



PREDICTION DE MAREE

Avant-propos

Cette fiche a été rédigée dans le cadre du Groupe de travail « Tempêtes et submersions historiques » et plus particulièrement au sein du sous-groupe « Types de données » réunissant plusieurs organismes, et dont l'objectif est de mutualiser les informations de tempêtes et de submersions marines historiques, capitaliser les connaissances et expertiser les données associées à des événements historiques.

Cette fiche relative à la prédiction de marée fait partie d'un catalogue de données pour accompagner et comprendre la base de données relative aux tempêtes historiques. Cet état de l'art pourrait nécessiter d'être complété en fonction de besoins ou applications particulières.

L'élaboration de cette fiche, fruit d'un travail collaboratif et pluridisciplinaire a été pilotée par Gaël André, Nathalie Giloy et Alexa Latapy (Shom).

Nous remercions également ici l'ensemble des personnes ayant collaboré avec leurs contributions écrites et/ou leurs relectures : Sabine Cavellec (Cerema), Aurélie Maspataud (BRGM) et Pierre Pouzet (ISEN Yncréa Ouest).

Les termes suivis d'un astérisque * sont définis dans un glossaire spécifique associé au catalogue de données.

Résumé

La marée océanique d'origine astronomique correspond aux variations de la surface de l'océan liées aux actions gravitationnelles de la lune et du soleil sur les liquides terrestres. La prédiction de la marée utilise la décomposition harmonique. Connaissant l'amplitude et la phase des composantes de marée les plus importantes, il est alors possible de reconstruire le signal de marée très précisément et à n'importe quel instant, passé ou futur.



PREDICTION DE MAREE

Caractéristiques de la donnée

Définition

La marée* océanique d'origine astronomique correspond aux variations de la surface de l'océan liées aux actions gravitationnelles de la lune et du soleil sur les liquides terrestres. De par sa proximité avec la terre, l'astre lunaire a plus d'influence que le soleil (Provost, 1974). Le niveau des océans est perturbé par le mouvement de ces deux astres, *i.e.* l'évolution de la lune autour de la terre ainsi que l'évolution du système terre-lune autour du soleil. À cela s'ajoute la variation des paramètres orbitaux de ceux-ci : l'axe de la terre est incliné et les orbites des deux astres sont ellipsoïdales (et non circulaires).

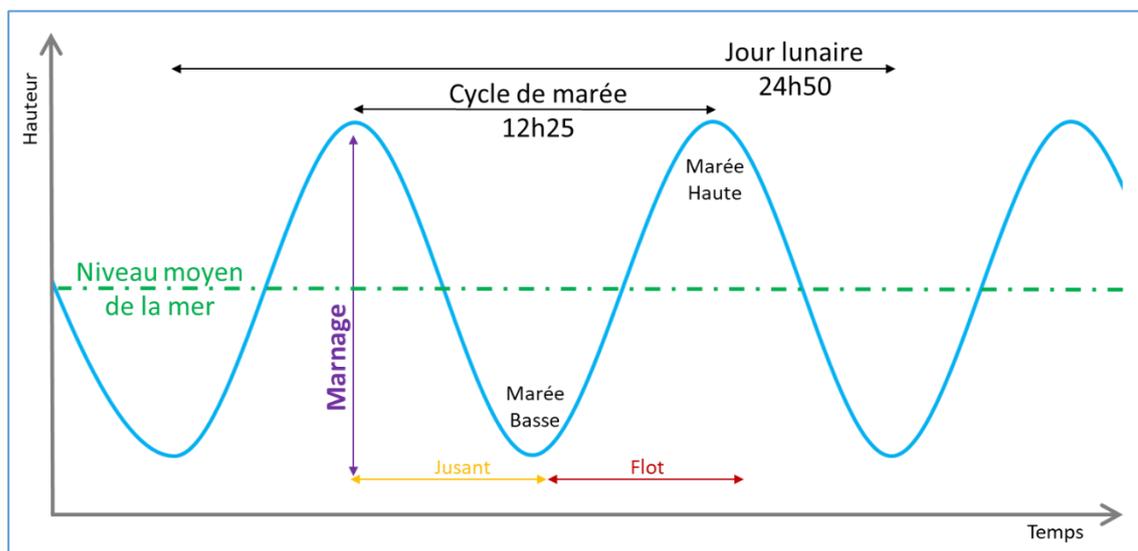


Figure 1 - Courbe de marée pour une marée de type semi-diurne. Crédits : Shom

La différence entre la marée haute et la marée basse est appelée **marnage***. On parle du **flot***, lorsque la marée est montante et du **jusant*** lorsqu'elle descend (Figure 1). La marée varie autour du niveau moyen* de la mer. On parle de « lune moyenne » lorsqu'on considère un astre fictif correspondant à l'orbite moyenne de la Lune réelle. Cette « lune moyenne » génère un cycle de marée semi-diurne* – le temps entre deux marées hautes ou deux marées basses – qui dure en moyenne 12h25. Ainsi, il faut 24h50 à la Lune pour se retrouver à la verticale du même endroit de la Terre. Enfin, la lune met environ 28 jours pour faire un tour autour de la Terre. Comme les mouvements des astres à l'origine du phénomène de marée sont connus, la marée (dite « astronomique ») peut alors être prédite à l'aide de calculs mathématiques.

Un peu d'histoire...

Les premières hypothèses sur l'origine des marées en lien avec la Lune et le Soleil ont été émises dès l'antiquité, mais il a fallu attendre le XVII^e siècle pour en avoir la confirmation. Johannes Kepler (1571-1630) émet dans un premier temps l'idée que la force génératrice de la lune est à l'origine des marées, et c'est finalement Isaac Newton (1642-1727) le premier à le démontrer. Dans sa théorie statique des marées, il illustre que l'origine des marées réside dans l'attraction exercée sur les molécules des océans par la Lune et le Soleil. Le mathématicien Laplace (1749-1827) propose la théorie dynamique des marées vers la fin du XVIII^e siècle : la force génératrice de la marée prend la forme d'ondes qui se propagent sur la surface



PREDICTION DE MAREE

maritime ; elles-mêmes sont réfléchies, réfractées et dissipées en fonction de la nature des fonds et des côtes. Ainsi, la marée en un point est une superposition d'ondes élémentaires (Lefevre, 2000; Simon, 2007).

Au XIX^e siècle, les travaux de Lord Kelvin (1824-1907) introduisent la notion d'analyse harmonique*, démontrant que la marée peut être décomposée en une somme d'oscillations élémentaires périodiques. Par ailleurs, il invente le « Tide Predictor », une machine permettant de tracer la courbe de marée résultant de différentes ondes. En 1883, Darwin (1809-1882) présente un développement quasi-harmonique dont les noms des composantes harmoniques* sont encore utilisés aujourd'hui. Enfin, en 1921 le développement harmonique complet est réalisé par Doodson (1890- 1968), qui s'appuie sur la théorie lunaire de Brown exprimant les coordonnées de la Lune par rapport à l'écliptique. Il décompose le signal de marée en plus de 400 ondes.

Spectre de marée

Le niveau d'eau en un point est la résultante d'une superposition d'ondes, chaque onde ayant une fréquence spécifique. Un spectre de marée correspond à la décomposition sur les différentes fréquences de la marée en un lieu donné. Il indique l'importance relative de chacune des ondes (amplitude) et la fréquence de ces ondes. Le spectre de marée de Brest est présenté en [Figure 2](#). Typiquement à Brest, les ondes semi-diurnes sont les ondes ayant les plus grandes amplitudes et se produisent deux fois par jour (d'où le fait qu'on observe deux pleines mers et deux basses mers par jour). On aperçoit également des ondes regroupées selon leur fréquence. Les ondes ayant une fréquence d'environ 1 cycle par jour correspondent aux ondes diurnes et celles ayant une fréquence de deux cycles par jours correspondent aux ondes semi-diurnes.

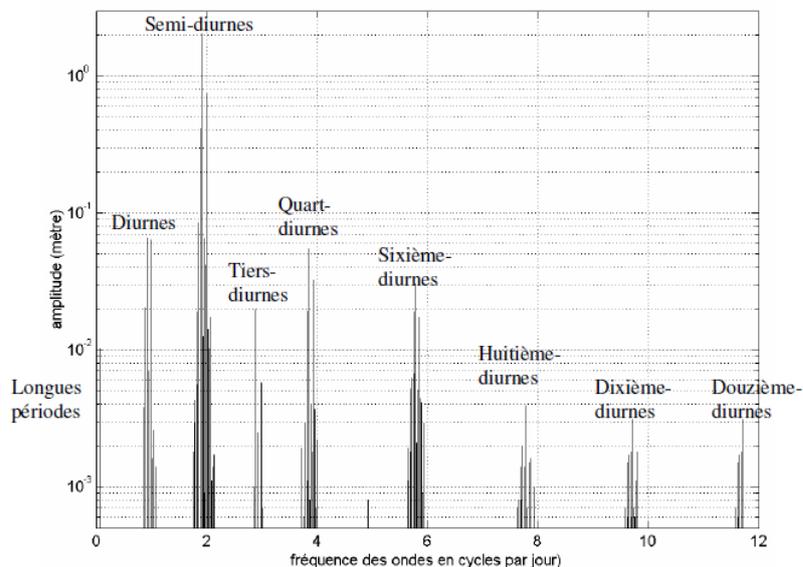


Figure 2 - Spectre de marée à Brest (Pouvreau, 2008)

Chaque onde, appelée également composante harmonique, possède une amplitude et une phase, qui sont dépendantes de chaque site de mesure. L'amplitude correspond au niveau maximal à laquelle la composante contribue à la marée. La phase est le moment auquel ce niveau est atteint, par rapport à un temps de référence, tel que le passage de la lune sur un méridien local (Parker, 2007).



PREDICTION DE MAREE

Le **Tableau 1** présente les ondes principales qui contiennent à elles seules l'essentiel du signal de marée, permettant de faire les premières approximations de prédiction de marée (Simon, 2007).

Tableau 1 - Les composantes principales classées par ordre de périodes décroissantes.

Diurnes	Désignations	Périodes (heures)
Q₁	Elliptique majeure	26.868
O₁	Lunaire principale	25.819
P₁	Solaire principale	24.066
K₁	Déclinationnelle	23.934
Semi-diurnes		
N₂	Elliptique majeure	12.653
M₂	Lunaire moyenne	12.421
S₂	Solaire moyenne	12.000
K₂	Déclinationnelle	11.967

La **Figure 3** illustre les ondes semi-diurnes lunaire (M_2) et solaire (S_2) ainsi que leur interaction, sur une période de 30 jours. La marée lunaire (et solaire respectivement) correspond à l'oscillation du niveau d'eau liée à l'action gravitationnelle de la Lune moyenne (et du Soleil moyen). La marée lunaire à une période de 12h25, et la marée solaire à une période de 12h. En lien avec la constellation du système terre-lune-soleil, les ondes vont s'additionner quand les trois astres sont alignés en période de pleine (PL) ou nouvelle lune (NL). Au contraire, elles vont être en opposition de phase en période de quadrature (dernier quart – DQ, premier quart – PQ). Un cycle de nouvelle lune à nouvelle lune dure environ 28 jours. En cas de syzygie, c'est à dire d'alignement du système terre-lune-soleil (NL, PL), on parle de « marées de vives-eaux* », et en période de quadratures on parle de « marée de mortes-eaux* ». Les plus grandes marées ont entre un et deux jours de retard sur la pleine ou nouvelle lune, à cause de l'inertie des masses d'eau.

Afin de simplifier la classification des ondes, celles-ci sont nommées selon leur origine et leur fréquence. Par exemple l'onde M_2 tire son nom du mot anglais « moon » signifiant lune et l'indice 2 pour sa caractéristique semi-diurne, en parallèle la composante semi-diurne S_2 est d'origine solaire, « sun » en anglais. Les ondes diurnes porteront l'indice 1, les ondes demi-diurnes l'indice 2, les tiers-diurne l'indice 3 et ainsi de suite. M_4 est une onde quart-diurne, résultant de l'interaction de l'onde M_2 avec elle-même, et MS_4 est le résultat de l'interférence de M_2 et S_2 .

Bien que la majorité de l'énergie de la marée se situe dans les fréquences diurnes et semi-diurnes, il existe également des ondes beaucoup plus lentes ayant des fréquences semi-annuelles, annuelles voir pluriannuelles. Les ondes les plus lentes ont une période de 18,6 ans et correspondent à la période du cycle nodal*. En effet, l'angle orbital de la lune et le plan équatorial varie sur cette période. Bien que peu visible au cours d'une année, une variation de $\pm 4\%$ sur l'amplitude de l'onde lunaire (M_2) est visible sur l'ensemble de la période des 18,6 ans (Parker, 2007).



PREDICTION DE MAREE

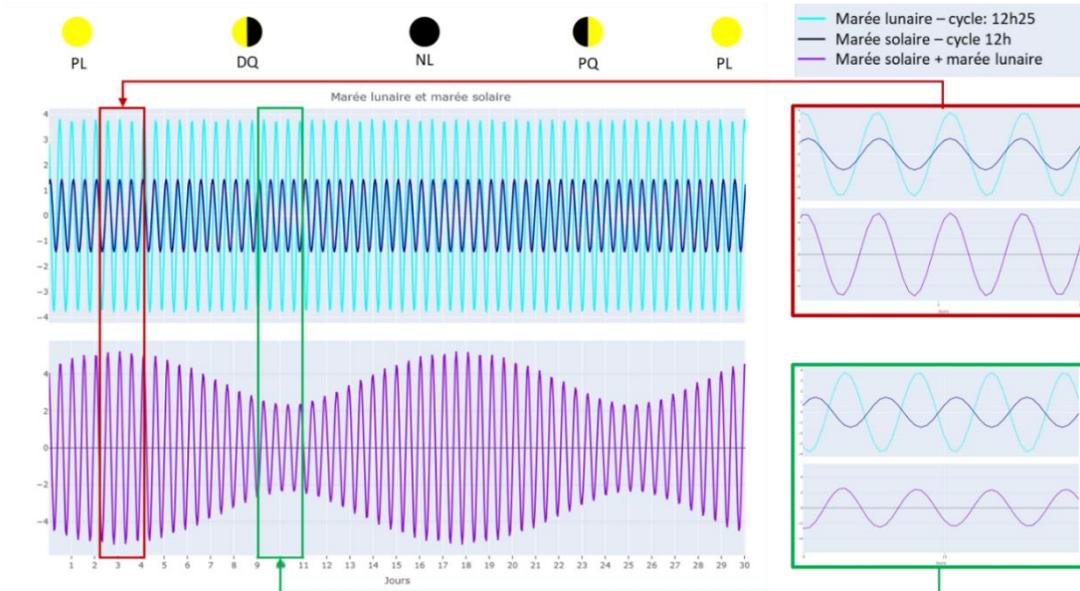


Figure 3 - Exemple d'un signal de marée fictif de la composante solaire S2 (bleu foncé) et lunaire M2 (bleu clair) (en haut) sur un cycle de marée (entre deux pleines lunes). Le signal violet (en bas) correspond à la superposition des signaux de M2 et S2 : les périodes où les ondes sont en phases correspondent aux cycles de vives-eaux (encadré rouge) et les périodes où les ondes sont déphasées correspondent aux cycles de mortes-eaux (encadré vert). PL = pleine lune, DQ = dernier-quart, NL = nouvelle lune, PQ = premier quart. Crédits : Shom

Lors du passage de la marée sur les plateaux continentaux et de la propagation de la marée en eau peu profonde, celle-ci se déforme, elle est réfléchiée et réfractée. Les ondes principales peuvent être amenées à interagir et à créer de nouvelles ondes, dites d'interaction, qui peuvent être classées en deux catégories :

- les ondes composées, lorsque plusieurs ondes astronomiques interagissent et
- les ondes supérieures, dues à l'interaction d'une onde avec elle-même (Lefevre, 2000; Parker, 2007)

Types de marée

Selon la configuration bathymétrique et côtière, la déformation de l'onde de marée ne se fait pas de la même manière. Il en résulte différents types de marée, représentés suivant 4 types principaux (Figure 4). En métropole, sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique, la marée est de type semi-diurne* (représentée en bleu), c'est-à-dire qu'elle est caractérisée par deux marées hautes et deux marées basses par jours (cf. panel A sur la Figure 5).

La station de Do Son au Vietnam n'enregistre qu'une marée haute et basse par jour, la marée est alors de type diurne* (cf. panel D sur la Figure 5). Entre ces deux types de marée, les marées sont de type mixte* ou semi-diurne à inégalité diurnes*(Figure 4, Tableau 2).

Le facteur de forme (F) permet d'estimer le type de marée à partir des amplitudes (H) des composantes principales suivantes : K₁ et O₁ (diurnes), M₂ et S₂ (semi-diurnes) :

$$F = \frac{H_{K_1} - H_{O_1}}{H_{M_2} - H_{S_2}}$$



PREDICTION DE MAREE

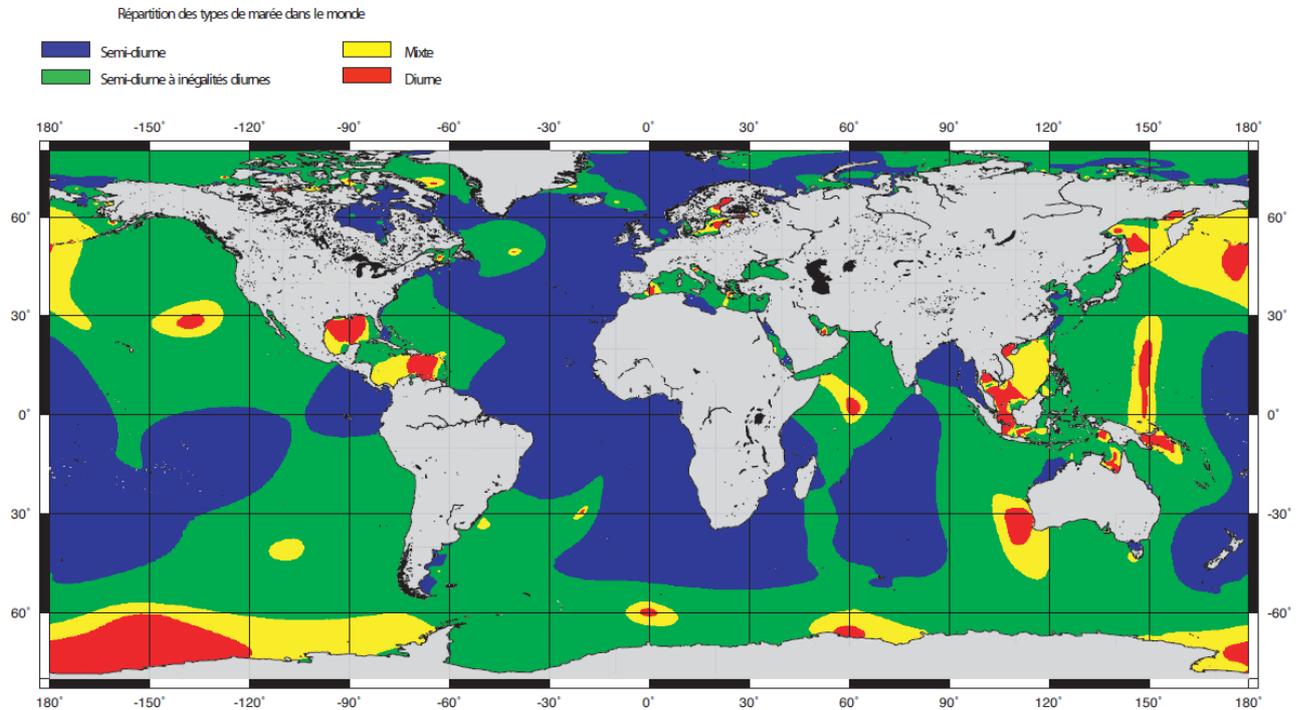


Figure 4 - Répartition des quatre types de marée dans les trois océans, d'après (Simon, 2007).

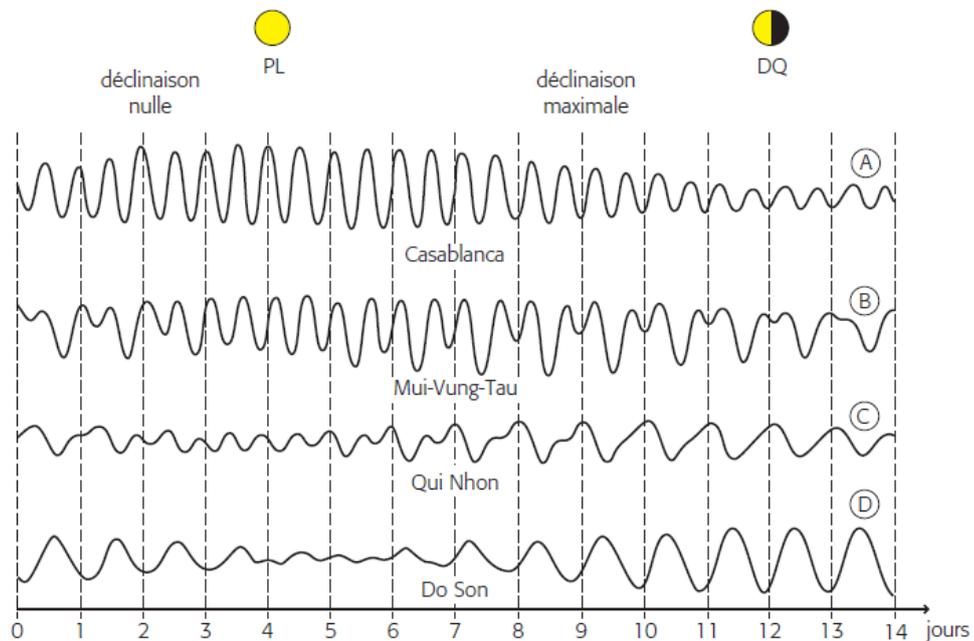


Figure 5 - Les types de marée. A) marée semi-diurne, B) marée à inégalité diurne, C) marée mixte, D) marée diurne. D'après Simon (2007).



PREDICTION DE MAREE

Tableau 2 - Classification des types de marée selon le coefficient de forme F. La classification française d'après Simon, (2007), en italique la classification d'après Pugh & Woodworth (2014).

Coefficient F	Type de marée
$0 < F < 0.25$	semi-diurne <i>semi-diurnal</i>
$0.25 < F < 1.50$	mixte à inégalités diurnes <i>mixed, mainly semi-diurnal</i>
$1.50 < F < 3.00$	mixte <i>mixed, mainly diurnal</i>
≥ 3.00	Diurne <i>diurnal</i>

Les marées peuvent également être classées par leur marnage représentant la différence de niveau entre la marée haute et la marée basse. Lorsque le marnage est inférieur à 2 m il est considéré comme microtidal*, entre 2 et 4 m il est mésotidal* et enfin, supérieur à 4 m le marnage est macrotidal*.

Coefficients de marée

Tout d'abord, 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.

Le coefficient de marée a été imaginé par Laplace pour caractériser chaque port par une unité de hauteur : « l'unité 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, 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 pleine mer au-dessus du zéro hydrographique (ZH)*, N_0 est le niveau de mi-marée au-dessus du ZH et U est l'unité de niveau.

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 3 :

Tableau 3 - Type de marnage associé au coefficient de marée.

Coefficient de marée	Type de marnage
20	Marée de morte-eau extrême
45	Marée de morte-eau moyenne
< 70	Marée de morte-eau
> 70	Marée de vive-eau
95	Marée de vive-eau moyenne
120	Marée de vive-eau extrême



PREDICTION DE MAREE

Le coefficient est calculé pour Brest uniquement, 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 de France métropolitaine. Il convient toutefois de prendre en compte le décalage horaire entre la pleine mer de Brest et celle du port concerné.

Niveaux caractéristiques de la marée

Le niveau de la mer est la position moyenne de la surface de la mer. Celui-ci peut être calculé de différentes manières. Il est généralement représenté par le calcul des niveaux moyens journaliers (NMj), des niveaux moyens mensuels (NMm), ou des niveaux moyens annuels (NMa) suivant les critères définis par le *Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)* décrit dans la **fiche « Mesures de niveaux marins »**. Les niveaux moyens sont diffusés par SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales ; <https://www.sonel.org/>).

En plus du niveau moyen, il existe différents niveaux caractéristiques de la marée :

Sigle	Définition
PHMA*	Niveau des plus hautes mers astronomiques
PMVE*	Niveau de pleines mers de vives-eaux
PMME*	Niveau de pleines mers de mortes-eaux
BMME*	Niveau de basses mers de mortes-eaux
BMVE*	Niveaux de basses mers de vives-eaux
PBMA*	Niveau des plus basses mers astronomiques

Ces niveaux caractéristiques de la marée sont calculés à partir des composantes harmoniques de marée. Les niveaux des plus hautes et des plus basses mers astronomiques (respectivement PHMA et PBMA) représentent respectivement la valeur maximale et le minimale du niveau de marée astronomique prédit, pour une marée de vive-eau extrême (coefficient 120).

Les niveaux de pleines et basses mers de vives-eaux (respectivement PMVE et BMVE) correspondent à la marée de vive-eau moyenne de coefficient 95. Les niveaux de pleines et basses mers de mortes-eaux (respectivement PMME et BMME) correspondent à la marée de morte-eau moyenne de coefficient 45. Les différents niveaux caractéristiques sont calculés pour chaque port et mis à disposition dans le RAM (Références altimétriques maritimes)¹ (Shom, 2022).

Ces différents niveaux sont donnés par rapport au zéro hydrographique (ZH). Le ZH est une référence verticale : il s'agit du niveau de référence commun aux cartes marines et aux annuaires des marées. Le ZH est choisi en France au voisinage du niveau des PBMA sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement (voir **fiche « Référentiels verticaux »** pour plus de détails).

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



PREDICTION DE MAREE

Moyen(s) d'acquisition

Formule harmonique

En étude de traitement du signal, il existe deux types de représentation : 1) une représentation temporelle dans laquelle la variable indépendante est le temps ; 2) une représentation fréquentielle dans laquelle la variable indépendante est la fréquence. Le passage de l'une à l'autre est possible par la transformation dite de Fourier (Simon, 2007).

Le phénomène de marée peut être perçu comme un mouvement régulier mais n'est pas forcément périodique. C'est par le biais de l'analyse harmonique qu'il sera possible de séparer un certain nombre de composantes de marée du signal total. Pour décomposer ce signal, une Transformée de Fourier permet de localiser sur l'échelle des fréquences des amplitudes « significatives » relatives aux variations temporelles du phénomène étudié, en l'occurrence le niveau marin dans notre cas.

A partir des différentes composantes harmoniques identifiées pour un lieu donné, il est possible par la suite de « prédire » la marée en sommant de nouveau les amplitudes et les phases des différentes composantes. On parle ainsi, de prédiction de marée.

La formule harmonique permet de calculer le niveau d'eau en un lieu et à un instant t :

$$h(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^n [H_i \cos(\sigma_i t - g_i)]$$

avec

t = temps

Z_0 = Niveau moyen autour duquel oscille le niveau de la mer

H_i = amplitude de l'onde i [m]

σ_i = vitesse angulaire [rad]

g_i = phase de l'onde i [rad]

Si le nombre d'ondes élémentaires composant la marée doit être considéré comme illimité, seules un certain nombre d'entre elles ont une amplitude d'une valeur suffisante pour avoir une influence sensible sur le niveau d'eau. Il est ainsi possible d'obtenir une précision de quelques centimètres en ne prenant en compte qu'un nombre restreint d'ondes.

Cette précision est largement suffisante dans la mesure où le niveau de l'eau peut subir des perturbations d'origine météorologique de quelques dizaines de centimètres qu'il est impossible de prévoir à moyen ou long terme.

Les outils

Il existe plusieurs outils pour effectuer une analyse harmonique des données d'observations marégraphiques et obtenir des prédictions de marée.



PREDICTION DE MAREE

La liste des outils présentés n'est pas exhaustive :

Outil	Développeurs	Langage	Droit d'utilisation	Durée d'analyse	Nombre de composantes	Remarques
T_tide	(Pawlowicz et al., 2002).	Matlab / Python	Libre	1 an	146	
U_tide	(Codiga, 2011)	Matlab / Python	Libre	Longue durée	146	Adapté aux jeux de données avec des lacunes plus ou moins importantes
TideHarmonics	(Stephenson, 2017)	R	Libre	Longue durée	409	Permet d'inclure une variation du niveau de la mer
MAS	Shom	Fortran	Non libre	Longue durée	143	
TASK	NOC	-	Non libre	-	115	Tous les programmes sont écrits pour fonctionner sous Microsoft Windows (XP, Vista, 7, 8, 10)

Traitements nécessaires

Importance des observations pour l'analyse harmonique

Comme précisé précédemment, la marée peut être décomposée en un multiple de composantes harmoniques ayant chacune une fréquence bien spécifique. Pour déterminer leur amplitude et leur phase, une observation préalable des niveaux d'eau est une condition nécessaire, car c'est à partir des amplitudes et phases que la prédiction sera réalisée. Plus la qualité des observations est bonne et de longue durée, plus la prédiction sera précise. Les calculs de prédiction nécessitent des séries de mesures marégraphiques de qualité pour réaliser par exemple les annuaires de marée. Des erreurs systématiques dans les observations, résultant de mauvais calages (en temps ou en hauteur) des systèmes d'enregistrement, peuvent affecter gravement la précision de la prédiction, tout comme les conditions météorologiques. En effet lorsqu'une année est considérée comme très tempétueuse, le signal de marée théorique est plus difficile à estimer.

Généralement, l'analyse d'une année de mesures horaires suffit au calcul d'une prédiction de bonne qualité pour les besoins de la navigation. En revanche, lorsque l'onde de marée progresse par faibles fonds sur de grandes distances (plateau continental ou estuaires), le calcul de certaines composantes harmoniques, provenant d'interactions non linéaires, exige plus de quatre années d'observations.

Dans tous les cas, 19 années de mesures (durée supérieure au cycle lunaire nodal de 18,6 ans) permettent une analyse optimale (Pugh & Woodworth, 2014), même s'il est parfois difficile de disposer de données marégraphiques de qualité sur une aussi longue période pour chaque site côtier.



PREDICTION DE MAREE

Pour certains sites, il est possible de se contenter de durées inférieures à une année. Enfin, sur des durées très courtes, il est possible d'utiliser une méthode de concordance par espèce² lorsque l'on peut disposer de composantes harmoniques précises sur un port très proche (Simon, 2007). Un mois d'observations peut alors s'avérer suffisant à condition que les mesures soient de très bonne qualité. Il est alors préférable de les effectuer au cours de l'été, car elles sont moins perturbées par les phénomènes météorologiques qui affectent le niveau marin.

Bien qu'une dizaine d'ondes contiennent pratiquement l'ensemble de l'énergie du signal de marée et permettent de faire une bonne approximation de prédiction, un nombre plus important d'ondes est considéré lors de l'analyse harmonique et les prédictions. Au Shom, actuellement 143 composantes sont prises en compte dans les études de marée.

Incertitudes et limites

Il est nécessaire pour réaliser des analyses harmoniques et donc des prédictions de marée en un lieu donné, d'avoir des observations de qualité sur une durée suffisamment longue. Une durée d'un an minimum est préconisée par le Shom, bien que d'autres méthodes d'analyse comme la concordance par espèces permettent de diminuer les durées d'observations.

Dans le cadre des prédictions de marée sur des périodes anciennes (XIX^e siècle par exemple ou antérieur), il peut s'avérer délicat d'utiliser des composantes harmoniques modernes, car les caractéristiques des marées peuvent avoir évolué au cours du temps (Cartwright, 1972; Pineau-Guillou et al., 2021; Ray & Talke, 2019; Wilmes & Green, 2014).

Une étude menée par le Shom est en cours pour comparer différentes méthodes de prédictions de marée historiques. La première méthode consiste à estimer des composantes harmoniques à partir des mesures de niveaux d'eau contemporaines à l'évènement. La deuxième méthode part du constat que des mesures continues n'ont pas forcément été réalisées lors d'un évènement donné. En absence de mesures, les composantes harmoniques sont estimées à partir d'observation modernes et les prédictions de marée sont ajustées en prenant en comptes les tendances d'évolution du niveau des mers du site étudié. Cette étude vise à estimer l'écart entre les deux méthodes de prédictions.

Organisme(s) clés / en jeu

Service hydrographique et océanographique de la marine (Shom)*

Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL)*

Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)*

² La méthode des concordances par espèce se base sur la règle suivante : à une amplitude donnée de la marée à un port de référence quelconque, correspondent une amplitude et un déphasage au port secondaire. Pour appliquer cette méthode, il est par contre nécessaire que les marées des deux ports soient de même type.



PREDICTION DE MAREE

Sources, vecteurs de diffusion/de porter à connaissance

<https://maree.shom.fr/>

<https://diffusion.shom.fr/>

Références clés

Cartwright, D. E. (1972). Secular Changes in the Oceanic Tides at Brest, 1711–1936. *Geophysical Journal International*, 30(4), 433-449. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb05826.x>

Codiga, D. L. (2011). *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions*. 60.

Lefevre, F. (2000). *Modélisation des marées océaniques à l'échelle globale : Assimilation de données in situ et altimétriques* [These de doctorat, Toulouse 3]. <https://www.theses.fr/2000TOU30087>

Parker, B. B. (2007). *Tidal analysis and prediction*. [Report]. NOAA, NOS Center for Operational Oceanographic Products and Services. <https://doi.org/10.25607/OBP-191>

Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)

Pineau-Guillou, L., Lazure, P., & Wöppelmann, G. (2021). Large-scale changes of the semidiurnal tide along North Atlantic coasts from 1846 to 2018. *Ocean Science*, 17(1), 17-34. <https://doi.org/10.5194/os-17-17-2021>

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>

Provost, C. L. (1974). *Contribution à l'étude des marées dans les mers littorales : Application à la Manche* [Université Joseph-Fourier-Grenoble I; Institut National Polytechnique de Grenoble-INPGGrenoble]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00284605/document>

Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-Level Science : Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press.

Ray, R. D., & Talke, S. A. (2019). Nineteenth-Century Tides in the Gulf of Maine and Implications for Secular Trends. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(10), 7046-7067. <https://doi.org/10.1029/2019JC015277>

Shom. (2020). *Références altimétriques maritimes 2020 (RAM)*. <https://diffusion.shom.fr/pro/referencess-altimetriques-maritimes-ram.html>

Simon, B. (2007). *La marée océanique côtière* (Institut Oceanographique).



PREDICTION DE MAREE

Stephenson, A. (2017). *TideHarmonics: Harmonic Analysis of Tides* (0.1-1) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=TideHarmonics>

Wilmes, S.-B., & Green, J. A. M. (2014). The evolution of tides and tidal dissipation over the past 21,000 years. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(7), 4083-4100.

Fiches en lien

Fiche « Surcotes »

Fiche « Référentiels verticaux »

Fiche « Mesure du niveau de la mer »

