

## L'évolution du niveau de la mer

*Dans le contexte des changements climatiques, le sujet de l'évolution du niveau de la mer est très présent dans les médias, mais sa complète compréhension nécessite l'assimilation de quelques notions techniques. Alain Coulomb, ingénieur à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), responsable du Nivellement général de la France et auteur d'un ouvrage de référence sur le marégraphe de Marseille, nous aide à y voir plus clair.*



Alain Coulomb

L'étude du niveau de la mer est la marégraphie. Elle s'effectue essentiellement grâce à des **satellites océanographiques** et à des **marégraphes**, ce dernier mot désignant à la fois un appareil d'enregistrement du niveau instantané de la mer et un bâtiment qui abrite cet instrument.

### LES SATELLITES Océanographiques

L'**altimétrie satellitaire** est basée sur la mesure de la hauteur instantanée de la mer à l'aide d'un émetteur/récepteur d'ondes radar embarqué sur un satellite artificiel (Topex/Poseidon, Jason, ERS, plateforme Envisat...). Un train d'ondes émis en direction de la mer est réfléchi par la surface de l'eau, et le temps d'aller/retour est transformé en hauteur du satellite au-dessus de la mer, avec une précision de quelques centimètres. Connaissant la position du satellite, on en déduit celle de la surface océanique.

L'ensemble des hauteurs de mer ainsi déterminées le long de la trajectoire du satellite permet d'obtenir le relief de la surface des océans. Sur une durée de plusieurs années, le satellite altimétrique donne accès à une cartographie évolutive de l'ensemble de la

surface des océans, ce que ne peuvent offrir les marégraphes établis sur les littoraux.

Mais l'altimétrie satellitaire a pour le moment ses limites : absence de données exploitables à proximité des côtes (là où sont justement implantés les marégraphes), existence trop récente de la technique pour déterminer des tendances à long terme (alors que les marégraphes offrent parfois des séries de données dépassant le siècle : 170 ans à Brest, 130 ans à Marseille). Les deux techniques sont donc très complémentaires.

### LES MARÉGRAPHES

Les plus anciennes mesures du niveau de la mer ont été obtenues au moyen de planches graduées fixées le long de quais : les échelles de marées. Puis l'évolution des techniques a donné naissance aux marégraphes mécaniques. Les premiers sont apparus en Angleterre dans les années 1830. En France, c'est l'ingénieur hydrographe Rémi Chazallon qui a inventé le mot marégraphe et réalisé les premières observations à Toulon en 1844.

Cet appareil mesure le niveau de la mer, dépendant de la marée astronomique (l'attraction de la Lune essentiellement) et des « surcotes » ou « décotes » provoquées par d'autres phénomènes, surtout météorologiques. Sur les mers à faible marée, l'effet météorologique dépasse parfois l'effet astronomique.

Un marégraphe mécanique, comment ça marche ? C'est d'abord un flotteur, posé à la surface de la mer et dont la 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 des instruments (crayons, plumes, etc.) qui tracent la courbe de la hauteur de la mer en fonction du temps. Le papier d'enregistrement s'enroule en effet sur un cylindre rotatif dont le moteur est une horloge. C'est la combinaison des mouvements de va-et-vient des instruments traceurs et de la rotation du cylindre qui donne la sinusoïde de la courbe du niveau de la mer.

L'appareil historique du marégraphe de Marseille comprend en outre un intégrateur mécanique capable de donner très rapidement un niveau moyen de la mer sur une période de temps donnée. Il est aujourd'hui unique au monde dans sa catégorie et classé monument historique depuis 2002. Il est toujours en fonctionnement mais secondé depuis 1998 par un appareil numérique.

Les marégraphes numériques les plus performants fonctionnent grâce à des ondes radar. Comme pour l'altimétrie satellitaire, l'instrument mesure le temps de parcours, selon la verticale, d'impulsions électromagnétiques réfléchies par la surface de la mer. Les fichiers des données acquises sont régulièrement transmis au Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) via le réseau téléphonique.

L'implantation d'un marégraphe est en effet souvent liée à des activités maritimes et la plupart des marégraphes français sont gérés par le SHOM, opérateur en France du Réseau d'observation du niveau de la mer (RONIM) constitué de 46 marégraphes côtiers numériques.

L'ensemble immobilier du marégraphe de Marseille a cependant la particularité d'avoir été attribué à l'IGN parce qu'il a servi à déterminer un niveau moyen de la mer par rapport auquel sont définies les altitudes de la France continentale (l'altitude 0). L'entretien de cet observatoire est l'une des contributions de l'IGN à SONEL.

Le Système d'observation du niveau des eaux littorales (SONEL) est constitué de plusieurs dizaines de marégraphes, répartis sur l'ensemble des territoires français et intégrés au réseau mondial d'observation du niveau des mers GLOSS (Global Sea Level Observing System).

**SONEL** s'oblige à associer le plus systématiquement possible des mesures marégraphiques et géodésiques. Pourquoi ? Un marégraphe ne mesure que les variations du niveau de la mer par rapport à celui de la



## SONEL

Les fondateurs de **SONEL** sont l'IGN, le SHOM et le CNRS (Centre national de la recherche scientifique).

L'**IGN** est l'opérateur public pour l'information géographique (hors domaine maritime) et il est notamment chargé de « concevoir et constituer une infrastructure géodésique cohérente avec les systèmes internationaux, et assurer la gestion du système national de référence géographique, gravimétrique et altimétrique ». Il participe à la mise en place de l'infrastructure de SONEL et apporte son expertise en mesure de précision.

Le **SHOM** est l'opérateur public de référence pour l'information géographique maritime et littorale. Il est le référent national pour l'observation du niveau de la mer et en coordonne les réseaux. A ce titre, il assure au travers du portail **REFMAR** (Réseaux de référence des observations marégraphiques), différentes fonctions de coordination en matière de collecte et de diffusion des données publiques relatives à l'observation du niveau de la mer. Il assure pour SONEL l'expertise en matière de marégraphie et de références altimétriques maritimes.

Le **CNRS** est le principal organisme de recherche français. En appui sur deux de ses instituts et sur les universités de Toulouse et de La Rochelle, il conduit l'étude de la marégraphie en conditions extrêmes, met à disposition son expertise en altimétrie satellitaire et héberge le portail Internet de SONEL.

SONEL fait en outre appel aux compétences de plus de 80 acteurs régionaux ou locaux pour l'installation et le maintien des infrastructures. Récemment, il a coopéré avec l'Ordre des géomètres-experts pour une campagne de mesures simultanées destinées à surveiller la stabilité des observatoires marégraphiques.

La collecte en continu des mesures fait de **SONEL** un service performant pour de nombreux utilisateurs (collectivités locales, bureaux d'études, GIEC, etc.). La surveillance du fonctionnement et de la stabilité des instruments est le gage de la qualité du service et de ses données. La fourniture de produits spécifiques répond à un grand nombre d'usages : perfectionnement des modèles climatiques ; prévision des conséquences des variations océaniques sur la faune, la flore et l'environnement littoral ; étude des événements extrêmes (tempêtes, tsunamis...) ; etc. Tous ces enjeux, et bien d'autres encore, concernent de très nombreux acteurs économiques et ont des conséquences pratiques : rehaussements de digues, aménagements littoraux, renforcements d'infrastructures...

terre sur laquelle il est installé. Ces mesures doivent donc être corrigées en fonction des possibles variations verticales du socle terrestre lui-même. Dis autrement, lorsqu'on constate une diminution de la distance verticale entre le niveau de la mer et un point terrestre, il convient de savoir si c'est la mer qui monte ou la terre qui descend. C'est notamment l'objet des mesures géodésiques réalisées près des marégraphes, qui sont de plusieurs types : géodésie spatiale, gravimétrie et nivellement de précision.

### Niveau de la mer et géodésie

La **géodésie** est la science qui mesure la forme et les dimensions de la Terre. Aujourd'hui, elle s'appuie beaucoup sur les informations des satellites **GNSS** (Global Navigation Satellite System), nom générique des systèmes de navigation satellitaires sur l'ensemble de la planète : GPS (États-Unis), GLONASS (Russie), Galileo (Union européenne), Beidou (Chine)... En recevant les signaux émis par les satellites GNSS, les récepteurs au sol déterminent les mouvements absolus de la terre.

Dans le même but, SONEL utilise aussi les données fournies par le système **DORIS**, basé sur une autre technique de géodésie spatiale développée par le CNES en collaboration avec l'IGN à partir des années 80.

Le couplage de la marégraphie et de la géodésie spatiale fournit à l'altimétrie satellitaire, et plus généralement aux géosciences, une référence géodésique unique, mondiale et précise. Elle donne une évolution absolue du niveau des mers.

Celle-ci peut aussi être obtenue grâce à des mesures répétées de **gravimétrie**, sur laquelle SONEL va probablement s'appuyer de plus en plus dans les prochaines années. La gravimétrie est une méthode de mesure et d'étude des variations du champ de pesanteur (la pesanteur qui nous tient les pieds au sol, qui génère le mouvement des marées ou qui fait tomber la pomme sur la tête de Newton dans les bandes dessinées de Gollib...).

L'accélération de pesanteur vaut à peu près  $9.8 \text{ m/s}^2$  à la surface de la Terre, mais cette valeur varie selon l'endroit, en raison par exemple de l'aplatissement du globe aux pôles ou de la répartition hétérogène des différentes masses avoisinantes (montagnes, fosses...). Elle varie également de façon temporelle en raison des phénomènes de marée, des mouvements dus à la tectonique des plaques ou encore de la fonte des glaciers.

Pour surveiller la stabilité locale des marégraphes, SONEL utilise aussi des mesures de **nivellement de précision**, ensemble d'opérations fournissant des éléments chif-



désie spatiale, gravimétrie, nivellement de précision) et de bien d'autres (climatologie, géologie, glaciologie, étude des coraux...) fournit déjà une bonne connaissance des phénomènes en jeu, du niveau d'élévation actuel des mers et des perspectives à court et moyen terme.

**Le niveau de la mer n'est pas partout le même.** En France, la surface méditerranéenne serait (du moins à Marseille) environ 15 cm plus basse que le niveau moyen océanique, quasiment identique entre Dunkerque et St-Jean-de-Luz.

Les résultats les plus récents permettent aussi d'estimer à 16 cm la hausse du niveau moyen de la mer à Marseille depuis la fin du dix-neuvième siècle (soit 1,2 mm/an). Cette hausse est inférieure à la moyenne constatée sur l'ensemble du globe ( $1,7 \pm 0,2$  mm sur la période 1901-2010), ce qui peut s'expliquer par les particularités de la Méditerranée (mer fermée, profonde, chaude, de forte salinité, etc.). **Les variations du niveau de la mer ne sont donc pas partout identiques.** La carte globale de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer sur la période 1993-2013 montre des variations comprises entre +14 et -14 mm/an.

Les océans sont d'importants régulateurs thermiques qui modifient le climat, emmagasinant la chaleur et la restituant en partie à l'atmosphère. En parallèle, une des principales conséquences (très nombreuses) des changements climatiques, est la hausse du niveau des mers, principalement causée par la dilatation thermique des océans et la fonte des glaciers de montagne et des calottes glaciaires.

**Quelles conséquences ?**

L'élévation du niveau marin pourra induire ou aggraver deux types de **submersions** : les

frés pour traduire le relief au millimètre près, sous forme d'altitudes ou de différences de niveau.

Le nivellement est utile pour les travaux d'aménagement du territoire. Pour rattacher précisément ses chantiers à la référence verticale nationale, le géomètre utilise des repères de nivellement implantés par l'IGN. Un repère de nivellement est un point métallique dont l'altitude est déterminée avec une précision millimétrique. 400 000 repères sont répartis sur le territoire national. Leurs données descriptives sont accessibles par le

moyen d'une fiche signalétique consultable et téléchargeable sur Internet.

Chacun d'entre nous peut participer à l'entretien du réseau de Nivellement général de la France (NGF) en envoyant des informations à l'adresse [sgn@ign.fr](mailto:sgn@ign.fr) (repère constaté détruit, au contraire repère vu en place et en bon état, nouvelle photographie, etc.)

**Le niveau de la mer monte-t-il ? Où ? De combien ? Comment ? Pourquoi ?**

La combinaison des techniques évoquées (altimétrie satellitaire, marégraphie, géo-



submersions permanentes de zones basses et les submersions temporaires. Les submersions temporaires sont le plus souvent associées à une conjonction de phénomènes (forte marée, surcote atmosphérique, surcote liée aux vagues, etc.). Elles se distinguent par la mise en danger de personnes exposées.

L'élévation du niveau marin peut aussi générer des **intrusions salines** dans les aquifères côtiers. Ces aquifères constituent des ressources en eau souterraine importantes pour les activités humaines (alimentation en eau potable, usages agricoles, industriels, etc.) et l'environnement (zones humides littorales, marais et lagunes côtières).

Combinée à l'augmentation de la houle, l'élévation du niveau marin peut enfin avoir un impact destructeur sur les infrastructures portuaires et côtières, ces dernières (ouvrages de haut de plage, brise-lames, etc.) ayant pour fonction de protéger le littoral contre les risques (érosion, submersion).

Ces conséquences s'appliquent à des littoraux à fort développement économique et démographique, où vit environ 60% de la population mondiale sur une bande de 60 km de large.

Par l'exemple de l'élévation globale du niveau des mers, qui ne cesse de s'accélérer depuis les dernières décennies, on voit bien que le changement climatique constitue un enjeu majeur pour le siècle à venir. Pour encore mieux comprendre les phénomènes en jeu (notamment la part prise par la fonte des glaces) et affiner les scénarios prospectifs, il convient de **continuer à mesurer** et à fournir des chiffres toujours mieux qualifiés. En France, c'est notamment ce que fait SONEL...

### Alain Coulomb

*Chef du département des réseaux matérialisés  
IGN - INSTITUT NATIONAL DEL'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FORESTIERE*

### LIENS UTILES

Observation du niveau de la mer

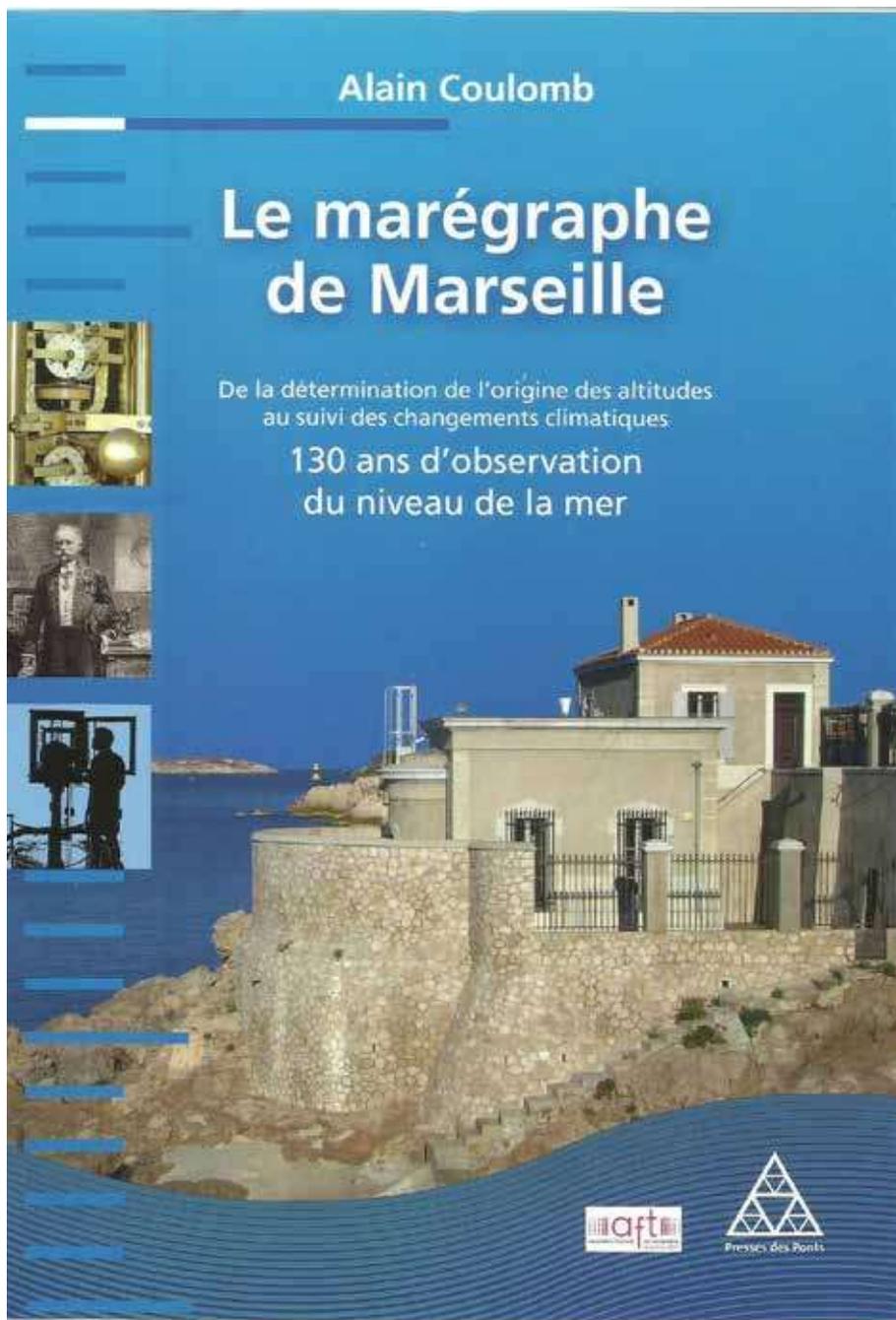
<http://www.sonel.org/>

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

Changement climatique

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

[Volume-5-Changement-climatique-et.html](http://www.developpement-durable.gouv.fr/Volume-5-Changement-climatique-et.html)



## LE NIVELLEMENT

Trois réseaux de nivellement de grande ampleur se sont succédés sur le sol de la France continentale :

- Entre 1857 et 1864, Paul Adrien Bourdalouë établit un premier réseau national de nivellement. L'origine de ce réseau était le trait 0,40 m de l'échelle de marée du Fort St-Jean à Marseille.
- Dès 1878, le ministère des travaux publics décida de poursuivre l'œuvre de Bourdalouë. Le travail fut confié à un service public du Nivellement général de la France dirigé par Charles Lallemand. L'origine de ce nouveau réseau fut déterminée à l'issue d'observations du niveau de la mer réalisées au marégraphe de Marseille entre 1885 et 1897.
- Entre 1962 et 1969, l'IGN (à l'époque Institut géographique national) remit en état le réseau de base, en conservant l'origine du réseau Lallemand. Aujourd'hui encore, le système de référence vertical officiel est le NGF/IGN69 basé sur ces observations de nivellement et de gravimétrie faites dans les années 60.