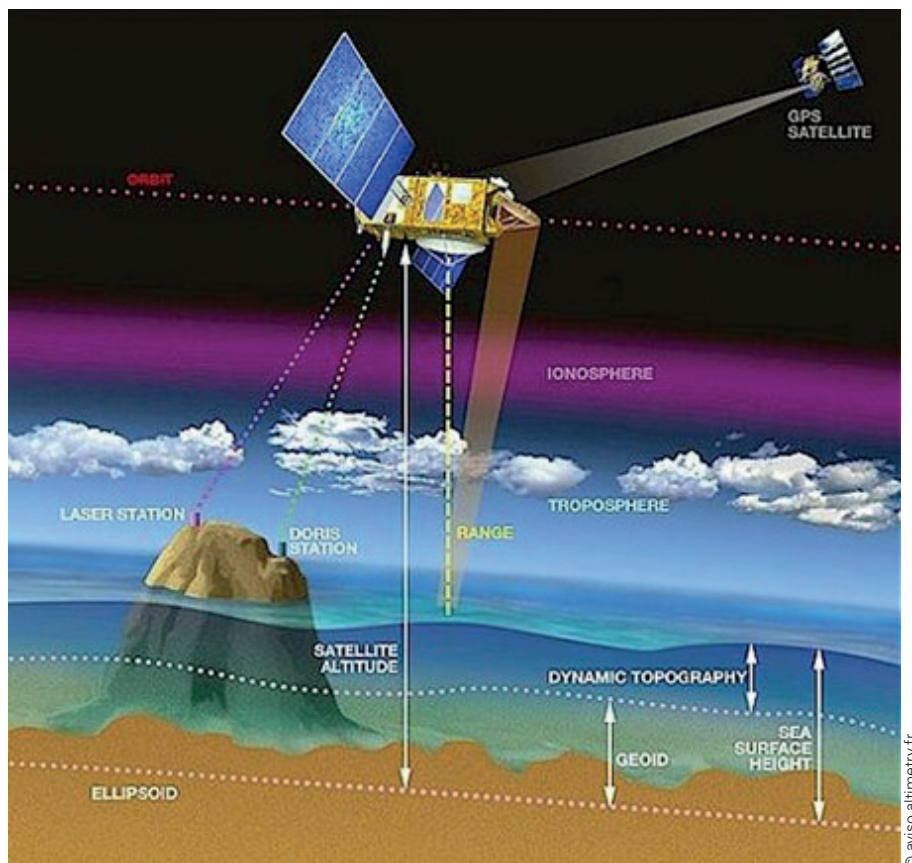


Figure 1. Schéma source AVISO.

pour reconstruire la topographie dynamique : la hauteur de mer est exprimée en anomalies par rapport à la surface moyenne océanique qui correspond à la moyenne des hauteurs comptées par rapport à l'ellipsoïde. Ces anomalies sont ajoutées à la topographie dynamique moyenne qui correspond à la même surface, mais exprimée par rapport au géoïde. Cette dernière surface est déduite d'une analyse combinée de données altimétriques et de mesures de courants et représente la part stationnaire de circulation océanique. Pour donner un ordre de grandeur les creux et bosses permanents de la surface marine ont une amplitude de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres. Le signal océanique variable a pour sa part une amplitude maximale de l'ordre de quelques dizaines de centimètres après correction des effets de marée. Depuis octobre 1992 et le lancement de la mission TOPEX/Poséidon, on dispose de mesures continues de la topographie de l'océan réalisées par une série de satellites : TOPEX/Poséidon, Jason-1, 2 & 3 et plus récemment, Sentinel-6. Ces missions sont appelées "missions de

référence" et assurent la stabilité à long terme du système d'observation. Ces missions ont été lancées sur la même orbite, elles observent donc le même océan et une intercalibration précise est possible grâce à la réalisation systématique d'une phase tandem pendant laquelle les deux satellites sont placés l'un derrière l'autre à quelques minutes d'intervalle.

Variabilité du niveau de la mer observée par altimétrie spatiale

La continuité des observations sur les 30 dernières années permet d'utiliser les mesures d'altimétrie par satellite pour construire un indicateur climatique important : le niveau moyen global de la mer (figure 2). Cet indicateur est obtenu en moyennant, pour chaque cycle de dix jours, toutes les observations collectées. Sur les 30 années disponibles, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 10 cm, ce qui correspond à un rythme moyen d'élévation de 3,3 mm/an. Cette valeur est obtenue après correction du rebond postglaciaire

correspondant à l'effet de la variation du volume des bassins océaniques résultant de la perte de masse des grandes calottes polaires à la suite du dernier épisode de déglaciation, il y a environ 20 000 ans. Une autre caractéristique est l'accélération de la hausse du niveau de la mer, mesurée à 0,12 mm/an/an ce qui est statistiquement significatif. Cela signifie que tous les dix ans, le rythme de hausse du niveau de la mer s'accroît de 1,2 mm/an. Sur la dernière décennie (2013-2023), la hausse du niveau de la mer est ainsi proche de 5 mm/an. Deux contributeurs majeurs expliquent la hausse observée : l'expansion du volume de l'océan et l'apport d'eau

douce provenant d'autres réservoirs. D'une part, l'océan absorbe en effet plus de 90 % de l'excédent de chaleur accumulé dans le système climatique sous l'effet de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la température moyenne de l'océan augmente et l'eau de mer se dilate (page 70, *Chenal - Meyssignac*). D'autre part, l'augmentation de la température moyenne provoque la fonte des calottes polaires (Groenland et Antarctique) et des glaciers de montagnes. Ces eaux de fonte contribuent à l'augmentation de la masse de l'océan et donc à la hausse du niveau de la mer.

La courbe du niveau moyen de la mer masque une diversité régionale importante des tendances du niveau de la mer (*figure 3*). Ainsi, dans certaines régions du globe, le niveau de la mer monte trois fois plus rapidement que la moyenne globale. Cette variabilité géographique est principalement expliquée par la redistribution de la chaleur sous l'effet des grandes oscillations climatiques (oscillation australe El Niño en particulier). La contribution de l'apport de masse à cette variabilité régionale est moindre et résulte principalement de modifications locales du géoïde en réponse à la perte de masse des calottes polaires. L'accès à cette dynamique régionale constitue véritablement un apport majeur de l'altimétrie par satellite : si les marégraphes, installés sur la côte, permettaient déjà d'estimer la hausse du niveau moyen global de la mer, cette variabilité spatiale demeurerait inaccessible.

La carte des tendances (*figure 3*) révèle plusieurs échelles spatiales : des grandes structures à l'échelle d'un bassin océanique et des structures beaucoup plus fines dans les grands courants (Gulf Stream, Kuroshio et courant circumpolaire austral). À basse résolution, l'altimètre réalise une mesure par seconde, soit tous les 7 km le long d'une

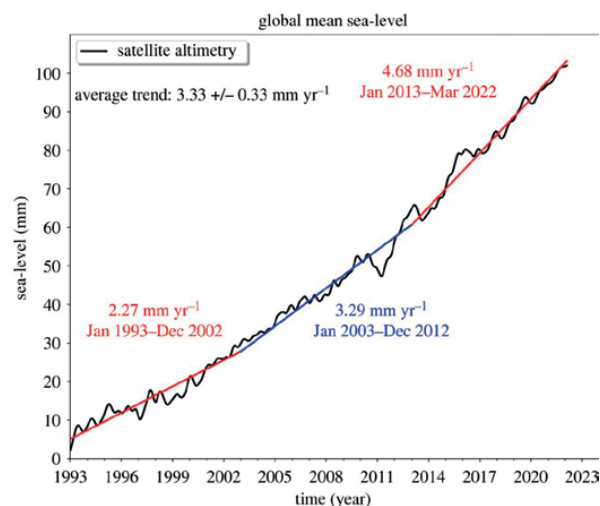


Figure 2. Évolution du niveau moyen global de la mer (courbe noire) à partir de l'altimétrie multimission (données d'AVISO, <https://www.aviso.altimetry.fr>) de janvier 1993 à mars 2022. Les lignes droites colorées représentent les tendances linéaires du niveau de la mer sur trois périodes successives, source Cazenave et Moreira (2022).

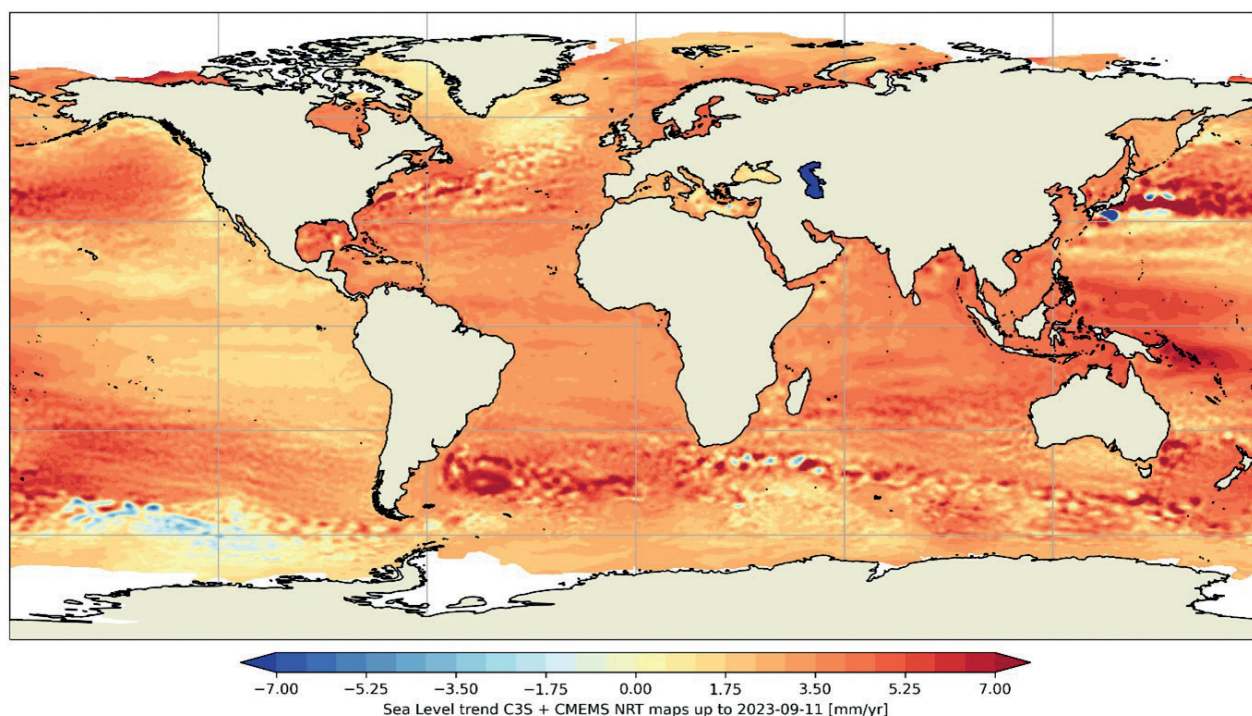


Figure 3. Carte des tendances du niveau de la mer observées par altimétrie spatiale, source Copernicus.



trace au sol et l'on estime que la résolution effective (compte tenu du niveau de bruit et d'erreurs corrélées le long de la trace) est d'environ 100 km. Cette résolution spatiale constitue un apport majeur de l'altimétrie spatiale à la connaissance de la circulation océanique. En effet, les gradients de hauteur de mer correspondent à des gradients de pression, eux-mêmes reliés au courant via l'équilibre géostrophique¹. En plus des indicateurs climatiques évoqués ici, la combinaison de mesures provenant des différents altimètres permet de construire des cartes quotidiennes de la hauteur de mer telles que celles diffusées par le service Copernicus Marine (marine.copernicus.eu).

Au-delà des variations climatiques, la dynamique océanique présente en effet des échelles spatiales et temporelles très variables : de la variabilité interannuelle à multidécennale liée à la fluctuation naturelle du système couplé atmosphère-océans (oscillation australe El Niño, oscillation Nord-Atlantique, oscillation Pacifique décennale, etc.), jusqu'aux fines échelles des tourbillons de mésoéchelle (quelques centaines de kilomètres et quelques jours).

Incertitudes associées

La précision d'une mesure élémentaire à une seconde est comprise entre 2 cm et 2,5 cm avec un niveau de confiance de 90 %, principalement en raison d'erreurs de mesure aléatoires liées à l'état de la mer, aux effets des systèmes de houle à ondes longues et à la façon dont une impulsion radar interagit avec la surface de l'océan. L'exactitude de cette mesure élémentaire est comprise entre 2,5 cm et 3,5 cm en raison d'erreurs systématiques provenant essentiellement de la détermination de l'orbite et de la correction de la troposphère humide qui prend en compte le retard de la vapeur d'eau atmosphérique sur la mesure de la distance. Sur des échelles de temps supérieures à une seconde et des échelles spatiales plus

¹ En météorologie ou en océanographie, l'équilibre géostrophique désigne l'équilibre entre les gradients de pression et la force de Coriolis qui oriente les courants (les vents dans l'atmosphère) orthogonalement aux gradients de pression.

grandes que l'empreinte de l'écho radar (typiquement de plusieurs km pour les satellites TOPEX/Poseidon et Jason), les erreurs de mesure montrent une corrélation importante à travers le temps et l'espace qu'il est essentiel d'évaluer afin de dériver l'incertitude des estimations du niveau de la mer sur des échelles de temps supérieures à un an.

L'estimation des incertitudes est nécessaire à la fourniture d'indicateurs climatiques. De telles incertitudes doivent permettre d'identifier les signaux physiques et de les séparer d'artefacts ou d'erreurs affectant le système d'observation. Aujourd'hui, il reste difficile de propager les erreurs depuis les différents instruments (altimètre, radiomètre...) jusqu'aux indicateurs climatiques tels que le GMSL. D'une part, parce que les caractéristiques de ces erreurs sont partiellement décrites pour certaines composantes (on connaît par exemple bien le niveau de bruit d'un instrument, mais plus difficilement ses erreurs corrélées). D'autre part, nous ne sommes pas toujours en mesure de propager ces incertitudes depuis l'instrument (ou les corrections) jusqu'aux indicateurs climatiques.

Cependant les activités de validation des missions en vol, ainsi que d'analyse de nouveaux standards (nouvelles solutions d'orbite, nouveaux algorithmes de traitement radar...) fournissent des informations et des contraintes pour construire des modélisations de l'amplitude et de la covariance pour certaines sources d'erreurs. Trois types génériques d'erreur ont été identifiés : des erreurs corrélées, des dérives et des sauts, chacun correspondant à une certaine structure de la covariance d'erreur. La covariance d'erreur totale est alors obtenue comme la somme des contributions individuelles.

Cette approche introduite par Ablain et al., 2009, 2019 et mise à jour récemment par Guérou et al., 2023, permet d'estimer l'incertitude associée à la tendance et à l'accélération du niveau moyen de la mer. Les incertitudes ainsi estimées sont de 0,3 mm/an et 0,05 mm/an/an pour la tendance et l'accélération, dans un intervalle de confiance à 90 % sur une période de 30 ans.

Cette approche peut également être appliquée à l'échelle régionale pour

associer une carte des incertitudes à la carte des tendances (figure 3). On estime que l'incertitude associée aux tendances locales est proche de 0,9 mm/an. Cette valeur est notablement plus élevée que l'incertitude associée à la tendance globale (0,3 mm/an), d'une part, parce que certaines incertitudes se réduisent en moyennant globalement (décorrélation spatiale), d'autre part, parce que notre connaissance des incertitudes à l'échelle régionale est moins bonne qu'à l'échelle globale. Cela conduit à adopter une position conservatrice utilisant des majorants des incertitudes (pire cas).

Il faut enfin noter que les incertitudes présentées ici ne décrivent que la contribution du système de mesure à l'incertitude sur les tendances et les accélérations du niveau de la mer. À l'échelle régionale notamment, la dynamique océanique naturelle est un contributeur majeur à l'incertitude et n'est pas incluse ici.

Comparaisons aux marégraphes & autres systèmes de mesure

Les incertitudes décrites précédemment dérivent de connaissances majoritairement issues d'éléments d'autocohérence interne du système altimétrique : deux missions différentes observent-elles bien la même variabilité ? Quel est le niveau de désaccord entre deux corrections à la performance a priori équivalente à différentes échelles spatiales et temporelles ? Afin de vérifier que ces incertitudes sont réalistes, il est nécessaire de disposer de moyens indépendants de mesure du niveau de la mer. Comme tout appareil de mesure indirecte, l'altimètre doit être calibré. Cette opération consiste à comparer le résultat de la mesure à une mesure directe, celle-ci peut être fournie par des stations laser au sol (SLR)² ou des transpondeurs. Le développement et le maintien en condition opérationnelle d'un tel observatoire est très onéreux, limitant de fait leur nombre. Pour cette raison, les marégraphes qui fournissent des mesures indépendantes

² Et en particulier la station laser ultra mobile française, financée principalement par le CNES, développée à cet effet dès 1990 (FTLRS : *French Transportable Laser Ranging Station*).

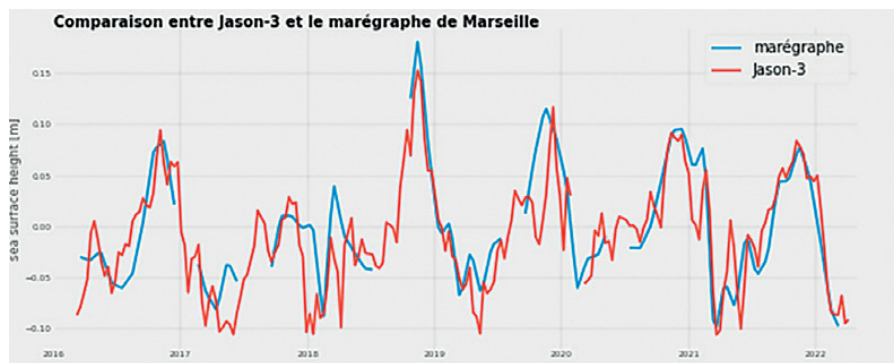


Figure 4. Comparaison des anomalies de hauteur d'eau mesurées par Jason-3 et le marégraphe de Marseille.

du niveau de la mer sont principalement utilisés pour la calibration absolue des altimètres, ainsi que pour quantifier leur stabilité long-terme.

On distingue deux types d'utilisation des données marégraphiques : les sites de calibration absolue et les approches ensemblistes. Quatre sites de calibration absolue sont aujourd'hui disponibles, ils sont équipés de marégraphes et de systèmes de positionnement de précision (GNSS, DORIS) pour convertir les hauteurs relatives du marégraphe en hauteurs absolues telles que mesurées par l'altimétrie. À certains de ces sites, des modèles haute-résolution du géoïde ont été calculés afin de réduire les incertitudes liées à la colocalisation entre une mesure marégraphique à la côte et des mesures altimétriques réalisées au large. Cette approche est limitée par le faible nombre de sites ainsi instrumentés. Les approches ensemblistes reposent sur des réseaux de stations, tels que celui assemblé par le PSMSL (psmsl.org). En moyennant de nombreuses comparaisons locales (*figure 4*) et sous l'hypothèse que l'utilisation de plus de marégraphes, même de qualité plus faible, permet de réduire certaines erreurs, diminuant ainsi l'incertitude associée. Une source importante d'incertitude dans ce type de comparaisons est liée à la correction des mouvements verticaux de la référence du marégraphe, qui se traduisent par des dérives artificielles lors de comparaisons à l'altimétrie. L'augmentation du nombre de marégraphes équipés de capteurs GNSS permet d'espérer que la précision associée à ces méthodes ensemblistes (environ 0,4 à 0,8 mm/an pour des séries longues) s'améliore dans le futur.

Une autre approche de validation repose sur l'estimation indépendante des termes contribuant à l'élévation du niveau de la mer : les variations de masse de l'océan (appelée composante manométrique du niveau de la mer) et les variations de densité de la colonne d'eau sur sa verticale (appelée composante stérique). Depuis 2003, les missions GRACE et GRACE-FO de la NASA, mesurent les variations du champ de gravité terrestre dont on déduit directement la composante manométrique du niveau de la mer. Les flotteurs profileurs du programme Argo dérivent avec les courants océaniques et se déplacent à la verticale entre la surface et le fond des océans. Ils permettent de mesurer la température et la salinité de la mer et donc, sa densité à différentes profondeurs de la colonne d'eau, avec une bonne

couverture spatiale des océans depuis 2005. L'intégration de chaque profil de température et salinité sur la verticale, moyenné sur tout l'océan à l'échelle mensuelle, fournit les variations de la composante stérique du niveau de la mer. La somme de la composante manométrique et stérique doit, en théorie, être égale à la composante totale du niveau de la mer fournie par les mesures altimétriques. La vérification de cette égalité (appelée fermeture du bilan du niveau de la mer) permet de vérifier la cohérence des systèmes de mesures entre eux (*voir figure 5*). La non-fermeture du bilan indique au contraire une erreur sur l'une au moins des trois composantes de ces systèmes de mesures indépendants. Cette approche a permis de mettre en évidence des erreurs du niveau de la mer mesurée par l'altimètre sur la période 1993-1999 (de façon cohérente avec les marégraphes) et plus récemment, depuis 2016, liées respectivement à des problèmes de l'altimètre TOPEX et du radiomètre micro-onde embarqué sur le satellite Jason-3.

Conclusion

L'altimétrie par satellite fournit des observations de la topographie de l'océan depuis plus de 30 ans. La maturité de cette technique est excellente : observations continues par différents

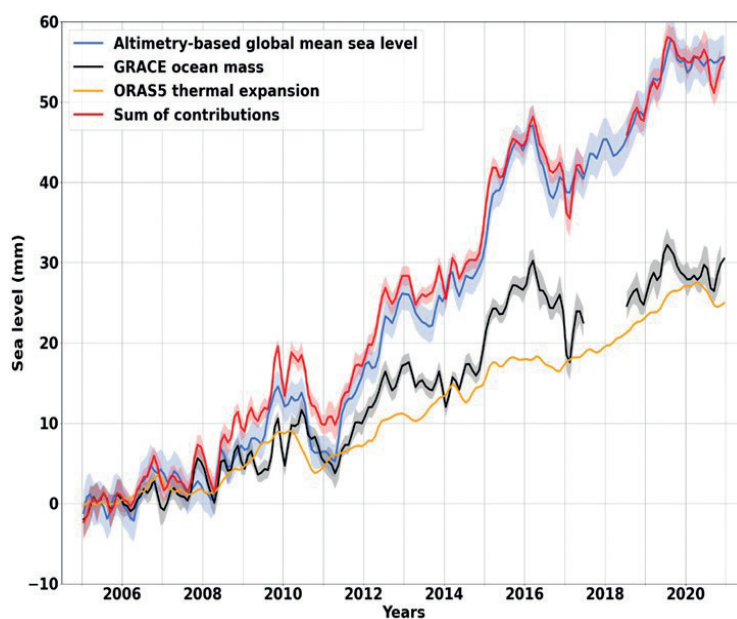


Figure 5. Évolution du niveau de la mer moyen global (altimétrie) en bleu, de la somme de la composante stérique (profileurs Argo) et manométrique (gravimétrie) en rouge, de la composante manométrique noire, et stérique en jaune (source, Barnoud et al., 2023).



capteurs, stabilité dans le temps par des missions de référence précisément inter-calibrées, description rigoureuse des incertitudes, méthodes de validation.

C'est également un système opérationnel dont la responsabilité est confiée en Europe à EUMETSAT. Plusieurs lancements sont déjà prévus pour assurer la pérennité de ce système Sentinel-6B en 2025, Sentinel-3C et 3D entre 2024 et 2026. En parallèle, de nouveaux concepts instrumentaux, comme l'interféromètre KaRIn embarqué sur la mission franco-américaine SWOT qui fournit une image bidimensionnelle de la topographie de l'océan, contribuent et contribueront à une meilleure connaissance de la dynamique océanique. ●

Références

Ablain, M., Cazenave, A., Valladeau, G., and Guinehut, S.: *A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over*

1993-2008, Ocean Sci., 5, 193-201, <https://doi.org/10.5194/os-5-193-2009>, 2009.

Ablain, M., Meyssignac, B., Zawadzki, L., Jugier, R., Ribes, A., Spada, G., Benveniste, J., Cazenave, A., and Picot, N.: *Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration*, Earth Syst. Sci. Data, 11, 1189-1202, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1189-2019>, 2019.

Barnoud, A., Pfeffer, J., Cazenave, A., Fraudeau, R., Rousseau, V., and Ablain, M.: *Revisiting the global mean ocean mass budget over 2005-2020*, Ocean Sci., 19, 321-334, <https://doi.org/10.5194/os-19-321-2023>, 2023.

Cazenave, A., Moreira, L., 2022 *Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review* Proc. R. Soc. A. 478 20220049 20220049, <http://doi.org/10.1098/rspa.2022.0049>

Guérou, A., Meyssignac, B., Prandi, P., Ablain, M., Ribes, A., and Bignalet-Cazalet, F.: *Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement*

ABSTRACT

Satellite radar altimetry is a remote sensing technique used to observe sea surface topography. Continuous and near global observations collected over the last three decades are used to estimate climate indicators such as the global mean sea level. This observation system is precise enough to quantify sea level rise with an uncertainty of 0,3 mm/yr. The near global coverage uncovers regional variability, mainly linked to heat distribution in the ocean.

uncertainty, Ocean Sci., 19, 431-451, <https://doi.org/10.5194/os-19-431-2023>, 2023.

Contacts

Pierre Prandi, pprandi@groupcls.com, Collecte Localisation Satellites, Ramonville St-Agne, France, www.cls.fr
Michael Ablain, michael.ablain@magellium.fr, Magellium, Ramonville St-Agne, France

FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2024



Le 19^e forum de la topographie
jeudi 28 mars à Gembloux, Belgique



LiDAR, la topographie instantanée ?



CONTACTS ET RENSEIGNEMENTS :

POUR LES EXPOSANTS communication@aftopo.org - **POUR LES PARTICIPANTS** forum@aftopo.org
billetterie sur www.billetweb.fr/forum-de-la-topographie

Association francophone de topographie

73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ Cedex - Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

La marégraphie pour l'hydrographie

■ Gaël ANDRÉ - Alexa LATAPY - Nathalie GILOY

La marégraphie joue un rôle primordial dans la connaissance des caractéristiques hydrographiques d'un site. Les composantes harmoniques de la marée, déduites des mesures du niveau marin par analyse harmonique, permettent de calculer les prédictions de marée, les coefficients de marée, les niveaux caractéristiques de la marée et d'établir les références verticales marines communes aux profondeurs des cartes marines et aux prédictions de marée. Les niveaux marins sont référencés au zéro hydrographique défini par rapport à un repère terrestre. Ce repère fondamental de l'observatoire marégraphique peut être référencé par rapport à des systèmes de référence altimétrique par rapport au géoïde, ou géodésique par rapport à un ellipsoïde. Le référencement à un système géodésique permet de s'affranchir des mouvements verticaux terrestres. Le niveau moyen des mers varie au cours du temps à des échelles temporelles allant des variations mensuelles, saisonnières à multidécennales et centennales. Le calcul d'une droite de régression est communément utilisé pour déterminer les tendances d'évolution du niveau de la mer à partir des niveaux moyens mensuels ou annuels. Enfin, la surcote liée aux conditions météorologiques peut s'ajouter à la marée astronomique et aux variations du niveau moyen, générant ainsi un risque de submersion. L'objectif de cet article est d'explicitier ces différentes notions et d'en montrer l'utilité pour l'hydrographie.

MOTS-CLÉS

Hydrographie, références altimétriques maritimes, niveau moyen, coefficient de marée, surcotes

temps mensuelles, saisonnières et multidécennales. Le NM de la mer peut être calculé de différentes manières et son évolution au cours du temps permet d'estimer des tendances d'élévation.

Les conditions météorologiques (pression atmosphérique et vent) peuvent engendrer une augmentation du niveau de la mer, qui s'ajoute à la marée astronomique. Dans les conditions les plus extrêmes, ces conditions peuvent générer un risque de submersion marine.

Référencement vertical

Le niveau marin observé ou prédit est référencé par rapport au ZH, défini par rapport au repère fondamental (repère physique) de l'observatoire marégraphique. Ces repères peuvent être référencés par rapport à des systèmes de référence altimétrique par rapport au géoïde, ou géodésique par rapport à un ellipsoïde de référence.

■ Systèmes de référence géodésiques

La hauteur ellipsoïdale exprime la distance géométrique d'un point à une représentation mathématique du géoïde (l'ellipsoïde) représentant un repère terrestre indépendant des mouvements terrestres. Depuis les années 1990 et le développement de la géodésie spatiale, des systèmes internationaux de référence terrestre (ITRS *International Terrestrial Reference System* ou WGS84), dont l'origine est le centre de la masse terrestre, sont utilisés pour exprimer les coordonnées d'un point sur un ellipsoïde dans un repère géodésique de référence. De nos jours, il est recommandé d'associer à l'installation d'un marégraphe la pose d'une station GNSS (*Global Navigation Satellite System*) à proximité (UNESCO/COI, 2016). Les niveaux d'eau mesurés par le marégraphe peuvent être exprimés en hauteurs ellipsoïdales et être corrigés des mouvements verticaux terrestres donnant ainsi des niveaux marins absolus.

Introduction

Selon l'Organisation hydrographique internationale (OHI), l'hydrographie est la branche des sciences appliquées traitant du mesurage et de la description des éléments physiques des océans, des mers, des zones côtières, des lacs et des fleuves, ainsi que de la prédiction de leur changement dans le temps, essentiellement dans l'intérêt de la sécurité de la navigation et à l'appui de toutes les autres activités maritimes. L'hydrographie comprend ainsi la mesure de la marée et des courants permettant de connaître les conditions océanographiques et de corriger les mesures bathymétriques. L'application la plus connue de l'information hydrographique est la réalisation des cartes marines et des prédictions de marée que tous les marins utilisent pour la navigation.

La connaissance de la marée est apportée par des marégraphes ou des mesures altimétriques satellitaires permettant de mesurer le niveau de la

mer au cours du temps et d'en estimer l'évolution temporelle. La mesure du niveau de la mer est faite par rapport à une référence verticale maritime appelée zéro hydrographique (ZH), commune aux profondeurs indiquées sur les cartes marines et aux prédictions de marée, déterminée à partir des observations. Le ZH est défini par rapport au repère fondamental de l'observatoire. Ce repère peut être référencé par rapport à des systèmes de référence altimétrique ou géodésique. Le référencement des niveaux marins par rapport à un système géodésique permet de s'affranchir des mouvements verticaux terrestres et d'obtenir des niveaux marins absolus. La mesure continue du niveau de la mer est essentielle pour déduire les composantes harmoniques (CH) de la marée astronomique permettant le calcul des prédictions de marée et des coefficients de marée, de définir les niveaux caractéristiques de la marée et d'établir les références verticales maritimes.

Le niveau moyen (NM) des mers varie au cours du temps à des échelles de



■ Systèmes de référence altimétriques

Historiquement, un référentiel altimétrique terrestre est établi à l'échelle d'un pays, ou d'un territoire contigu d'un pays (territoire métropolitain, territoire d'outre-mer...), pour les travaux de topographie. Le choix est alors fait de définir l'altitude par rapport au NM de la mer, en s'appuyant sur un réseau de repères de nivellement disséminés sur le territoire. Ces repères permettent de déterminer l'altitude en chaque point du territoire. L'altitude obtenue par nivellement de repères matérialisés correspond à l'éloignement d'un point par rapport au géoïde terrestre, i.e. la surface du potentiel de pesanteur terrestre qui coïncide au mieux avec le NM de la mer.

Un référentiel lié à un repère à terre est relatif, car le socle sur lequel se situe ce repère est susceptible de bouger verticalement, sous l'effet de processus naturels (rebond isostatique, mouvement tectonique), ou liés à des activités anthropiques (extraction d'eau souterraine entraînant une subsidence).

Le système d'altitude en vigueur en France continentale est le NGF/IGN69 (NGF pour nivellement général de la France). L'altitude de référence a été déterminée à partir des observations marégraphiques réalisées au marégraphe de Marseille entre le 3 février 1885 et le 1^{er} janvier 1897 et se situe à la cote 0,329 m de l'ancienne échelle de marée du fort Saint-Jean, ou 1,661 m sous le repère fondamental situé sous le local du marégraphe. Le type d'altitude est l'altitude normale (contre un type d'altitude orthométrique pour le précédent réseau NGF/Lallemand). En Corse, le système d'altitude est le NGF/IGN78 dont l'origine a été établie à partir d'observations de niveau de la mer réalisées à Ajaccio entre 1912 et 1937. Pour les autres territoires d'outre-mer, il existe d'autres systèmes d'altitude locaux. Les systèmes de référence verticale en vigueur sont définis par l'arrêté du 5 mars 2019 portant application du décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000.

■ Référentiels altimétriques maritimes

Le ZH, appelé aussi cote marine (CM), 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). C'est, en quelque sorte, l'équivalent en mer de la surface de référence des altitudes à terre.

Il 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, le niveau marin se situant quasiment toujours au-dessus du ZH, la sonde exprimée sur la carte marine peut être interprétée par le navigateur comme la profondeur (hauteur d'eau) minimale. Dans d'autres pays, le choix a été fait de se référer au NM de la mer ou au niveau moyen des basses mers. Cependant, l'OHI a recommandé le choix d'un zéro des cartes marines proche du niveau des PBMA.

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 treize zones de marées distinctes en France métropolitaine, rattachées chacune à un port de référence où le ZH a été historiquement déterminé à partir des observations marégraphiques (figure 1).

Le long du littoral, il y a un recouvrement des référentiels altimétriques maritime (ZH) et terrestre (par exemple NGF/IGN69). En France, le Shom publie et met à jour les "Référentiels altimétriques maritimes (RAM)"¹ fournissant la cote du ZH dans le système altimétrique terrestre légal des ports situés en France métropolitaine et en outre-mer.

Caractéristiques de la marée

Pour connaître avec précision les caractéristiques de la marée, il faut mesurer les variations du niveau de la mer sur des périodes de plusieurs mois à plusieurs années. Les techniques d'observation marégraphique ont évolué depuis la transcription manuscrite des

¹ <https://diffusion.shom.fr/donnees/references-verticales/references-altimetriques-maritimes-ram.html>

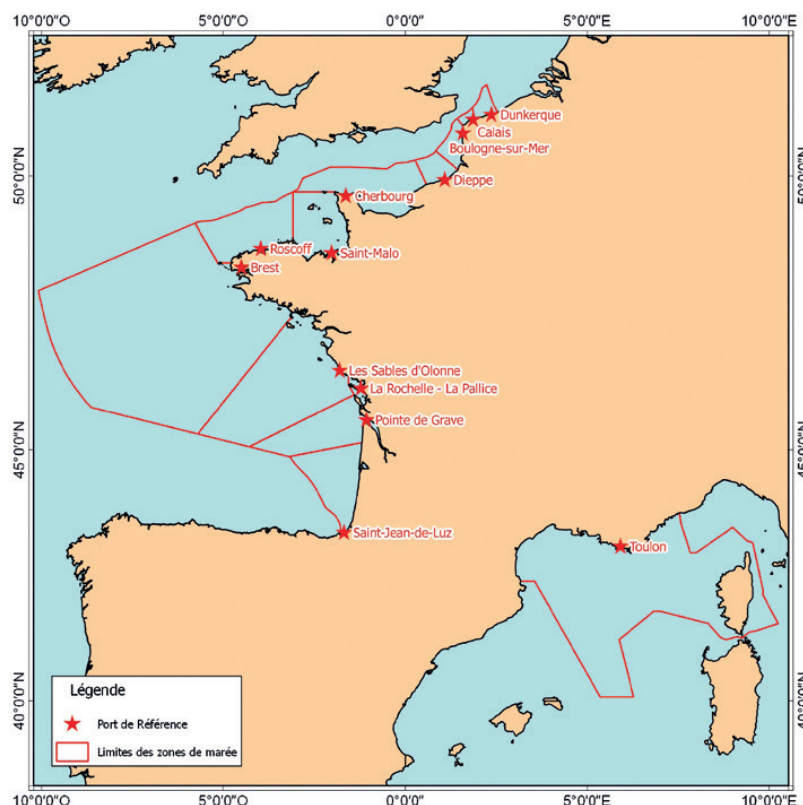


Figure 1. Carte des zones de marée sur les côtes françaises métropolitaines (RAM).

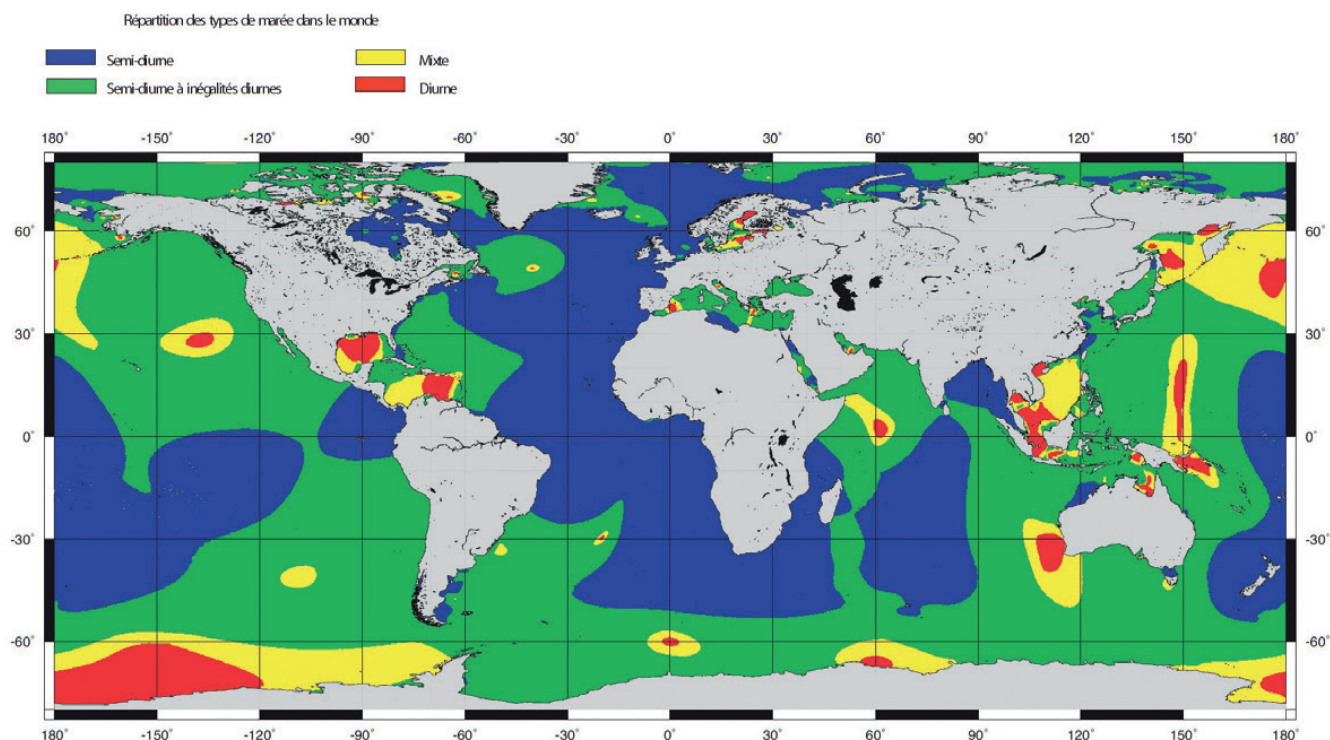


Figure 2. Répartition des types de marée dans le monde (extrait de Simon, 2007).

hauteurs d'eau lues sur des échelles de marée au XVII^e siècle, en passant par les mesures analogiques obtenues par les marégraphes à flotteur jusqu'à la technique actuelle d'enregistrements numériques basés sur la mesure du tirant d'air par ultrasons, ou par ondes électromagnétiques (radar). La mesure du niveau d'eau par télémètres radar est aujourd'hui la plus utilisée dans de nombreux pays et en particulier en France (UNESCO/COI, 2016). L'arrivée des enregistrements numériques a permis un essor et une diversification du nombre de marégraphes. Les marégraphes à capteur de pression peuvent également être utilisés ponctuellement, mais la connaissance de la pression atmosphérique et de la densité de l'eau est indispensable pour obtenir les niveaux d'eau. De plus, depuis les années 1990, les mesures du niveau de la mer par altimétrie spatiale complètent les données marégraphiques en fournissant une couverture globale des océans.

Les fluctuations du niveau marin sont la manifestation de deux phénomènes qui se superposent. D'une part, la marée astronomique, phénomène déterministe pouvant être prédit, correspondant au mouvement périodique du niveau

de la mer, trouvant son origine dans l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil. D'autre part, les mouvements aléatoires appelés surcotes (ou décotes), d'origines essentiellement météorologiques et océaniques.

■ Composantes harmoniques de la marée

Le signal de marée est la somme de la contribution de plusieurs ondes. Les mesures du niveau de la mer permettent de définir les composantes harmoniques (CH) qui correspondent à l'amplitude et à la phase associées à chaque onde ainsi que le niveau moyen de la mer. Les CH de la marée, propres à chaque site, sont calculées par une méthode d'analyse harmonique à partir des observations du niveau de la mer. Les CH permettent d'estimer la marée astronomique calculée par somme de fonctions sinusoïdales dépendantes de ces composantes suivant la formulation harmonique proposée initialement par Darwin en 1883, puis complétée par Doodson en 1921 (Simon, 2007). De plus, elles rendent possible l'estimation des niveaux caractéristiques et des coefficients de marée.

Les CH sont variables spatialement et dépendent principalement de la

morphologie de la côte et de la bathymétrie. Les valeurs d'amplitude les plus fortes se situent notamment sur le plateau continental, aux abords des continents, ou dans les mers peu profondes comme la Manche. Ces amplitudes sont très faibles dans les mers semi-fermées aux faibles dimensions (mer du Japon, mer des Antilles, Baltique, Méditerranée).

La marée résulte principalement de la superposition d'une composante diurne (un maximum et un minimum par jour) et d'une composante semi-diurne (deux maximums et deux minimums par jour). L'importance relative de ces deux composantes, très variables géographiquement, définit différents types de marée dont la classification varie selon les pays. En France, la classification suivante a été adoptée :

- type semi-diurne : deux pleines mers (PM) et deux basses mers (BM) par jour, respectivement de hauteurs sensiblement égales ;
- type semi-diurne à inégalité diurne : deux PM et deux BM par jour, respectivement de hauteurs très différentes ;
- type mixte : tantôt deux PM et deux BM par jour, tantôt une seule ;
- type diurne : seulement une PM et une BM par jour.





La répartition de ces quatre types de marées dans l'océan mondial est représentée sur la *figure 2*.

Niveaux caractéristiques de la marée

Les niveaux caractéristiques de la marée sont calculés à partir des CH de marée et sont définis par rapport au ZH. Les niveaux des plus hautes et des plus basses mers astronomiques représentent respectivement la valeur maximale et minimale du niveau de marée astronomique pour une marée de vive-eau extrême. Ces niveaux extrêmes de marée se reproduisent environ tous les 18 ans correspondant à un saros, période nécessaire pour que la Lune, le Soleil et la Terre se retrouvent quasiment dans la même configuration géométrique. La *figure 3* représente les niveaux caractéristiques de la marée :

- PHMA : Niveau des plus hautes mers astronomiques ;
- PMVE : Niveau des pleines mers de vives-eaux ;
- PMME : Niveau des pleines mers de mortes-eaux ;
- NM : Niveau moyen ;
- BMME : Niveau des basses mers de mortes-eaux ;
- BMVE : Niveau des basses mers de vives-eaux ;
- PBMA : Niveau des plus basses mers astronomiques.

Les différents niveaux caractéristiques sont calculés pour chaque port et sont mis à disposition dans le produit RAM (Références altimétriques maritimes) (Shom, 2022).

Coefficients de marée

La notion de coefficient de marée n'est guère utilisée hors de la France, mais peut s'avérer très pratique pour caractériser les variations du marnage. Il est cependant important de garder en tête que cette notion n'est qu'une approximation du marnage, car il n'est pas calculé sur l'ensemble des ondes de marée, mais uniquement sur les composantes semi-diurnes. Il est donc calculable uniquement pour les ports soumis à un type de marée semi-diurne.

Le coefficient de marée a été imaginé par Laplace pour caractériser chaque port par une unité de hauteur : "l'unité

Cas des marées de type semi-diurne

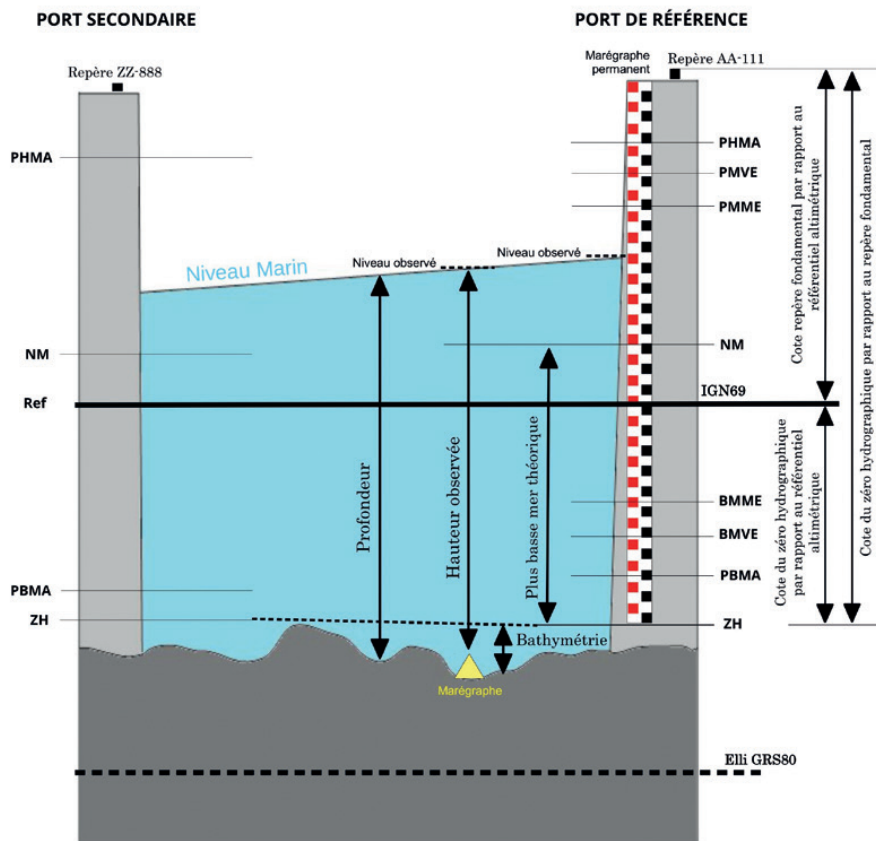


Figure 3. Schéma récapitulatif des niveaux de marée (type semi-diurne).

de hauteur est la valeur moyenne de l'amplitude (demi-marnage) de la plus grande marée qui suit d'un jour et demi environ l'instant de la pleine ou de la nouvelle lune, vers les syzygies d'équinoxe".

Par convention, on attribue le coefficient de 100 au marnage moyen des vives-eaux qui suivent la syzygie d'équinoxe, c'est-à-dire lors de l'alignement du système Terre-Lune-Soleil (lors des pleines lunes et des nouvelles lunes), on parle de "marées de vives-eaux", et en période de quadratures, on parle de "marée de mortes-eaux", d'où la formule :

$$C = \frac{H - N_0}{U} \times 100$$

Où C est le coefficient de marée, H est le niveau de la PM, N_0 est le niveau de mi-marée et U est l'unité de hauteur. Les valeurs extrêmes actuellement admises sont comprises entre 20 et 120 ; des exemples de valeurs de coefficient correspondant aux types de

marnage sont donnés dans le *tableau 1*. Le coefficient de marée est calculé uniquement pour le port de Brest, puis est propagé à l'ensemble des sites en

Tableau 1. Type de marnage associé au coefficient de marée et les niveaux caractéristiques correspondants.

Coefficient de marée	Type de marnage	Niveaux caractéristiques
20	Marée de morte-eau extrême	
45	Marée de morte-eau moyenne	PMME / BMME
< 70	Marée de morte-eau	
> 70	Marée de vive-eau	
95	Marée de vive-eau moyenne	PMVE / BMVE
120	Marée de vive-eau extrême	PHMA / PBMA

mer du Nord, Manche et Atlantique de la France métropolitaine. Le succès en France de cette notion de coefficient vient du degré de précision adopté pour la valeur de Brest qui permet de l'appliquer sur toutes les côtes Atlantique, Manche et mer du Nord de France métropolitaine.

Niveaux moyens

■ Calcul des niveaux moyens

Afin d'estimer un niveau moyen, un filtrage sur les données permet de s'affranchir de certaines oscillations hautes-fréquences (Simon, 2007). En effet, le choix d'une moyenne arithmétique sur une durée de 24 h présente l'inconvénient de ne pas filtrer correctement les signaux de période inférieure à la journée, en particulier ceux pour lesquels une durée de 24 h 50 serait plus adaptée. Afin de moyenniser les niveaux d'eau à l'échelle d'une journée lunaire, il faut donc utiliser des filtres passe-bas. Ainsi, plus le nombre de niveaux d'eau horaires pris en compte dans le calcul est grand, plus le filtre est efficace dans la réduction des effets de la marée, mais plus son application sera limitée dans le cas d'observations marégraphiques contenant des lacunes. Le Shom recommande et utilise le filtre de Demerliac pour le calcul des niveaux moyens journaliers (NMj) (Demerliac, 1973). Ce filtre moyenne le niveau d'eau en prenant en compte les mesures disponibles sur trois jours (soit 72 h). Chacune des mesures est pondérée d'un coefficient (présenté en Tableau 8.3 dans l'ouvrage de Simon [2007]).

Selon les critères du service international PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*), pour calculer les niveaux moyens mensuels (NMm), une simple moyenne arithmétique des NMj (minimum 15 jours de données disponibles) est effectuée. De la même manière, les niveaux moyens annuels (NMa) sont obtenus en moyennant les NMm, pondérés par le nombre de jours pour lesquels des mesures ont été faites (minimum 11 NMm par an) (Holgate et al., 2013). En France, les niveaux moyens sont diffusés par SONEL² (Système d'observation du niveau des eaux littorales).

² <https://www.sonel.org/>

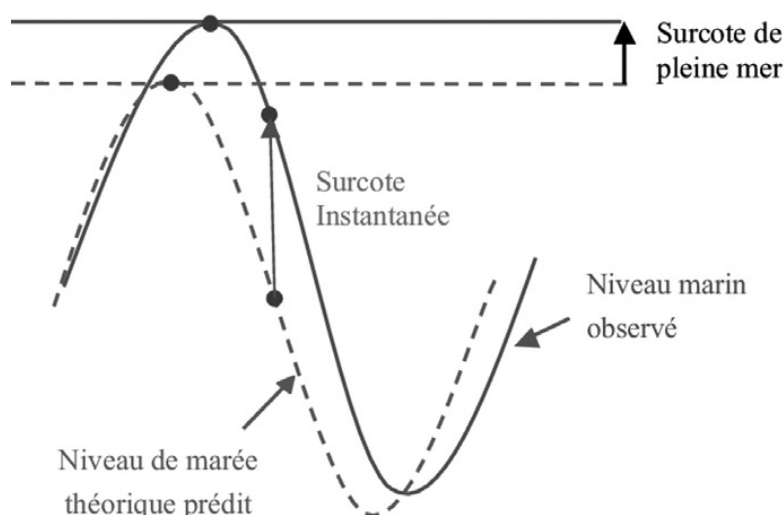


Figure 4. Représentation schématique des surcotes/décotes (extrait de Duluc et al., 2014).

■ Méthode de calcul des tendances d'évolution

Pour calculer des tendances d'évolution du niveau de la mer, à l'échelle mondiale et régionale, l'ajustement d'une droite de régression est communément utilisé malgré l'existence de phénomènes non linéaires (Church and White, 2011 ; Frederikse et al., 2020 ; Steffebauer et al., 2022). En 2015, le PSMSL a changé sa méthode de calcul en utilisant les NMm plutôt que les NMa pour l'estimation des tendances. Par ailleurs, au vu de l'accélération de la hausse du niveau de la mer observée depuis les années 1960, plusieurs auteurs utilisent d'autres méthodes de calcul de tendance, telles que l'ajustement d'un polynôme du second degré ou des méthodes de décomposition modale empirique (Dangendorf et al., 2019).

Surcotes

La différence entre le niveau marin observé et la prédiction de marée est appelée surcote si la différence est positive, et décote si la différence est négative. De nombreux phénomènes physiques sont susceptibles de faire varier le niveau observé au marégraphe en sus de la marée astronomique (effets stériques, courants généraux, seiches côtières ou portuaires, déferlement des vagues, etc.), mais on parle généralement de surcote/décote pour qualifier les variations induites par les effets météorologiques principalement liés à

la pression atmosphérique et au vent. On différencie deux types de surcotes/décotes :

- la surcote/décote instantanée qui est la différence, à un instant t , entre le niveau d'eau observé et le niveau d'eau prédit ;
- la surcote/décote de PM qui est la différence entre le niveau de PM observé et le niveau de PM prédit, les instants d'occurrence de ces deux niveaux pouvant être décalés dans le temps (cf. figure 4).

Les surcotes sont déduites des observations marégraphiques, mais les modélisations numériques permettent également de disposer de bases de données de surcotes/décotes de large emprise spatio-temporelle. La validation de ces simulations aux marégraphes est néanmoins fortement recommandée.

Conclusion

La mesure du niveau marin au cours du temps est primordiale pour l'hydrographie. L'observation marégraphique permet de caractériser la marée astronomique localement et de déduire les composantes harmoniques. Celles-ci permettent le calcul des prédictions de marée, des coefficients de marée et des niveaux caractéristiques de la marée.

La référence verticale utilisée pour les mesures de hauteurs d'eau et les prédictions de marée est le zéro hydrographique. Cette référence, commune

aux cartes marines et aux prédictions de marée est définie par rapport à un repère physique, repère fondamental de l'observatoire, qui peut bouger en fonction des mouvements verticaux du sol. Le référencement des niveaux marins par rapport à un système géodésique de référence permet de s'affranchir des mouvements terrestres et d'avoir une mesure absolue des niveaux marins. La mesure marégraphique sur le long terme permet également de connaître l'évolution temporelle du niveau moyen de la mer. L'élévation du niveau de la mer est globalement linéaire depuis la fin du XIX^e siècle, mais une accélération persistante est constatée depuis les années 1960. Par ailleurs, les surcotes générées par des effets météorologiques lors des tempêtes peuvent faire peser un risque de submersion le long des littoraux. ●

Contacts

Gaël ANDRÉ, gael.andre@shom.fr -
Alexa LATAPY, alexa.latapy@shom.fr, Service hydrographique national (Shom),
Nathalie GILOY, nathalie.giloy@shom.fr, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

Références bibliographiques

Altamimi, Z., Collilieux, X. and Métivier, L., 2011. *ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame*, Journal of Geodesy, 85, 8, pp. 457-473

Church, J.A., White, N.J., 2011. *Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century*. Surv Geophys 32, 585-602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>
Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F.M., Marcos, M., Piecuch, C.G., Berk, K., Jensen, J., 2019. *Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s*. Nat. Clim. Chang. 9, 705-710. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>
Demerliac, A., 1973. *Le niveau moyen de la mer, calcul du niveau journalier*. Shom.
Duluc, C.-M., Deville, Y., Bardet, L., 2014. *Extreme sea level assessment: application of the joint probability method at Brest and La Rochelle and uncertainties analysis*, La Houille Blanche, 1, 11-17, doi:10.1051/lhb/2014002
Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L., Adhikari, S., Parkes, D., Humphrey, V.W., Dangendorf, S., Hogarth, P., Zanna, L., Cheng, L., Wu, Y.-H., 2020. *The causes of sea-level rise since 1900*. Nature 584, 393-397. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>
Holgate, S.J., Matthews, A., Woodworth, P.L., Rickards, L.J., Tamisiea, M.E., Bradshaw, E., Foden, P.R., Gordon, K.M., Jevrejeva, S., Pugh, J., 2013. *New data systems and products at the permanent service for mean sea level*. Journal of Coastal Research 29, 493-504
OHI, 2010. *Résolutions de l'Organisation Hydrographique Internationale Publication M-3*, 2^e édition - 2010, Publié par l'OHI, Monaco.
Simon, B., 2007. *La marée océanique côtière*, Institut Océanographique. ed, Synthèses
Steffelbauer, D.B., Riva, R.E.M., Timmermans, J.S., Kwakkel, J.H., Bakker, M., 2022. *Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea*. Environ. Res. Lett. 17, 074002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac753a>

Shom, 2022. *Références Altimétriques Maritimes (RAM)*, Éd. 2022
UNESCO/COI, 2016. *Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer*. Marégraphes radar. Volume V. Manuels et guides 1

ABSTRACT

Tide gauges play a vital role in understanding the hydrographic characteristics of a site. By measuring the sea level, the tidal components can be derived using harmonic analysis. These tidal components are used to calculate tidal predictions, tidal coefficients and tidal levels, and to establish vertical marine references common to chart depths and tidal predictions. Sea levels are referenced to the chart datum defined in relation to a terrestrial reference. This fundamental benchmark of the tide gauge observatory can be referenced to altimetric reference system referred to the geoid or to geodetic reference system to an ellipsoid. Referencing to a geodetic system avoids the effects of vertical land movements. Mean sea level changes over time on scales ranging from monthly and seasonal to multi-decadal and centennial variations. Usually, linear regression model is used to calculate sea level rise trends from monthly or annual mean values. Finally, meteorological surges can be added to astronomical tides and mean sea level variations and can be a source of flood risk. The aim of this article is to explain these different concepts and show their usefulness in hydrography.

Olivier Reis

Ingénieur géomètre-topographe
ENSAI Strasbourg - Diplômé de l'Institut de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg
9, rue des Champs
F-57200 SARREGUEMINES
Téléphone / télécopie : 03 87 98 57 04
Courriel : o.reis@infonie.fr

Pour toutes vos traductions d'allemand et d'anglais en français en topographie – géodésie – géomatique – GNSS

Reinhard Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe
Interprète diplômé de la
Chambre de commerce et d'industrie de Berlin
Heinrich-Heine-Straße 17, D-10179 BERLIN
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60
Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61
Courriel : stoelzel@aol.com

Pour toutes vos traductions de français et d'anglais en allemand en géomatique – GNSS – infrastructures de transport

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service

Le système d'assainissement de Marseille face à la montée du niveau de la mer

Nicolas HESSE - Amaury PERRIN - Christine NÈGRE - Dominique LAPLACE

Le changement climatique est un sujet d'actualité dont nous proposons d'évaluer les conséquences sur le système d'assainissement de la ville de Marseille. Très concrètement à Marseille, les influences se font déjà ressentir sur la température de l'air et celle des eaux usées ainsi que sur le niveau de la mer. L'élévation du niveau de la mer influe sur les déversoirs d'orage qui, s'ils sont calés trop bas, laissent entrer des eaux salées qui dégradent la performance du traitement d'épuration biologique ou à l'inverse sont contrariés par rapport à leur capacité hydraulique d'évacuation par temps de pluie. Par conséquent, des solutions sont à l'étude pour remédier à ces désagréments en tenant compte des évolutions futures qui vont conduire à aggraver ces phénomènes.

MOTS-CLÉS

Changements climatiques, réseaux d'assainissement, niveau de la mer.

Paramètre de la surcote	Valeur (m)
Percentile 95 %	0.23
Percentile 99 %	0.37

Figure 2. Statistiques de surcote issues de l'exploitation des données du marégraphe. Pour un percentile 99 %, seulement 1 % des valeurs observées se situe au-dessus de la valeur 0.37 m.

Les valeurs données par le marégraphe ont été corrigées de l'élévation du niveau de la mer d'un rythme de 3 mm par an. Cette correction permet de déterminer les valeurs du niveau de la mer pour l'année 2020 :

- Niveau moyen : 0,19 m NGF/IGN69,
- Niveau des plus hautes eaux (Percentile 99 %) : 0,56 m NGF/IGN69.

Ces éléments vont fournir les bases de dimensionnement des ouvrages de protection du réseau d'assainissement contre les intrusions d'eau de mer.

Introduction

Le réseau d'assainissement unitaire de la ville de Marseille date de la fin du XIX^e siècle. Ce réseau a deux fonctions : en premier lieu, évacuer les eaux usées, mais aussi protéger contre les inondations. Afin d'assurer au mieux cette seconde fonction, le réseau est équipé de déversoirs d'orage qui permettent, pour les pluies exceptionnelles, d'évacuer les trop-pleins vers le milieu naturel. Cependant, ces déversoirs peuvent constituer des points d'entrée de l'eau de mer dans le réseau avec des conséquences néfastes sur le système d'assainissement.

Qu'apprend-on des relevés du marégraphe ?

Évolution du niveau de la mer à Marseille

En se basant sur la figure 1, il ressort que, depuis l'époque de la construction du réseau unitaire à nos jours, le niveau de la mer Méditerranée a augmenté de 20 cm, avec une accélération au fil des années. Selon l'Institut espagnol d'océanologie (cité par Chabartot, 2018), une accélération sensible est à noter depuis le début des années 2000 et, à ce jour, la croissance du niveau de la Méditerranée s'établit à environ 3 mm par an.

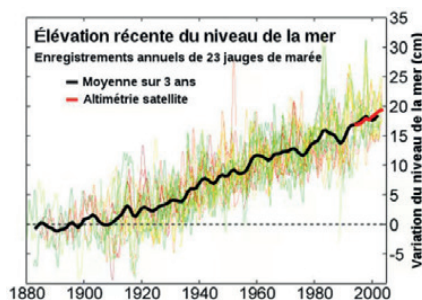


Figure 1. Évolution du niveau moyen de la mer de 1880 à nos jours. Moyenne sur 23 sites de suivi, répartis autour du monde (courbe noire), et suivi par satellite (courbe rouge). Graphique issu de l'article de Jérôme Petit et Guillaume Prudent cité en bibliographie.

Surcote marine

Une surcote marine est un dépassement anormal du niveau de la mer. Ce dépassement est induit par des conditions météorologiques inhabituelles (vent ou système dépressionnaire) combinant leurs effets à ceux des marées induites par la Lune et le Soleil.

Le suivi du niveau de la mer à haute fréquence, tel qu'il est réalisé au marégraphe de Marseille, est un outil précieux pour évaluer la fréquence et l'amplitude des surcotes observées à Marseille. L'analyse des données fournies entre 2013 et 2022 a permis de calculer les valeurs de surcote disponibles en figure 2 :

Quelles sont les projections du futur concernant l'évolution du niveau de la mer ?

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est l'organisme des Nations unies chargé d'évaluer les données scientifiques liées au changement climatique. Le GIEC a été créé pour fournir aux

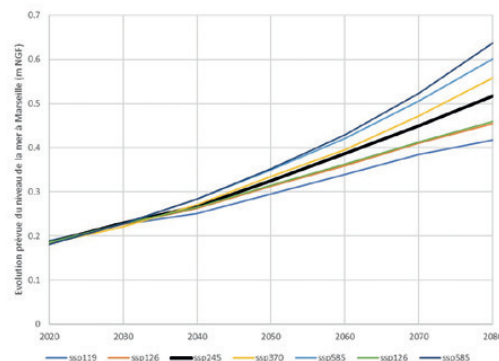


Figure 3. Évolution prévue du niveau moyen de la mer à Marseille (m NGF/IGN69) selon les différents scénarios établis par le GIEC.

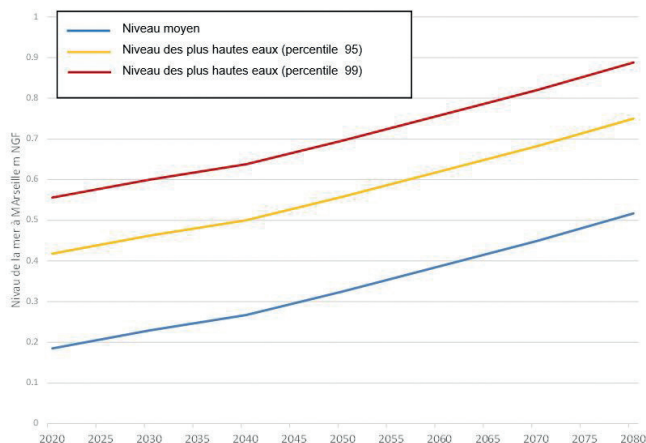


Figure 4. Niveau moyen et niveau des plus hautes eaux de la mer à Marseille (m NGF/IGN69) attendus jusqu'en 2080.

décideurs politiques des évaluations scientifiques régulières sur le changement climatique, ses implications et les risques futurs. Le sixième rapport d'évaluation du GIEC fournit des projections sur les futurs niveaux de la mer à travers le monde selon une gamme de scénarios futurs possibles.

Le scénario médian (ssp245) prévoit un niveau moyen de 0,35 m à l'horizon 2050 (figure 3).

La combinaison des projections du GIEC sur l'élévation du niveau moyen de la mer et des fréquences de surcote calculées à partir des niveaux enregistrés par le marégraphe permet d'établir les courbes des plus hautes eaux attendues jusqu'à l'horizon 2080 (figure 4).

On constate qu'un objectif de la protection du réseau contre les intrusions d'eau de mer 99 % du temps nécessite de rehausser les seuils de déversements à la cote 0,7 m NGF/IGN69 à l'horizon 2050 et 0,9 m NGF/IGN69 à l'horizon 2080.

Impact de l'élévation du niveau de la mer sur le réseau d'assainissement de Marseille

Les déversoirs d'orage ont été calés lors de la construction du réseau à la cote 0,40 m NGF/IGN69. Cette cote, initialement adaptée à la protection du système d'assainissement contre l'intrusion des eaux de mer, s'est révélée problématique à la fin du XX^e siècle.

■ Intrusions des eaux de mer dans le système d'assainissement

L'augmentation progressive du niveau de la mer a conduit à des épisodes d'entrée massive d'eau de mer avec les effets suivants :

- les apports massifs et ponctuels de chlorure induits par les épisodes de surcote dégradent la biomasse de l'étage biologique de la station d'épuration, construit en 1987 ;
- l'apport en sulfates contenus dans l'eau de mer, combiné à l'augmentation progressive de la température des eaux, favorise la production d'hydro-

Influence du niveau de la mer sur le taux de chlorures sur le réseau unitaire

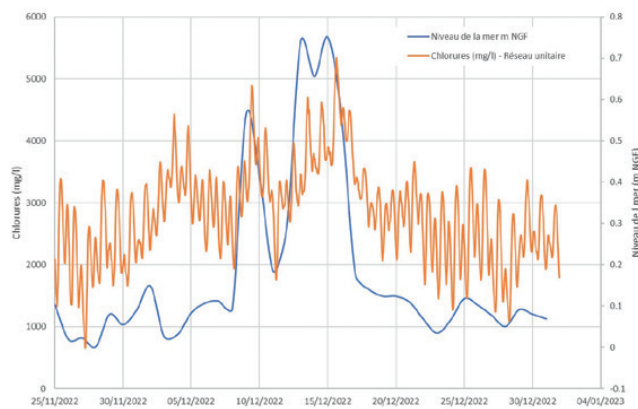


Figure 5. Influence du niveau de la mer sur le taux de chlorures dans le réseau unitaire.

gène sulfuré à l'origine de mauvaises odeurs ;

- les volumes conséquents apportés dans le réseau d'assainissement induisent une surconsommation électrique des postes de pompage et des ouvrages de dépollution.

La figure 5 montre l'influence du niveau de la mer sur le taux de chlorures en entrée de la station d'épuration des eaux usées (réseau unitaire) autour du 15/12/2022, date à laquelle le niveau de la mer a atteint la cote de 0,75 m NGF/IGN69.

■ Dégradation de la protection contre les inondations

L'augmentation du niveau des plus hautes eaux va également provoquer une dégradation de la fonction de lutte contre les inondations qu'assurent les déversoirs d'orage. En effet, l'élévation de cette cote de 0,56 m NGF/IGN69 en 2020 à la cote 0,70 m NGF/IGN69 en 2050 va contrarier l'évacuation des effluents au niveau des déversoirs.

La figure 6 montre les lignes d'eau simulées pour la pluie annuelle sur un déversoir d'orage en fonction de ces deux cotes.

On observe en 2050 l'apparition d'un point de débordement qui n'existait pas en 2020. L'élévation du niveau marin va donc créer de nouvelles problématiques de lutte contre les inondations.

Les travaux à engager

Afin de protéger les réseaux contre les intrusions d'eau de mer, la mesure la

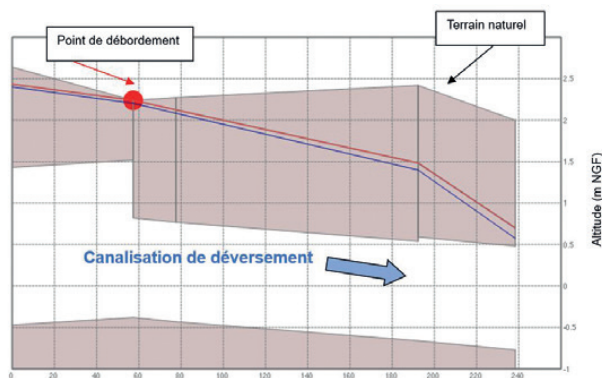


Figure 6. Résultats des modélisations des lignes d'eau dans une canalisation de déversement en fonction du niveau marin pour la pluie annuelle. Les zones colorées représentent le terrain naturel. La courbe bleue correspond au niveau des plus hautes eaux en 2020 (0,56 m NGF/IGN69) et la courbe rouge celui des plus hautes eaux en 2050 (0,70 m NGF/IGN69).

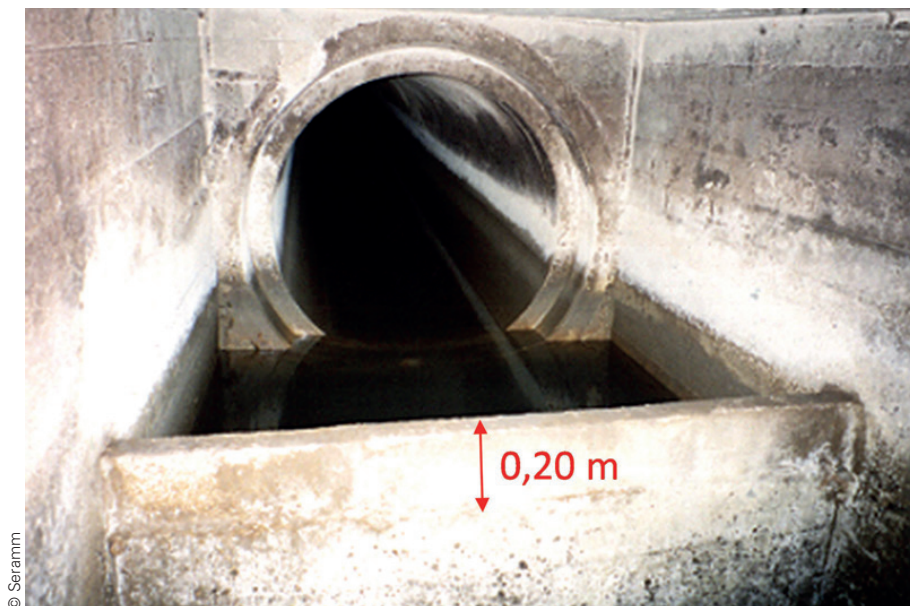


Figure 7. Rehausse de 20 cm réalisée sur les déversoirs en 2010.

plus simple est de rehausser les seuils de déversement. Ainsi, en 2010, les principaux déversoirs du réseau de Marseille ont été rehaussés à la cote 0,6 m NGF/IGN69 (figure 7).

Cependant, comme l'illustre la figure 8, les marges de rehausse supplémentaires des ouvrages sont parfois réduites si l'on veut préserver leurs capacités de déversement par temps de pluie. Par conséquent, de nouvelles solutions sont à imaginer pour un futur relativement proche.

Pour augmenter le niveau de protection contre les entrées d'eau de mer, tout en ne diminuant pas la capacité de déversement des ouvrages par temps de pluie, diverses solutions sont à l'étude : rehausses fixes, rehausses mobiles,

vannes motorisées, clapets hydromécaniques, stations de pompage et enfin, reprises de génie civil.

Conclusion

En conclusion, les effets de l'évolution du climat se traduisent à Marseille par une augmentation des températures et par une élévation du niveau de la mer. Les conséquences sur le système d'assainissement de Marseille se font ressentir sur les entrées d'eau de mer par les déversoirs d'orage et sur la protection contre les inondations. Face à ces problèmes, de nouvelles solutions sont à trouver dès aujourd'hui afin de lutter contre ces nuisances et de bien préparer l'avenir. Pour cela, la Métropole Aix Marseille

Provence, Seramm et SUEZ Eau France regroupent leurs compétences et se sont lancés dans une démarche pragmatique de mesures, de modélisation et de test de solutions. De nouvelles pratiques et de nouveaux montages financiers seront nécessaires pour s'adapter à ces changements. ●

Bibliographie

- LAPLACE D., 2018, *Le système d'assainissement de Marseille face aux changements climatiques TSM*.
 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 Paris, 638 p.
 CHABAROT P., 2018, https://www.notre-planete.info/actualites/2759augmentation_niveau_mer_Mediterranee
 NASA : <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>
 PETIT J. & PRUDENT G. 2008. *Changement climatique et biodiversité dans l'outre-mer européen*. UICN, Bruxelles. 196 p.

Contacts

Nicolas Hesse¹,
 nicolas.hesse@seram-metropole.fr,
 Amaury Perrin, Christine Nègre¹,
 Dominique Laplace¹

¹ Service Assainissement Marseille Métropole (Seramm Suez), Parc des Aigalades, 35 bd Capitaine Gèze, 13014 Marseille.

ABSTRACT

Climate change is a topical issue, and we propose to assess the consequences for Marseille's wastewater treatment system. In Marseilles, the effects are already being felt in terms of air and wastewater temperatures, as well as sea levels. Rising sea levels have an impact on storm overflows, which, if set too low, allow salt water to enter, degrading the performance of biological purification treatment or, conversely, compromising their hydraulic capacity for evacuation in wet weather. As a result, solutions are currently being studied to remedy these problems, taking into account future developments that are likely to exacerbate these phenomena.



Figure 8. Revanche résiduelle à la suite de la rehausse sur le déversoir Prohibé. La revanche est l'espace libre restant pour permettre le déversement des eaux. Le déversoir Prohibé est celui de la station de pompage appelée "Prohibé".

Intercomparaison par nivellement de précision de niveaux moyens de la mer aux principaux marégraphes hexagonaux

■ Sylvain LAVOUÉ - Olivier JAMET

L'IGN met en œuvre un réseau de nivellement de haute précision (le NIREF) reliant entre eux différents marégraphes présents sur les côtes métropolitaines continentales et contribuant à la référence verticale européenne. Ce réseau, s'il met en évidence des biais dans le système de référence légal des altitudes NGF/IGN69, offre également la possibilité de déterminer des différences de potentiel entre ces marégraphes et des dénivelées, d'ordre de grandeur décimétrique, entre les niveaux moyens des bassins océaniques. Néanmoins, l'évaluation de la qualité du NIREF par comparaison à des modèles de potentiel de pesanteur globaux montre qu'il semble subsister sur celui-ci une erreur résiduelle de quelques centimètres que des travaux en cours à l'IGN cherchent à mieux caractériser.

MOTS-CLÉS

Nivellement de haute précision, NIREF, référence verticale, marégraphie

Introduction

Lorsque l'on parle de niveaux moyens de la mer, il convient de distinguer niveau marin absolu, qui correspond à la hauteur d'eau par rapport à un référentiel absolu et géocentrique et niveau marin relatif observé localement par des instruments, par rapport au socle terrestre qui les supporte. Les différents marégraphes présents sur nos côtes entrent dans cette deuxième catégorie et enregistrent les variations relatives de hauteur du niveau de la mer local par rapport à un ou plusieurs points de référence situés sur la terre, à proximité du lieu de mesure. Le niveau de la mer est généralement exprimé par rapport à deux surfaces de référence globales qui définissent la forme de la Terre : l'ellipsoïde (référencement géométrique) et le géoïde (référencement dynamique).

L'ellipsoïde de révolution est la surface mathématique qui approxime au mieux le géoïde terrestre. Sa définition mathématique ne correspond pas exactement à la forme physique de la Terre, mais elle permet d'exprimer des coordonnées et de calculer des positions et des distances dans un référentiel unique et stable. Le référencement géométrique,

par rapport à l'ellipsoïde, permet de suivre l'élévation du niveau de la mer de manière globale, relativement au centre des masses de la Terre.

On définit le géoïde, quant à lui, comme étant une surface équipotentielle du champ de pesanteur qui coïncide le mieux avec le niveau moyen des océans au repos, à une époque de référence conventionnelle. La valeur correspondante du potentiel de pesanteur est notée W_0 . Par exemple, le W_0 choisi par l'Association internationale de géodésie est celui de la résolution de 2015, qui correspond à une estimation de la valeur du potentiel au niveau moyen des mers à l'époque 2010.0. Le référencement dynamique, par rapport au géoïde, permet de suivre les évolutions du relief océanique dues à la circulation générale, notamment aux courants côtiers. Dans la pratique, la détermination du géoïde est complexe car elle dépend de la répartition des masses dans l'océan, sur et à l'intérieur de la Terre. D'autre part, l'interface entre le géoïde terrestre réalisé par technique gravimétrique et le géoïde marin issu d'observations d'altimétrie spatiale, n'est pas bien maîtrisée et donc, le référencement dynamique ponctuel reste peu précis.

Pour améliorer le référencement dynamique des marégraphes, on peut s'appuyer sur un réseau de nivellement qui traduira directement les variations d'altitude entre les instruments et permettra d'accéder à un référencement dynamique commun. Notons tout de même que ce type de réseau est potentiellement attaché de biais liés aux techniques d'observation employées.

Le coût de mise en œuvre des techniques de nivellement direct traditionnel exclut d'emblée l'idée de procéder à un rattachement systématique des marégraphes entre eux, néanmoins, on peut s'appuyer sur des réseaux existants : en France métropolitaine continentale, le NGF/IGN69, réseau de référence altimétrique légal, est utilisé pour exprimer ces différences d'altitudes. Précisons qu'il s'agit bien ici de différences d'altitudes et pas de dénivelées observées : chaque marégraphe est rattaché localement à des repères dont l'altitude, issue d'une compensation globale des observations compatible avec l'estimation de différences de potentiel terrestre, est connue dans le système légal. Ce détail a toute son importance, car l'exactitude des altitudes ainsi obtenues dépend de la qualité du réseau compensé et pas de celle des dénivelées réellement observées. Or, nous savons aujourd'hui que le système légal français est entaché de biais, notamment un biais Nord-Sud d'une vingtaine de centimètres. Utiliser telles quelles les altitudes exprimées dans le système NGF/IGN69 conduirait ainsi à établir une dénivelée entre les marégraphes de Marseille et Dunkerque, donc une différence entre leurs niveaux des mers respectifs, erronée de plus de 20 cm. Le réseau de nivellement à vocation scientifique de l'IGN (le NIREF) peut permettre de répondre en partie à cette problématique, tout en nous interrogeant sur sa qualité et son évaluation.

Le NIREF, un réseau de nivellement de haute précision

Conscient des biais du réseau NGF/IGN69, depuis son établissement dans les années 70, l'IGN a entrepris en 1983, des mesures de nivellement de haute précision, reliant Marseille à Dunkerque¹. Réalisée intégralement en nivellement géométrique motorisé pour atténuer l'impact des phénomènes suspects de provoquer des erreurs systématiques (axe de visée plus haut, matériel plus lourd et plus stable, plus grande rapidité de mesure), à l'aide de niveaux optomécaniques Zeiss Ni-002 munis d'un compensateur à miroir réversible, cette opération a permis d'atteindre une précision qui n'a pas pu être surpassée par la suite, faute notamment de maintien des instruments disponibles en 1983. La reprise de traverses de précision comparable s'est effectuée de 2001 à aujourd'hui pour relier plusieurs points des côtes aux pays européens frontaliers (figure 1). Elle s'est appuyée sur des spécifications publiées en 1996 par l'ingénieur géographe en chef Henri Duquenne, avec des contraintes d'observations plus strictes que celles mises en œuvre pour le réseau traditionnel, mais des matériels différents de ceux utilisés en 1983. Ce réseau de nivellement de référence (dénommé aujourd'hui NIREF) est destiné à être utilisé dans de nombreux domaines comme la recherche sur les systèmes de référence verticaux, l'unification des systèmes de référence verticaux au niveau européen, l'étude de déformations de la croûte terrestre ou encore l'étude des variations du niveau de la mer. Ce réseau est composé de près de 12 000 dénivelées observées entre des points successifs, distants de quelques centaines de mètres au maximum. Ces dénivelées donnent une estimation des différences de potentiel terrestre via une valeur de gravité interpolée sur chacun des points dans le modèle de gravimétrie dense de l'IGN (voir encart).

Dans un contexte européen, l'IGN a poursuivi une démarche de densifica-

¹ Kasser, M. (1989). Un nivellement de très haute précision : la traversée Marseille-Dunkerque 1983. *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Série II*, 1989, pp. 695-700.

Figure 1. Itinéraires mesurés en NIREF (en bleu) et réseau de 1^{er} ordre du NGF/IGN69 (en magenta).

tion de ce réseau de haute précision, en réalisant une nouvelle compensation des données du nivellement de 1^{er} ordre du réseau NGF/IGN69² partiellement contraintes sur le NIREF afin d'obtenir un réseau densifié offrant le même ordre de grandeur de précision et d'exactitude que le NIREF.

La mise en œuvre du NIREF – considéré plus exact que le nivellement historique – a permis de confirmer l'existence d'une pente Nord-Sud entre NGF/IGN69 et la réalité physique (figure 2). Mises à part quelques anomalies locales, ces écarts croissent régulièrement avec la latitude,

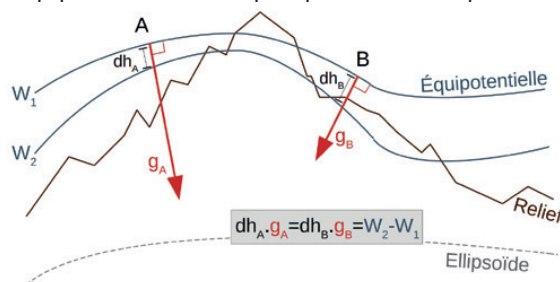
² Pour plus de précision sur le réseau de nivellement NGF/IGN69, voir : https://geodesie.ign.fr/index.php?page=reseaux_nivellement_francais

allant de 0 cm à Marseille (point de référence) à 18 cm à Dunkerque. NIREF confirme donc le supposé biais Nord-Sud du système NGF/IGN69 et donne une indication sur son amplitude.

Ces observations semblent par ailleurs confirmées par les observations des huit marégraphes rattachés à la fois au NGF/IGN69 et au NIREF. On peut comparer en ces points, trois références : deux références altimétriques (le NGF/IGN69 et le NIREF) et une référence maritime (on utilisera ici le niveau moyen NM). La définition du niveau moyen dépend de la série temporelle d'observation utilisée pour le calculer. Cette durée est variable selon les données marégraphiques diffusées par le Shom dans le

La pesanteur et le potentiel de pesanteur

La pesanteur est en tout point perpendiculaire à la surface d'un liquide au repos. Cette surface, sur laquelle le potentiel gravitationnel (W) est constant, est appelée surface équipotentielle. La différence de potentiel entre deux de ces surfaces, le long de la verticale s'écrit $dW = g \cdot dh$ où dh est la distance en mètres séparant les deux surfaces en un point et g la pesanteur en ce point. Cette relation ne dépend pas du lieu de la mesure. Il existe une infinité de surfaces équipotentielles dont les principales caractéristiques sont qu'elles ne sont pas parallèles et qu'elles ne s'entrecroisent pas. On note W_0 la valeur du potentiel sur la surface particulière correspondant à celle des "océans au repos", prolongée sous les continents.



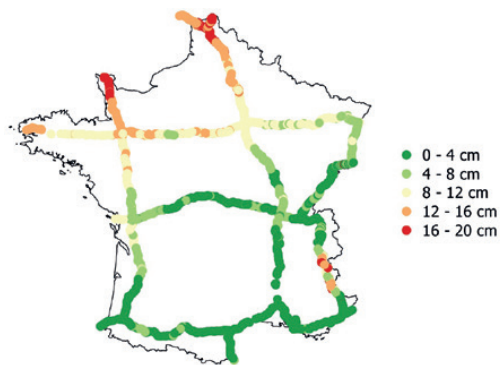


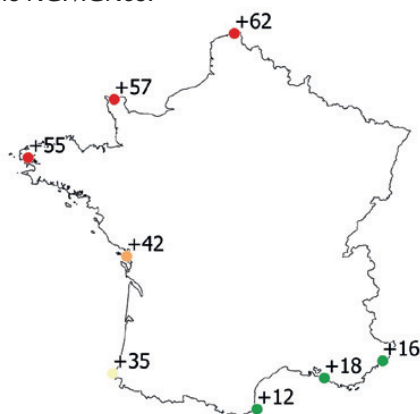
Figure 2. Écart entre altitudes NGF/IGN69 et altitudes NIREF en cm.



document des Références altimétriques maritimes (RAM) ; c'est pourquoi, dans un souci d'harmonisation, on utilisera ici un niveau moyen calculé à partir des données de 2000 à 2022, diffusées par le Système d'observation des eaux littorales (SONEL). Les écarts présentés en figure 3 expriment l'altitude de ce niveau moyen par rapport à la référence NGF/IGN69 ou par rapport au NIREF.

On note tout d'abord que la valeur de +18 cm à Marseille peut être lue comme la hausse du niveau moyen de la mer, à cet endroit, depuis la fin du XIX^e siècle, au moment de l'établissement de l'origine du système altimétrique NGF/IGN69, jusqu'à aujourd'hui. Le NIREF ayant par convention le même point d'origine que le réseau légal, on y retrouve le même écart.

Selon les données issues du NGF/IGN69, le niveau moyen océanique croît significativement avec la latitude, alors que, selon le NIREF, le niveau moyen océanique est plus constant sur la façade atlantique et le long des côtes de la Manche, ce qui semble plus cohérent, et confirme l'existence d'un biais dans le NGF/IGN69.



Enfin, NIREF permet également d'estimer une dénivellée d'une quinzaine de centimètres entre le niveau moyen de la Méditerranée et le niveau moyen océanique, comme l'ont déjà remarqué Johan Leclercq et Alain Coulomb³, ce qui est cohérent avec les différences observées par l'Ordre des géomètres-experts lors d'une campagne de mesures réalisée en 2016 à l'occasion du 70^e anniversaire de l'Ordre.

Effet des conventions de définition des altitudes

Avant d'aller plus loin, il convient de rappeler quelques conventions en matière de définition des altitudes. Une altitude exprime l'éloignement d'un objet par rapport à un niveau de référence, généralement un niveau moyen de la mer. De façon générale, l'altitude est donnée par (Heiskanen et Moritz, 1967) :

$$H_M = \frac{C_M}{\gamma^*} = \frac{-W_M + W_A}{\gamma^*}$$

où M est le point où on détermine l'altitude, A est un point de référence dont l'altitude est nulle par convention, par exemple un marégraphe, et γ^* est une fonction du seul point M qui a la dimension d'une accélération. Le choix de γ^* définit le type d'altitude. On distinguera ici plusieurs types d'altitudes : les altitudes dites usuelles (H_M) qui peuvent être des altitudes orthométriques ou des altitudes normales et la cote géopotentielle (C_M), à vocation plutôt scientifique.

3 XYZ n° 153, 4^e trimestre 2017, pp. 52-54

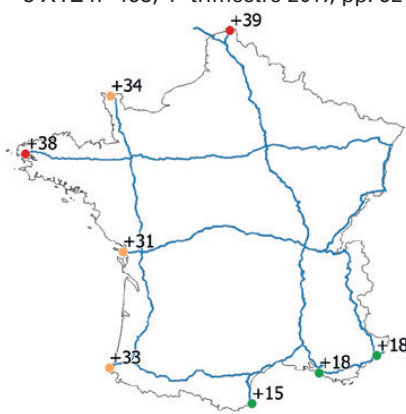


Figure 3. Altitudes du niveau moyen des mers sur la période 2000-2022 (cm), exprimées dans les systèmes NGF/IGN69 (à gauche) et NIREF (à droite).

Dès lors qu'on essaie de comparer entre elles des altitudes usuelles, on se heurte assez vite aux problématiques des différences d'origine et de définition de la grandeur γ^* , ces conventions étant notamment différentes d'un pays à l'autre.

En France métropolitaine, le système d'altitude en vigueur est un système d'altitudes dites "normales", c'est à dire pour lequel la grandeur γ^* est déterminée à partir d'un modèle de la pesanteur terrestre basé sur un ellipsoïde. Il utilise l'ellipsoïde de Hayford 1909 ainsi que le système de référence gravimétrique CFG65 et se réfère au niveau moyen de la mer à Marseille mesuré à la fin du XIX^e siècle comme point origine. La publication des altitudes NIREF est effectuée dans le même système. Une comparaison avec les valeurs des altitudes exprimées dans les systèmes internationaux (ellipsoïde GRS80 et référence gravimétrique IGSN71) montre que si les écarts sur les côtes sont quasiment nuls, il y a des différences de plusieurs dizaines de centimètres dans les secteurs montagneux.

Pour cette raison, nous utiliserons par la suite des cotes géopotentielles qui expriment directement la différence de potentiel par rapport au point de référence A. La cote géopotentielle en un point M est notée C_M et s'obtient lorsque $\gamma^*=1$. Cette altitude ne s'exprime pas en mètres, contrairement aux altitudes usuelles, mais en $m^2 s^{-2}$ ou en unités géopotentielles (UGP) telles que $1UGP=10SI=10m^2 s^{-2}=10^6 mGal.m$. À 2 % près, les valeurs des cotes géopotentielles en UGP sont assimilables à des valeurs d'altitude en mètres.

Le NIREF comme outil d'intercomparaison entre quelques marégraphes hexagonaux

Indépendamment de sa publication traditionnelle comme liste d'altitudes dans le système légal français NGF-IGN69, le NIREF est construit à partir d'observations de dénivellées qui, associées à des estimations de la pesanteur aux lieux de mesure, conduisent à des estimations de différences de potentiel de

pesanteur entre les points. Ces différences de potentiel sont compensées pour tenir compte des redondances des observations et conduisent ainsi à une estimation des cotes géopotentielles par rapport au point de référence des réseaux français.

Le *tableau 1* présente les cotes géopotentielles des niveaux moyens de la mer sur la période 2000-2022 des marégraphes métropolitains rattachés au NIREF.

On constate, comme nous l'avions fait sur les altitudes, que les bassins océaniques montrent des cotes assez homogènes. On constate également qu'il y a une différence de potentiel d'une quinzaine de centièmes d'UGP entre le niveau moyen de la Méditerranée et celui de la façade atlantique du territoire hexagonal, et d'une vingtaine de centièmes d'UGP entre la façade méditerranéenne et la Manche.

Évaluation de l'exactitude du NIREF

On pourrait s'en tenir à ces premiers résultats, pourtant, lorsqu'on cherche à étudier de manière fine la problématique des niveaux moyens des mers, il est indispensable de s'assurer de la qualité des sources de données utilisées et le nivellement ne déroge pas à la règle. Dans cette optique, l'IGN a entrepris une campagne de réobservation de la traverse NIREF reliant Marseille à Dunkerque entre 2012 et 2016. Or, les calculs qui en ont résulté montrent une variation Nord-Sud de 0,1 UGP (environ 10 cm) entre les deux itérations (*figure 4*). Cet écart croît fortement sur les 300 premiers kilomètres du tracé où les itinéraires suivis et les méthodes d'observation employées sont différents, ce qui remet en cause la

Bassin	Localisation	Cote en UGP
Méditerranée	Marseille	0,00
	Nice	0,00
	Port-Vendres	-0,03
Façade atlantique	Saint-Jean-de-Luz	0,14
	La Rochelle	0,13
	Brest	0,20
	Cherbourg	0,16
Manche	Dunkerque	0,21

Tableau 1. Différences de potentiel en UGP par rapport au marégraphe de Marseille.

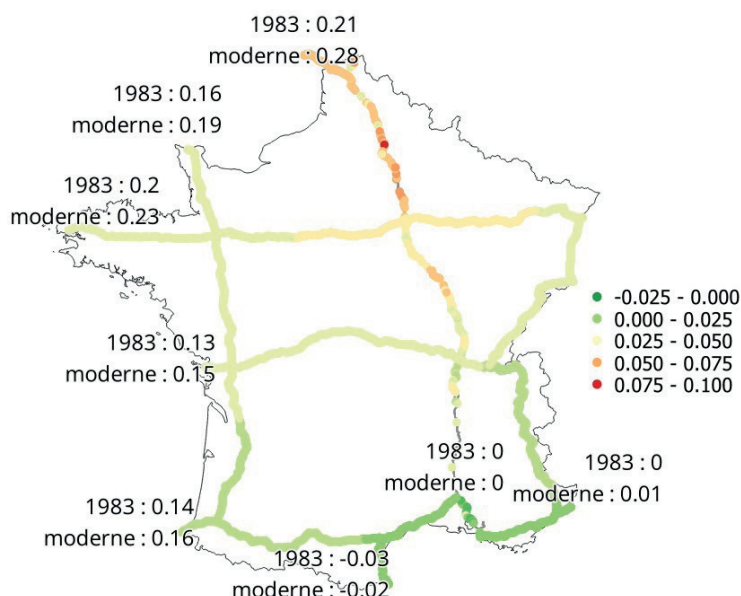


Figure 5. Écarts, en UGP, entre les cotes géopotentielles compensées selon que l'on calcule avec les observations de la traverse Marseille-Dunkerque de 1983 ou celles issues de sa réobservation moderne.

choix de certains modes opératoires. En outre, on constate que la différence de potentiel le long de la façade atlantique et du littoral de la Manche croît de façon plus importante si l'on tient compte des observations modernes, ce qui tendrait à penser que la traverse ancienne est plus exacte (*figure 5*).

Néanmoins, un certain nombre de points du NIREF ayant été également observés par des techniques GNSS, cela offre la possibilité d'étudier cette hypothèse en utilisant des modèles de potentiel de pesanteur globaux, ici le modèle mondial EGM2008 et le modèle européen EGG2015. Le tableau suivant présente des statistiques sur les écarts entre les valeurs de potentiel, en UGP, déduites des différentes solutions NIREF par rapport aux modèles globaux. Deux solutions de NIREF sont évaluées : l'une excluant la reprise moderne : solution 1983, et l'autre excluant la

mesure ancienne : solution moderne (*tableau 2*). S'il est impossible d'estimer un biais entre NIREF et modèle de champs globaux puisqu'on ne connaît pas précisément le potentiel du point de référence du NIREF, on peut tout de même s'appuyer sur ces éléments pour évaluer la qualité des différences de potentiel du réseau NIREF au regard de ces modèles.

On constate, en effet, que le NIREF est plutôt cohérent avec les modèles globaux comme le montrent les écarts, toujours inférieurs au décimètre, avec un écart-type de l'ordre de 3 cm. Cette dispersion de quelques centimètres s'explique par ailleurs, pour partie par la qualité des observations GNSS, par une temporalité différente entre la mesure de nivellement et la mesure GNSS et par la qualité des modèles globaux eux-mêmes, qui peut être décimétrique dans les zones de montagne.

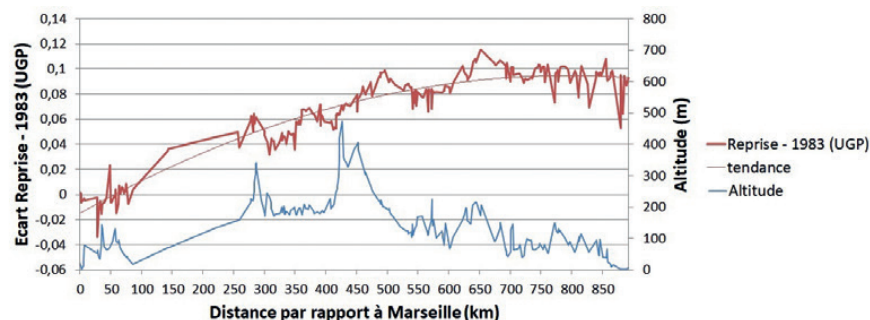


Figure 4. Écart entre les deux observations de la traverse reliant Marseille à Dunkerque (en rouge ; les altitudes le long du parcours sont représentées en bleu).

	Sol. moderne - sol. 1983	Sol. 1983 - EGG15	Sol. 1983 - EGM08	Sol. moderne - EGG2015	Sol. moderne - EGM08
Min recentré	-0,021	-0,057	-0,041	-0,054	-0,055
Max recentré	0,018	0,070	0,088	0,077	0,073
Écart-type	0,009	0,033	0,032	0,029	0,030

Tableau 2. Évaluations des solutions de NIREF.



Dans le détail, si les deux observations de la traverse entre Marseille et Dunkerque n'ont pas une grande influence sur les écarts avec les modèles en fonction de la longitude, elles influent de façon notable sur les écarts en fonction de la latitude. De manière générale, on constate en effet une meilleure cohérence, en fonction de la latitude, du réseau compensé à partir des observations modernes plutôt qu'à partir des observations de 1983, tant par rapport à EGM2008 que par rapport à EGG2015 (figure 6). La solution moderne du NIREF montre en effet une pente plus faible par rapport aux modèles globaux que la solution 1983. Ces indications tendent à mettre en avant une meilleure exactitude des observations modernes au regard des modèles et ce, en dépit des écarts plus importants constatés au niveau des marégraphes. Elles doivent cependant être prises avec précaution dans la mesure où les modèles globaux qui servent ici de référence exploitent des valeurs d'altitude et peuvent hériter d'une partie de leurs biais.

Ces observations montrent d'autre part, qu'il est possible qu'il subsiste une pente dans le NIREF, de l'ordre de 7 mm par

degré, soit une erreur résiduelle d'environ 3 cm entre Marseille et Dunkerque. Une analyse similaire en cours de réalisation sur le réseau NIREF complet, densifié par les observations de 1^{er} ordre du réseau NGF/IGN69, tend à confirmer cette relative cohérence du NIREF par rapport à EGG2015, d'une part et à EGM2008, d'autre part.

Enfin, partant de ces premières analyses, l'IGN travaille actuellement à l'acquisition de mesures GNSS complémentaires sur le réseau NIREF afin de conforter ces conclusions et d'offrir, à terme, une meilleure maîtrise de sa qualité.

Conclusion

La France s'est dotée d'un réseau de nivellement de grande précision, le réseau NIREF, qui a permis de mettre en évidence des biais importants dans le système de référence légal NGF/IGN69 et qui contribue à la construction d'une référence européenne de qualité.

Le réseau NIREF met en évidence des différences de cotes géopotentielles d'ordre de grandeur décimétrique

entre les niveaux moyens des bassins océaniques, par exemple une quinzaine de centimètres entre Méditerranée et façade atlantique. Néanmoins, ces résultats sont à considérer avec prudence car, malgré des spécifications d'observation exigeantes, il subsiste une incertitude de quelques centimètres sur ce réseau réalisé au fil de plusieurs décennies. Cette incertitude, dont l'impact est davantage visible en fonction de la latitude, est, aujourd'hui encore, mal maîtrisée et découle tant de variations gravimétriques locales imparfaitement modélisées, que des modes opératoires variés mis en œuvre par l'IGN au fil du temps. Ceci étant, cette incertitude reste du même ordre de grandeur que celle des modèles de potentiel de pesanteur globaux, notamment européens : EGG2015 étant par exemple évalué à 3 cm d'écart-type sur l'ensemble du continent.

C'est dans ce contexte que l'IGN travaille sur des améliorations (évaluation des biais, combinaison d'observations comme cela est réalisé dans le cadre du projet SONEL) pour faire progresser à la fois la qualité de la référence européenne et la cohérence terre-mer des références géodésiques. ●

CONTACTS

Sylvain LAVOUÉ, IGN, sylvain.lavoue@ign.fr
Olivier JAMET, IGN, olivier.jamet@ign.fr

ABSTRACT

The French National Institute of Geographic and Forest Information (IGN) implements a high-precision leveling network called NIREF, connecting various tide gauges along the French continental coasts and contributing to the European vertical reference. This network, while highlighting biases in the legal altitude reference system NGF/IGN69, also provides the opportunity to determine potential differences between these tide gauges and decimetric elevation differences between the mean levels of ocean basins. Nevertheless, an evaluation of this comparison tool with respect to global gravity potential models suggests that it seems to be a few centimeters residual error in NIREF. IGN is currently working at a better assessment of this residual error.

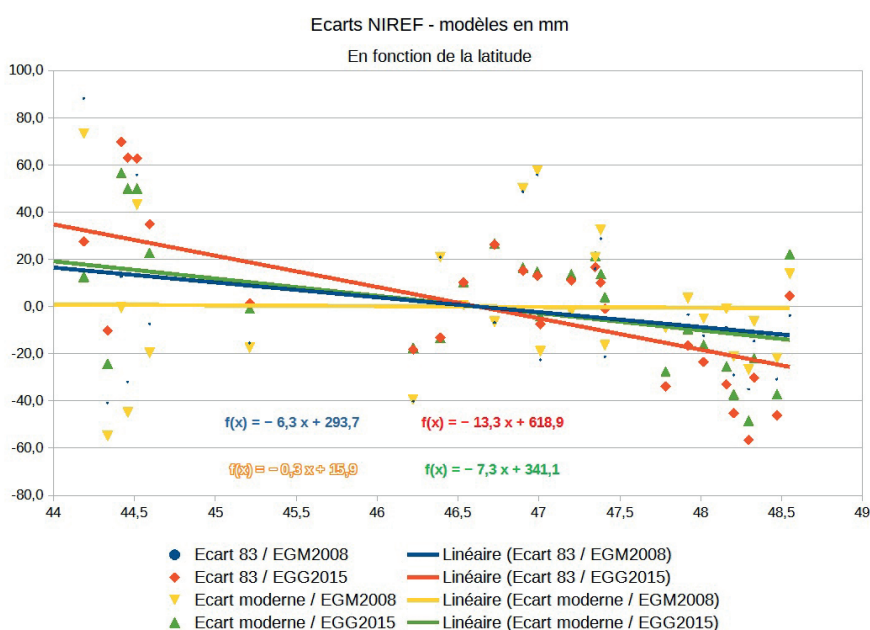


Figure 6. Écarts entre NIREF 1983 et NIREF moderne par rapport aux modèles globaux EGM2008 et EGG2015, en mm, en fonction de la latitude.



Retour sur 20 ans de mesures marégraphiques pour la surveillance des tsunamis et l'alerte opérationnelle

■ Hélène HÉBERT

Un tsunami est un train de vagues océaniques déclenché majoritairement suite à un séisme sous-marin, une éruption volcanique, un éboulement de roches dans l'eau. Très observés dans le Pacifique où ils sont plus fréquents, les tsunamis se produisent dans la plupart des mers et océans où la géologie est active. Peu détectable au large, où leur amplitude est de quelques centimètres, la dangerosité des tsunamis se manifeste lors des amplifications à la côte, où ils peuvent être catastrophiques, et où les marégraphes sont les instruments privilégiés pour les détecter et les mesurer. Cet article montre plusieurs exemples de tsunamis enregistrés par des marégraphes, puis ouvre sur des perspectives de moyens futurs d'observation au large de ces phénomènes. Les tsunamis sont surveillés, pour les autorités, par des centres d'alerte dédiés, tel en France le Cenalt (Centre national d'alerte aux tsunamis), opérationnel au CEA depuis 2012 vis-à-vis des côtes méditerranéennes et atlantiques de la France, et qui s'appuie sur des données des marégraphes mises à disposition par le Shom dans ce cadre, et partagées avec les autres centres d'alerte internationaux.

MOTS-CLÉS

Nivellement de haute précision, NIREF, référence verticale, marégraphie

Introduction sur l'aléa tsunami

Les grands séismes sous-marins provoquent en quelques minutes des déformations importantes du fond de la mer, qui peuvent déclencher des tsunamis, d'autant plus forts si la magnitude est grande et si la rupture sismique est peu profonde dans la croûte. Les trains de vagues générés peuvent se propager sur plusieurs milliers de kilomètres, pendant plusieurs heures. Parfois, les vagues, relativement atténuées pendant la propagation, sont réamplifiées sur des côtes très éloignées de la source. Ces différentes étapes décrivent la vie d'un tsunami, depuis sa source jusqu'à son amplification à la côte, où s'exprime sa dangerosité, parfois responsable de catastrophes [1], [2].

Les tsunamis peuvent aussi être provoqués par des phénomènes volcaniques, ou par des glissements de terrain impactant la couche d'eau. Généralement, dans ce cas, l'atténuation au cours

de la propagation est nettement plus marquée, les amplitudes décroissent plus vite, rendant les effets à distance beaucoup moins considérables, mais souvent majeurs près de la source.

Les zones sources de séismes "tsunamigéniques" se retrouvent dans la plupart des mers et océans, le plus fréquemment dans le Pacifique (les grandes subductions autour de l'océan, plusieurs fois à dizaines de fois par siècle), mais aussi, moins fréquemment, dans l'océan Indien, aux Antilles, au large de la péninsule ibérique et dans toute la Méditerranée.

Le point commun de tout tsunami est son amplification à la côte, après une phase de propagation de quelques minutes à plusieurs heures, voire plus d'une journée dans les grands océans. Le tsunami est généralement de faible amplitude au large, mais est observable, mesurable, à la côte, sur les plages, dans les ports, et s'il est suffisamment fort, sur les falaises. Comme le train d'ondes se propage pendant

plusieurs heures, les effets côtiers sont des successions de surcotes et de décotes qui peuvent durer plus de 24 heures, toutes les 5 à 40 minutes suivant les cas. Dans les cas majeurs, cela conduit à des retraits de la mer parfois au-delà de la marée basse, alternant avec des montées de la mer pouvant atteindre plusieurs mètres verticalement, l'ensemble provoquant les dégâts dans les ports, sur les plages et sur le littoral.

Les instruments mesurant directement les tsunamis à la côte sont les marégraphes déployés dans les ports, qui permettent avant tout de mesurer la marée océanique, ainsi que l'évolution du niveau de la mer sur de longues durées, par exemple dans le cadre du changement climatique. Ces mesures reflètent une observation ponctuelle dans un port, mais pas toujours les amplitudes des effets du tsunami sur les rivages autour, qui les excèdent parfois largement.

Dans ce qui suit, plusieurs exemples illustrent l'apport de ces données pour comprendre les tsunamis. Les mesures au large sont aussi aujourd'hui de plus en plus accessibles, avec des capteurs de pression au fond de la mer, rendant possible la mesure des tsunamis avant leur arrivée à la côte, perspective intéressante pour le suivi par les systèmes d'alerte.

Comment mesurer et analyser un tsunami sur un marégramme

Avant 2004, les réseaux marégraphiques du Pacifique étaient souvent bien adaptés pour mesurer les tsunamis. Par exemple, le séisme du 25 septembre 2003 au Japon





(magnitude 8,3) a provoqué un tsunami de 4 mètres localement, très destructeur, qui s'est ensuite propagé dans le Pacifique. En Polynésie française, les îles Marquises sont très sensibles à l'amplification des tsunamis, et le tsunami y est arrivé une douzaine d'heures après le séisme. La *figure 1* illustre l'arrivée de ce tsunami, superposée à l'onde de marée représentée pendant 24 heures, mesuré par le marégraphe de Taiohae à Nuku Hiva (îles Marquises, Polynésie française), opéré par l'Université d'Hawaï. Le tsunami, bien détectable, et modéré (environ 0,2 mètre crête à creux, si on filtre la marée), n'a pas fait de dégâts significatifs.

La même année, le 21 mai 2003, un fort séisme (magnitude 6,8) s'est produit au large de Boumerdès (Algérie). De faible profondeur et provoquant suffisamment

de déformation verticale du fond de la mer, ce séisme a déclenché un tsunami qui a provoqué des dégâts importants sur plusieurs côtes méditerranéennes (Baléares, Côte d'Azur), atteignant 2 à 3 mètres d'amplitude [3]. Les données marégraphiques disponibles sont contrastées dans l'ouest de la Méditerranée. Par exemple (*figure 2*), le marégraphe dans le port de Sant Antoni (Ibiza, Baléares) y a enregistré une amplitude de 2 mètres environ, reflétant l'impact très marqué aux Baléares où plusieurs quais ont été inondés. Le marégraphe de Nice a enregistré un signal peu détectable, d'une amplitude de quelques centimètres. L'appareil de l'époque, déjà numérique, ne produisant que des données intégrées et restituées toutes les 10 minutes, contre 2 minutes à Sant Antoni, la mesure ne permet

pas de montrer la complexité du train d'ondes tsunami, dont la période était de 10 à 20 minutes. Sur les côtes françaises proches, le tsunami a provoqué des variations du niveau de la mer d'au moins 1 à 2 mètres, par exemple dans le port de la Figueirette (Alpes-Maritimes) qui s'est vidé à plusieurs reprises [3].

La simulation numérique est un outil privilégié pour expliquer les observations marégraphiques. Elle s'appuie sur de nombreux paramètres dépendant principalement des caractéristiques sismologiques, mais aussi sur des modèles bathymétriques décrivant la profondeur d'eau en tout point de la propagation, y compris en détail dans les ports et les baies (maille de 5 à 20 mètres si possible). Ces études permettent de comprendre des événements passés, comme pour le tsunami déclenché par le séisme d'El Asnam en Algérie en 1980 (*figure 3*), où différents modèles de séisme source sont testés [5].

Extension depuis 2004 des systèmes d'alerte aux tsunamis

Suite à la catastrophe du tsunami de l'océan Indien déclenché par le séisme de Sumatra (Indonésie, magnitude 9,2), le 26 décembre 2004, la situation des réseaux marégraphiques a considérablement évolué pour ce qui concerne les tsunamis.

© D. Reymond, Centre Polynésien de Prévision des tsunamis à Tahiti

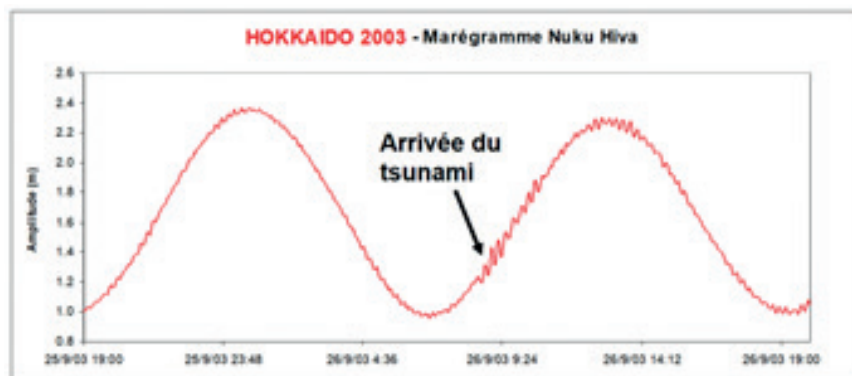


Figure 1. Marégramme à Taiohae (Nuku Hiva, îles Marquises) mesuré lors du tsunami provenant de Hokkaido (Japon) en septembre 2003. L'amplitude de la marée est de 1,40 m environ, celle du tsunami n'excède pas 0,15 à 0,20 m et s'exprime ici pendant au moins 6 heures.

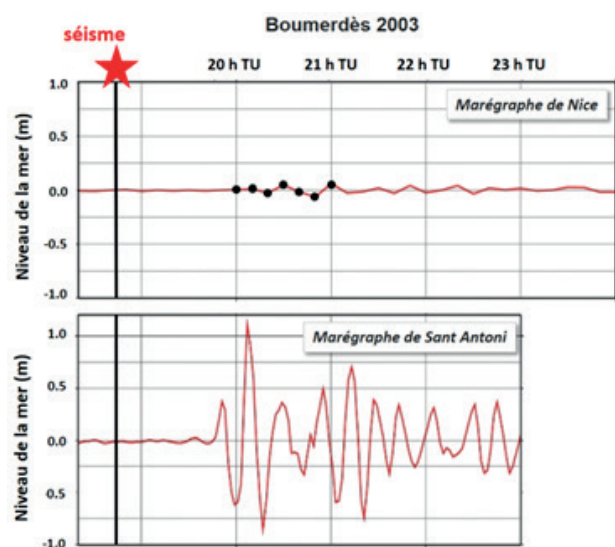


Figure 2. Marégrammes à Nice et à Sant Antoni lors du tsunami du 21 mai 2003 en Méditerranée occidentale, après le séisme de Boumerdès. Les données ont été filtrées de la marée pour ne conserver que le signal tsunami (échantillonnage 2 min à Sant Antoni, 10 min à Nice) (d'après [4]).

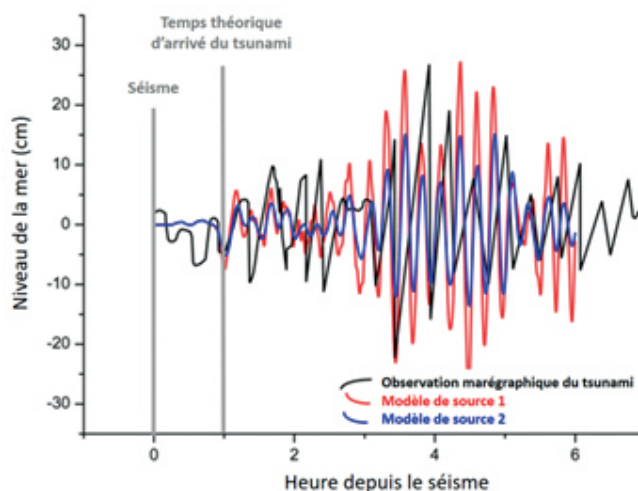


Figure 3. Marégramme dans le port d'Alicante (Espagne) (en noir), filtré de la marée, après le séisme d'El Asnam (magnitude 7,3) du 10 octobre 1980. Les deux modèles testés ici (rouge et bleu) permettent d'ajuster certaines caractéristiques du tsunami et de discuter des paramètres du séisme (adapté de [5]).

Situation en France, pour la Méditerranée occidentale

La France a participé dès 2005 à cette dynamique et a soutenu la création du Centre national d'alerte aux tsunamis (Cenalt), opérationnel depuis 2012, pour surveiller en permanence (24h/24), les côtes métropolitaines exposées de la Méditerranée occidentale et de l'Atlantique nord-est, pour les ministères de l'Intérieur et de la Transition écologique. Dans le cadre de la construction du Cenalt, mais aussi pour la mission de Vigilance vagues-submersion, le Shom a modernisé et densifié le réseau marégraphique RONIM, dont les données sont reçues en temps réel au Cenalt via des liaisons dédiées robustes.

Coordonné et maintenu par le CEA/DAM (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Direction des applications militaires), sur son site de Bruyères-le-Châtel, le Cenalt s'appuie sur les données sismiques et marégraphiques de ses partenaires CNRS/INSU (Institut national des sciences de l'univers) et Shom (Service hydrographique national), pour construire et diffuser les messages d'alerte vers la Sécurité civile.

Le Cenalt analyse en continu les données sismiques et marégraphiques. En quelques minutes, après les premières estimations automatiques, l'opérateur de permanence confirme la détection et les caractéristiques du séisme. Selon les paramètres, il diffuse les messages, envoyés 15 minutes maximum après l'heure du séisme, au Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises (Cogic) du ministère de l'Intérieur et, dans le cadre de la COI/UNESCO, aux centres homologues régionaux (Portugal, Italie, Grèce, Turquie) ainsi qu'aux organismes et autorités abonnés. Si un séisme potentiellement tsunamigène est détecté, le Cenalt surveille le niveau de la mer via le réseau de marégraphes du Shom, et des instituts de la région, afin de valider ou d'infirmer la propagation d'un tsunami, en mesurant et transmettant ses caractéristiques (heure d'arrivée, amplitude).

En 2021, suite à un séisme en Algérie (magnitude 5,9), le Cenalt a mesuré sur plusieurs marégraphes (figure 5)

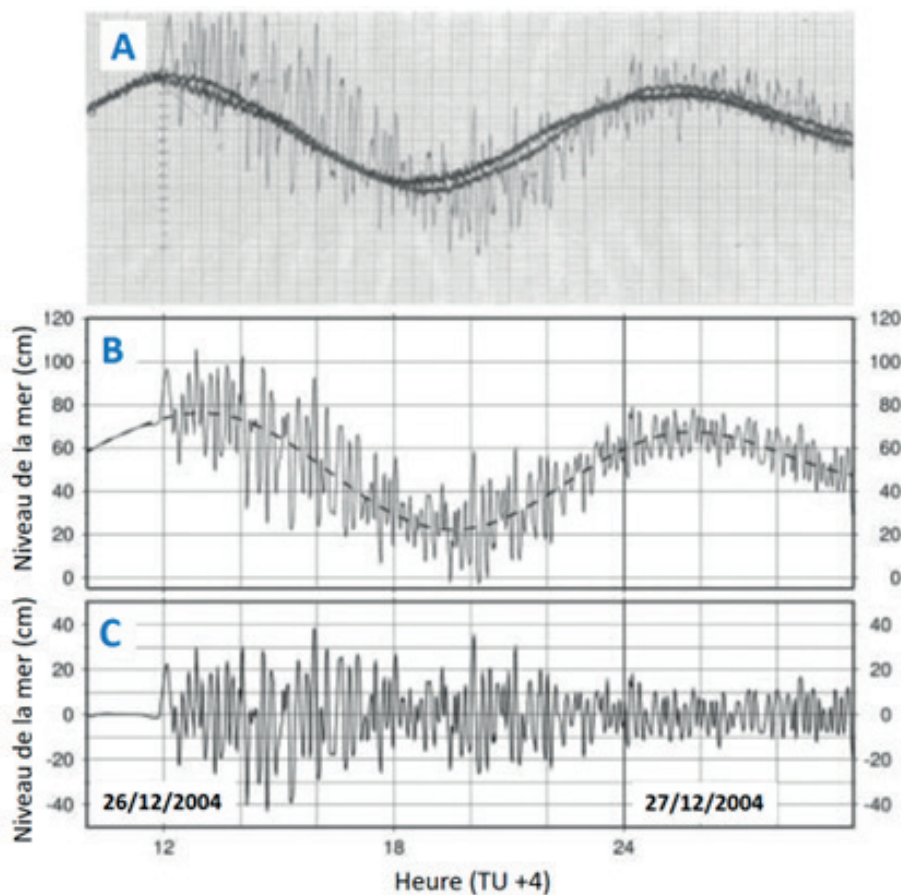


Figure 4. Enregistrement marégraphique original du tsunami de 2004 dans l'océan Indien, dans le port de la Pointe des Galets, avec trois jours de signaux de marée superposés (A), numérisés (B) et finalement filtrés (C) pour extraire le signal tsunami, ici sur une durée de 18 h environ, avec une amplitude maximale proche de 80 cm (adapté de [6]).

À l'époque, très peu de données de marégraphes étaient disponibles hors Pacifique pour étudier les tsunamis, et les observations du tsunami de 2004 reposent parfois davantage sur les témoignages de victimes (photographies, vidéos). À la Pointe des Galets (île de La Réunion), les données du marégraphe analogique OTT R16 ont néanmoins permis de reconstituer les caractéristiques du tsunami (figure 4), arrivé environ 7 heures après le séisme, qui a produit des dégâts portuaires importants (rupture d'amarres par exemple), et des hauteurs de vagues de 2 à 3 mètres autour de l'île.

En 2005, la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (COI/Unesco) a établi des Groupes de coordination intergouvernementaux (GIC) dans tous les océans et mers concernés (océan Indien, Caraïbes, Nord-Est Atlantique et Méditerranée) sur le modèle de celui

formalisé depuis 1965 dans le Pacifique [7]. Chaque État membre peut contribuer à cette dynamique, en particulier en mettant à disposition des données pour faire fonctionner les centres d'alerte établis dans ce cadre.

À l'aide des réseaux sismiques, les centres d'alerte détectent, localisent et caractérisent les séismes. L'objectif est de définir rapidement si un tsunami a pu être généré, afin d'envoyer dès que possible les messages d'alerte vers les autorités nationales (les sécurités civiles en particulier), et également vers les autres centres d'alerte.

Le déclenchement et la propagation des tsunamis sont suivis pendant plusieurs heures sur les réseaux marégraphiques. Les données mises à disposition dans ce but permettent de valider ou d'infirmer la présence d'un tsunami, et les caractéristiques mesurées sont partagées avec les autorités et les autres centres d'alerte.

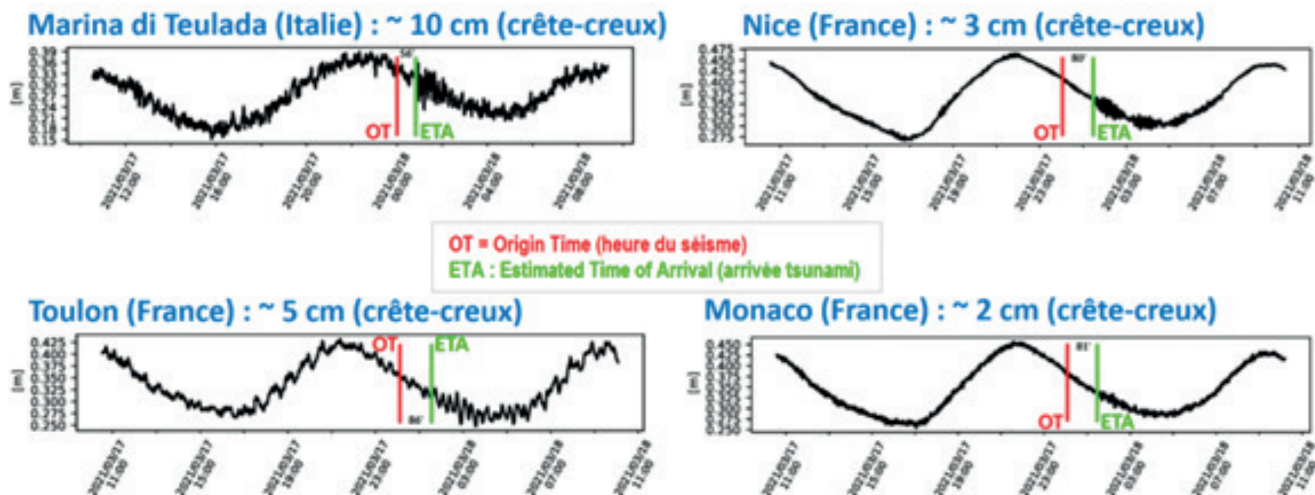


Figure 5. Enregistrements marégraphiques dans quatre ports, suite au séisme du 18 mars 2021 au large de l'Algérie. Les données des marégraphes modernisés, mises à disposition par le Shom pour le Cenalt, permettent de mesurer un tsunami de quelques centimètres dans les ports français.

le passage d'un tsunami de très faible amplitude, en particulier dans trois ports français environ 1 h 40 après le séisme. Les valeurs sont compatibles avec le message diffusé en 9 minutes, de niveau "information" (pas de risque avéré). C'est grâce à la très bonne sensibilité de ces capteurs qu'un tel phénomène a pu être mesuré pour la première fois en France, depuis que le Cenalt surveille en temps réel de tels phénomènes en Méditerranée.

Perspectives d'évolution pour l'alerte aux tsunamis

Le Cenalt étudie aussi les estimations des effets des tsunamis et des hauteurs

de vague à la côte par simulation numérique [8]. Les simulations, encore trop longues par rapport aux délais pour diffuser l'alerte, devraient fournir dans le futur des prévisions des effets côtiers en temps réel, selon les configurations, en s'appuyant sur les marégraphes, et de plus en plus, sur les données de mesure des variations du niveau de la mer, au large, les plus proches des sources tsunamigènes.

Dès les années 1990, de tels moyens de mesure au large ont été développés par les Américains, dans le Pacifique, avec des capteurs de pression au fond des océans, capables de détecter la variation de pression hydrostatique au passage du tsunami [9]. Les mesures

sur ces "tsunamimètres" sont précises dès quelques centimètres d'amplitude et participent de plus en plus aux modèles numériques en temps réel, permettant de mieux prévenir des impacts possibles. C'est ainsi que le Centre polynésien de prévention des tsunamis de Tahiti s'appuie sur de telles données pour produire des modèles dont les résultats sont diffusés dans les messages aux autorités [10].

Cette évolution remarquable devrait s'accroître au fur et à mesure que des réseaux de mesure se développeront au large, grâce à plusieurs nouvelles technologies (voir aussi [11]). En Méditerranée et Atlantique Nord-Est, ces moyens n'existent pas encore. Les

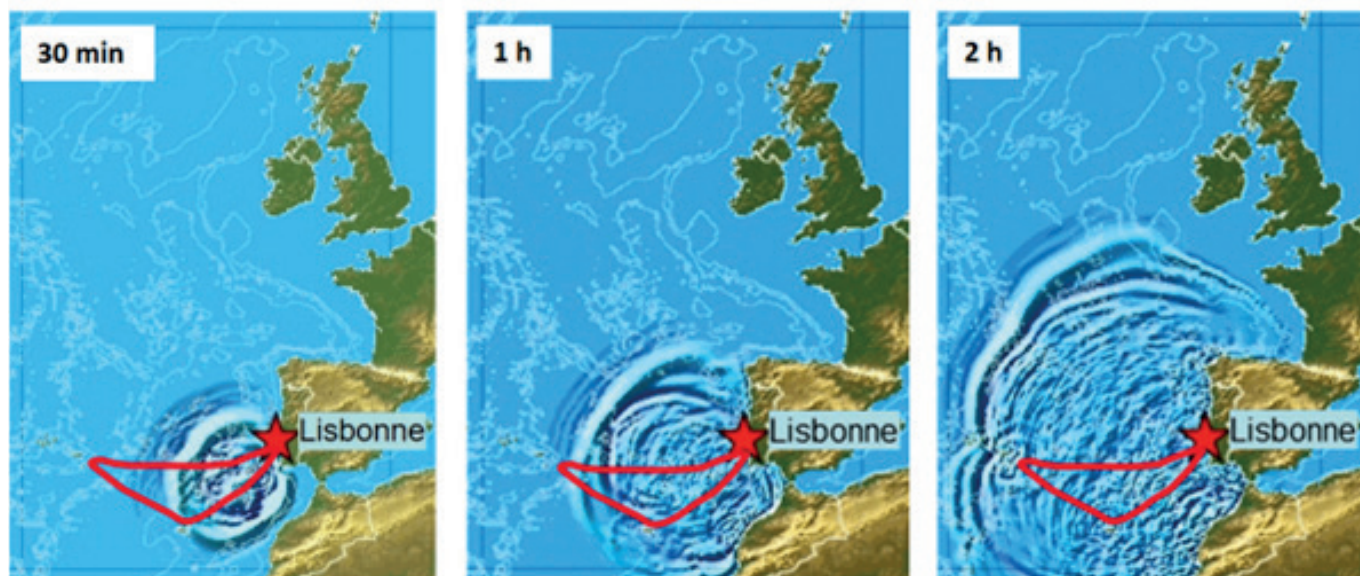


Figure 6. Simulation d'un tsunami similaire au cas de 1755 initié au large de Lisbonne, et positionnement du projet de câble SMART en projet, le long duquel une dizaine de répéteurs devraient être déployés pour relayer des données rapidement après de tels séismes.



projets d'instrumenter les câbles sous-marins de télécommunication, avec des répéteurs dédiés à de l'instrumentation physique et chimique, sont particulièrement prometteurs pour densifier les données au large. Ces câbles, dits SMART (Science Monitoring And Reliable Telecommunications) [12], en projet au large du Portugal [13], permettront, environ 10 à 30 minutes après un fort séisme, d'obtenir les caractéristiques d'un tsunami tel que celui de 1755 déclenché au large de Lisbonne (figure 6).

Le réseau des marégraphes portuaires reste indispensable pour relever les amplitudes portuaires, étudier les phénomènes d'amplification locale, et suivre au cours du temps la propagation le long d'une côte pendant une alerte. Depuis 2005, les réseaux se sont étendus et modernisés (passage en temps réel), de nombreux pays et organismes contribuent aux échanges de données recommandés par la COI/ UNESCO, permettant de rendre plus performants les systèmes d'alerte aux tsunamis. Ces derniers traitent avant tout des tsunamis générés par les séismes. Mais les marégraphes permettent aussi de suivre des événements d'origine météorologique ou volcanique atypique [14], ainsi que des tsunamis déclenchés par des sources gravitaires qui, aujourd'hui, ne font pas l'objet d'une procédure d'alerte liée à un séisme.

Les réseaux marégraphiques côtiers densifiés, robustes, complétés par des mesures au large, pourraient contribuer, à terme, à un réseau global de surveillance et de détection de tout tsunami, quelle que soit son origine, dans une démarche multialéas aujourd'hui préconisée par l'UNESCO.

Remerciements

L'auteur remercie ses collègues du CEA, en particulier des centres d'alerte aux tsunamis, Cenalt (Centre national d'alerte aux tsunamis), et CPPT (Centre polynésien de prévention des tsunamis) pour la Polynésie française, ainsi que ses collègues du Shom, partenaires du Cenalt. La donnée marégraphique de la Pointe des Galets, en 2004, a été mise

à disposition par la Direction départementale de l'équipement de la Réunion qui en était responsable. Les données marégraphiques du réseau français RONIM sont reçues grâce à la collaboration avec le Shom dans le cadre du Cenalt. ●

Contact

Hélène Hébert,
CEA DAM/DIF, 91297 Arpajon,
helene.hebert@cea.fr

Ressources et références

- [1] Hébert, H., F. Schindelé, *Peut-on prévoir les tsunamis ?* Les Petites Pommés, Le Pommier, 2011
- [2] Hébert, H., F. Schindelé, Tsunamis : les connaître pour mieux les prévoir, Encyclopédie de l'Environnement, Université Grenoble Alpes, <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/tsunamis-connaître-prévoir/>
- [3] Sahal, A., et al., *The tsunami triggered by the 21 May 2003 Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake: field investigations on the French Mediterranean coast and tsunami modeling*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1823-1834, 2009.
- [4] Alasset, P.J., et al., *The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (Mw=6.9, Algeria): modelling and results*, Geophysical Journal International, 166, 213-226, 2006.
- [5] Roger, J., et al., *The El Asnam October 10th, 1980 inland earthquake: a new hypothesis of tsunami generation*, Geophysical Journal International, 185, 1135-1146, 2011.
- [6] Hébert, H., et al., *Numerical Modeling of the Great 2004 Indian Ocean Tsunami: Focus on the Mascarene Islands*, Bulletin of the Seismological Society of America, 97, S208-S222, 2007.
- [7] *Programme Tsunami de l'Unesco*, <http://www.ioc-tsunami.org/>
- [8] Gailler, A., et al., *Coastal Amplification Laws for the French Tsunami Warning Center: Numerical Modeling and Fast Estimate of Tsunami Wave Heights Along the French Riviera*, Pure and Applied Geophysics 175, 1429-1444, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1713-9>
- [9] *Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) description*, <https://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml>
- [10] Jamelot, A., Reymond, D., *New Tsunami Forecast Tools for the French Polynesia*

- Tsunami Warning System Part II: Numerical Modelling and Tsunami Height Estimation*, Pure Appl. Geophys. 172, 805-819, 2015, <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0997-2>
- [11] Hébert, H., et al., *Contributions of Space Missions to Better Tsunami Science: Observations, Models and Warnings, Surveys in Geophysics*, 41, 6, 1535-1581, <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09616-2>
- [12] Howe, B.M., et al., 2021, *SMART Subsea Cables for Observing the Earth and Ocean, Mitigating Environmental Hazards, and Supporting the Blue Economy*, Frontiers in Earth Science, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.775544>
- [13] International Telecommunication Unit, <https://www.itu.int/hub/2022/06/submarine-cables-telecom-climate-monitoring-tsunami-forecasts>
- [14] Heinrich, P., et al., *Observations and simulations of the meteotsunami generated by the Tonga eruption on 15 January 2022 in the Mediterranean Sea*, Geophysical Journal International, 234, 903-914, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad092>

ABSTRACT

A tsunami is an oceanic wavetrain mostly triggered by submarine earthquakes, volcanic eruptions, landslides. Most of tsunamis are observed in the Pacific Ocean where they are very frequent, and some of them also occur in any other sea or ocean affected by a significant geological activity. The tsunami waves are hardly detected offshore where their amplitudes are low (a few centimeters high), and they become dangerous and possibly catastrophic onshore due to the coastal shoaling effect. Tide gauges are the most convenient sensors to measure such phenomena on the coast, and this article presents a series of various tsunami observations made in different contexts. Finally, it also explores future perspectives concerning offshore tsunami monitoring. Tsunami warning centers are able to detect and monitor such waves, for instance in France, through the French tsunami warning center Cenalt (Centre national d'alerte aux tsunamis), which has been operating since 2012 in CEA, and which alerts national authorities in case of a hazardous tsunami able to impact Mediterranean and NE Atlantic French coastlines, thanks to tide gauge data provided by its partner Shom.

Prévision et avertissement du risque de submersion marine : la Vigilance vagues-submersion

■ Didier JOURDAN - Éric CAILLAUD - Audrey PASQUET - Héloïse MICHAUD - Denis PARADIS

La capacité à anticiper et avertir, en temps réel, d'un risque de submersion marine sur une portion de littoral repose, à l'échelle nationale, sur le dispositif de Vigilance vagues-submersion (VVS). La VVS est construite sur une chaîne de valeur constituée de systèmes d'observation, de systèmes de prévision des conditions météo-océaniques au plus proche du littoral et de l'expertise des prévisionnistes de Météo France pour l'analyse de la situation, la prise en compte des vulnérabilités et des remontées terrain, puis le conseil aux autorités.

Nous proposons ici de présenter l'état de l'art opérationnel de cette chaîne de valeur en décrivant chacun des maillons et en illustrant le résultat de ce processus d'expertise par un cas de Vigilance orange aux vagues-submersion.

MOTS-CLÉS

Océanographie, météorologie, surcotes, vagues, submersions marines, prévisions numériques, systèmes opérationnels.

Introduction

Dans la nuit du 27 au 28/02/2010, la tempête Xynthia frappe de plein fouet les côtes de la Vendée et de la Charente-Maritime. À La Rochelle, le marégraphe du port de La Pallice enregistre un niveau d'eau total de 4,50 m (cote IGN 69) autour de 3 h du matin, lorsque l'onde de tempête atteint son amplitude maximum, soit 1,52 m au-dessus du niveau de marée habituel pour cette date. Plus au sud, dans la baie de l'Aiguillon, le bilan post-catastrophe dénombre 41 victimes directement liées à la submersion ainsi que de nombreux dégâts sur les biens, les équipements et de lourdes conséquences économiques et environnementales, estimés à un montant total 2,5 milliards d'euros (MTECT, 2020).

Cet évènement a dramatiquement rappelé au grand public la vulnérabilité du littoral face aux submersions marines, même protégé par des aménagements anthropiques, et encore plus violemment dans ce cas, pour lequel les conséquences se sont finalement révélées d'autant plus dévastatrices que l'aléa a croisé un usage irréfléchi de l'espace naturel.

On dénombre actuellement 1,4 million d'habitants exposés au risque de submersion marine en France (PSR, 2017). Ce risque, à défaut de mesures d'atténuation, va continuer à croître en raison des modifications de l'aléa sous l'effet combiné du changement climatique (IPCC, 2023) – élévation du niveau marin et changements des caractéristiques des phénomènes initiateurs – et de la pression économique, démographique et urbaine toujours croissante à laquelle le littoral est soumis.

Du côté de l'État, cet évènement catastrophique – auquel ont succédé les crues rapides dans le Var à peine quelques mois plus tard – a accéléré la mise en œuvre des politiques publiques en vue de réduire le risque de submersion marine. L'adoption du "Plan national submersions rapides" (PSR) en 2011 a fourni un premier cadre pour travailler sur l'amélioration de la connaissance et de la caractérisation de l'aléa, de la prévision et du suivi de l'évènement et sur l'acculturation au risque, dans un objectif global de maîtriser aux mieux la préparation, la gestion de la crise, puis le retour à la normale, d'éviter des victimes et de réduire les conséquences matérielles.

Cette première réponse de la puissance publique se prolonge, sur le long terme, avec la Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (SNGRI) dont un des objectifs prioritaires est "d'augmenter la sécurité des populations exposées". Cette stratégie vise à consacrer des efforts et des moyens à l'anticipation et la préparation de la crise via des dispositifs de prévision et d'avertissement.

C'est ainsi que, parmi les réponses concrètes apportées à l'échelle nationale, la capacité à anticiper un évènement de submersion marine sur tout ou partie du littoral français repose sur le dispositif de la Vigilance vagues-submersion (VVS) de Météo France. Ce dispositif a été mis en place en 2011 avec le Shom, et est amélioré depuis en continu, sous la maîtrise d'ouvrage du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT).

Après un rappel sur le phénomène des submersions marines, nous présentons plus en détail le système VVS et les capacités de prévisions sous-jacentes en insistant sur la contribution des mesures marégraphiques aux différentes étapes de conception et de validation des chaînes de modélisation. Enfin, nous illustrerons le cas mis en VVS orange et l'articulation entre prévisions numériques, observations marégraphiques, houlographiques et expertise du prévisionniste.

Les submersions marines

■ Le phénomène de submersion marine

Les submersions marines sont des inondations temporaires par la mer d'une zone littorale habituellement émergée, lors de conditions météoro-



logiques et océaniques défavorables. Elles touchent surtout les zones basses proches du littoral, mais des inondations peuvent se propager vers l'intérieur des terres.

Les submersions marines sont liées à une élévation du niveau et/ou une agitation inhabituelle de la surface de la mer lors d'une tempête. Elles résultent de plusieurs facteurs :

- les facteurs préexistants à la tempête que sont :
 - la morphologie naturelle du terrain dans ses parties immergées (bathymétrie), émergées (topographie) et le trait de côte qu'elle dessine ;
 - les aménagements en mer, au niveau du trait de côte ou à terre en zone rétrolittorale.
- les facteurs concomitants à la tempête que sont :
 - l'amplitude de la marée (coefficient) et sa phase ;
 - le débit des fleuves dans les espaces estuariens ou de transition fluvio-maritime ;
 - des effets de la dynamique à grande échelle signant sur tout ou partie de la colonne d'eau, comme les courants saisonniers ou encore les effets thermiques de dilatation.
- et enfin, les facteurs directement liés à la tempête et à sa chronologie :
 - la surélévation du niveau marin statique, appelée surcote météorologique, en réponse directe aux conditions météo-océaniques, résultat de :
 - la diminution de la pression atmosphérique engendrée par le centre dépressionnaire (effet du baromètre inverse) ;
 - l'accumulation d'eau à la côte sous l'effet d'entraînement du vent s'il est d'afflux ;
 - du déferlement de la houle, dont une partie de l'énergie qu'il dissipe provoque une augmentation du niveau moyen (phénomène de *wave set-up*).
 - la surélévation du niveau marin instantanée ou haute fréquence, réponse combinée à des conditions météo-océaniques locales ou distantes :
 - le flux et le reflux des vagues qui arrivent au rivage, qui influencent l'élévation instantanée du niveau

d'eau (phénomène de *wave run-up* ou jet de rive) ;

- divers phénomènes ondulatoires à plus ou moins haute fréquence, dont les ondes infragravitaires ou les ondes de seiches portuaires...

Le niveau d'eau maximal instantané atteint au-dessus de son niveau moyen habituel est ainsi déterminé par la hauteur de marée, la surcote (d'origine atmosphérique et liée aux vagues) auxquelles se combine la hauteur des vagues. La configuration du littoral et un phasage défavorable de tous ou certains de ces facteurs (forts coefficients de marée, maximum de surcote atteint au moment de la pleine mer...) constituent des circonstances aggravantes à la survenue d'une submersion.

On distingue alors trois modes de submersions qui peuvent se combiner :

- le débordement, quand le niveau marin statique pendant l'évènement est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel. Il entraîne le déversement direct d'importantes quantités d'eau, dont le volume dépend de la différence entre le niveau d'eau et la cote du littoral, de la durée du débordement et de la vitesse de l'écoulement ;
- le franchissement par paquets de mer, lorsque la vague dépasse la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel. Il dépend du niveau statique et des caractéristiques locales des vagues et entraîne l'accumulation d'eau plus ou moins importante selon la hauteur du franchissement, sa durée et le linéaire côtier concerné ;
- la rupture partielle ou complète du système de protection (ouvrage ou cordons naturels), sous l'action répétée du choc des vagues, qui provoque le passage à un régime d'envahissement pour les terrains en arrière de la protection et situés en dessous du niveau marin atteint pendant l'évènement.

La concomitance d'un phénomène de submersion marine avec une crue peut également entraîner une inondation dans les zones d'exutoire des bassins versants. Ce type de submersion fluvio-maritime très spécifique se rapproche de la submersion par débordement.

■ Comment mieux prévoir les submersions marines ?

Une prévision précise des submersions marines à des fins de protection des personnes et des biens est un enjeu dont une partie de la réponse repose sur la modélisation des processus météo-océaniques. Cela requiert :

- des données topo-bathymétriques (incluant le trait de côte) fines et récentes ;
- des données de forçage pour prescrire au modèle océanique les conditions aux frontières du domaine de prévision : prévisions des conditions météorologiques, prévisions des états de mer, du niveau de la marée ;
- des données de mesure pour calibrer et valider les résultats des modèles (bouées, marégraphes, observations satellitaires...) ;
- des modèles numériques capables de générer et/ou propager la bonne physique de leur frontière jusqu'à la côte.

Des modèles numériques résolvant les équations de Navier-Stokes – qui décrivent les écoulements de façon complète – à des échelles métriques, peuvent fournir une prévision fine et précise des états de mer et de la dynamique océanique dans la frange littorale. Malgré l'augmentation continue des moyens de calcul, cette modélisation n'est envisageable pour l'instant que sur de très petites zones, à titre de démonstrateur ou d'étude "à froid". C'est une perspective de progrès des programmes de R&D, mais il est tout aussi important de pouvoir étudier et disposer des modèles proposant une physique simplifiée, compatibles avec les exigences de mises en œuvre opérationnelle, c'est-à-dire de calculer et disposer chaque jour de simulations représentant des temps cumulés (d'intégration des équations) supérieurs à la centaine de jours (*cf. paragraphe VVS*).

La décennie passée a vu des avancées très importantes dans le cadre du projet HOMONIM – Historique, observation, modélisation des niveaux marins (Jourdan et al., 2020) – confié au Shom et à Météo France, sous maîtrise d'ouvrage de la DGPR – Direction générale de la prévention des risques du MTECT – et de la Direction





de la Sécurité civile et de la gestion de crise (ministère de l'Intérieur).

Elles ont conduit à une amélioration continue des capacités de prévision océaniques côtières soutenant le dispositif de la VVS, et ont amené les technologies de modélisation numérique à l'échelle des façades métropolitaines (golfe de Gascogne/Manche et Méditerranée) comme ultramarines (Antilles-Guyane, Mayotte/Réunion), à maturité.

C'est ainsi que des modèles de prévision des niveaux d'eau 2D simplifiés, de type shallow water tels que HYCOM-2D (Baraille & Filatoff, 1995 ; Bleck, 2002 ; Pasquet, 2016) et dernièrement TOLOSA-SW (module shallow water de l'outil multimodèle TOLOSA développé majoritairement par l'INSA et le Shom en collaboration avec d'autres organismes universitaires, Couderc et al., 2017 ; Duran et al., 2017, 2020), peu coûteux en temps calcul, ont été développés et sont utilisés de façon opérationnelle pour la prévision numérique des surcotes à l'échelle des façades. Ils propagent le signal de marée et les ondes de tempête de grande échelle du large vers les côtes, décrivent en partie l'évolution des masses d'eau, et permettent donc d'estimer le niveau d'eau statique, après la zone de déferlement ; ils répondent ainsi parfaitement aux besoins de prévision de façade à l'échelle nationale et peuvent être utilisés pour les problématiques d'inondation par débordement dans des systèmes plus locaux. En revanche, ils ne prennent pas en compte le *wave set-up*. Les transformations des vagues dans les zones de levage (*shoaling*) et de déferlement n'y sont pas représentées et ils ne permettent pas non plus la modélisation des franchissements par paquets de mer ; ce qui limite leur utilisation pour la modélisation de l'inondation.

La modélisation régionale des vagues est, quant à elle, basée sur le modèle spectral WAVEWATCH III (WW3DG, 2019) ; ce type de modèle à phase moyennée fournit les caractéristiques moyennées des champs de vagues, mais ne permet pas de représenter finement les processus littoraux à l'échelle d'une vague individuelle, ce qui limite son utilisation pour la modélisation fine

des inondations par franchissement de paquets de mer par exemple.

Grâce à ces avancées, la capacité opérationnelle actuelle fournit des prévisions numériques des surcotes et des vagues, avec une résolution de quelques centaines de mètres (entre 200 et 600 m suivant les façades) le long de tout le littoral français, heure par heure, jusqu'à cinq jours d'échéance, et actualisées plusieurs fois par jour.

Le couplage de ces deux types de modèles, en passe d'être opéré en routine sur une portion de façade permettra – sous quelques mois – de représenter plus complètement la surcote météorologique grâce à la prise en compte du *wave set-up* et constituera la prochaine avancée importante dans l'amélioration du réalisme des prévisions des submersions marines.

L'étape suivante passe par la représentation de la surcote instantanée, via le recours à des modèles non hydrostatiques, qui fournissent, au prix d'un coût calcul encore difficilement conciliable avec une mise en œuvre opérationnelle à grande échelle, une représentation vague à vague de la dynamique littorale, incluant jet de rive, ondes infragravitaires, etc. La prévision du risque de submersion évoluera ainsi vers la prévision de l'inondation à proprement parler. Le modèle non hydrostatique 2D TOLOSA-LCT (Richard, 2021) présente aujourd'hui des performances calculatoires significativement plus élevées que les modèles usuels de ce type, et pourra répondre aux exigences d'une mise en œuvre opérationnelle en temps réel pour des prévisions de façades aux échelles départementales, voire régionales.

La capacité opérationnelle de prévision des vagues et des niveaux marins s'améliore également en apportant une information sur l'incertitude des prévisions. Cette amélioration est actuellement réalisée par la mise en œuvre de la Prévision d'ensemble, qui est une technique permettant de représenter les états possibles d'un paramètre prévu (vent, surcote, état de mer...) à une échéance donnée par un ensemble d'états équiprobables (les membres de l'ensemble, au nombre de quelques dizaines). Cela permet de connaître la

prévisibilité des modèles pour un jour donné, ou bien mettre à jour l'existence de scénarios océaniques alternatifs pour ce même jour. Une seconde voie d'amélioration, complémentaire, porte sur l'adaptation statistique des sorties de modèle pour les corriger en s'appuyant sur des prévisions et des observations passées, via l'utilisation d'outils statistiques ou d'intelligence artificielle.

Les modèles numériques de l'océan, quelles que soient les équations plus ou moins simplifiées qu'ils adoptent, utilisent des paramétrisations, notamment pour la prise en compte des phénomènes dissipatifs (couches limites et effets des frictions de fond et de surface, déferlement), et requièrent donc une étape de calibration à l'aide de données d'observation issues notamment des réseaux pérennes – houlographiques et marégraphiques – ou bien de campagnes terrain dédiées. Ces données permettent également d'évaluer les performances physiques des modèles pour une configuration donnée, d'inter-comparer plusieurs modèles, ou encore de s'assurer de la non-régression lors des évolutions des outils numériques dans la chaîne opérationnelle.

La Vigilance vagues-submersion

■ Un dispositif d'avertissement sur le risque de submersion marine

Afin d'apporter l'information la plus simple, accessible et utile à tous, sur les dangers de phénomènes météorologiques extrêmes, Météo France a mis en place, en 2001, le dispositif national de vigilance météorologique. La Vigilance fournit simultanément à la population, aux pouvoirs publics – dont les autorités de gestion de crise et de situations sanitaires exceptionnelles – ainsi qu'aux médias, l'information de référence en cas de phénomènes météorologiques dangereux pouvant affecter le territoire. Elle indique, pour chaque département, le niveau de danger d'une situation météorologique, les conséquences des événements dangereux annoncés et les précautions pour se protéger. En 2011, le dispositif a été complété avec la Vigilance vagues-submer-

sion (VVS) – en partenariat avec le Shom et la DGPR – pour avertir des dangers sur le littoral, liés aux vagues et aux submersions marines. La VVS évolue depuis en continu, avec les progrès des capacités de modélisation (page 55, § *Comment mieux prévoir les submersions marines ?*) pour fournir une information plus raffinée géographiquement, à plus longue échéance et au profit de nouvelles missions de l'État (RDI-L : référent départemental inondation-littoral). La VVS est la résultante d'une phase de mise en place – régulièrement révisée – et d'un processus quotidien d'expertise et de production des prévisionnistes Marine de Météo France, pour élaborer le niveau d'avertissement synthétique, pertinent et accessible au plus grand nombre.

La mise en place de la VVS a nécessité plusieurs travaux :

- pour chaque portion de littoral, un inventaire des événements de référence et de leurs impacts a d'abord été réalisé. Un recensement des zones vulnérables à l'aléa vagues-submersion a également été accompli avec l'appui des différents services de l'État (DREAL, DDTM, préfectures) ;
- des rejeux par modélisation des situations répertoriées les plus intéressantes

ont été effectués afin de disposer des caractéristiques météo-océaniques à l'origine de ces situations de submersion ;

- des données statistiques de durée de retour de niveaux marins calculées par le Shom et d'état de la mer calculées par le CEREMA ont été mises à disposition et exploitées pour caler parfois les niveaux de vigilance à la fréquence d'occurrence des événements de submersion ;
- enfin, l'ensemble de ces données a permis d'établir des tableaux de seuils pour chaque portion de littoral du territoire couvert par la VVS.

La résultante d'un processus d'expertise

La VVS est produite deux fois par jour, hors actualisation intermédiaire lorsque l'évolution de la situation en cours l'exige, et fait l'objet d'une organisation et d'un suivi opérationnels H24 au centre national de prévision de Météo France.

Pour élaborer la VVS, les prévisionnistes disposent des prévisions numériques de niveau, surcote et vagues sous différentes formes. Ces prévisions résultent de la mise en œuvre quatre fois par jour (réseaux 00 06 12 et 18) des

modèles hydrodynamiques décrits supra (page 55, § *Comment mieux prévoir les submersions marines ?*), alimentés par les prédictions de marée du Shom et les prévisions d'évolution des conditions météorologiques (vent et pression), telles que vues par plusieurs modèles atmosphériques européens (IFS du ECMWF) et nationaux (ARPEGE et AROME de Météo France).

L'étude croisée, par le prévisionniste Marine, de ces prévisions numériques à proximité du littoral, des tableaux de seuils ainsi que d'autres facteurs conjoncturels, combinée à sa connaissance de la vulnérabilité du littoral et des événements passés permet d'établir un niveau de risque de l'aléa vagues-submersion par portion de littoral.

Cette étude inclut l'étape indispensable de confrontation des prévisions numériques avec la situation terrain en cours, afin de valider le comportement des modèles de vagues et de surcotes. Pour cette phase, le prévisionniste s'appuie sur les observations temps réel, en mer et à la côte, d'état de mer (hauteur, direction, période, des vagues et de la houle) mesuré par les bouées météo et houlographiques et sur les observations de la hauteur d'eau mesurée par les marégraphes côtiers du réseau RONIM du Shom.

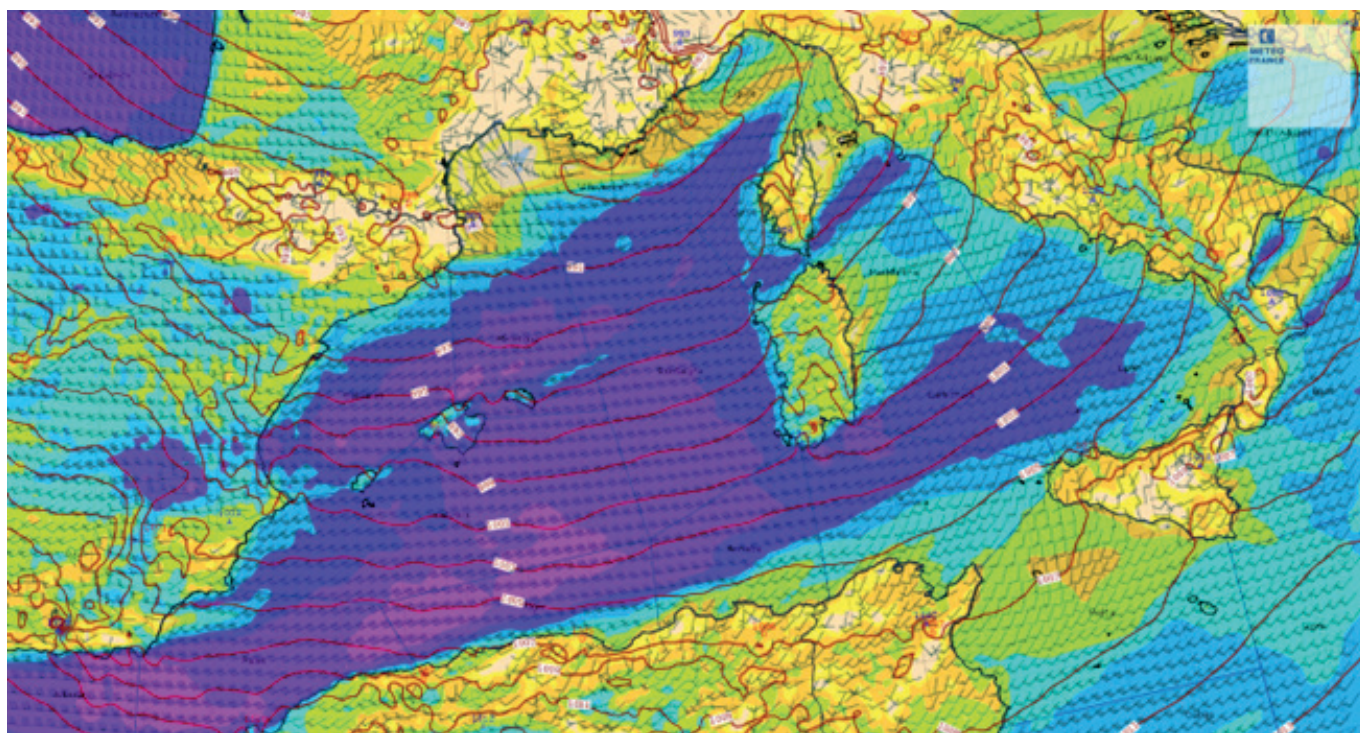


Figure 1. Carte de pression (isolignes), vitesse et direction du vent (et barbules) prévues par le modèle ARPEGE pour le 17/01/2023 à 06 H UTC (prévisions à 06H d'échéance) sur la Méditerranée occidentale.

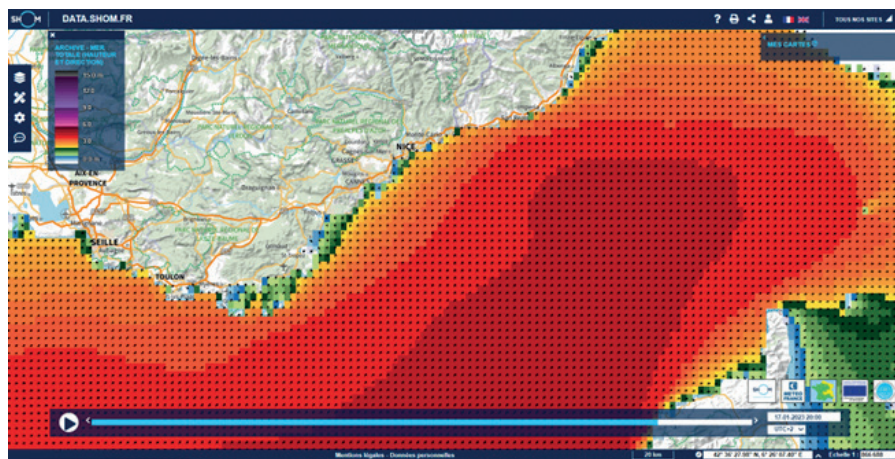


Figure 2. Carte de hauteur et direction des vagues prévues par le modèle de vague de la VVS (modèle WAVEWATCH III) pour le 17/01/2023 à 20 H UTC (prévisions à 20H d'échéance) sur le nord du bassin Liguro-Provençal.

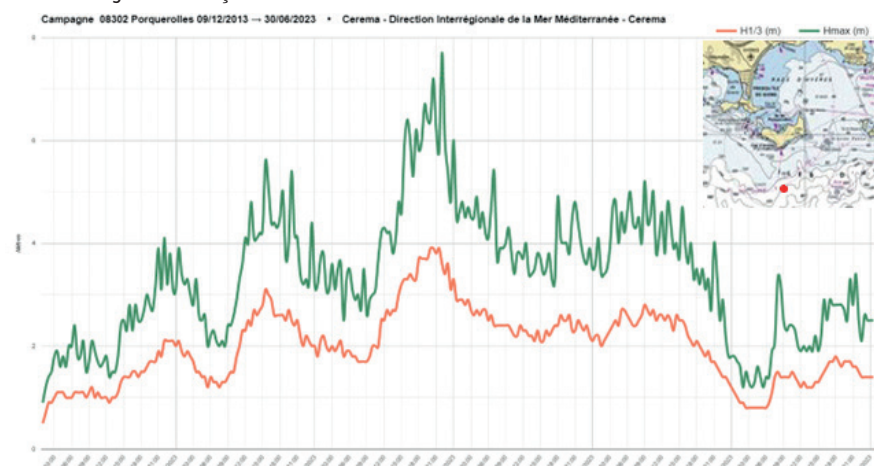


Figure 3. Observation des hauteurs significatives (H1/3) en rouge et maximale, en vert, des vagues à la bouée Porquerolles entre le 15 et le 20/01/2023.

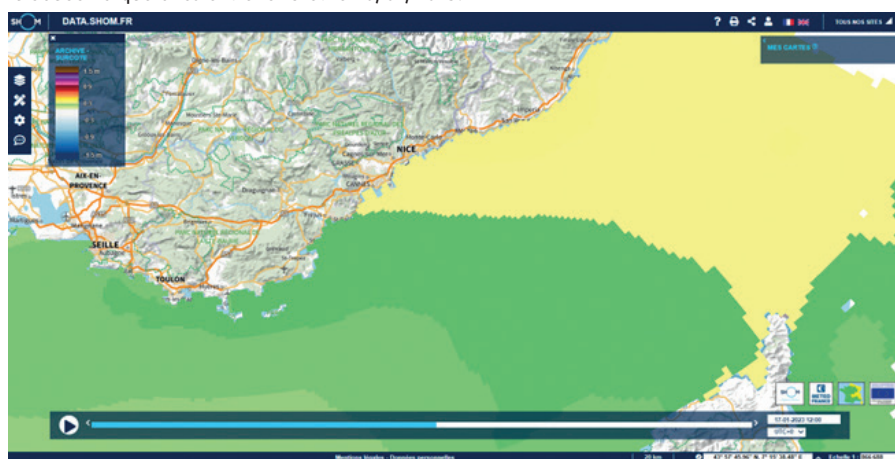


Figure 4. Carte des surcotes prévues par le modèle de surcote de la VVS (modèle HyCom-Med HOMONIM) pour le 17/01/2023 à 13 H UTC (prévisions à 13H d'échéance) sur le nord du bassin Liguro-Provençal.

néen, avec des vents de 7 à 8 Beaufort, localement 9 sur le sud du bassin (figure 1). Ces vents forts se maintiennent toute la journée de mardi et génèrent une puissante houle de sud-ouest, atteignant l'ouest de la Corse dès le mardi matin, puis grossissant en cours de journée.

Cette houle puissante, de période supérieure à 10 s, se propage également vers le continent en s'orientant au sud à sud-ouest (figure 2) et touche, à la mi-journée, l'est du département des Bouches du Rhône et l'ouest du département du Var. La mer devient forte dans l'après-midi près du littoral, croisée avec le renforcement du vent consécutif à une bascule au secteur Ouest du vent dans le golfe du Lion. En soirée, la mer totale approche 4 m (H1/3) à la bouée côtière de Porquerolles et atteint des hauteurs maximales de 7,7 m (figure 3). La mer devient forte également en soirée sur le littoral de la Côte d'Azur, dominée par la houle de sud-ouest.

Des niveaux marins élevés sont généralisés sur le nord du bassin Liguro-Provençal (figure 4), résultats de l'onde de tempête générant des surcotes de 25 à 30 cm, dont le maximum est atteint du nord de la mer de Ligure jusqu'au département du Var et le nord de la Corse. Le niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA)¹ est dépassé partout.

La figure 5 illustre comment le marégraphe de Toulon a mesuré cet événement en termes de surcotes et de hauteur d'eau totale, avec une signature de l'onde de surcote sur les journées du 17 et 18/01 dont le maximum est atteint le 17/01 vers 11h30 (UTC). Sur cette même période, on peut voir que la hauteur d'eau totale est maximale le 17/01/2023 à 15h20 (84 cm), amplifiée par une surcote de 30 cm, et dépasse le niveau des PHMA.

Ce niveau maximum observé correspond, d'après les données de statistiques de niveaux marins extrêmes à disposition, à un niveau marin de période de retour inférieure à 5 ans.

¹ Plus hautes mers astronomiques. Niveau théorique atteint par une pleine mer de coefficient 120. Ce niveau peut être dépassé lors d'événements météorologiques exceptionnels générant des surcotes de tempêtes.



C'est grâce à cette chaîne d'expertise que le niveau de risque vagues-submersion est défini, puis restitué sous forme de la carte de vigilance, des bulletins de suivi et du bulletin dédié vers le RDI-L (<https://vigilance.meteofrance.fr/fr>).

Un cas de VVS orange

Dans la nuit du lundi 16 au mardi 17 janvier 2023, en marge de la tempête Fien qui a circulé en Manche en journée, un flux rapide d'ouest à sud-ouest se met en place sur le bassin méditerranéen.



Figure 5. Séries temporelles haute fréquence des prévisions et des observations au marégraphe de Toulon. En haut sont représentées la hauteur moyenne sans effet atmosphérique (marée, en marron), les prévisions de la hauteur d'eau totale hauteur d'eau à 00H UTC pour les 24 heures à suivre (rouge) et les observations de la hauteur d'eau totale (bleu) mesurées par le marégraphe. En bas sont représentées les prévisions de surcote à 00H UTC pour les 24 heures à suivre (rouge) et les surcotes calculées par différence des courbes des hauteurs d'eau totale observées et de la hauteur de la marée locale.

L'effet combiné d'un niveau marin dépassant la PHMA et des fortes vagues a engendré un risque de submersion pour les départements littoraux de la région PACA et la Corse : les départements du Var et de la Corse du sud ont alors été placés en vigilance orange vagues-submersion (figure 6). En retour d'expérience, il sera reporté des submersions par franchissement de paquets à Ajaccio et Cannes où une demande de catastrophe naturelle a été émise par la commune.

L'exploitation des données d'observation marégraphique en temps réel est donc un des piliers du dispositif VVS.

Ces données sont indispensables aux prévisionnistes Marine pour le suivi en temps réel de l'évènement et pour corriger, si besoin, les prévisions de surcotes. Sur ce cas (figure 5), on peut voir que les observations (en rouge) confirment les prévisions du modèle par la très bonne superposition des deux courbes (rouge et marron en haut : rouge et bleu en haut) pendant l'évènement. Dans d'autres cas, le modèle peut présenter des biais qui sont parfois relativement stables sur quelques jours, et qui peuvent être ainsi corrigés par l'observation.

Ces écarts entre prévisions numériques de modèles et réalité sont dus

à certaines limitations intrinsèques des modèles à représenter la complexité des phénomènes, en raison d'hypothèses physiques simplificatrices (l'absence de modélisation de la surcote due aux vagues, etc.), imposées par les contraintes de rapidité et de mise en œuvre opérationnelle (cf. paragraphe modélisation). Elles trouvent aussi leur source dans les incertitudes des forçages atmosphériques qui alimentent les modèles de vagues et de surcote. Dans les modèles actuels, l'erreur de la prévision numérique des niveaux d'eau et des vagues par rapport aux observations marégraphiques et houlographiques est de l'ordre de 10 à 20 cm et 20 à 25 cm respectivement, en erreur quadratique, avec une répartition non homogène le long des façades.

A posteriori, les données marégraphiques contribuent également à l'évaluation systématique des épisodes VVS à partir du niveau orange, ainsi que de certains épisodes jaunes. Ces évaluations peuvent conduire à l'évolution des critères de vigilance.

Conclusion

Les dix dernières années ont vu, sous l'impulsion des politiques publiques de prévention et gestion des risques, des progrès importants des capacités opérationnelles de prévision numérique pour anticiper le risque de submersion marine. Sur cette période, la résolution

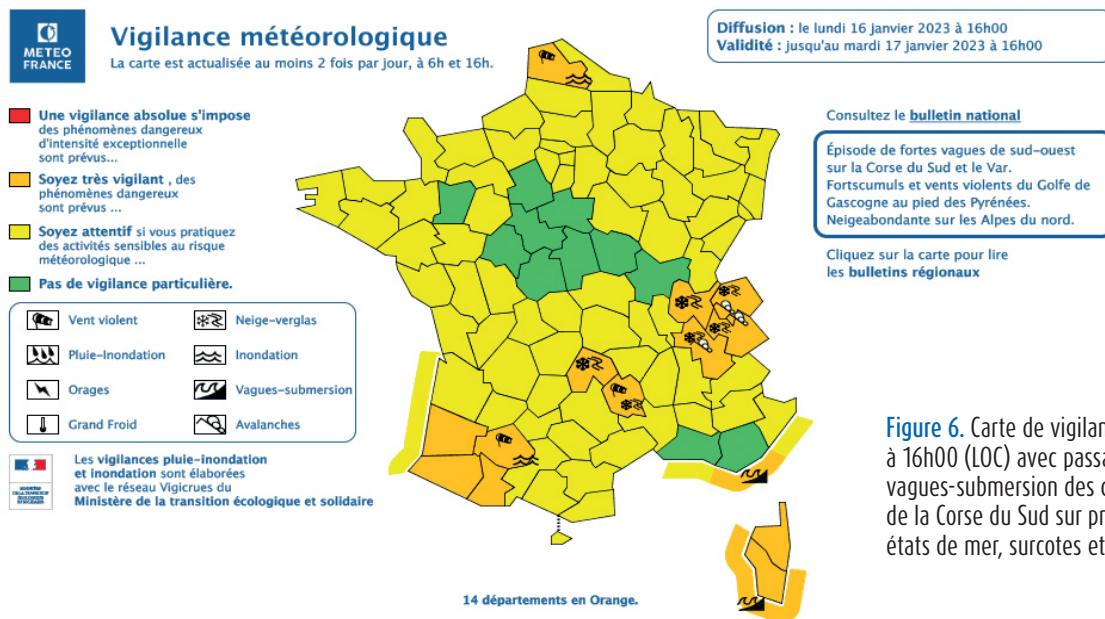


Figure 6. Carte de vigilance émise le 16/01/2023 à 16h00 (LOC) avec passage en vigilance orange vagues-submersion des départements du Var et de la Corse du Sud sur prévision et expertise des états de mer, surcotes et hauteur d'eau totale.



spatiale des modèles de surcotes et des vagues a augmenté d'un facteur 10 en domaine côtier, suivant les zones, portée par les développements de schémas numériques plus performants – moins dissipatifs, plus stables et plus rapides – et l'accroissement des capacités des calculateurs qui ont permis de faire chuter les temps de calcul dans des délais acceptables pour une mise en œuvre opérationnelle au quotidien. La capacité opérationnelle actuelle, qui sous-tend le dispositif de la Vigilance vagues-submersion, permet ainsi de produire en 2023 des prévisions numériques des surcotes et des vagues, avec une résolution de quelques centaines de mètres le long de tout le littoral français, heure par heure, jusqu'à 4 à 5 jours d'échéance, et actualisées plusieurs fois par jour. Cette capacité reste cependant basée sur une modélisation non couplée, empêchant les prévisions numériques d'intégrer les effets réciproques entre vagues et niveaux/courants ou de modifications des conditions de rugosité en surface.

Une prochaine étape est donc de porter en opérationnel, d'abord à l'échelle d'une portion de façade, puis progressivement de l'ensemble des côtes françaises, une modélisation couplée vagues, niveaux et courants. Cela permettra d'améliorer la représentation des processus physiques dans les modèles et le réalisme des prévisions opérationnelles sur le littoral. Cela demande un gain d'environ un facteur 10 supplémentaire dans la résolution des grilles des modèles. En parallèle, un autre axe d'amélioration consistera à mieux décrire l'incertitude des modèles (météo, vagues, niveau marin) grâce à la prévision d'ensemble.

Au-delà, l'objectif consiste à passer de la prévision des conditions susceptibles d'engendrer une submersion marine à une prévision des zones rétrolittorales effectivement submergées. Cela demande de représenter la surcote instantanée, via le recours à des modèles non hydrostatiques, qui fournissent une représentation vague à vague de la dynamique littorale, incluant jet de rive, ondes infragravitaires, etc.

Dans toutes ces étapes, la mise au point

et la qualification des configurations des modèles reposent sur la confrontation à une vérité terrain qu'apportent les observations, qu'elles soient mesurées *in situ* par les marégraphes et houlographes ou bien acquises par satellite. Combiné aux travaux sur l'amélioration de l'estimation des incertitudes de prévision au travers de l'approche ensembliste, le dispositif Vigilance vagues-submersion pourra ainsi bénéficier d'une information plus précise sur les valeurs de surcotes et vagues de tempêtes, mais aussi sur la confiance à accorder à ces prévisions.

De même, les autres usagers (services déconcentrés, gestionnaires d'ouvrages, services et autorités de gestion de crise) pourront disposer de l'information adéquate pour alimenter leurs applications et outils aval d'aide à la décision de manière cohérente avec le dispositif national. ●

Contacts

Didier JOURDAN¹, didier.jourdan@shom.fr,
Éric CAILLAUD², Audrey PASQUET¹,
Héloïse MICHAUD¹, Denis PARADIS²

¹ Shom-Toulouse, 42 av Coriolis 31057 Toulouse, France

² Météo France DirOP/MAR, 42 av Coriolis 31057 Toulouse, France

Références

- IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.5932/IPCC/AR6-9789291691647.
- Jourdan D., Paradis D., Pasquet A., Michaud H., Baraille R., Biscara L., Dalphiné A., Ohl P., 2020. *La phase-3 du projet HOMONIM : définition et contenu*, pp. 779-788, doi :10.5150/jngcgc.2020.087.
- The WAVEWATCH III® Development Group (WW3DG), 2019: *User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 6.07*. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 p. + Appendices
- MTECT, 2020 : *"Tempête Xynthia : 10 ans d'action pour renforcer la prévention des risques d'inondations et de submersion marine"* - <https://www.ecologie.gouv.fr/xynthia-10-ans-daction-renforcer-prevention>.

PSR, 2017 : "Bilan du plan Submersion Rapide" - https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/170427__livret_Bilan_PSR.pdf.

Baraille R., Filatoff N. (1995): *Modèle shallow-water multicouches isopycnal de Miami*. Technical Report. 003/95.

Bleck R. (2002). *An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnal-Cartesian coordinates*. Ocean Modelling, Vol. 4(1), pp. 55-88. [http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003\(01\)00012-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003(01)00012-9)

Pasquet, A. (2016). *HOMONIM – Phase II – Version V4 du système de prévision des surcotes – Configuration ATL*. Rapport SHOM, 52 pages.

Couderc F, Duran A, Vila J-P (2017). *An explicit asymptotic preserving low Froude scheme for the multilayer shallow water model with density stratification*. Journal of Computational Physics, 343 : 235-270.

Duran A, Vila J-P, Baraille R (2017). *Semi-implicit staggered mesh scheme for the multi-layer Shallow Water system*. Comptes Rendus Mathématique, 355 : 1298-1306.

Duran, A., Vila, J.P., Baraille, R. (2020). *Energy-stable staggered schemes for the shallow water equations*. Journal of Computational Physics, 401: 109051. DOI:10.1016/j.jcp.2019.109051

Richard GL. (2021). *An extension of the Boussinesq-type models to weakly compressible flows*. European Journal of Mechanics - B/Fluids 2021 : 217-240.

ABSTRACT

The ability to anticipate and warn, in real time, of a risk of storm surge on a part of coastline is based, at national level, on the Vigilance Vagues-Submersion (VVS) system. The VVS is built on a value chain comprising observation systems, forecasting systems for combined weather and ocean conditions as close as possible to the coast, and the expertise of Météo-France forecasters in analyzing the situation, considering vulnerabilities and the feedback from the field, in order to advice the authorities. We propose here to present the operational status of this value chain, describing each component and illustrating the results of this expertise process with a case of orange warning report for waves and storm surge.

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

■ Guy WÖPPELMANN

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

MOTS-CLÉS

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

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

Principaux verrous

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

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

Introduction

Le niveau de la mer fait partie des variables essentielles du climat listées par l'Organisation météorologique mondiale¹. En particulier, l'évolution du niveau moyen global de la mer apparaît comme un indicateur majeur de changements à l'échelle planétaire (page 70, Chenal - Meyssignac). Dans ce contexte, la vue synoptique de la surface des océans par les satellites permet un calcul direct de moyenne globale des données acquises tous les dix jours, même si ces données font l'objet de corrections instrumentales et géophysiques complexes en amont du calcul simple de moyenne (page 29, Prandi - Ablain).

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

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

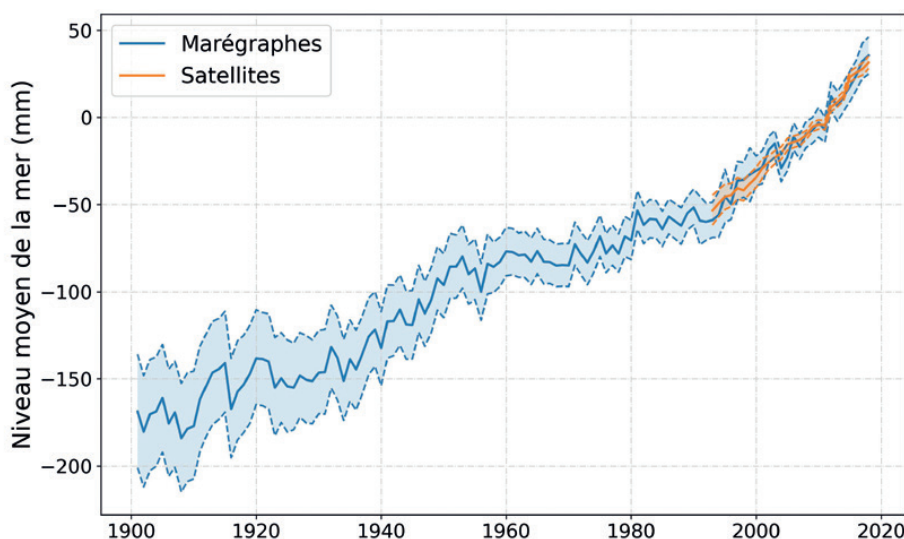


Figure 1. Évolution du niveau moyen global de la mer : en bleu, à partir de marégraphes (reconstruction publiée par Frederikse et al. [1]) et en orange, à partir des moyennes des données des satellites d'altimétrie radar [2].

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

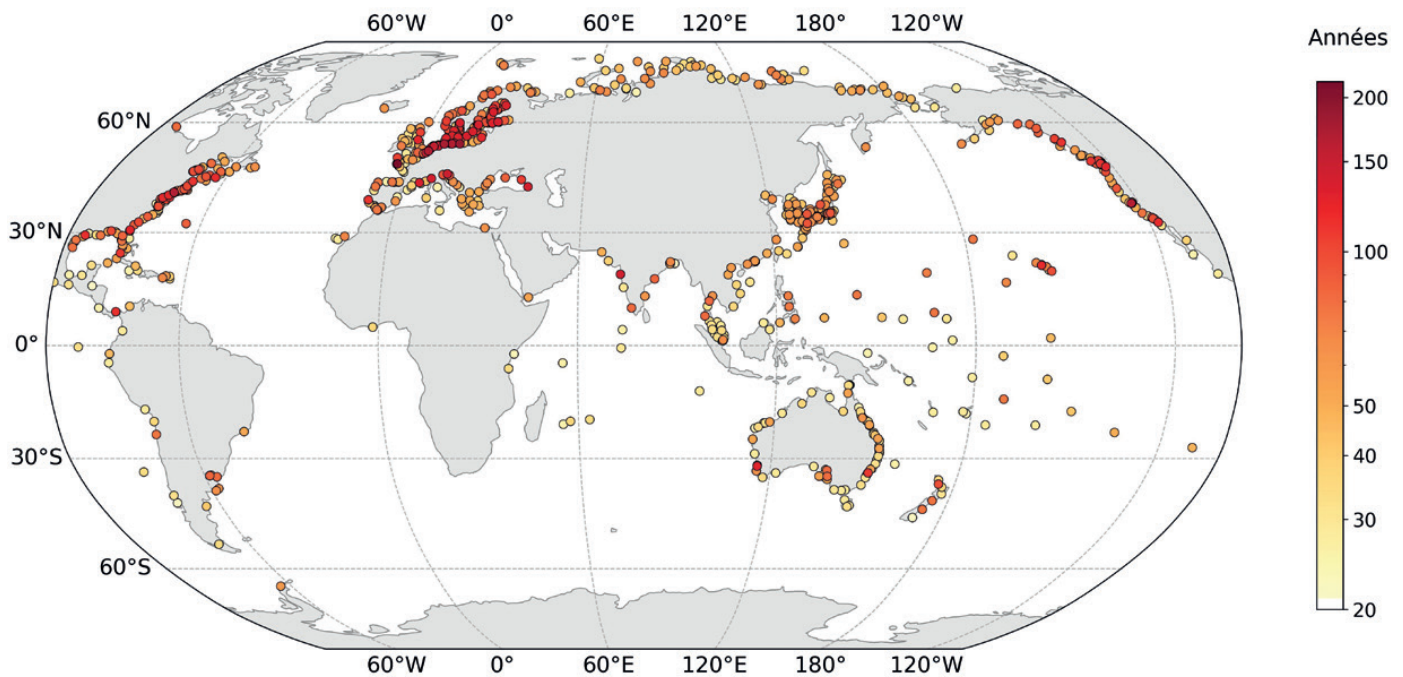


Figure 2. Répartition géographique et durée d'observation des marégraphes, dont les données sont accessibles depuis le Service international du PSMSL [3].

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

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

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

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

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

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

niveau des standards exigés par ces programmes².

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

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

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

Stratégies d'analyse

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

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

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

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

Performances et limites des reconstructions

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

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

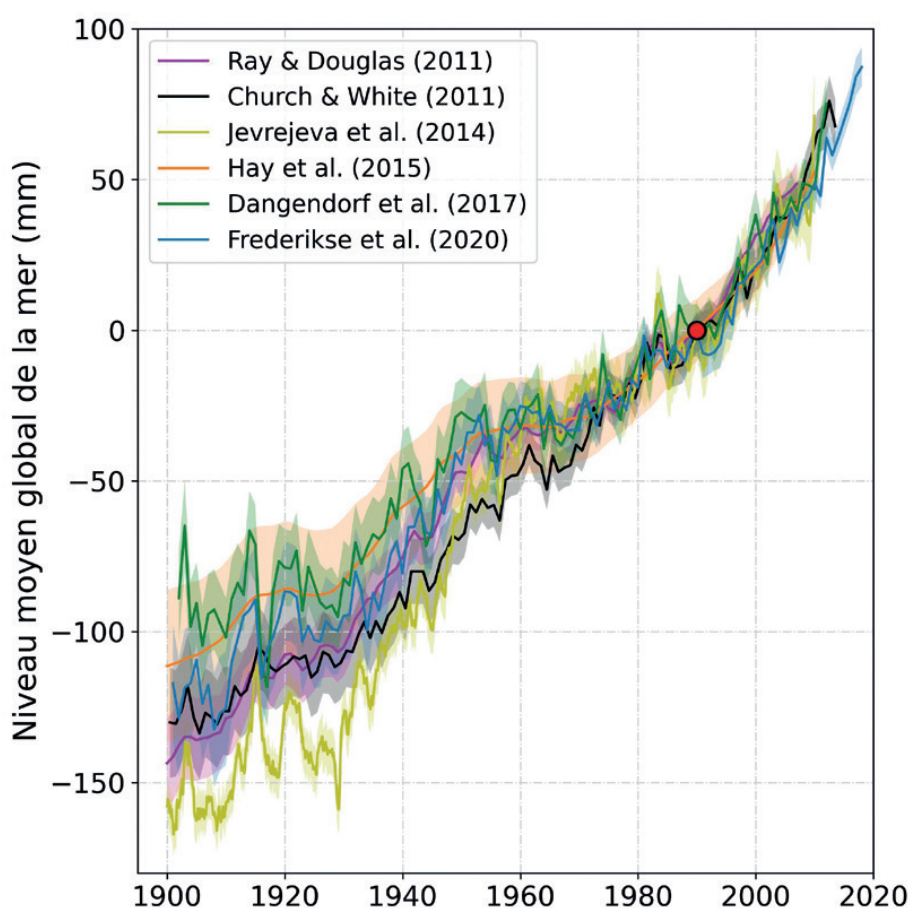


Figure 3. Courbes de reconstructions du niveau moyen global de la mer obtenues à partir de marégraphes [1, 6-10].



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

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

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

Conclusion

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

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

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

Contact

Guy Wöppelmann, Laboratoire LIENSs (La Rochelle Université & CNRS),
guy.woepelmann@univ-lr.fr

Ressources et références

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

produit MEaSUREs, Version 1812, <https://doi.org/10.5067/SLREF-CORV2>

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRACT

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



Les activités de reconstruction marégraphique en France

■ Alexa LATAPY - Inge VAN DEN BELD - Frédéric PONS - Nicolas POUVREAU

Dans le contexte actuel de changement climatique, l'apport de séries temporelles du niveau de la mer, pluridécennales à séculaires, se révèle primordial pour mieux appréhender les risques côtiers futurs. En France, de nombreuses observations systématiques du niveau de la mer au moyen de marégraphes mécaniques ont été initiées dès le milieu du XIX^e siècle. Pour exploiter ces données, il est d'abord nécessaire de numériser ce patrimoine scientifique et culturel et de valider les nouvelles données. Dans ce contexte, des actions de "data archeology" ou de reconstruction de séries historiques marégraphiques ont été entreprises au Shom depuis plusieurs décennies. Cette initiative répond aux recommandations du programme GLOSS (Global Sea Level Observing System) sur la sauvegarde des mesures historiques du niveau de la mer. Ainsi, de nombreuses séries temporelles ont été rallongées de plusieurs dizaines d'années de mesures pour de nombreux ports du littoral métropolitain. Cet article présente la méthodologie appliquée dans le cadre des projets de reconstruction marégraphique, les reconstructions réalisées au Shom sur les façades françaises soumises à forts marnages avec un volet s'intéressant aux observations historiques acquises en mer Méditerranée.

MOTS-CLÉS

Reconstruction marégraphique, niveau de la mer, océanographie, marée

Introduction

L'étude du changement climatique global et son influence sur les variations du niveau marin, qu'il s'agisse de l'évolution du niveau moyen de la mer ou de l'évolution des événements extrêmes, constituent un enjeu sociétal fort (IPCC, 2013). Depuis les années 1990, les données altimétriques satellitaires permettent d'avoir une vision globale de ces changements et rendent compte de l'hétérogénéité spatiale des variations du niveau marin (Cazenave & Llovel, 2009). Les technologies embarquées pour réaliser ces études et les traitements appliqués aux données ne cessent de s'améliorer, mais il est toujours nécessaire de croiser ces mesures avec les observations issues des marégraphes ponctuels, particulièrement dans les zones côtières (Cipollini et al., 2017).

De plus, les données altimétriques ne couvrent que les 30 dernières années. Les mesures effectuées à l'aide de marégraphes sont donc pratiquement les seules données disponibles rensei-

gnant sur l'évolution du niveau marin, à l'échelle des décennies, voire des siècles passés.

Lorsqu'on s'intéresse aux variations du niveau de la mer, il est admis qu'au moins 60 ans d'enregistrements sont raisonnables pour filtrer les influences des effets atmosphériques à grande échelle (Douglas, 1991), d'où la nécessité d'avoir des séries temporelles de niveau d'eau les plus longues et les plus continues possibles.

Organisme référent pour l'observation du niveau de la mer, le Shom possède une expertise et un patrimoine unique dans le domaine de la marégraphie remontant à plusieurs siècles. En France, les premières mesures remontent au XVII^e siècle à Brest et se sont généralisées au cours du XIX^e siècle avec la création du premier réseau d'observation marégraphique national (Pouvreau, 2008) géré par le Dépôt des cartes et plans de la Marine (ancêtre du Shom). Malgré cet important héritage scientifique, la majorité de ces mesures n'est pas exploitée, car toujours sous forme papier. Dans ce contexte, et à l'instar

de nombreuses institutions étrangères (Hogarth et al., 2020 ; Talke & Jay, 2017), un important travail est entrepris au Shom depuis le début des années 2000 afin d'inventorier, de sauvegarder ces nombreuses données historiques et de permettre leur exploitation.

C'est dans ce cadre et avec ce besoin de données numériques horaires que l'IGN a entrepris, en collaboration avec le Shom, l'extraction, depuis 1885, des hauteurs d'eau en fonction du temps des marégrammes du marégraphe totalisateur de Marseille. Ce partenariat a confirmé la nécessité de posséder l'expertise "marégraphique" pour la réalisation des phases de contrôle et de validation des données nouvellement numérisées (Philippe, 2003).

Ce projet et d'autres visent à pérenniser l'ensemble des documents historiques stockés dans les archives afin d'améliorer la connaissance de l'évolution du niveau moyen des mers. Cette initiative s'inscrit dans une démarche plus internationale et répond aux recommandations du programme *Global Sea Level Observing System* (GLOSS) mené par la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, sur la valorisation des observations "archéologiques" du niveau de la mer (Bradshaw et al., 2015).

Le présent article a pour objectif de présenter la méthodologie de reconstruction marégraphique et d'illustrer diverses applications à travers les réalisations récentes du Shom sur les façades françaises soumises à forts marnages avec un volet s'intéressant aux archives marégraphiques acquises en mer Méditerranée¹.

¹ NDLR : Les marégraphes des grands ports avaient comme principale finalité historique opérationnelle de permettre l'accès aux quais des navires selon leur tirant d'eau, c'est pourquoi la conservation des observations n'a pas toujours été jugée comme importante, les volets scientifiques pouvant avoir peu d'impact sur les personnels chargés de l'entretien technique.





Le processus de sauvetage des données

Inventaire

La première étape essentielle à ce processus de sauvetage des données historiques est la réalisation d'un inventaire le plus exhaustif possible (lieu de mesure, période, type de documents...) de toutes les informations disponibles, afin d'estimer leur potentiel technique. Les documents recherchés peuvent être classés en deux catégories :

- mesures du niveau de la mer : enregistrements du niveau de la mer, soit sous la forme de registres de marée, soit sous la forme de marégrammes. Les registres des marées sont des données tabulées (manuscrites ou typographiées) avec des enregistrements horaires, quotidiens ou mensuels (figure 1a). Les maré-

grammes représentent directement le signal de marée sur un document papier et sont générés par des marégraphes à flotteur (figure 1b). Ces mesures peuvent avoir des origines très différentes et peuvent provenir d'observations continues de marégraphes fixes, de données de campagne, de levés hydrographiques, de campagnes à court terme pour le génie civil, des levés scientifiques et des levés portuaires, de registres écrits des marées hautes et basses ;

- données auxiliaires et métadonnées : tous les documents complémentaires qui peuvent renseigner sur la mesure (emplacement du site, références verticales, changements d'équipement...). Des investigations sont également menées sur les types et modèles de marégraphes utilisés, les mécanismes d'enregistrement, la réduction des

données, l'étalonnage, le nivellement géodésique, la mesure de paramètres environnementaux supplémentaires à la station marégraphique (données météorologiques par exemple), et la disponibilité de notes techniques, d'entretien et de traitement. Afin de pouvoir exploiter ces données, il est essentiel de réunir les informations sur les repères verticaux historiques pour un observatoire marégraphique et de pouvoir retracer leurs rattachements au réseau d'altitude légal.

De par son histoire, le Shom dispose d'importantes archives techniques, notamment dans le domaine de la marégraphie, mais il en existe d'autres. Grâce à son rôle de référent de l'observation du niveau de la mer, le Shom a référencé, avec le concours des producteurs de données, de nouveaux centres d'archives spécifiques.

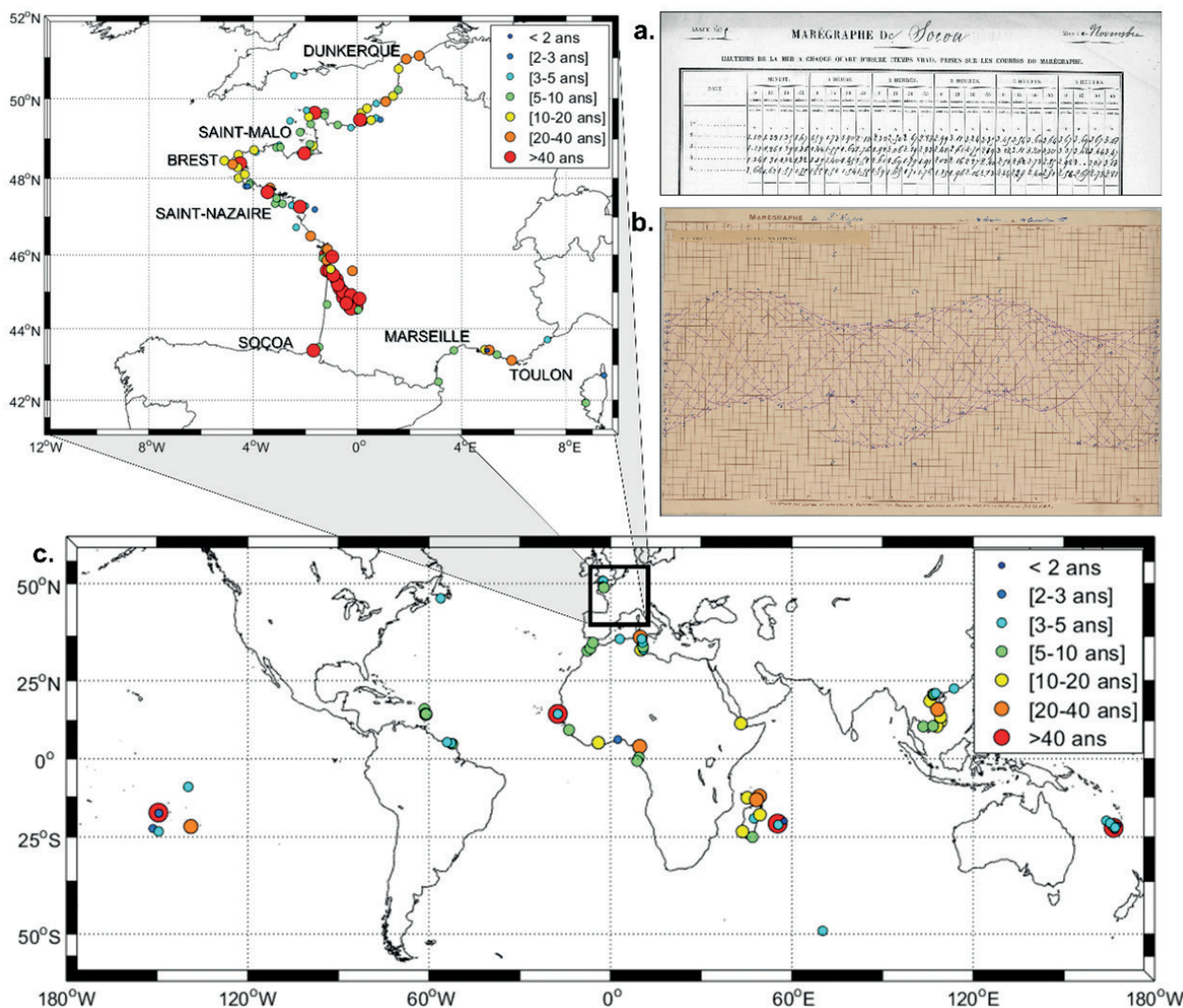


Figure 1. a) Exemple de registres de marée à Socoa (St-Jean-de-Luz, France) en novembre 1875 (source : Shom) ; b) exemple de carte de marée de St-Nazaire enregistrée en novembre 1956 (source : Shom) ; c) vue partielle de la distribution spatiale des données.

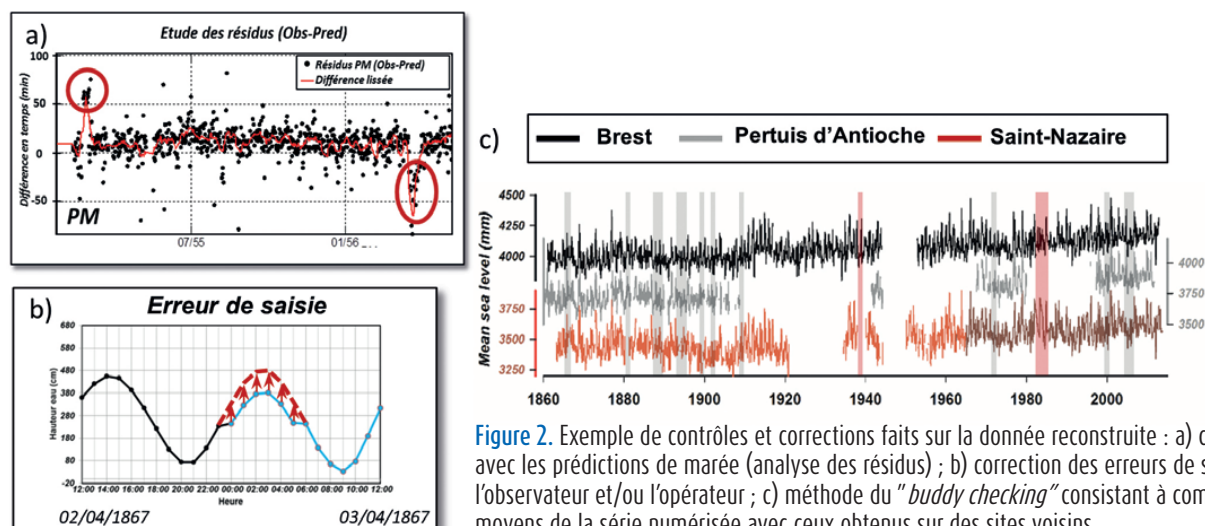


Figure 2. Exemple de contrôles et corrections faits sur la donnée reconstruite : a) comparaison avec les prédictions de marée (analyse des résidus) ; b) correction des erreurs de saisie faites par l'observateur et/ou l'opérateur ; c) méthode du "buddy checking" consistant à comparer les niveaux moyens de la série numérisée avec ceux obtenus sur des sites voisins.

À ce jour, plus de 60 000 documents ont été identifiés et inventoriés (figure 1c) dont environ 70 % ont déjà été numérisés. Malgré tout, il reste encore des milliers de documents à inventorier et à numériser suivant les recommandations internationales (*Intergovernmental Oceanographic Commission/UNESCO*, 2020). Plus de la moitié des observations inventoriées se rapporte à des ports français (environ 300 sites) ; l'autre moitié concerne des mesures plus ponctuelles et porte sur des stations réparties sur l'ensemble du globe (environ 240 sites) (figure 1c)².

■ Processus de numérisation et de validation

Une fois les documents identifiés, ils doivent être dématérialisés et numérisés afin d'extraire les données utiles. Ce processus de numérisation varie en fonction du type de document considéré. Les registres de marée sont en général manuellement numérisés alors que l'extraction des informations contenues sur des marégrammes peuvent se faire de manière semi-automatique. Au Shom, le logiciel NUNIEAU, développé et mis à disposition gratuitement par le CEREMA³ (Ullmann et al., 2005), est utilisé. Il permet d'extraire les mesures de niveau d'eau en fonction du temps. Pour plus d'informations sur la méthodologie de numérisation, se référer à Latapy et al. (2022).

Après avoir été numérisées, ces données doivent être validées. Dans un

premier temps, l'objectif est de rendre la série reconstruite cohérente en temps (exprimée en temps universel [UTC]) et en hauteur (généralement rapportée au zéro hydrographique [ZH] ou zéro des cartes marines). Les métadonnées identifiées lors de la phase d'inventaire sont ici cruciales, car elles permettent de connaître précisément les différents niveaux, ou références, utilisés comme zéro instrumental du marégraphe.

Une fois cette étape réalisée, des contrôles qualité sont effectués sur les données nouvellement numérisées afin d'identifier des sauts verticaux et/ou temporels (figure 2a) ou des erreurs de saisie (figure 2b).

Il est également possible d'intercomparer les données inédites (figure 2c) avec des séries temporelles existantes à proximité. En effet, les stations proches sont globalement soumises aux mêmes conditions atmosphériques de grande échelle, permettant une bonne corrélation des variations journalières et mensuelles du niveau de la mer entre les sites proches. Cette comparaison permet de mettre en évidence des périodes pour lesquelles la qualité des données est potentiellement suspecte. Ces différentes étapes de validation permettent d'attribuer une étiquette qualité sur chaque mesure de hauteur d'eau reconstruite.

De plus, pour certains observatoires, des mesures météorologiques ont été effectuées en parallèle des mesures marégraphiques. Ces mesures peuvent également faire l'objet d'une numérisation. L'utilisation des mesures de pression atmosphérique permet de calculer l'effet du baromètre inverse (Pugh & Woodworth, 2014) et d'identifier

l'influence des tempêtes sur le niveau de la mer. Le couplage de ces mesures physiques permet de confirmer ou d'infirmer les niveaux d'eau reconstruits.

Applications et projets réalisés

Les séries de données reconstruites et validées donnent accès à de nombreuses applications. À partir de séries de données pluridécennales à séculaires, il est possible de dégager des tendances locales d'évolution du niveau de la mer à moyen et long terme. Plus généralement, elles donnent accès à une meilleure connaissance du phénomène de marée en permettant l'étude des caractéristiques des marées, telles que l'évolution des pleines et basses mers, du marnage et des composantes harmoniques (Haigh et al., 2020).

En outre, les séries de données reconstruites permettent aussi de redécouvrir des tempêtes historiques. La prise en compte de ces valeurs extrêmes, non quantifiées jusqu'à présent, permet d'améliorer les estimations des niveaux extrêmes (Bulteau et al., 2015 ; Saint Criq et al., 2022). Certains événements tempétueux identifiés sont par la suite analysés au sein du Groupe de travail pluridisciplinaire "Tempêtes et submersions historiques" (GT-TSH) dont l'objectif est de collecter et d'expertiser tous types d'informations sur les événements tempétueux et submersions marines historiques (Giloy et al., 2021).

Les longues séries temporelles permettent de mesurer les tendances à long terme du niveau de la mer pour un site ; ainsi, elles permettent une

2 Un inventaire détaillé est disponible sur : <https://refmar.shom.fr>

3 <https://www.cerema.fr/fr/actualites/logiciel-numerisation-enregistrements-graphiques-niveaux-eau>

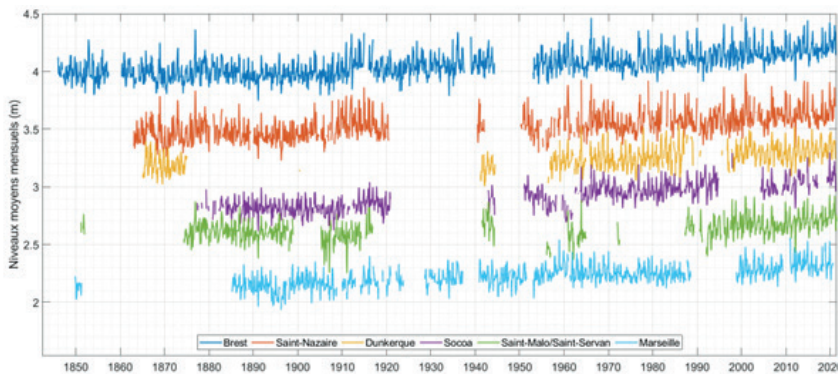


Figure 3. Évolution du niveau mensuel moyen de la mer à Brest, Saint-Nazaire, Dunkerque, Socoa, Saint-Malo/Saint-Servan et à Marseille. Les séries de niveaux moyens ont été décalées verticalement pour des raisons graphiques.

meilleure évaluation des risques. Ces dernières années, devant la nécessité de disposer de longues séries de mesures marégraphiques, de nombreux projets de “reconstruction” ont vu le jour (*figure 3*), et ont permis de compléter de plusieurs dizaines d’années de données les séries existantes de stations situées le long des façades françaises Atlantique (Pouvreau, 2008 ; Gouriou, 2012 ; Ferret, 2016 ; Khan et al., 2023), de la Manche (Van Den Beld et al., 2022), de la mer du Nord (Latapy, 2020), mais aussi en mer Méditerranée (Philippe, 2003 ; Wöppelmann et al., 2014).

Données marégraphiques historiques sur la façade métropolitaine méditerranéenne

Les longues séries de données sont majoritairement associées aux observatoires marégraphiques historiques hérités du Dépôt des cartes et plans de la Marine. Pour les besoins hydrographiques de l’époque, les efforts de mesure étaient majoritairement concentrés le long du littoral ouest et nord de la métropole. Néanmoins, des sites comme Marseille et Toulon se démarquent, disposant d’observations dès le XIX^e siècle.

Le marégraphe de Marseille abrite un appareil unique au monde, classé monument historique en 2002. C’est également un observatoire moderne de surveillance du niveau des mers intégré au réseau RONIM opéré par le Shom. Les marégrammes de Marseille ont fait l’objet d’une numérisation et analyse financées par l’IGN au début des années 2000. Grâce à ces observations, une série séculaire quasi complète du niveau de la mer à cadence horaire depuis 1885 a pu être réalisée. Elle est complétée par 2 ans d’observations en 1850-1851 (*figure 3*).

À Toulon, un observatoire marégraphique a été implanté en 1844 avec des premières mesures continues sur la deuxième moitié du XIX^e siècle (*figure 4*). Ces mesures n’ont pas encore été exploitées à ce jour, mais une fois traitées, elles permettraient d’étendre d’une quarantaine d’années la série existante.

Par ailleurs, des observations plus récentes ont fait l’objet d’un important travail de numérisation en 2007 pour initier la réalisation de PPRL⁴ du Languedoc-Roussillon (Pons, 2007). Ce travail a permis d’exploiter plusieurs dizaines d’années de mesures pour seize stations maritimes et lacustres du golfe

4 PPRL : Plan de prévention des risques littoraux.

du Lion, utilisées dans le cadre d’études statistiques et d’analyse d’événements extrêmes.

Conclusions

Les plus anciennes observations systématiques du niveau de la mer ont été observées à la fin du XVII^e siècle en France. Héritier de ce patrimoine, le Shom dispose aujourd’hui d’un grand nombre de mesures historiques du niveau de la mer. La sauvegarde de ces mesures anciennes est essentielle, car une meilleure évaluation du passé peut aider à mieux comprendre le présent et à mieux appréhender le futur. Des efforts conséquents sont déployés pour partager ces archives scientifiques grâce à la tenue à jour d’un inventaire et de sa diffusion en ligne sur refmar.shom.fr sans oublier la mise en ligne des séries marégraphiques reconstruites sur data.shom.fr.

Cet article rappelle les efforts déployés pour trouver, cataloguer et pérenniser les mesures marégraphiques historiques. Ces nouvelles données disponibles sur le niveau de la mer sont une clef pour comprendre les changements océaniques en lien avec les modifications des systèmes côtiers depuis les derniers siècles. Des exemples de reconstructions réalisées ces dernières années par ou avec la collaboration du Shom ont été présentés avec un focus particulier sur les stations marégraphiques françaises remarquables déployées sur la façade méditerranéenne avec les sites de Marseille et de Toulon.

La reconstruction systématique de ces séries de niveaux de mer permettra également d’identifier des événements de surcotes qui n’ont pas été quantifiés jusqu’à présent sur le littoral français et fournir ainsi des éléments essentiels pour l’étude séculaire des niveaux extrêmes. ●

Contacts

Alexa Latapy, alex.latapy@shom.fr,
Inge Van Den Beld, inge.van.den.beld@shom.fr,
Nicolas Pouvreau, nicolas.pouvreau@shom.fr,
Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom)

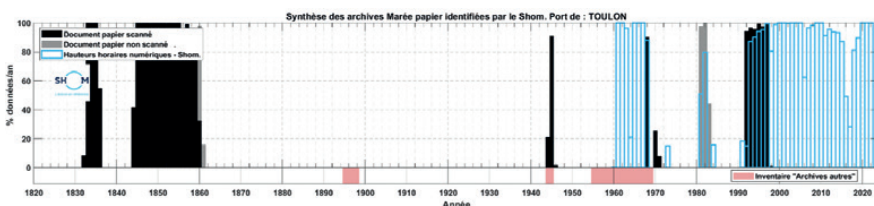


Figure 4. Synthèse sous forme de chronogramme des mesures marégraphiques disponibles à Toulon (en noir : les documents papier scannés ; en gris : les documents papier non scannés ; en bleu : les données en format numérique ; en rose : les données inventoriées dans d’autres centres d’archives).



Frédéric Pons, frederic.pons@developpement-durable.gouv.fr,
Cerema - Direction Méditerranée

Références

- Bradshaw, E., Rickards, L., & Aarup, T. (2015). *Sea level data archaeology and the Global Sea Level Observing System (GLOSS)*. *GeoResJ*, 6, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.005>
- Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., & Garcin, M. (2015). *How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels : Application to the Xynthia event at La Rochelle (France)*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1135-1147. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1135-2015>
- Cazenave, A., & Llovel, W. (2009). *Contemporary Sea Level Rise*. *Annual Review of Marine Science*, 2(1), 145-173. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081105>
- Cipollini, P., Calafat, F. M., Jevrejeva, S., Melet, A., & Prandi, P. (2017). *Monitoring sea level in the coastal zone with satellite altimetry and tide gauges*. *Integrative Study of the Mean Sea Level and Its Components*, 35-59.
- Douglas, B. C. (1991). *Global sea level rise*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C4), 6981-6992. <https://doi.org/10.1029/91JC00064>
- Ferret, Y. (2016). *Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire (27 SHOM/DOPS/HOM/MAC/NP)*. Shom. <http://refmar.shom.fr/documents/10227/194658/Reconstruction+serie+maregraphique+Saint-Nazaire+par+Yann+Ferret+2016.pdf>
- Giloy, N., members of the Working Group, & "Historical Storms and Floodings". (2021). *Multidisciplinary expertise of historical information for the characterization of water levels during storm and coastal flooding events*. *Proceedings of the 9th EuroGOOS International Conference*. 3-5 May, Brest, France. EuroGOOS 2021, Brest, France.
- Gouriou, T. (2012). *Évolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime* [PhD thesis, La Rochelle]. <http://www.theses.fr/2012LAROS361>
- Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J. A. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D. A., Jänicke, L., Lee, S. B., Müller, M., Schindelegger, M., Talke, S. A., Wilmes, S.-B., & Woodworth, P. L. (2020). *The Tides They Are a-Changin' : A comprehensive review of past and future non-astronomical changes in tides, their driving mechanisms and future implications*. *Reviews of Geophysics*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>
- Hogarth, P., Hughes, C. W., Williams, S. D. P., & Wilson, C. (2020). *Improved and extended tide gauge records for the British Isles leading to more consistent estimates of sea level rise and acceleration since 1958*. *Progress in Oceanography*, 184, 102333. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102333>
- Intergovernmental Oceanographic Commission/UNESCO. (2020). *Workshop on Sea Level Data Archaeology* (Workshop Reports No. 287, p. 47).
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boshung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Khan, M. J. U., Van Den Beld, I., Wöppelmann, G., Testut, L., Latapy, A., & Pouvreau, N. (2023). *Extension of high temporal resolution sea level time series at Socoa (Saint Jean-de-Luz, France) back to 1875*. *Earth System Science Data Discussions*, 1-23. <https://doi.org/10.5194/essd-2022-443>
- Latapy, A. (2020). *Influence des modifications morphologiques de l'avant-côte sur l'hydrodynamisme et l'évolution du littoral des Hauts-de-France depuis le XIX^e siècle* [Thèse de doctorat, Université Littoral Côte d'Opale]. <http://www.theses.fr/2020DUNK0554>
- Latapy, A., Ferret, Y., Testut, L., Talke, S., Aarup, T., Pons, F., Jan, G., Bradshaw, E., & Pouvreau, N. (2022). *Data rescue process in the context of sea level reconstructions : An overview of the methodology, lessons learned, up-to-date best practices and recommendations*. *Geoscience Data Journal*. <https://doi.org/10.1002/gdj3.179>
- Philippe, V. (2003). *Étude critique des observations du marégraphe de Marseille réalisée par le service de Géodésie et nivellement de l'Institut géographique national*. *Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA, spécialité Topographie*.
- Pons, F. (2007). *Digitalisation de signaux ou d'étangs du golfe du Lion* (p. 182). CETE Méditerranée.
- 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* [PhD thesis, Université de La Rochelle]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00353660/document>
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-Level Science : Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press.
- Saint Crieg, L., Gaume, E., Hamdi, Y., & Ouarda, T. B. (2022). *Extreme Sea Level Estimation Combining Systematic Observed Skew Surges and Historical Record Sea Levels*. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR030873.
- Talke, S., & Jay, D. (2017). *Archival Water-Level Measurements : Recovering Historical Data to Help Design for the Future*. Civil and Environmental Engineering Faculty Publications and Presentations. https://pdxscholar.library.pdx.edu/cengin_fac/412
- Ullmann, A., Pons, F., & Moron, V. (2005). *Tool kit helps digitize tide gauge records*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 86(38), 342-342. <https://doi.org/10.1029/2005EO380004>
- Van Den Beld, I., Kermaol, R., Latapy, A., Pouvreau, N., Vignaud, C., Michaud, H., & Fraboul, C. (2022). *PAPI d'intention Saint-Malo - Axe 1 - Action 1.II - Livrable 3 : Fourniture de la série reconstruite des hauteurs d'eau à Saint-Malo après le contrôle, la validation et la mise en cohérence des données numériques*. Shom.
- Wöppelmann, G., Marcos, M., Coulomb, A., Miguez, B. M., Bonnetain, P., Boucher, C., Gravelle, M., Simon, B., & Tiphaneau, P. (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*, 88(9), 869-885.

ABSTRACT

In the current context of climate change, the contribution of multi-decadal to secular sea level time series is essential for a better understanding of future coastal hazards. In France, systematic observations of sea level using mechanical tide gauges have been carried out since the mid-19th century. To process these data, it is first necessary to digitize this scientific and cultural heritage and validate the new data. In this context, data archaeology activities have been undertaken at Shom for several decades. This initiative responds to the recommendations of the GLOSS (Global Sea Level Observing System) program for the preservation of historical sea level measurements. As a result, numerous time series have been extended by several decades of measurements for many ports along the French coast. This article presents the methodology used in sea level data archaeology projects, and the ones carried out by the Shom French coasts that have high tidal ranges, with a special focus on historical observations acquired in the Mediterranean Sea.

Des émissions de gaz à effet de serre à l'élévation du niveau de la mer : contraindre la dynamique du bilan d'énergie planétaire par la géodésie spatiale

■ Jonathan CHENAL - Benoît MEYSSIGNAC

MOTS-CLÉS

Changement climatique, déséquilibre énergétique planétaire, niveau de la mer

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre conduisent à l'apparition d'une différence en haut de l'atmosphère entre le flux radiatif solaire reçu par la Terre et le flux radiatif infrarouge émis par la Terre. On appelle cette différence le déséquilibre énergétique planétaire, qui correspond à l'énergie additionnelle stockée par le système climatique. Le déséquilibre énergétique planétaire est donc la cause du réchauffement global. De plus, comme 90 % du réchauffement global est absorbé par l'océan, le déséquilibre énergétique planétaire est la cause d'une contribution importante à l'élévation du niveau de la mer. Difficile à mesurer directement par méthode radiative, le déséquilibre énergétique planétaire peut être déduit par la mesure géodésique de sa contribution à l'élévation du niveau de la mer. Cette méthode géodésique permet de contraindre la dynamique du bilan d'énergie planétaire pour mieux anticiper les conséquences du changement climatique.

Introduction

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont sans équivoque la cause du changement climatique actuel. Parmi les conséquences de celui-ci, l'élévation du niveau de la mer est une source importante de préoccupation pour les zones littorales, qui sont les plus densément peuplées dans le monde. Or les projections climatiques actuelles d'élévation du niveau de la mer, comme des autres variables climatiques, souffrent d'incertitudes encore importantes qui sont symptomatiques d'incompréhensions encore majeures de la réponse de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre. Le rôle clé joué par l'océan dans la dynamique du bilan d'énergie du système climatique permet d'envisager l'élévation du niveau de la mer non seulement pour les conséquences qu'elle aura pour les littoraux, mais aussi pour en tirer des informations sur le système climatique lui-même. En effet, l'observation du niveau de la mer et la fermeture du bilan de ses contributions permet d'estimer les variations des principaux réservoirs d'énergie du système climatique et ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer la compréhension du système climatique et suivre son évolution en

réponse aux émissions de gaz à effet de serre.

Cet article présente d'abord la physique de la réponse radiative de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre et l'apparition du déséquilibre énergétique planétaire (I), puis l'élévation du niveau de la mer en tant que manifestation majeure du changement climatique et la méthode géodésique pour évaluer le déséquilibre énergétique planétaire à partir de la mesure du niveau de la mer (II).

Émissions de gaz à effet de serre et anomalie dans la réponse radiative de la Terre

■ Rayonnement solaire, température de surface, rayonnement infrarouge terrestre

Le Soleil est la principale source d'énergie du système climatique. Son rayonnement est maximal dans la partie visible du spectre électromagnétique. Une petite fraction de ce flux est captée par la Terre. Cela représente 340 W/m^2 en moyenne à la surface de la Terre. L'albédo de la Terre, c'est-à-dire la capacité de celle-ci à réfléchir le rayonnement, est de l'ordre de 0,3,

si bien qu'environ 240 W/m^2 pénètrent effectivement dans le système climatique et 100 W/m^2 sont directement réfléchis vers l'espace. Le rayonnement capté traverse l'atmosphère jusqu'à la surface et y est absorbé. Ce flux est la principale source d'énergie du système climatique, qui permet la mise en mouvement de l'ensemble du système (figure 1).

En réponse à l'absorption du rayonnement solaire visible par la surface et l'atmosphère, ceux-ci émettent un rayonnement dans le domaine infrarouge. Or, l'atmosphère est majoritairement opaque dans ce domaine spectral, en raison de la présence de gaz à effet de serre (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, etc.). En absorbant le rayonnement infrarouge qu'émettent la surface et l'atmosphère, l'atmosphère se réchauffe elle-même et émet à son tour un rayonnement infrarouge isotrope : une moitié est émise vers le haut, jusqu'à ne plus être réabsorbée et se propager librement hors de l'atmosphère à une altitude appelée dernière altitude d'émission thermique, tandis qu'une autre moitié est émise vers la surface et contribue à la réchauffer. Sans atmosphère, la température de surface de la Terre serait de -18 degrés

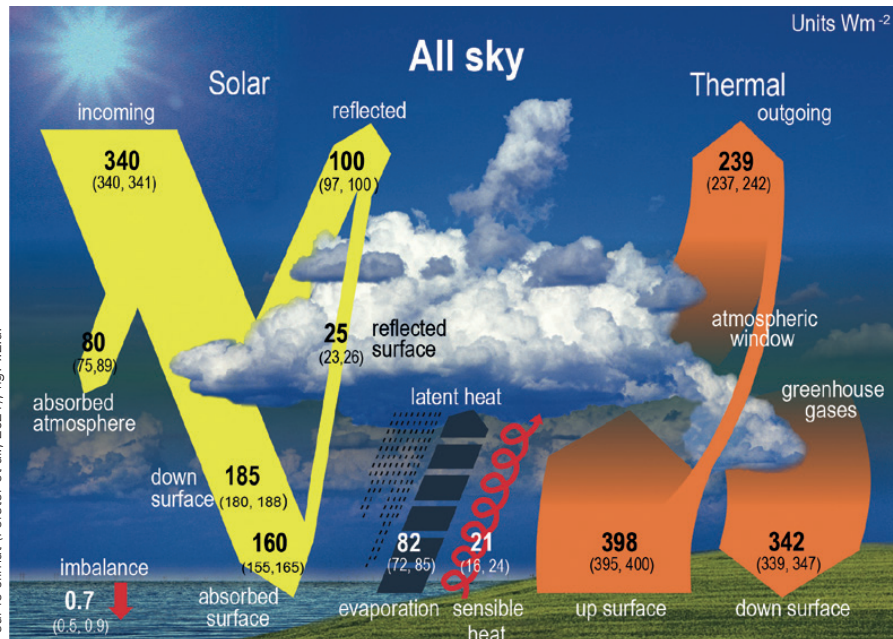


Figure 1. Flux entrant, sortant et internes au système climatique.

Celsius ; avec l'atmosphère, elle est de +13 degrés : c'est l'effet de serre. Au sommet de l'atmosphère, on parle d'équilibre radiatif lorsque le flux solaire visible net entrant dans le système climatique est égal au flux infrarouge sortant.

■ Émissions de gaz à effet de serre, déséquilibre énergétique planétaire

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre font augmenter la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre en raison du long temps de résidence de ceux-ci (plus d'un siècle pour le dioxyde de carbone par exemple). Cette augmentation de leur concentration rend la Terre plus opaque au rayonnement infrarouge. Ainsi, l'altitude de dernière émission thermique s'élève et donc la température associée à cette émission diminue et le flux infrarouge net sortant émis par la Terre diminue (loi de Stefan-Boltzman). Comme la Terre reçoit toujours le même flux solaire incident et que le flux infrarouge sortant diminue, il apparaît une différence entre les deux flux. Cette différence est appelée forçage radiatif tant que le système climatique n'y a pas encore répondu. Le système climatique s'ajuste toutefois pour rétablir l'égalité des flux entrant et sortant en se réchauffant. Cet ajustement est appelé réponse radiative de la Terre et elle dépend de la température de surface. À mesure que la température de surface augmente, la réponse radiative augmente aussi. La différence entre le forçage radiatif et la

réponse radiative de la Terre est appelée déséquilibre énergétique planétaire ; celui-ci se réduit au fur et à mesure de l'augmentation de la température de surface, mais cela prend du temps du fait de l'inertie du système climatique (typiquement plusieurs décennies à plusieurs siècles). Le déséquilibre énergétique planétaire représente donc à la fois la différence entre les flux radiatifs entrant et sortant au sommet de l'atmosphère, mais aussi la différence entre le forçage radiatif dû aux gaz à effet de serre et la réponse radiative proportionnelle à la température de surface. Le déséquilibre énergétique planétaire, en tant que différence de flux radiatifs, représente la quantité d'énergie absorbée par le système climatique. Selon le ch. 7 du 6^e rapport du groupe I du GIEC (Forster et al., 2021), 91 % de cette énergie est absorbée par l'océan sous forme de chaleur, 3 % par la cryosphère, 5 % par les surfaces continentales et 1 % par l'atmosphère (figure 2).

Le déséquilibre énergétique planétaire est petit par rapport aux flux d'énergie entrant et sortant du système climatique en haut de l'atmosphère, d'environ deux ordres de grandeur plus petit. Selon le ch. 7 du 6^e rapport du groupe I du GIEC (Forster et al., 2021), sa valeur moyenne sur la période 2006-2018 vaut $0,79 [0,52;1,06] \text{ W/m}^2$ (médiane, 90 % intervalle de confiance). Cette petite valeur est difficile à mesurer par radiométrie en haut de l'atmosphère : la mission CERES de la NASA qui mesure le bilan radiatif en haut de l'atmos-

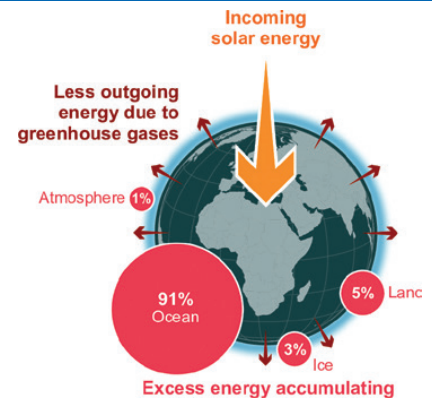


Figure 2. Répartition de la chaleur absorbée en raison du déséquilibre énergétique planétaire. Source : (Forster et al., 2021), FAQ 7.1.

phère a une précision de $\sim 0,2 \text{ W/m}^2$ par décennie, mais une exactitude de seulement $\pm 2,5 \text{ W/m}^2$ en raison des difficultés de calibration absolue des radiomètres (Loeb et al., 2018). Elle ne permet donc pas de mesurer la valeur absolue du déséquilibre énergétique de la Terre. En revanche, il est possible de mesurer de manière absolue le stock d'énergie qui s'accumule dans l'océan et d'en déduire, par dérivation, le déséquilibre énergétique planétaire. Deux méthodes aujourd'hui permettent de faire cela précisément : 1) la mesure *in situ* quasi globale des températures de l'océan par la flotte de dériveurs autonomes Argo et 2) la mesure de l'expansion thermique de l'océan qui contribue à la hausse du niveau de la mer.

L'élévation du niveau de la mer, manifestation de la réponse du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre

■ Mesures et causes de l'élévation du niveau de la mer

Les variations du niveau de la mer sont mesurées de longue date par les marégraphes et, depuis 1993 et le lancement de la mission Topex-Poséidon, par altimétrie spatiale (page 29, Prandi - Ablain). Le rythme d'élévation est mesuré entre 1971 et 2018 à environ $2,33 \text{ mm/an}$ [$1,55;3,12$] (médiane, 90 % intervalle de confiance) (Fox-Kemper et al., 2021), et entre 1993 et 2021 à $3,3 \text{ mm/an} \pm 0,3 \text{ mm/an}$ (Guérou et al., 2023), avec une accélération statistiquement significative de $0,12 \pm 0,05 \text{ mm/an}^2$. Les contributions climatiques à cette élévation sont l'expansion thermique de l'eau de mer et le bilan de masse de l'océan.



Comme expliqué dans la première partie, l'océan absorbe une très large fraction du déséquilibre énergétique planétaire sous forme de chaleur. Cette absorption se traduit par la dilatation de l'eau de mer qui contribue à l'élévation du niveau de la mer. On peut calculer que $0,1 \text{ W/m}^2$ de déséquilibre énergétique planétaire équivaut à $0,24 \text{ mm/an}$ d'élévation du niveau de la mer (Meyssignac et al., 2023b) ; cette contribution à l'élévation du niveau de la mer est appelée la contribution thermostérique. La part de celle-ci est estimée par les mesures de température et salinité des campagnes hydrographiques et d'Argo (à partir de 1995) à environ 50,4 % entre 1971 et 2018, et à 38,6 % sur 2006-2018 (Fox-Kemper et al., 2021) (voir figure 3). Toutefois, cette contribution est loin d'être homogène à la surface de l'océan, et sa structure spatiale explique celle de l'élévation du niveau de mer. La mesure du contenu de chaleur de l'océan par les campagnes hydrographiques et par le réseau Argo se heurte à des difficultés de maîtrise instrumentale, de limite d'échantillonnage spatio-temporel (en particulier sur la verticale) et donc d'interpolation des mesures.

L'autre contribution à l'élévation du niveau de la mer est l'apport d'eau douce, qui augmente le bilan de masse de l'océan. Celui-ci se décompose en diverses contributions : la fonte des glaciers continentaux (22,2 % sur 1971-2018), de la calotte du Groenland (12,6 % également sur 1971-2018) et de la calotte de l'Antarctique (7,1 % sur 1971-2018), et les variations des stocks d'eau liquide

continentaux (7,7 % sur 1971-2018) (figure 3). Sur les figures 2 et 3, on peut noter que les quelques pourcents de déséquilibre énergétique planétaire absorbé par les glaces correspondent à une fraction importante (en l'occurrence 49,6 % sur 1971-2018) d'élévation du niveau de la mer. Cette contribution du bilan de masse de l'océan peut être mesurée par gravimétrie spatiale, avec les missions GRACE et GRACE-FO (Blazquez et al., 2018).

■ Contraindre le bilan d'énergie planétaire avec la géodésie spatiale

Si la mesure radiative directe du déséquilibre énergétique planétaire est difficile, sa mesure par l'intermédiaire du contenu de chaleur de l'océan offre une alternative qui donne accès à plus de 90 % du déséquilibre énergétique planétaire, mais l'accès au contenu de chaleur de l'océan par mesure de températures a des limites liées surtout à l'échantillonnage spatio-temporel. Pour y remédier, une méthode géodésique a été développée, consistant à calculer la contribution thermostérique par estimation de l'expansion thermique de l'océan à partir de la différence entre le niveau de la mer observé par altimétrie spatiale et la contribution à l'élévation du niveau de la mer due au bilan de masse de l'océan mesuré par gravimétrie spatiale (Marti et al., 2022). Cette méthode fournit une mesure sans limite de profondeur, avec une couverture globale homogène, et une bonne maîtrise des incertitudes du système d'observation, car elle utilise peu d'instruments (au total cinq alti-

mètres satellitaires à ce jour : Topex/Poséidon, Jason 1, 2, 3 et Sentinel-6 Michael Freilich). Elle permet un suivi du déséquilibre énergétique planétaire comparable à celui de CERES avec une résolution temporelle bisannuelle et une exactitude de $\pm 0,2 \text{ W/m}^2$ (voir figure 4). Cette approche permet en outre de vérifier la fermeture du bilan du niveau de la mer (Barnoud et al., 2021, Meyssignac et al., 2023b).

Les leviers d'amélioration de la méthode géodésique sont identifiés et concernent d'abord l'altimétrie spatiale, avec l'objectif de réduire l'incertitude sur la tendance d'élévation du niveau de la mer de $0,3 \text{ mm/an}$ sur 20 ans à $0,1 \text{ mm/an}$ sur 10 ans (Meyssignac et al., 2023b), via l'amélioration des métadonnées de l'altimétrie, dont l'estimation de la correction de troposphère humide (en améliorant la stabilité des radiomètres embarqués ou en exploitant le potentiel du GNSS) et du repère international de référence terrestre (ITRF) (en densifiant le réseau de télémétrie laser sur satellites ou avec la future mission GENESIS). Ensuite, la continuation et l'amélioration de la gravimétrie spatiale sont envisagées avec les futures missions NGGM/MAGIC et CARIOQA. In fine, l'obtention de séries longues de déséquilibre énergétique planétaire permettra de contraindre la dynamique du bilan d'énergie planétaire et de caractériser la trajectoire climatique effectivement suivie par la planète en réponse aux émissions de gaz à effet de serre et à leur réduction.

Conclusion et perspectives

L'émergence de la méthode géodésique de contrainte du déséquilibre énergétique planétaire, observé via l'élévation du niveau de la mer, répond aux lacunes de systèmes d'observation antérieurs. Ces travaux confirment que l'élévation du niveau de la mer est l'application la plus exigeante de la géodésie (*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 2020). Au-delà du strict périmètre de cet article consacré au déséquilibre énergétique planétaire et à sa mesure par géodésie spatiale, des perspectives de plusieurs ordres sont à mentionner.

Sur le plan scientifique, les efforts de réduction des incertitudes de la méthode

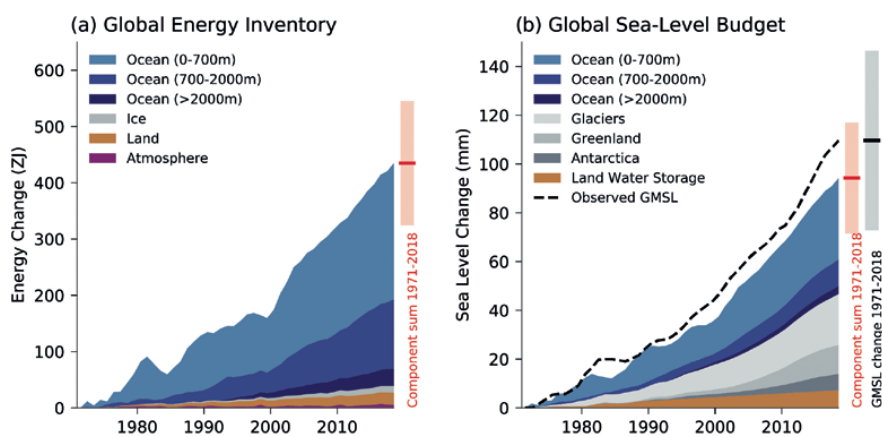


Figure 3. Inventaire des quantités de chaleur absorbées par les compartiments du système climatique (gauche). Inventaire des contributions à l'élévation du niveau de la mer (droite).

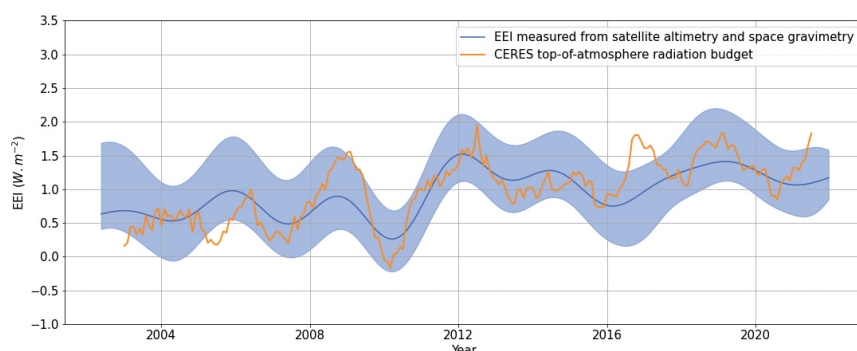


Figure 4. Déséquilibre énergétique planétaire par la méthode géodésique (bleu) avec intervalle de confiance à 90 %, et son équivalent radiatif mesuré au sommet de l'atmosphère par CERES (orange). Figure adaptée de (Marti et al., 2022) avec la permission des auteurs.

géodésique de mesure du déséquilibre énergétique planétaire permettent d'envisager la mise en place d'un système d'observation géodésique spécialement conçu à cette fin. L'amélioration de la contrainte sur le bilan d'énergie planétaire entrevue par la méthode géodésique ouvre la possibilité de tester les théories fondamentales du bilan d'énergie et de quantifier la réponse du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre et ses variations temporelles (Chenal et al., 2022, Meyssignac et al., 2023a,c).

Cette perspective scientifique forme le socle pour envisager un rôle pour la géodésie au service des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. En permettant de suivre la trajectoire climatique effectivement suivie par la Terre par l'intermédiaire du déséquilibre énergétique planétaire, elle répond aux besoins des politiques d'atténuation du changement climatique (comment le système climatique répond-il aux émissions de gaz à effet de serre ?) ; en permettant de contraindre l'ampleur de la réponse du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre, elle s'inscrit dans la réponse aux besoins des politiques d'adaptation aux effets du changement climatique (quelle est l'amplitude des impacts à venir du changement climatique ?). ●

Contacts

Jonathan Chenal, Direction des programmes, IGN, Ramonville-Saint-Agne, jonathan.chenal@ign.fr

Benoît Meyssignac, Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales

(Université de Toulouse, CNRS, CNES, IRD), Toulouse, Benoit.Meyssignac@cnes.fr

Références

Barnoud, Anne, et al. (2021) "Contributions of altimetry and Argo to non closure of the global mean sea level budget since 2016." *Geophysical Research Letters* 48.14: e2021GL092824.

Blazquez, A., et al. (2018). *Exploring the uncertainty in GRACE estimates of the mass redistributions at the Earth surface: implications for the global water and sea level budgets.* *Geophysical Journal International*, 215(1), 415-430.

Chenal, Jonathan, et al. (2022) "Observational Constraint on the Climate Sensitivity to Atmospheric CO₂ Concentrations Changes Derived from the 1971-2017 Global Energy Budget." *Journal of Climate* 35.14 : 4469-4483.

Forster, P., et al. (2021) "The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity". 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, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923-1054, doi: 10.1017/9781009157896.009.

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, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211-1362, doi: 10.1017/9781009157896.011.

Guérou, Adrien, et al. (2023) "Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty." *Ocean Science* 19.2 : 431-451.

Loeb, Norman G., et al. (2018) "Clouds and the earth's radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) top-of-atmosphere (TOA) edition-4.0 data product." *Journal of Climate* 31.2 : 895-918.

Marti, Florence, et al. (2022) "Monitoring the ocean heat content change and the Earth energy imbalance from space altimetry and space gravimetry." *Earth System Science Data* 14.1 : 229-249.

Meyssignac, Benoît, et al. (2023a) "Time-variations of the climate feedback parameter are associated with the Pacific Decadal Oscillation." *Communications Earth & Environment* 4.1 : 241.

Meyssignac, Benoît, et al. (2023b) "How accurate is accurate enough for measuring sea-level rise and variability." *Nature Climate Change* 13.8 : 796-803.

Meyssignac, Benoît ; et al. (2023c) "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. 10.37053/lameteorologie-2023-0069

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2020). "Evolving the Geodetic Infrastructure to Meet New Scientific Needs". Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25579>.

ABSTRACT

Anthropogenic greenhouse gases emissions create a difference at the top of the atmosphere between the incoming solar flux received by the Earth and the outgoing infrared flux emitted by the Earth, coined "Earth energy imbalance": this difference which corresponds to the additional energy stored by the climate system is responsible for global warming. Since about 90% of global warming is absorbed by the ocean, the Earth energy imbalance is the cause of one important contribution to sea level rise. Difficult to measure directly with radiometry, the Earth energy imbalance can be derived from the geodetic measurement of its contribution to sea level rise. This geodetic method can help constraint the Earth energy budget dynamics which further enable to better anticipate the consequences of climate change.

L'élévation du niveau de la mer et les risques côtiers

■ Gonéri LE COZANNET

L'élévation du niveau de la mer est un processus qui s'est enclenché avec le réchauffement climatique d'origine humaine. Si ce phénomène ne peut plus être raisonnablement arrêté, 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 climat 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 possible de nombreuses options.

Causes et observations de l'élévation du niveau de la mer

Les observations sont claires : à l'échelle globale, l'élévation du niveau de la mer est en accélération. Pendant la période 1901-1990, le taux d'élévation du niveau marin moyen mondial était de 1,35+/-0,6 mm/an (0,78-1,92 mm/an, fourchette très probable). Sur la période 1993-2018, l'élévation du niveau marin s'accélère et atteint 3,25+/-0,4 mm/an (Fox-Kemper et al., 2021). 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.

Les causes de l'élévation du niveau de la mer sont aujourd'hui bien comprises : à l'échelle globale, ce phénomène est essentiellement dû au changement climatique d'origine humaine, qui engendre le réchauffement et l'expansion thermique des océans ainsi qu'une fonte des glaces de montagnes et des calottes polaires. À l'échelle régionale et locale, il peut être amplifié par des mouvements verticaux du sol (subsidence) ou par la dynamique océanique.

Les projections montrent que le niveau marin continuera à s'élever pendant des siècles, notamment en raison de

MOTS-CLÉS

Réchauffement climatique, anthropocène, anthropique, expansion thermique, fonte des glaces, GIEC

la réponse lente des calottes de glace au réchauffement climatique d'origine humaine (figure 1). En réalité, dépasser 1,5°C de réchauffement climatique rend inévitable un dépassement de 2 m d'élévation du niveau de la mer, sans doute bien après 2100. Pour le XXI^e siècle, la vitesse de l'élévation du niveau marin dépendra, d'une part, de nos émissions de gaz à effets de serre et, d'autre part, de la réponse de l'océan et des glaciers et calottes polaires à ce réchauffement. Les projections indiquent des valeurs de 0,5 à 1 mètre en 2100 selon les scénarios, mais des valeurs bien supérieures au mètre ne peuvent pas être exclues en cas d'effondrement de certains secteurs de l'Antarctique ou d'une fonte rapide du Groenland.

Conséquences de l'élévation du niveau marin

Au cours du XX^e siècle, le littoral s'est transformé dans de nombreuses régions, notamment en raison d'activités humaines modifiant les écosystèmes côtiers et les processus naturels de transport sédimentaire. Depuis le début des années 2000, les conséquences du réchauffement climatique deviennent de plus en plus évidentes dans les zones littorales. Par exemple, le réchauffement des océans affecte la biodiversité marine et les activités qui en dépendent telles que la pêche.

En ce qui concerne l'élévation du niveau de la mer, les évidences commencent également à s'accumuler. Dans les zones où l'élévation du niveau marin est accentuée par la subsidence (enfouissement) du sol comme en Virginie sur la côte Est des États-Unis, on observe depuis plusieurs décennies une augmentation des submersions marines à marée haute par temps calme. Ce type d'évènement est aujourd'hui observé dans d'autres secteurs, y compris dans des régions où le sol est relativement stable, en

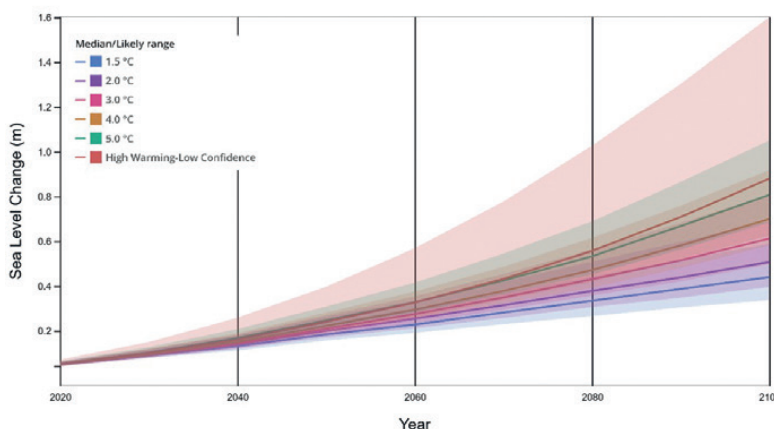


Figure 1. Projections globales d'élévation du niveau de la mer pour différents niveaux de réchauffement climatique, en 2100, par rapport à la période préindustrielle. Le scénario "High-Warming-low confidence" correspond à un effondrement précoce de secteurs de la calotte Antarctique.

(Source : NASA <https://sealevel.nasa.gov/pcc-ar6-sea-level-projection-tool>, GIEC, 2023)

Australie ou en Guyane française, par exemple (Longueville et al., 2022). Des études commencent également à mettre en perspective l'évolution des coûts des submersions marines lors de tempêtes avec l'élévation du niveau de la mer, aux États-Unis notamment. Enfin, les spécialistes australiens et américains de l'érosion présentent de plus en plus de plages sableuses dont l'érosion est difficile à expliquer sans l'élévation du niveau marin.

Au cours des prochaines décennies, l'élévation du niveau marin causera une accentuation de ces phénomènes. L'une des questions les plus urgentes est certainement celle des submersions chroniques à marée haute, un phénomène qui reste aujourd'hui peu anticipé dans les ports et les villes côtières et dont les études scientifiques nous rappellent qu'elles vont se multiplier dans le monde au cours de la décennie 2030. Si les conséquences, notamment humaines, sont moindres que pour des submersions marines survenant lors de tempêtes, les retours d'expérience effectués aux États-Unis montrent que les coûts indirects, résultant de l'interruption d'activités économiques, notamment portuaires, peuvent être importants.

À plus long terme, nous savons que dépasser 1,5°C de réchauffement climatique conduira inéluctablement à un dépassement de 2 mètres d'élévation du niveau marin, sans doute bien au-delà de 2100 (CoCliCo/PROTECT, 2022). Si de telles échéances peuvent paraître lointaines, il faut également songer que certaines infrastructures côtières ont des durées de vie très élevées allant

jusqu'au siècle dans le cas de sites industriels ou de centrales nucléaires. Choisir aujourd'hui avec soin la localisation de telles infrastructures peut se faire à un coût relativement faible, alors que leur protection ou leur relocalisation pourrait devenir très coûteuse ou difficile techniquement dans quelques décennies.

Les risques côtiers et l'adaptation

Les risques résultent de la rencontre entre un aléa, tel que la submersion marine ou érosion côtière, avec des personnes, des biens ou des écosystèmes exposés et plus ou moins vulnérables. L'élévation du niveau de la mer implique que les aléas submersion et érosion sont en augmentation. Mais en réalité, l'exposition aux risques augmente également, comme cela a bien été montré dans le dernier rapport du GIEC (GIEC, 2023). En Asie, notamment, les projections indiquent que 16 millions de personnes supplémentaires seront exposées à l'élévation du niveau de la mer d'ici à 2040, la moitié d'entre elles étant de nouveaux habitants en provenance d'autres régions et s'installant dans les zones basses, notamment des grands deltas (*figure 2*). Dans ce type de situation, une mesure peut consister à limiter l'augmentation de l'exposition aux risques autant que possible. Ces contraintes à l'urbanisme, qui prennent la forme des plans de prévention des risques littoraux en France, ont l'avantage de laisser des espaces disponibles pour les écosystèmes côtiers, limitant ainsi leur déclin.

Pour les infrastructures existantes, différentes options sont disponibles. La mesure la plus utilisée reste la protection, par des moyens d'ingénierie côtière ou en utilisant des écosystèmes dunaires, par exemple. Une autre mesure peut consister à anticiper un déplacement des enjeux. Cette option rencontre généralement un enthousiasme modéré chez les acteurs concernés. Elle peut être motivée par le constat que la protection des côtes est coûteuse, nécessite une planification sérieuse et implique des compromis, notamment sur la protection des écosystèmes côtiers. Typiquement, une barrière estuarienne permettant de réduire l'aléa de submersion peut coûter plusieurs milliards d'euros, se construit sur des périodes allant de 10 à 40 ans et a des conséquences importantes et souvent mal comprises sur les écosystèmes (Orton et al., 2023). La *figure 3* présente une telle infrastructure, l'Oosterscheldekering, sur l'Escaut aux Pays-Bas. Le déplacement des enjeux rencontre un intérêt en France à l'échelon national, notamment depuis la publication de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte depuis une dizaine d'années. Il se matérialise plus difficilement sur le terrain où les intérêts immédiats des acteurs vont rarement dans le sens d'un déplacement de leurs activités. On peut néanmoins citer le cas du village de Miquelon, où la relocalisation pourrait devenir un projet porté par les habitants eux-mêmes (Philippenko, 2022). Entre ces deux options extrêmes de protection à tout prix et de relocalisation, des réponses visant à réduire la vulnérabilité aux submersions peuvent être mises en œuvre. Il peut s'agir, par exemple, de construire des maisons à pilotis comme sur les atolls de Polynésie française, ou bien de la dépoldérisation de marais afin d'atténuer le pic de niveau d'eau lors des tempêtes, en favorisant le déversement de l'eau dans des zones humides plutôt que de risquer un débordement dans des zones habitées en canalisant les estuaires de manière excessive. Si elles apportent des bénéfices immédiats, ces méthodes perdent en efficacité au fur et à mesure que le niveau marin s'élève.

Source : GIEC, 2023.

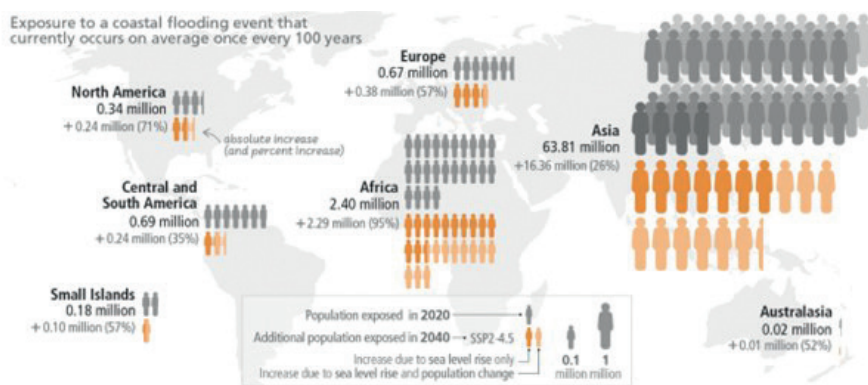


Figure 2. Populations exposées, actuellement et en 2040, à une tempête centennale (probabilité annuelle de survenance de 0,01).



© Goneri Le Cozannet

Figure 3. Barrière estuarienne de l'Oosterscheldekering aux Pays-Bas. Achèvement en 1986, la barrière peut être fermée une fois par an en fonction de la survenance de tempêtes à marée haute. Avec l'élévation du niveau de la mer, les travaux de l'Institut royal de météorologie des Pays-Bas (KNMI) montrent que la barrière devra être fermée de plus en plus souvent, ce qui posera de nouveaux défis pour la gestion et l'amélioration de cette infrastructure.



Une autre option, rarement motivée par l'élévation du niveau de la mer, peut consister à avancer vers la mer. Aux Maldives, par exemple, de plus en plus d'îles sont agrandies ou construites en déposant des sédiments sur le platier récifal. Lors de la construction de ces îles, l'élévation du niveau de la mer est prise en compte en rehaussant le sol par rapport aux îles naturelles. Les conséquences sur les écosystèmes, notamment coralliens, sont souvent défavorables et la motivation principale reste la création d'espace pour le développement urbain.

Un agenda pour l'adaptation côtière ?

Si l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer est conceptuellement bien décrite depuis plusieurs décennies, les modalités précises de sa mise en œuvre sont plus complexes. Pour cela, la dimension économique, sociale et politique de l'adaptation doit être comprise et les moyens de mise en œuvre doivent être financés, y compris

en ce qui concerne la phase de concertation. Spécifiquement, au-delà de la dimension technique et d'aménagement du territoire, on peut identifier les dimensions suivantes de l'adaptation :

- le processus politique qui régit la gouvernance de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer : réglementation, décisions à différentes échelles de temps, de l'échelle nationale et européenne, à l'échelle locale ;
- le processus de planification pour évaluer les risques, les options à mettre en œuvre, les réponses et à évaluer les résultats ;
- les aspects sectoriels de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer dans des domaines tels que la gestion de l'espace public, de l'usage des sols, l'agriculture, la pêche, l'aquaculture, le tourisme, la santé et les activités portuaires ;
- les mesures transsectorielles qui soutiennent l'adaptation, en particulier – mais pas uniquement – à l'élévation du niveau de la mer telles que le financement de l'adaptation, les mécanismes assurantiels, les politiques sociales, le développement

d'espaces de concertation au niveau local ou des services climatiques.

Dans beaucoup de pays, et notamment en France, des progrès importants ont été faits pour l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer au cours des 30 dernières années ; un exemple particulièrement marquant étant la prise en compte d'un scénario de niveau marin de 60 cm en 2100 depuis 2011 pour la réalisation de plan de prévention des risques littoraux. Mais définir un scénario de changement climatique ne dit rien des mesures que l'on entend mettre en œuvre pour s'adapter à l'élévation du niveau de la mer. Surtout, aucun acteur ne s'adapte à l'élévation du niveau marin seule : il s'agit aussi de faire face à l'augmentation des vagues de chaleur, des sécheresses et des pluies intenses, de commencer à ralentir le déclin rapide de la biodiversité et de répondre aux besoins urgents en matière de santé publique et de qualité de vie des citoyens.

Dans le 6^e rapport du GIEC, l'atteinte de ces objectifs de développement durable est appelée "développement résilient

face au changement climatique". Il s'agit clairement d'une rupture dans les modes de développement actuels, agir en mobilisant les réponses efficaces recensées dans les rapports du GIEC et d'autres rapports scientifiques, est le moyen dont nous disposons pour améliorer la qualité de vie des gens malgré le changement climatique. Les mettre en œuvre nécessitera de définir des objectifs clairs en matière de développement et d'adaptation, en portant une attention toute particulière à l'équité et à la justice des mesures mises en œuvre. ●

NDLR Dossier "Littoral menacé, un trait de côte qui recule", sept articles dans la revue Géomètre n° 2215, juillet – août 2023.

Contact

Gonéri Le Cozannet,
co-auteur du 6^e rapport du GIEC,
g.lecozannet@brgm.fr

Références

Longueville, François ; Thiéblemont, Rémi ; Bel Madani, A. ; Idier, Deborah ; Palany, P. ; D'Anna, M. ; Dutrieux, P. C. ; Védie, L. ; Lanson, Méline ; Suez Panama Bouton, B.

(2022) - *Impacts du changement climatique sur différents paramètres physiques en Guyane : caractérisation et projection* - GuyaClimat. Rapport final . BRGM/ RP-72111-FR, 349 p. <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-72111-FR>

Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211-1362, doi:10.1017/9781009157896.011. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter09.pdf
GIEC, 2023 : https://report.ipcc.ch/ar6sy/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
CoCliCo/PROTECT, 2022. Note d'orientation : à quelle échéance l'élévation du niveau

de la mer dépassera-t-elle 2 mètres ? Comment s'y adapter ? <https://coclicoservices.eu/note-dorientation-a-quellev-echeance-lelevation-du-niveau-de-la-mer-depassera-t-elle-2-metres-comment-sy-adapter/>

Orton, P., Ralston, D., van Prooijen, B., Secor, D., Ganju, N., Chen, Z., Fernald, S., Brooks, B. and Marcell, K., 2023. *Increased utilization of storm surge barriers: A research agenda on estuary impacts*. *Earth's Future*, 11(3), p.e2022EF002991.

Philippenko, 2022. <https://theconversation.com/que-faire-face-a-la-montee-du-niveau-de-la-mer-leexemple-de-miquelon-village-en-cours-de-deplacement-177786>

ABSTRACT

Sea-level rise is a process that has been set in motion by man-made global warming. While this phenomenon can no longer be reasonably halted, its speed will depend on greenhouse gas emissions and the response of ice caps to global warming. Ambitious climate policies, which limit greenhouse gas emissions massively and immediately, can bring major benefits for coastal adaptation by making many options possible.

• géomatique • topographie • SIG • géomatique • cartographie • génie civil •

photogrammétrie • géodésie • métrologie • hydrographie

POUR COMMUNIQUER PENSEZ À L'AFT

ANNONCES, BANNIÈRES, ÉVÈNEMENTS

L'AFT rapproche tous les professionnels de la topographie et de la géomatique (producteurs, utilisateurs, enseignants...)

photogrammétrie • géodésie • métrologie • hydrographie

CONTACT : SAMUEL GUILLEMIN
Tél : 06 72 12 08 97 Courriel : communication@aftopo.org

• géomatique • topographie • SIG • géomatique • cartographie • génie civil •

Apport de la gravimétrie absolue à l'estimation du niveau des mers

■ Marie-Françoise LEQUENTREC-LALANCETTE

La mesure et l'étude de la variation du niveau de la mer en zone côtière sont un enjeu scientifique et sociétal majeur. Les mesures marégraphiques montrent des tendances de quelques millimètres par an et doivent être associées à des mesures géodésiques permettant de séparer le signal du niveau de la mer du mouvement vertical continental. Il a été montré que le couplage de mesures GNSS et de gravimétrie absolue améliore la compréhension des signaux marégraphiques. Cet article décrit la méthodologie de mise en œuvre des mesures absolues ainsi que les résultats majeurs obtenus par des équipes internationales. Un bilan des mesures réalisées sur certains marégraphes métropolitains est décrit, ainsi que les perspectives nationales sur l'apport de la technologie quantique (gravimètre à atomes froids et géodésie chronométrique).

MOTS-CLÉS

Niveau de la mer, marégraphie, gravimétrie absolue, GNSS, marégraphe, pesanteur

Introduction

Le champ de pesanteur ou "la pesanteur" est un paramètre essentiel pour la compréhension de la physique de la Terre ainsi que de ses interactions avec les masses externes. Il intéresse à la fois les géodésiens pour la détermination de la forme de la Terre, les géophysiciens ainsi que les hydrologues pour la connaissance de la répartition des masses du sous-sol et en particulier des bilans de transfert de masses d'eau. En outre, les variations temporelles de la pesanteur de faible amplitude dues à l'hydrologie, l'atmosphère, l'océan sont de mieux en mieux étudiées pour deux raisons :

- la mission satellitaire GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), lancée en mars 2002, a montré des résultats exceptionnels (Wahr et al., 2004 ; Andersen and Hinderer, 2005 ; Frappart and Ramillien, 2018) avec la réalisation de modèles hydrologiques continentaux très précis ;
- la commercialisation des capteurs gravimétriques absolus à partir des années 90 pouvant atteindre des précisions de l'ordre de 10^{-8} m/s² soit 1 μ Gal (Niebauer et al., 1995 ;

Faller, 2002 ; Van Camp et al., 2005 ; Hinderer et al., 1991).

L'intérêt de mesures gravimétriques précises proches d'un site marégraphique a été démontré dans les années 90. Le rapport fondateur fut celui rédigé sous l'égide de l'Association internationale pour la physique des océans (IAPSO) qui présentait les recommandations sur les techniques de géodésie à mettre en œuvre aux marégraphes. Il était préconisé d'instrumenter les sites, en particulier par des techniques de géodésie géométrique GNSS et aussi par des mesures intégratives de gravimétrie (Carter et al., 1989).

La variation du niveau de la mer observée aux marégraphes est comprise entre 1 et 2 mm/an sur des durées d'observation supérieures à la centaine d'années (Wöppelmann et Marcos, 2016). Les amplitudes des mouvements verticaux sont à peu près du même ordre de grandeur, ce qui complexifie la séparation des signaux. Il est nécessaire d'observer très précisément les tendances du mouvement vertical côtier.

Sous l'impulsion de la COI (Commission océanographique intergouvernementale

tale de l'UNESCO), des observations satellitaires du mouvement du sol (GPS, puis GNSS) ont été associées quasi systématiquement aux sites marégraphiques d'intérêt (IOC, 1999 ; Poitevin et al., 2019), construisant ainsi des réseaux de stations permanentes d'observations satellitaires (CGPS ; Carter et al., 1994). En France, la plupart des sites marégraphiques instrumentés par le Shom dans le cadre du réseau RONIM (Réseau d'observation du niveau de la mer), sont désormais équipés d'une station permanente GNSS incluse dans le Réseau GNSS permanent (RGP) intégré à SONEL (www.sonel.org) dans le cadre du programme mondial d'observation du niveau de la mer (GLOSS).

Il est maintenant admis que selon les protocoles de calcul GNSS développés dans les équipes scientifiques et l'influence d'effets environnementaux mal corrigés comme les effets troposphériques (Wöppelmann et Marcos, 2016 ; Teferle et al., 2009), les solutions GNSS peuvent différer pour un même observatoire. La mesure de gravimétrie absolue présente alors un intérêt en tant qu'observable indépendant, car les variations du champ de pesanteur intègrent l'ensemble des variations de masses, dont le mouvement vertical. L'océan, l'hydrosphère et la Terre solide sont autant de sources potentielles de variations de la pesanteur terrestre (Lambert et al., 2006). Les mesures gravimétriques sont aussi indépendantes du système de référence terrestre, contrairement au GNSS (Mazzoti et al., 2007 ; Collilieux et Wöppelmann, 2011 ; Ophaug et al., 2016) .

La problématique en gravimétrie est la suivante : il s'agit d'estimer des tendances de variations de la pesanteur de l'ordre de 10^{-8} m/s² soit 1 μ Gal : un déplacement vertical de 1 mm induisant une variation de pesanteur



de 0,2 μGal (Williams et al., 2001 ; Van Camp et al., 2005 ; De Linage et al., 2007).

Les gravimètres répondant aux spécifications de mesures sont les gravimètres balistiques développés par la société *Microg Solutions*. Ce sont les instruments de terrain (c'est-à-dire transportables) les plus précis pour ce type d'application (Niebauer et al., 1995 ; Faller, 2002).

Les mesures de gravimétrie absolue n'ont pas été systématisées aussi rapidement que le GNSS à cause de la complexité de leur mise en œuvre, notamment instrumentale et logistique. En effet, ces capteurs ne peuvent être opérés en mode automatique et la fatigue mécanique de certains composants implique une contrainte forte sur une acquisition permanente des mesures en station (Van Camp et al., 2005). Les différentes observations côtières en gravimétrie absolue consistent à revisiter régulièrement des points remarquables.

Effet environnemental	Correction	Source
Pression atmosphérique	Normalisation de l'observable à une pression nominale pour chaque station.	Mesure sur site de la pression atmosphérique et correction avec un facteur : 0,3 $\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ (Boy et al., 1998)
Mouvement du pôle	Accélération centrifuge qui varie en fonction de la distance entre la station et l'axe de rotation de la Terre.	Coordonnées calculées par l'IERS (<i>Earth Rotation and Reference Systems Service</i>) et mises en ligne sur le site du constructeur : Microg solutions (Petit et al., 2010)
Correction de la marée terrestre	Attraction luni-solaire.	Modèle ETGTAB intégré à g9 (Wenzel et al., 2022).
Surcharge océanique	Attraction générée par le mouvement des masses d'eau.	Modèles mondiaux ou calculés à partir de données de station.

Table 1. Effets environnementaux majeurs pris en compte dans le calcul de la pesanteur absolue.

La mesure FG5

La mesure est basée sur le principe de la chute libre d'une masse d'épreuve dans une enceinte à vide mesurée par

interférométrie laser (figure 1). Dans le cas des gravimètres FG5, la masse consiste en un réflecteur en coin de cube formant un des bras de l'interféromètre et une horloge atomique

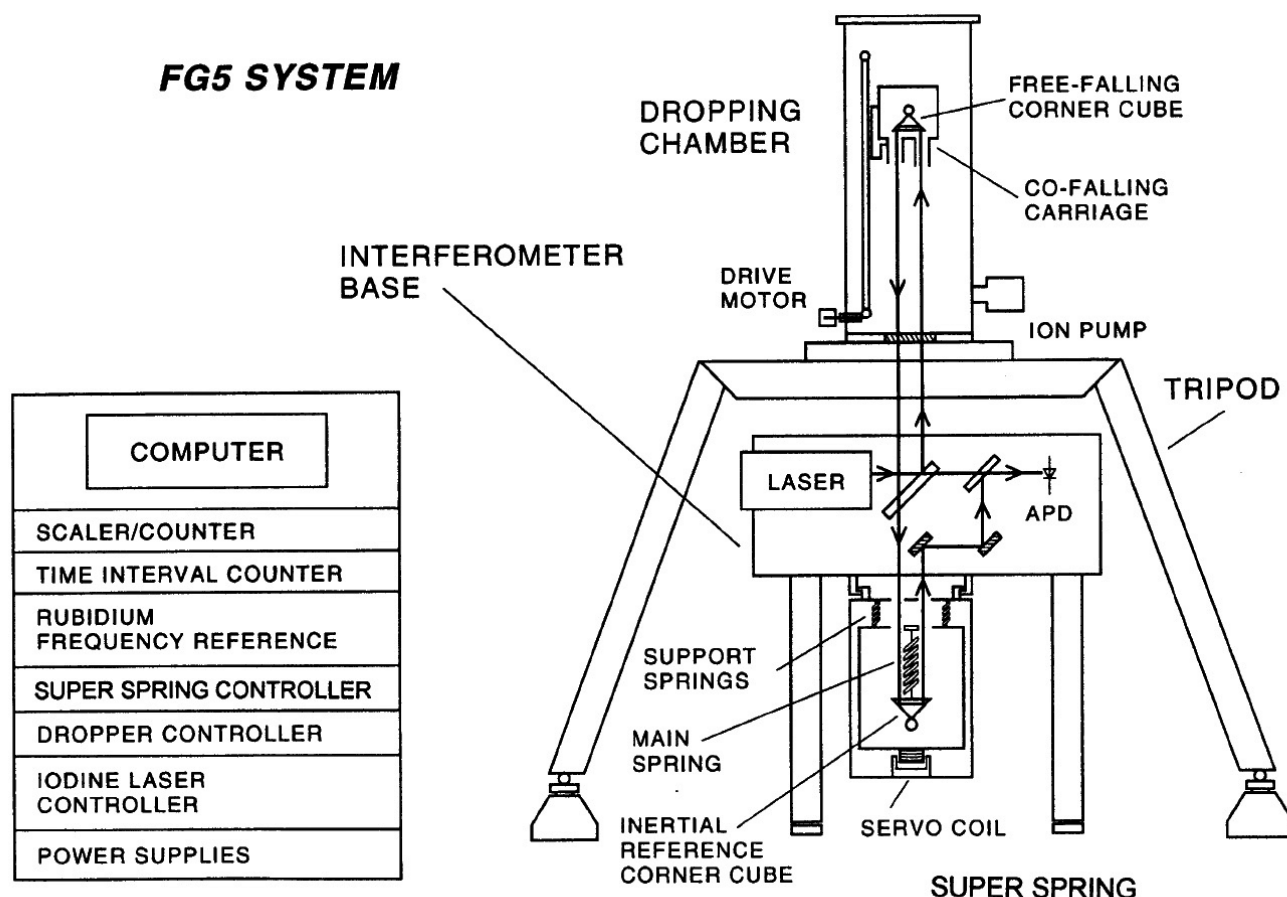


Figure 1. Principe du gravimètre absolu FG5 (Niebauer et al., 1995).



au rubidium permettant d'obtenir le temps et la distance et d'estimer l'accélération. La pesanteur est ainsi calculée à partir de l'équation du mouvement de Newton (Niebauer et al., 1995). Le système est aussi équipé d'un *Super Spring* (sismomètre longue période) pour filtrer une partie du bruit, comme l'effet de la houle à proximité des côtes (Williams et al., 2001). La pesanteur moyenne est obtenue en tenant compte du gradient vertical local, qu'il est donc nécessaire de calculer avant la mise en place du gravimètre absolu en station.

Les mesures sont généralement réalisées sur plusieurs jours à raison d'une série (*set*) par heure. Le traitement des mesures est effectué à l'aide du logiciel g9 développé par le constructeur. Ce logiciel permet, outre de régler les paramètres d'acquisition, de prendre en compte certains effets environnementaux.

L'estimation de l'erreur est calculée en combinant les erreurs instrumentales et l'erreur statistique du nombre de chutes, ainsi que l'erreur de mesure du gradient vertical (Niebauer, 1995 ; Williams, 2001 ; Ophaug et al., 2016). Pour cette dernière, il est ainsi recommandé que les mesures soient recalculées à une hauteur moyenne correspondant à la position dans la chambre de chute pour laquelle la mesure est le moins influencée par l'incertitude du gradient. Les données sont alors corrigées des effets environnementaux majeurs (*table 1*). Localement ces modèles sont perfectibles et il est ainsi recommandé de compléter les observations avec des mesures gravimétriques relatives précises en station permanente (gravimètre supraconducteur ou autre) pour améliorer les modèles locaux (Van Camp et al., 2005). C'est ce qui a été fait pour la station de Brest (*figure 2*).

Aucun capteur n'est plus précis qu'un gravimètre balistique FG5, l'estimation de l'exactitude de la mesure en devient complexe. Des campagnes d'intercomparaison sont donc réalisées régulièrement pour estimer les biais entre les différents capteurs existants (voir par exemple, Francis et al., 2005 ; Jiang et al., 2011). La

problématique de telles campagnes est de définir un protocole de mesure adapté, sachant que la difficulté est la prise en compte des variations temporelles de la pesanteur aux différents points de mesures (De Viron et al., 2011).

On notera qu'une des recommandations pour la réalisation de mesures de haute précision est finalement de n'utiliser qu'un seul capteur FG5 pour un observatoire (Van Camp et al., 2005).

Résultats majeurs à l'international

L'estimation du mouvement vertical sur les sites marégraphiques doit se faire avec une précision telle qu'il faudrait une durée d'observation d'un FG5 comprise entre 14 et 24 ans avec une mesure par an pour estimer une variation de pesanteur avec une précision de $0,1 \mu\text{Gal/an}$ soit $0,5 \text{ mm/an}$ (Van Camp et al., 2005). Avec les limites instrumentales précédemment évoquées, ceci nécessite de bien contraindre les effets environnementaux sur la mesure gravimétrique.

En mer Adriatique, une série de campagnes d'observation a été initiée en 1998, couplant plusieurs méthodes géodésiques dont l'acquisition GNSS et un gravimètre absolu sur des sites marégraphiques à raison de 15 mesures absolues sur sept ans (Zerbini et al., 2017). Les auteurs utilisent un gravimètre relatif supraconducteur en parallèle pour estimer les variations temporelles entre chaque visite. Ils démontrent ainsi l'influence de la composante océanique interannuel sur les mesures gravimétriques côtières. Ce point est aussi mentionné par (Lambert et al., 2006) qui souligne l'importance du signal interannuel dans les mesures gravimétriques à environ une période de sept ans, à prendre en compte pour ne pas biaiser les interprétations sur les tendances à long terme.

Dans le Pacifique Nord-Est, à l'ouest de la zone de subduction Cascadia, la surrection crustale (soulèvement progressif d'une portion de l'écorce terrestre) a été étudiée en combinant

les données GNSS et de gravimétrie absolue à des sites marégraphiques (Mazzoti et al., 2007). Les auteurs montrent dans ce cas la nécessité de modéliser plus précisément les effets géodynamiques impactant la valeur de la pesanteur dans ce contexte de zone subduction, pour isoler la composante due au mouvement vertical.

Au Royaume-Uni, des mesures absolues ont été réalisées avec un gravimètre FG5 sur trois marégraphes en Cornouaille, en Écosse et aux Îles Shetlands (Williams et al., 2001). Deux stations, Lerwick et Newlyn, ont été conservées pour une détermination de la hausse du niveau de la mer dans les îles britanniques. Une campagne de mesures par an y a été faite sur une durée totale de neuf ans entre 1995 et 2004. Les auteurs montrent l'apport non négligeable des mesures de pesanteur en complément du GNSS. Les solutions du CGPS sont systématiquement biaisées par rapport aux analyses gravimétriques ou géologiques (Teferle et al., 2009). Une des raisons avancées par les auteurs est le rattachement à l'ITRF2000 dont le centre de masse déterminé par les données des stations laser diffère de celui du système régional CGPS et du centre de masse terrestre. Dans ce cas, la gravimétrie absolue est un moyen de quantifier et corriger les biais du CGPS. La hausse du niveau de la mer dans les îles britanniques est ainsi estimée entre $0,6 \text{ mm/an}$ et $1,9 \text{ mm/an}$ suivant les stations CGPS choisies pour le calcul. Ce résultat est encore entaché d'erreurs par manque d'échantillonnage et devrait être amélioré au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données GNSS et de gravimétrie absolue.

Les projets nationaux

En France, les expérimentations de gravimétrie absolue aux sites marégraphiques ont été rendues possible par l'acquisition de deux capteurs FG5 de la société Microg solutions par la communauté scientifique française à partir de 1997 (FG5#206 et FG5#228). Le premier, opéré par l'EOST (École et observatoire des sciences de la Terre de



Figure 2. Station gravimétrique Brest-Shom.

Strasbourg) et le deuxième, opéré par l'équipe de Géosciences de l'université de Montpellier.

En 1998, une station gravimétrique a été créée sur le site du Shom à Brest, à quelques kilomètres du marégraphe et de la station permanente RGP (figure 2).

Les premières années d'observation à Brest ont permis de réaliser des études complètes de la surcharge océanique (Llubes et al., 2001 ; Vey et al., 2002 ; Llubes et al., 2008) et d'appréhender les effets environnementaux liés à la proximité de l'océan. Le mouvement des masses d'eau lié à la marée océanique génère une flexure de la croûte et induit une redistribution des masses océaniques dans les zones littorales. Cela peut affecter la valeur de la pesanteur de quelques dizaines de μGal . Il a été montré la parfaite cohérence entre le signal de marée et le signal gravimétrique. À la pointe de la Bretagne, les amplitudes de marée peuvent être



Figure 3. Mesures de gravimétrie absolue avec un FG5 au marégraphe de Marseille.



fortes et le signal de surcharge océanique local est d'environ 16 % plus fort que celui prédit par les modèles (Llubes et al., 2001). Un gravimètre relatif CG3M a ainsi été mis en station permanente entre 2003 et 2004 pour modéliser plus précisément l'effet de cette surcharge afin de corriger la mesure absolue.

Puis, des mesures périodiques ont été mises en place et pour chaque campagne à partir de 2001, un protocole identique a été suivi, comprenant un set par heure consistant en une centaine de chutes espacées de 10 secondes. Il a été important de prévoir ces mesures pendant au moins 48 h selon les conditions atmosphériques pour obtenir un signal exploitable. En effet, le bruit résiduel océanique et barométrique est très fort après filtrage et correction dans les conditions de tempêtes saisonnières.

Un total de 19 campagnes de mesures a été réalisé depuis 1998. Les données de gravimétrie absolue sont en cours de publication.

En parallèle, des points étaient réalisés aux marégraphes de Marseille (*figure 3*) et, plus récemment, depuis 2006, près du marégraphe de La Rochelle et à l'île d'Aix. La périodicité de revisite de ces points est encore trop faible pour une interprétation statistique acceptable.

Perspectives

À l'avenir, le développement de la gravimétrie quantique, éliminant l'aspect mécanique de la chute libre d'un coin de cube, permettra de réaliser des mesures en continu. Cette technologie est déjà mature pour des capteurs absolus de terrain en mer (Bidel et al., 2018), en aéroporté (Bidel et al., 2023) et à terre (Ménoret et al., 2018 ; Vu et al., 2023). Elle devra être testée sur les sites marégraphiques déjà instrumentés.

À plus long terme, l'utilisation d'horloges atomiques transportables, reliées par fibres optiques, permettra d'avoir accès au potentiel de pesanteur (Delva et al., 2019 ; Lion et al., 2017) : c'est le domaine de la géodésie chronométrique. En France, plusieurs initiatives sont en cours : le projet Equipex T-REFIMEVE (Réseau fibré métrologique à vocation européenne ; <https://www.refimeve.fr>),

coordonné par l'Université Sorbonne Paris-Nord et piloté par le Laboratoire de physique des lasers (LPL) et le SYRTE. Ce réseau permet le transfert longue distance d'une fréquence optique ultra stable sur un réseau internet. Il devrait être abouti en 2029 pour la ligne Paris Brest. En parallèle, se développe un projet de réalisation d'une horloge atomique portable. L'ANR ROYMAGE (hoRloge Optique à Ytterbium Mobile Appliquée à l'exploration GÉodésique) devra aboutir d'ici quelques années à la réalisation d'une horloge transportable pouvant être déployée le long du réseau (Lisdat, et al., 2016 ; Rahmouni et al., 2023).

Conclusions

Les mesures balistiques de gravimétrie absolue sont des compléments essentiels aux mesures géométriques de types GNSS pour une meilleure estimation des mouvements verticaux en zone côtière. Ces mesures ne sont pas reliées à un système de référence et intègrent l'ensemble des variations des masses. C'est aussi leur point faible, car il faut modéliser les effets gravimétriques de l'environnement aux stations marégraphiques sachant que les zones côtières sont le siège d'échanges hydrologique, atmosphérique et géodynamique important. La mise en œuvre des mesures reste le point dur dans le maintien d'un observatoire permanent. Les expériences nationales aux sites marégraphiques sont en cours de publication pour Brest et devront être poursuivies aussi pour les trois sites complémentaires (Marseille, La Rochelle, Île d'Aix) pour mieux estimer la hausse relative du niveau de la mer sur les zones côtières métropolitaines. Enfin, les nouvelles technologies quantiques permettront, à terme, d'améliorer l'estimation des mouvements verticaux. ●

Contact

Marie-Françoise Lequentrec-Lalancette
lalancette@shom.fr
Géophysicienne, ex-directrice Recherche et Innovation du Shom - chercheuse associée UMR 6538 Geo-Océan - membre correspondante du Bureau des Longitudes

Références

- Andersen, O. B., Hinderer, J., 2005 : *Global inter-annual gravity changes from GRACE: Early results*, Geophysical Research Letter, vol. 32, L01402, doi:10.1029/2004GL020948
- Bidel, Y. et al., 2018 : *Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry*. Nat Commun 9, 627 . <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03040-2>
- Bidel, Y. et al., 2023 : *Airborne absolute gravimetry with a quantum sensor, comparison with classical technologies*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128, e2022JB025921. <https://doi.org/10.1029/2022JB025921>
- Boy, J.-P., Hinderer, J., Gegout, P., 1998 : *Global atmospheric loading land gravity*. Phys. Earth Planet. Int. 109, 161-177
- Cantin E. et al, 2021 : New J. Phys. 23 053027 DOI 10.1088/1367-2630/abe79e
- Carter, W.E., et al., 1989 : *Geodetic fixing of tide gauge bench marks*, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report, WHO-89-31, 44 p.
- Carter, W. E. (Ed.), 1994 : *Report of the survey workshop of the IAPSO tide gauge benchmark fixing committee*, Report of a meeting held 13-15 December 1993 at the Inst. of Oceanog. Sci., Deacon Lab., NOAA Tech. Rep., NOSOES0006.
- Collilieux, X., Wöppelmann, G., 2011 : *Global sea-level rise and its relation to the terrestrial reference frame*. J Geod 85, 9-22 . <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0412-4>
- De Linage, C., Hinderer, J., Rogister, Y., 2007 : *A search for the ratio between gravity variation and vertical displacement due to a surface load*, Geophys. J. Int., 171, 986-994, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03613.x.
- Delva, P., Denker, H., Lion, G., 2019 : *Chronometric Geodesy: Methods and Applications*. In: Puetzfeld, D., Lämmerzahl, C. (eds) Relativistic Geodesy. Fundamental Theories of Physics, vol 196. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11500-5_2
- De Viron, O., Van Camp M., Francis, O., 2011 : *Revisiting absolute gravimeter intercomparisons*. Metrologia, Institute of Physics, 48, pp.290-298.
- Faller, J.E., 2002 : *Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances*, Metrologia, 39(5), 425-428.



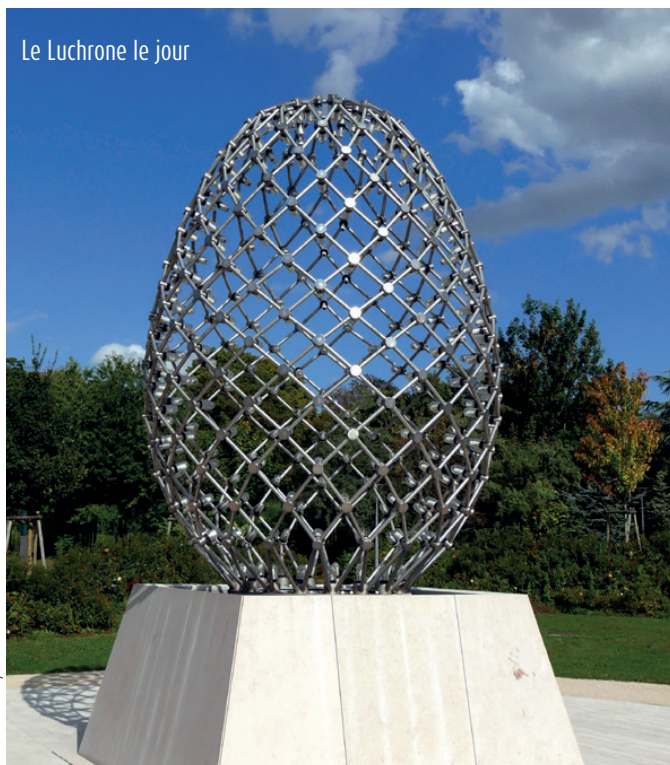
- Francis, O., et al., 2010 : *Results of the European Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2007*, in International Association of Geodesy Symposia, 135, 31-35. DOI: 10.1007/978-3-642-10634-7_5 DOI: 10.1007/3-540-26932-0_47
- Francis O., et al., 2005 : *Results of the International Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2003*, in International Association of Geodesy Symposia Gravity, Geoid and Space Missions GGSM 2004, Vol. 129 (XVI) ed C Jekeli, L Bastos and J Fernandes (Springer-Verlag), pp. 272-275
- Frappart, F., & Ramillien, G. (2018). *Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review*. Remote Sensing, 10(6), 829.
- Hinderer, J., et al., 1991 : *On the calibration of a superconducting gravimeter using absolute gravity measurements*, Geophys. J. Int., 106, 491-497.
- IOC, 2012 : *Global Sea-Level Observing System (GLOSS), Implementation Plan*, IOC Tech. Ser., Vol. 100, 41 p.
- IOC : *Manual on sea-level measurement and interpretation*, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides No. 14, Volumes I-III (1985, 1994, 1999).
- Jiang, Z., et al., 2011 : *Final report on the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG 2005)*, Metrologia, 48, 246-260.
- Lambert A., Courtier N., James T.S., 2006 : *Long-Term monitoring by absolute gravimetry: Tides to postglacial rebound*, Journal of Geodynamics, 41, 307-317.
- Larson, K. M., Van Dam, T., 2000 : *Measuring postglacial rebound with GPS and absolute gravity*, Geophys. Res. Lett., 27(23), 3925-3928.
- Lisdat, C., Grosche, G., Quintin, N., et al., 2016 : *A clock network for geodesy and fundamental science*. Nat Commun 7, 12443, <https://doi.org/10.1038/ncomms12443>
- Llubes, M., et al., 2001 : *Gravimetric observation of oceanic surges: first experiments in Brittany*, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa 332, 77-82.
- Llubes, M., et al., 2008 : *Multi-technique monitoring of ocean tide loading in northern France*. Comptes Rendus Geoscience, 340(6), 379-389.
- Lion, G., Panet, I., Wolf, P., et al., 2017 : *Determination of a high spatial resolution geopotential model using atomic clock comparisons*. J Geod 91, 597-611. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0986-6>
- Mazzotti, S., et al., 2007 : *Crustal uplift and sea level rise in northern Cascadia from GPS, absolute gravity, and tide gauge data*, Geophys. Res. Lett., 34, L15306, doi: 10.1029/2007GL030283.
- Ménoret, V., Vermeulen, P., Le Moigne, N., et al., 2018 : *Gravity measurements below 10⁻⁹ g with a transportable absolute quantum gravimeter*. Sci Rep 8, 12300. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30608-1>.
- Niebauer, T. M., Sasegawa, G.S., Faller, J.E., Hilt, R., and Klopping, F., 1995 : *A new generation of absolute gravimeters*, Metrologia, 32, 159-180.
- Ophaug V., et al., 2016 : *Absolute gravity observations in Norway (1993-2014) for glacial isostatic adjustment studies: The influence of gravitational loading effects on secular gravity trends*, Journal of Geodynamics 102, 83-94.
- Petit, G., Luzum, B.E., 2010 : *IERS Conventions, Tech. rep. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)*, Frankfurt am Main, tech. Note 36, 179 p.
- Poitevin, C. et al., 2019 : *Vertical land motion and relative sea level changes along the coastline of Brest (France) from combined space-borne geodetic methods*, Remote Sens. Environ., 222, 275-285, doi:10.1016/j.rse.2018.12.035.
- Rahmouni, F., et al., 2023 : *An Yb transportable clock connected to the REFIMEVE fiber network for chronometric geodesy (No. EGU23-8745)*. Copernicus Meetings.
- Teferle, F. N., et al., 2009 : *Crustal motions in Great Britain : evidence from continuous GPS, absolute gravity and Holocene sea level data*, Geophys. J. Int., 178, 23-46, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04185.x.
- Van Camp, M., Williams, S. D. P., Francis, O., 2005 : *Uncertainty of absolute gravity measurements*, J. Geophys. Res., 110, B05406, doi:10.1029/2004JB003497.
- Vey, S., et al., 2002 : *GPS measurements of ocean loading and its impact on zenith tropospheric delay estimates: a case study in Brittany, France*, Journal of Geodesy, 76(8), 419-427.
- Vu, D.T., et al., 2023 : *Potential of cold-atom airborne gravimetry to improve coastal gravity field and quasigeoid modeling* : Soumis au Journal of Geodesy.
- Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V., Velicogna, I., 2004 : *Time-variable gravity from GRACE: First results*, Geophysical Research Letters, vo. 31, L11501 doi:10.1029/2004GL019779.
- Wenzel, H-G., Forbriger, T., Wziontek, H., et al., 2022 : *Eterna-Programs for tidal analysis and prediction*.
- Williams, S.D.P, Baker, T.F., Jeffries, G., 2001 : *Absolute gravity measurements at UK tides gauges*, Geophysical Research Letters, 28, 12, 2317-2320.
- Wöppelman, G., Pouvreau, N., Coulomb, A., Simon B., Woodworth P. L., 2008 : *Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record*. Geophysical Research Letters, 35, L22605, doi:10.1029/2008GL035783.
- Wöppelmann, G., Marcos M., 2016 : *Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability*. Reviews of Geophysics 54.1 (2016) 64-92.
- Zerbini, S., et al., 2017 : *Sea-Level Change in the Northern Mediterranean Sea from Long-Period Tide Gauge Time Series*, Earth Science Reviews, 167, pp. 72-87.

ABSTRACT

Measuring and studying sea level variations in coastal areas is a major scientific and social challenge. Tide gauge measurements show trends of a few millimeters per year and must be combined with geodetic measurements to correct the oceanic signal for continental vertical movement. The coupling of GNSS and absolute gravity measurements has been shown to improve understanding of tide gauge signals. This article describes the methodology used to implement absolute measurements, as well as the major results obtained by international teams. An overview of measurements carried out on french tide gauges is given, as well as national outlooks on the contribution of quantum technology (cold atom gravimeter and chronometric geodesy).

Alain Le Boucher : le Luchrone de Reims Jean-Max Llorca : la fontaine de la solidarité

Le Luchrone le jour



Le Luchrone la nuit



■ Jean-Pierre MAILLARD

Les 1 200 géomaticiens se souviendront certainement de l'édition 2023 des GeoDataDays tenue à Reims tant par l'intérêt de la manifestation que par l'invitation faite aux participants de profiter de la ville d'art et d'Histoire. Riche de son passé, Reims garde la mémoire du baptême de Clovis, du sacre des rois de France, s'enorgueillit de la magnificence de sa cathédrale et porte un nom mondialement connu grâce au champagne. Forte de ce patrimoine, Reims vit avec son temps, bien desservie par l'autoroute de l'Est et le TGV. L'art contemporain est présent dans l'espace public et l'on peut y remarquer, en particulier, des œuvres animées par la lumière et/ou l'eau qui procèdent de technologies élaborées. Les côtés mécanique et électrique de deux installations à forme géométrique, alliés à la poésie des créations, attirent l'attention.*

Le Luchrone

Depuis 2019, implanté dans le parc des Arènes du Sud, le Luchrone d'Alain Le Boucher s'inscrit dans un ovoïde d'une dimension de 4 m par 6 m. Posé sur un socle pyramidal tronqué, la sculpture se résume à son enveloppe. Celle-ci est visuellement produite par la composition de lignes segmentées et parallèles qui se croisent en dessinant un damier

* voir page 8.

de losanges ajourés, chacun d'environ 50 cm de côté. Les côtés des losanges, à la forme évolutive, sont réunis à chacun des sommets par une pièce cylindrique qui supporte un équipement électrique. Ainsi, la structure, en acier inoxydable, porte 324 points lumineux, comme autant de sommets de losange, dont chaque intensité est programmée pour varier dans le temps, selon un rythme voulu semblable à une symphonie musicale. Les sources de lumière, la

tournant vers l'intérieur de l'œuvre, lui conservent une forme sans aspérité, mettant le cadre métallique en valeur. C'est la façon de l'artiste de sculpter la lumière, de lui donner des formes et de l'employer comme s'il travaillait d'autres matériaux.

L'initiative de la commande du Luchrone revient à l'association Prisme, anciennement union patronale rémoise, qui avait grandement contribué au financement de l'installation d'origine. Pour sa part le lycée technique Val-de-Murigny, devenu depuis Georges Brière après sa fusion avec le lycée Croix Cordier de Tinquieux, a participé à la réalisation de l'œuvre, positionnée et inaugurée en 1989, sur la place de la République. Tombée en panne en 2009, l'installation a été déposée. Il faut alors attendre 2015 pour que l'association Prisme, la ville de Reims et, cette fois, le lycée Saint Jean-Baptiste de la Salle unissent leurs efforts pour convenir de la restauration du Luchrone, avec encore la mise en place d'un projet pédagogique. Rénové grâce au savoir-



faire des professeurs et des élèves du lycée, le Luchrone a de nouveau illuminé l'environnement rémois en 2020. Après consultation publique, la municipalité a retenu le parc des Arènes du Sud pour sa réimplantation.

Le mot luchrone étant la contraction de *lux* et *chronos*, on remarque l'anomalie d'un néologisme issu de deux langues différentes, latine et grecque. Le créateur s'en affranchit en indiquant que luchrone combinant deux éléments différents, la lumière et le temps, sa dénomination souligne, au contraire, la dualité.

Alain Le Boucher

Né en 1950 à Paimpol (Côtes-d'Armor) Alain Le Boucher est diplômé de l'école supérieure d'art d'Aix-en-Provence (ESAAIX) qui forme des artistes et des créateurs. Son parcours professionnel est lié au hasard qu'il revendique. En 1980, il rejoint une société de micro-informatique, puis se tourne vers une société de développement de logiciels. Il découvre alors des domaines d'expression inexplorés.

En 1982, Alain Le Boucher réalise ses premiers "Luchrones" emprunts de légèreté et de transparence. La lumière agissant sur les sculptures en temps réel, elle les anime et donne ainsi le ressenti de la quatrième dimension. Les luchrones fonctionnent en continu. Ils évitent la monotonie en tirant au sort des partitions de lumière écrites par l'artiste. Alain Le Boucher expose régulièrement. Il vit et travaille en Normandie. Il est actuellement représenté par la galerie Lelia Murdoch à Paris.

La fontaine de la solidarité

Dans le cœur de ville, sur la place Drouet-d'Erlon, trône l'emblématique fontaine Subé et, non loin, la fontaine de la solidarité. Déjà évoqué cinq fois dans la rubrique "Art et géométrie", avec des sujets sur les œuvres de Yaacov Agam, André Maigne, Pol Bury, Chen Zen et Bertrand Lavier, l'art des fontaines y a toute sa place, d'autant qu'il renvoie à l'usage de points d'eau collectifs et à ce rôle primordial. Si ces derniers ont maintenant disparu



La fontaine de la solidarité

avec les adductions, la présence des fontaines dans la ville perpétue, outre la nécessaire présence de l'eau, une autre fonction aussi socialement importante : un lieu de rendez-vous. Les Rémois peuvent ainsi se retrouver aujourd'hui en centre-ville, soit à la fontaine Subé, soit à la fontaine de la solidarité, une dénomination en passe de devenir "à la fontaine boule" pour ne pas dire tout simplement à la "Boule", besoin d'abréger oblige. D'abord dénommée fontaine Condorcet en relation avec la rue adjacente, en 1982, une manifestation de salariés du syndicat FO a rebaptisé la fontaine "Solidarité" et le nom est resté. Solidarité fait référence au syndicat polonais Solidarnosc conduit par Lech Walesa qui prétendait, à l'époque de l'URSS, à l'indépendance syndicale face au pouvoir soviétique en place, une lutte qui a conduit à la chute du mur de Berlin.

Installée *in situ* en 1977, le volume sphérique en suspension sur un bassin circulaire, au profil en travers épuré, à dominante courbe, constitue un ensemble harmonieux, mais aussi musical, puisque 125 pommes d'arrosoir esquissent la surface de la boule en projetant des corolles d'eau chuintantes. Chaque pomme est emmanchée sur un tuyau droit de couleur bleue, tous les supports étant fixés au centre de la sphère de manière uniforme.

La réalisation et l'aménagement ont été conçus par le maître d'œuvre Jean-Max Llorca avec l'emploi de produits de la société canadienne PEM Fountain Company. Celui-ci a utilisé un *Dandelion*, un équipement en vogue au

début des années 1980, tellement prisé qu'on le retrouve dans de nombreuses villes du monde comme New York, Los Angeles et Sydney. Les anglophones auraient rapidement traduit *dandelion* en pissenlit, ce que la fontaine de la solidarité suggère parfaitement quand les étamines de sa fleur sont prêtes à s'envoler. Le *dandelion* de Reims a un diamètre d'environ trois mètres et s'inscrit dans un bassin de l'ordre de huit mètres de diamètre. À un croisement de rues, la superstructure est implantée au milieu d'un losange, de 20 m de côté, tramé cinq mètres par cinq mètres, avec un calepinage de pavés en écailles. Sphère, cercles, losanges, segments sont ici assemblés pour constituer une véritable œuvre d'art concret.

Près de cinquante ans après sa construction, l'équipement fonctionne toujours et il n'a pas pris une ride. Le mérite en revient d'abord au *designer* du *dandelion* dont on regrette de ne pas avoir trouvé le nom. On aurait ainsi, comme on le fait aux artistes *intuitu personae*, pu reconnaître son travail qui enchante année après année le centre ville de Reims et, au-delà, bien d'autres métropoles. Cet anonymat valorise d'autant Jean-Max Llorca qui a su choisir un *dandelion* pour la fontaine rémoise et le mettre en valeur.

Comme le Luchrone, la fontaine de la solidarité est pleine de vie et s'anime à longueur de temps. Ce faisant, les deux sculptures dont la géométrie est structurante sont, si l'on peut dire, lumineuses et pétillantes, même en plein jour. ●

©Yvette Velay



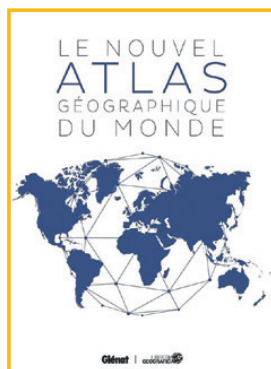
■ Une histoire des grandes exploratrices

Caroline RIEGEL

Elles s'appellent Alexandra David-Néel, Anita Conti, Jane Goodall, Ella Mailland, Gertrude Bell, Katia Krafft. Elles sont orientalistes, océanographes, éthologues, sportives, espionnes, volcanologues. Comme les quarante-cinq autres exploratrices et aventurières du livre, elles ont réussi à aller au-delà des océans, des crêtes, des déserts, à dépasser les frontières. Toutes les frontières. Y compris celles que la société de leur époque impose aux femmes. Y compris celles de leurs propres peurs. Il est des visages plus méconnus : on oublie souvent que l'expédition de Bougainville comptait une femme, Jeanne Barret, qui dut se déguiser en homme pour monter à bord. Elle fut la première à faire le tour du monde. Ce volume ménage aussi une place à des figures non occidentales, telle l'Inupiat Ada Blackjack, qui survécut à l'expédition catastrophique de l'ethnologue Vilhjalmur Stefansson sur l'île Wrangel en Arctique en 1921. Ce livre n'est pas écrit par une exploratrice de papier, mais par une grande voyageuse, Caroline Riegel. Cela donne cinquante portraits forts en engagés.

Écrivaine, réalisatrice, photographe et conférencière, Caroline Riegel est l'auteure des récits Soifs d'Orient, Méandres d'Asie et Éclats de Cristal, du livre de photographies et poésies Semeuses de joie, ainsi que de films multiprimés eux aussi : Semeuses de joie, Zanskar, Les promesses de l'hiver et Ouganda, Aux sources du Nil. Membre de la société des explorateurs, cette aventurière a traversé notamment l'Asie au fil de l'eau, seule durant deux années avec chevaux, ânes, bicyclette et chameaux. Ingénieure en constructions hydrauliques, Caroline Riegel a travaillé sur divers chantiers de barrages dans le monde, ainsi que dans l'humanitaire.

► ÉDITIONS GLÉNAT
25,95 € - 168 pages
EAN : 9782344058268



■ Le nouvel atlas géographique du monde

Collectif

Conçu par les plus grands spécialistes internationaux de cartographie, l'Istituto Geografico De Agostini et Libreria Geografica, en collaboration avec les Éditions Glénat, cet atlas est l'ouvrage de référence indispensable pour tous les curieux et passionnés de cartes du monde. Grâce aux méthodes de pointe de la cartographie numérique, les cartes bénéficient d'une précision exceptionnelle. L'ouvrage rassemble 368 pages de cartes physiques et politiques ; des cartes thématiques de la France : géologie, météorologie, économie, démographie... ; un tableau d'assemblage pour faciliter la consultation des cartes par zone géographique ; une riche toponymie exploitant les noms locaux officiels ; un planisphère indiquant les fuseaux horaires terrestres ; un index répertoriant 120 000 noms de lieux ; un glossaire présentant près de 1 000 termes géographiques.

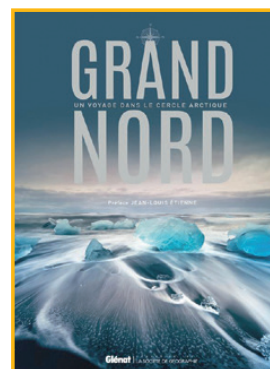
► ÉDITIONS GLÉNAT
33,50 € - 368 pages
EAN : 9782344054048

■ Le Grand Nord

Un voyage dans le cercle arctique

Collectif - Préface Jean-Louis ÉTIENNE

Partons au bout du monde, dans le Grand Nord, entre le 60° et 90° degré de latitude, dans la nature unique de l'Arctique avec des photographies d'une beauté à couper le souffle. Le voyage commence au 60° N, avec ses paysages de toundra et de fjords, et se termine au 90° N au Pôle Nord, et ses paysages de glace d'un bleu profond, ses icebergs, sa banquise et ses glaciers. Nous traversons de nombreux pays, régions et villes, en remontant vers le Grand Nord, que ce soit Anchorage en Alaska, la baie d'Hudson, les îles Féroé, pour remonter petit à petit en passant par les



parcs nationaux islandais, les îles Lofoten, le Cap Nord en Norvège, le Spitzberg, le détroit de Baffin, la mer de Kara en Russie, le Groenland... Des pages historiques reviennent sur les moments importants du cercle polaire arctique en commençant par la ruée vers l'or en Alaska en 1896, la mythique route maritime du passage du Nord-Ouest, la conquête du Pôle Nord, la vie des Inuits, sans oublier les premières expéditions polaires avec les explorateurs Peary, Amundsen, Jean-Baptiste Charcot et Paul-Émile Victor. Des pages thématiques présentent également la faune que l'on peut rencontrer dans ces contrées sauvages, comme les pingouins, mais aussi les ours polaires, les morses, le loup arctique, le renard des neiges ou encore les phoques barbus.

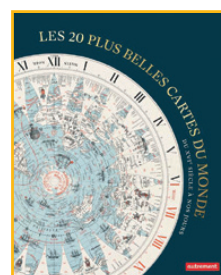
► ÉDITIONS GLÉNAT
45 € - 304 pages
EAN : 9782344059241

■ Les 20 plus belles cartes du monde

du XVI^e siècle à nos jours

Collectif

Dessinée dans un but scientifique ou travaillée dans une démarche artistique, la carte atteste du talent de son créateur. Quand les artistes contemporains dialoguent avec les cartographes du passé, l'art de la carte révèle toute sa richesse. Aux côtés de célèbres cartes, découvrez des œuvres plus rares qui vous entraînent dans un voyage d'exploration inédit à travers les siècles et mettent en lumière un monde fascinant : carte du monde, planisphères



célestes, projections étonnantes ou interprétations surprenantes... Les magnifiques reproductions de ces vingt trésors cartographiques, et les textes qui

dévoilent tous leurs secrets de fabrication, vous donneront sans aucun doute l'envie de partager ces pépites ou de les exposer autour de vous.

Collectif de cartographes et d'artistes.

Depuis Piri Reis au XVI^e siècle jusqu'aux cartographes du moment, ce sont vingt artistes à découvrir ou à redécouvrir !

► **AUTREMENT**

24,90 € - 44 pages

ISBN : 9782080432490

■ Mappemondes

Un voyage dans le temps pour raconter le monde contemporain

Xemartin LABORDE avec Delphine PAPIN et Francesca FATTORI

Et si on reprenait le meilleur de la cartographie d'antan pour dessiner notre monde actuel ? C'est le défi qu'a relevé Xemartin Laborde, cartographe au Monde, après s'être interrogé sur les différentes manières de représenter les phénomènes globaux, qu'ils soient naturels ou d'origine humaine. En cinquante cartes réparties en cinq grandes parties, cet atlas offre ainsi un voyage cartographique à l'esthétique soignée qui permet un regard global sur notre monde et nous éclaire sur les enjeux contemporains : l'environnement et notre impact sur la nature (transformation des paysages, démographie, pollution, déforestation...), les inégalités, les guerres et frontières, ou encore les enjeux sociétaux.

Xemartin LABORDE est journaliste-cartographe au journal *Le Monde*. Diplômé de l'Institut français de géopolitique de la Sorbonne et de l'École nationale des sciences géographiques, il est coauteur de nombreux atlas (*Atlas des forêts*, *Atlas des grands explorateurs* aux éditions Autrement, *Atlas des frontières* et *l'Atlas géopolitique de la Russie* aux éditions Les Arènes).

Delphine PAPIN est responsable du service infographie du journal *Le Monde* depuis 2016.

Francesca FATTORI est journaliste-cartographe du journal *Le Monde*.

► **ARMAND COLIN collection "chroniques"**

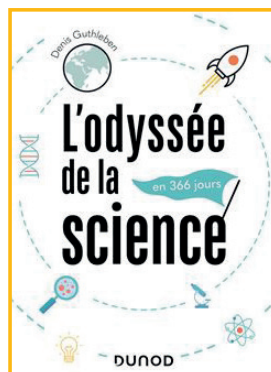
35 € - 152 pages

EAN : 9782200637095

■ L'odyssée de la science en 366 jours

Denis GUTHLEBEN

Des premières observations astronomiques aux images du télescope spatial James Webb, de l'invention du microscope au séquençage du génome



humain, Denis Guthleben embarque le lecteur dans un tour du monde des petites et grandes découvertes scientifiques en 366 jours. Au fil des pages, on retrouvera les savants, renommés ou méconnus, qui ont bouleversé notre compréhension du monde. *"Ceci n'est pas une histoire des sciences, mais une invitation à l'explorer en poussant 366 portes. Derrière chacune d'elles se dissimule une découverte, une personnalité, une observation, une aventure ou une mésaventure qui a marqué le long chemin de l'accumulation des connaissances scientifiques, de leur discussion, de leur contestation, parfois de leur rejet et de leur renouvellement, dans toutes les régions du globe et à toutes les époques".*

Historien des sciences passionné par la genèse des grandes découvertes, **Denis Guthleben** est directeur délégué du Comité pour l'histoire du CNRS, rédacteur en chef de la revue *Histoire de la recherche contemporaine* et auteur de nombreux articles et ouvrages.

► **DUNOD - collection "chroniques"**

16,90 € - 384 pages

EAN : 9782100856183

■ Le syndrome du nord magnétique

Gianguglielmo LOZATO

Que représente la notion du Nord dans nos cultures et nos imaginaires, tant du point de vue géographique, politique que sociologique ? L'auteur croise les sources, se plonge dans ce qu'il nomme la "géographie des mentalités" pour mieux appréhender ce Nord fantasmé qui peut conditionner nos actions. Il met en perspective ses recherches avec les fractures qui entachent la relation entre hémisphères.

Gianguglielmo LOZATO nous invite à explorer la notion du Nord dans nos

cultures et imaginaires, examinant comment elle influence nos actions et les fractures entre hémisphères. Une analyse captivante des perceptions culturelles et des enjeux mondiaux.

► **ÉDITIONS DU PANTHÉON**

18,90 € - 184 pages

ISBN : 978-2-7547-6664-7



■ Institut de physique du globe de Paris

100 ans de sciences pour la planète

En un siècle, l'Institut de physique du globe de Paris a forgé sa place d'établissement de premier plan en sciences de la Terre et des planètes, en restant fidèle à ses grands principes fondateurs, à savoir le lien indéfectible entre ses trois missions d'observation, de recherche et de formation.

Cet ouvrage présente 100 ans d'avancées scientifiques majeures, que ce soit la découverte de la structure profonde de la Terre ou de Mars, la mise en évidence des mécanismes qui contrôlent la dynamique de surface de la Terre, ou encore l'exploration de l'origine du système solaire et des planètes telluriques à travers l'étude des échantillons extra-terrestres. Quelles seront les révolutions scientifiques de demain ? Aujourd'hui, les défis de l'IPGP sont cruciaux au moment de changements globaux qui impactent profondément la Terre : tenter d'anticiper les phénomènes géologiques rapides et les évolutions de notre planète.

► **ÉDITIONS DE LA MARTINIÈRE-IPGP**

35 € - 208 Pages

ISBN : 9 791040 113584

Répertoire des annonceurs - n° 177	
LE MARÉGRAPHE	4° de couv.
FIG WW 2024 à Accra	3° de couv.
LEICA GEOSYSTEMS	2
RIEGL	12
REIS STOLZEL	40
TERIA	2° de couv.

Faut-il radicalement changer de paradigme face à l'inexorable montée des eaux et à la modification du littoral ?

■ Claire GALPIN

Comment clore toute une revue traitant du niveau de la mer sans parler des conséquences liées aux risques d'érosion littorale, de submersion marine et d'élévation du niveau de la mer et des océans ? La variation du trait de côte est un phénomène de plus en plus rapide et visible, qui convoque et interroge la gestion foncière de ces espaces et territoires disparus ou appelés à disparaître. Partout autour du monde, la densité des constructions dans les communes littorales est très forte et continue de progresser, tout comme le développement du tourisme sur le littoral. Comment le développement économique et social et en particulier la gestion du foncier vont-ils pouvoir s'adapter aux changements qui s'annoncent ?



Un pan entier de la falaise du cap Fagnet s'est décroché à Fécamp, en Normandie, le 24/02/2023. © CG

Le GIEC définit l'adaptation comme l'« ensemble des actions visant à adapter notre société aux nouvelles conditions environnementales créées par le changement climatique pour en limiter les dommages et maximiser les bénéfices »¹. Il s'agit donc d'assurer la sécurité des personnes, de limiter les dommages causés au territoire et aux biens fonciers et immobiliers et donc, d'anticiper de nouvelles options de gestion foncière et de protection du marché immobilier.

Comme cela a été largement développé dans cette revue, il existe de nombreux outils et méthodes pour suivre les fluctuations du trait de côte (capteurs GNSS, imageries satellitaire ou aérienne...). Les méthodes sont liées aux caractéristiques du site, à l'évolution du phénomène et à l'état du littoral. La comparaison avec des données antérieures, après contrôle, vérification et validation des données collectées, permet de mesurer l'évolution de la position du trait de côte. Développer l'observation du trait de côte permet d'identifier les territoires à risque d'érosion ou de submersion et ainsi de hiérarchiser l'action publique. De nombreuses études ont permis de mettre en avant des solutions tech-

niques². On peut citer les épis, les digues ou les jetées, la restauration des dunes, mais également celle des zones humides et des mangroves. Cette dernière ne nécessite pas de lourds budgets, mais exige l'approbation et la participation de la communauté pour notamment éviter les coupes de bois. Il convient donc de choisir avec soin les zones à replanter afin de s'assurer que les régimes fonciers et les activités traditionnelles ne seront pas affectés. Dans les zones urbaines et touristiques, si rien n'est fait, maisons, immeubles, entreprises vont disparaître, engendrant une catastrophe économique, sociale et environnementale. Cependant, le recul stratégique de la ligne de protection implique des moyens financiers beaucoup plus importants, notamment pour la construction d'infrastructures de protection. Il peut également provoquer des polémiques sociales et politiques, surtout quand il s'agit de mettre en œuvre la recomposition territoriale et la relocalisation des activités. En effet, lorsqu'il s'agit de relocaliser des résidents et d'être confronté aux propriétaires fonciers, les situations

sont très rapidement sensibles.

La littérature francophone, tant politique³ que scientifique⁴, préconise de nouveaux modes de gestion du trait de côte, de la gestion du foncier littoral et de nouvelles façons « d'habiter le littoral » délaissant l'attachement des individus à leur lieu de résidence. Dans la ligne de la stratégie nationale portée par le ministère de l'Environnement depuis 2012, la relocalisation est envisagée comme une option permettant de repenser les logiques de gestion foncière territoriale et l'intégration des risques environnementaux et sociaux. Certaines activités devront donc être déplacées, voire supprimées, questionnant évidemment l'acceptabilité de telles solutions par les personnes impactées. Cependant, la lutte contre le changement climatique impose de penser un nouveau référentiel de toutes les politiques publiques avec une approche multidimensionnelle⁵ pour réussir l'adaptation définie par le GIEC et l'adhésion de tous pour les générations futures. ●

3 GIP Littoral 2030.

4 Rey-Valette H., Lambert ML., Vianey G., Rulleau B., André, C., Lautrédou-Audouy N. Acceptabilité des relocalisations des biens face à l'élévation du niveau de la mer : perceptions de nouveaux dispositifs de gouvernance du foncier, Géographie économie et société 2018/3 (Vol.20) pages 359 à 379.

5 Millier C., Hubert B., Le changement climatique : s'adapter ou disparaître ?, 2009 Natures, Sciences Sociétés.

1 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001. Coastal Zones and Marine Ecosystems. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Chapter 6.

2 Alves Rodrigues B., Bapentire Angnuureng D., Almar Rafael, Louarn A., Rossi Pier Luigi, Corsini Laurent, Morand Pierre, Compendium : Pratiques de gestion des zones côtières en Afrique de l'Ouest : revue des mesures existantes et envisageables de mitigation et d'adaptation face aux risques d'érosion côtière et de submersion marine : résumé, 2022.



FIG Working Week 2024

19-24 May Accra, Ghana

Your World, Our World: Resilient Environment and Sustainable Resource Management for All

Join us at FIG Working Week 2024!



CUTTING-EDGE INSIGHTS: Immerse yourself in the forefront of geospatial technology and sustainable resource management.



GLOBAL NETWORK: Connect with like-minded professionals, experts, and decision-makers from around the world.



SKILLS ENHANCEMENT: Elevate your expertise through hands-on workshops, interactive sessions, and thought-provoking discussions.



SDG IMPACT: Align your mission with the United Nations Sustainable Development Goals. Discover how your work contributes to a better world.



Register now at fig.net/fig2024



International Federation
of Surveyors, FIG

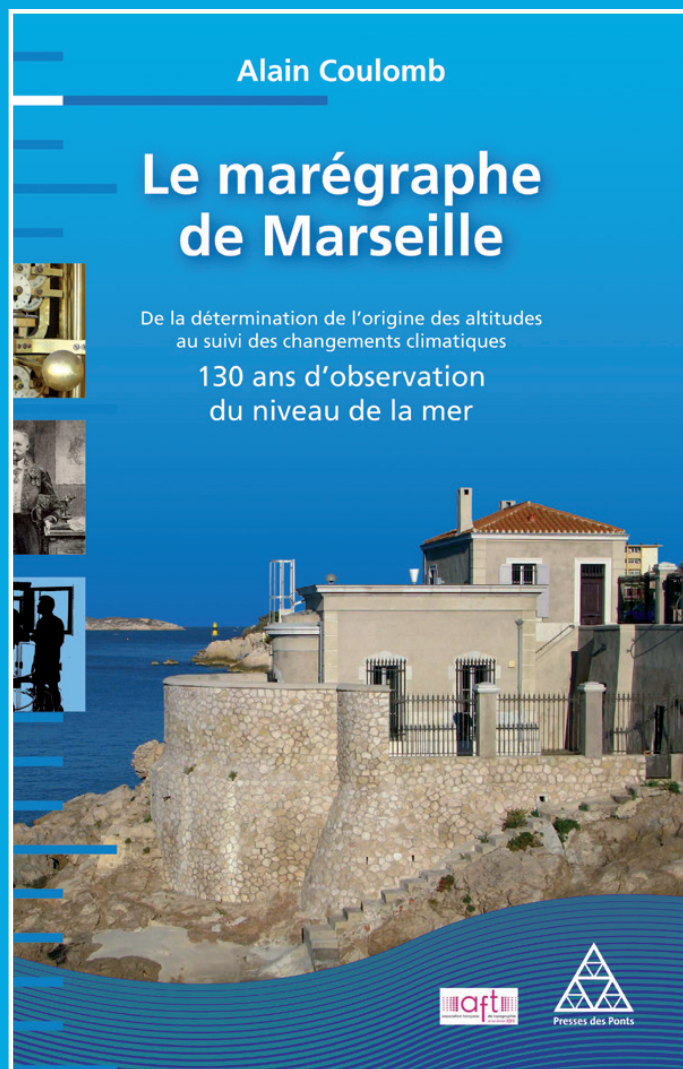


Licensed Surveyors
Association of Ghana, LISAG



Ghana Institution
of Surveyors

AKWAABA – Welcome to Accra!



COMMANDEZ "LE MARÉGRAPHE" au prix de 85,50 €

640 pages, 400 illustrations frais de port inclus (France)

M/Mme Nom : _____

Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal : | | | | |

Ville : _____

Tél. : | | | | | | | | | |

Fax : | | | | | | | | | |

Courriel : _____

Date :

Signature

Bulletin de commande à retourner accompagné d'un chèque à l'Association francophone de topographie

73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ Cedex –

Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

Achat également sur Internet : www.aftopo.org