

Traitement des observations de marée au SHOM

Rôle du SHOM relativement à la marée

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) est l'organisme public chargé de l'élaboration des documents nautiques dont font partie les cartes marines et les annuaires de marée. Pour cette raison, les hydrographes ont souvent été les instigateurs des études relatives à la marée. Longtemps après Laplace et Poincaré, la communauté scientifique n'a réellement recommencé à s'y intéresser que récemment, en raison des besoins nouveaux apparus avec les techniques spatiales.

Rôle interne

L'élaboration des cartes marines nécessite la mesure des profondeurs qui, mesurées au cours des campagnes de sondage, doivent être rapportées à la référence verticale des cartes marines, appelée zéro hydrographique. Pour les sondages à proximité d'une station marégraphique, cela ne présente pas de difficulté, car il suffit dans ce cas de lire la hauteur mesurée au marégraphe supposées rapportée à cette référence. Mais pour les sondages au large, le problème est beaucoup plus difficile et commence simplement à être résolu de façon satisfaisante grâce à l'apport de la modélisation numérique et aux techniques spatiales. Les méthodes dans ce domaine continuent à évoluer et devraient déboucher prochainement sur l'utilisation du GPS cinématique, le principal problème à résoudre étant le positionnement en tout point du zéro hydrographique dans un référentiel terrestre.

Rôle national

La publication des annuaires de marée constitue, dans ce domaine, l'activité du SHOM la plus connue. À côté de ces documents traditionnels (les annuaires sont publiés depuis 1839), la possibilité est offerte désormais aux navigateurs de réaliser eux-mêmes leurs prédictions de marée grâce aux moyens de calculs modernes maintenant très répandus.

La nécessité pour les hydrographes de disposer de mesures de marée de bonne qualité pour réaliser leurs travaux les a naturellement amenés à installer des observatoires de marée, à en assurer le maintien et à assurer l'archivage des observations. Celles-ci sont mises gratuitement à la disposition de la communauté scientifique. Mais ce rôle d'archivage est amené à évoluer face à la demande croissante de données ne correspondant pas aux critères traditionnels du SHOM (mesures géodésiques associées, temps réel, cadences d'acquisition,...).

Enfin, détenteur d'une compétence reconnue dans ce domaine, le SHOM est souvent sollicité pour des études particulières concernant la marée.

Responsabilité internationale

Les services hydrographiques, dont le rôle essentiel est d'assurer la sécurité de la navigation maintiennent entre eux des contacts étroits au sein de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI) afin d'organiser les échanges d'informations et élaborer des normes communes pour les navigateurs du monde entier. Concernant les marées, il s'agit essentiellement d'harmoniser les formats d'échange, de fournir des critères de qualité pour les

observations, les prédictions et la réduction des sondages, d'adopter des définitions communes, et de préciser les règles pour la fourniture de données aux compagnies privées. En tant que détenteur des fichiers d'observation de marée, le SHOM est en outre investi d'une responsabilité auprès de la communauté scientifique internationale pour la fourniture de données de qualité.

Observation de la marée

La marégraphie, qui était restée inchangée pendant près d'un siècle a fait l'objet depuis quelques années d'un regain d'intérêt, principalement en raison d'un besoin nouveau de mesures de bonne qualité émanant surtout de la communauté scientifique, mais également des services hydrographiques, souvent confrontés à la détérioration de la qualité des mesures issues des appareils traditionnels, les marégraphes à flotteur à enregistrement analogique. Cette perte de qualité doit vraisemblablement être attribuée au caractère désuet de la technique mise en jeu, entraînant le désintérêt des opérateurs pour un travail routinier et fastidieux que pourrait accomplir une machine.

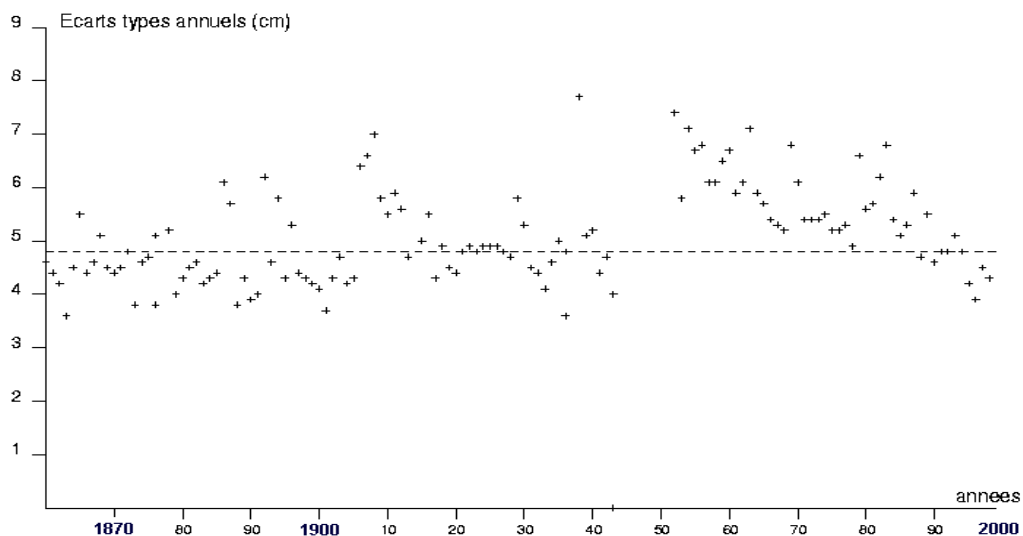


Figure 1 : écarts types annuels entre prédictions et observations à Brest

La courbe de la figure 1 montre les écarts types annuels représentés par une croix, entre les hauteurs horaires prédites et observées à Brest. L'augmentation sensible constatée après la période de la guerre au cours de laquelle le marégraphe avait été détruit, correspond à une diminution de la qualité des mesures. L'amélioration observée pour la période récente correspond à la mise en place d'un nouvel appareil, le Marégraphe Côtier Numérique (MCN). Une diminution de la qualité des mesures issues des appareils traditionnels a été constatée dans tous les observatoires. Confronté à ce problème qui risquait de se répercuter sur la qualité des prédictions des annuaires et la précision des sondes portées sur les cartes marines, le SHOM a entrepris la mise en place du réseau RONIM, dont l'objectif est de moderniser le réseau d'observatoires des côtes de France, d'une part en remplaçant ses propres appareils, d'autre part en collaborant avec les services portuaires concernés.

La technique choisie a été le capteur à ultrasons dont le principe est la mesure du temps de parcours d'un signal ultrasonore dirigé verticalement, durant son trajet aller-retour entre un transducteur placé dans l'air et la surface de l'eau.

La centrale d'acquisition étant reliée au réseau téléphonique par l'intermédiaire d'un modem, un opérateur au SHOM procède chaque semaine à la vérification du bon fonctionnement des appareils, à la validation et à la mise en fichier des données.

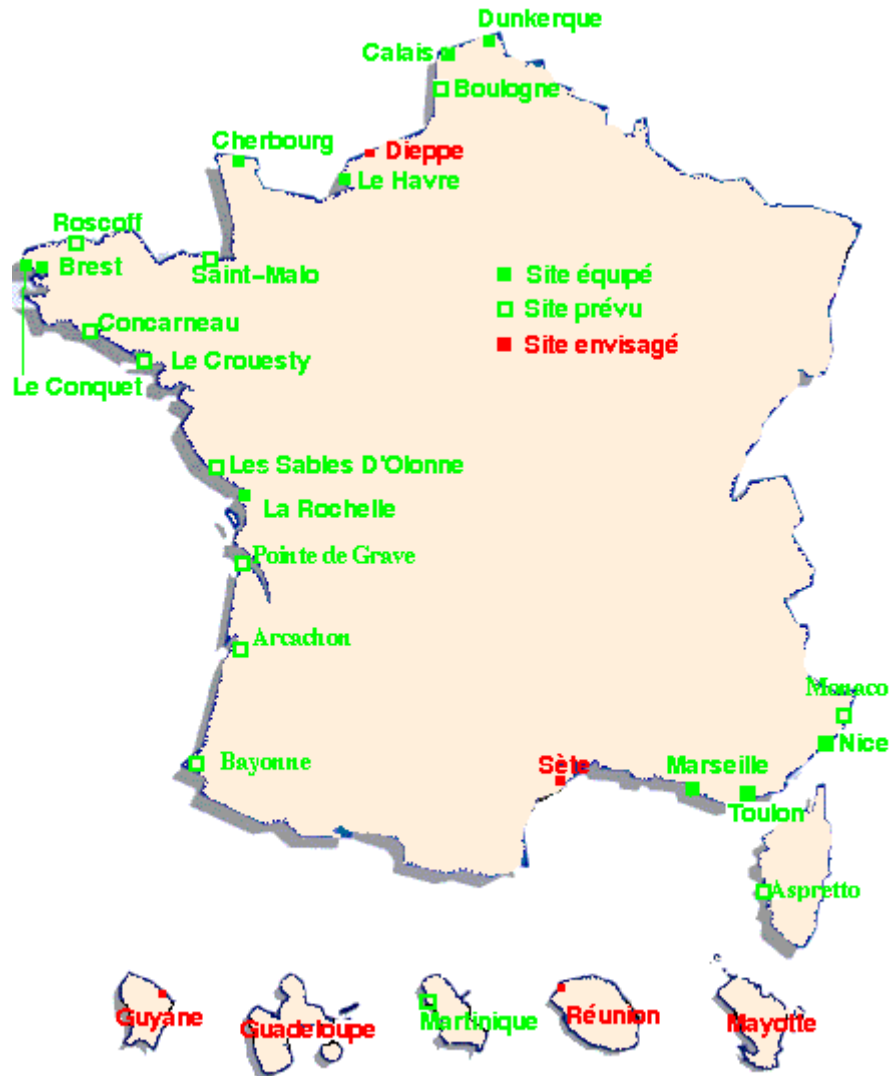


Figure 2: le réseau RONIM

La figure 2 montre l'état actuel du réseau RONIM.

Actuellement les capteurs à ultrasons sont en cours de remplacement par des capteurs électromagnétique (radars) insensibles à la température et plus précis.

En plus de ces observatoires qualifiés de permanents, le SHOM procède, pour les besoins des sondages hydrographiques, à des mesures généralement faites à l'aide de capteurs de pression posés sur le fond. Ces mesures sont souvent de durée supérieure à un mois, ce qui permet d'obtenir des constantes harmoniques de bonne qualité et des données statistiques sur les surcotes-décotes. La méthode consiste à s'aider des corrélations avec les observations effectuées au marégraphe permanent le plus proche. La densité de points de mesure disponible actuellement au large des côtes de France est suffisant pour obtenir une bonne connaissance de la marée en tout point par simple interpolation.

Une source d'erreurs non négligeable avec ces appareils provient de la traduction en hauteur d'eau de la pression mesurée, ce qui suppose la connaissance de la densité moyenne de la colonne d'eau au dessus du capteur et de la pression atmosphérique. Le mode opératoire habituel, consistant à adopter une densité moyenne à partir de prélèvements en surface au début et à la fin des mesures, et la pression atmosphérique mesurée à la station météorologique la plus proche, n'est pas exempte de critique.

Prédiction de marée

Analyse spectrale

Les prédictions de marée au SHOM sont actuellement réalisées par la méthode harmonique. La méthode de Laplace, qui est à l'origine des annuaires français, a été progressivement abandonnée au cours des années 80 et définitivement en 1992 avec la suppression du port fictif « Brest-référence » qui était encore, jusqu'à cette date, calculé par cette méthode. La méthode harmonique se base sur la représentation de la marée dans le domaine spectral, formée d'un grand nombre de composantes harmoniques dont les fréquences sont définies avec une précision telle que l'incertitude sur le calcul de leur phase est inférieure au degré sur une période de l'ordre d'un millénaire.

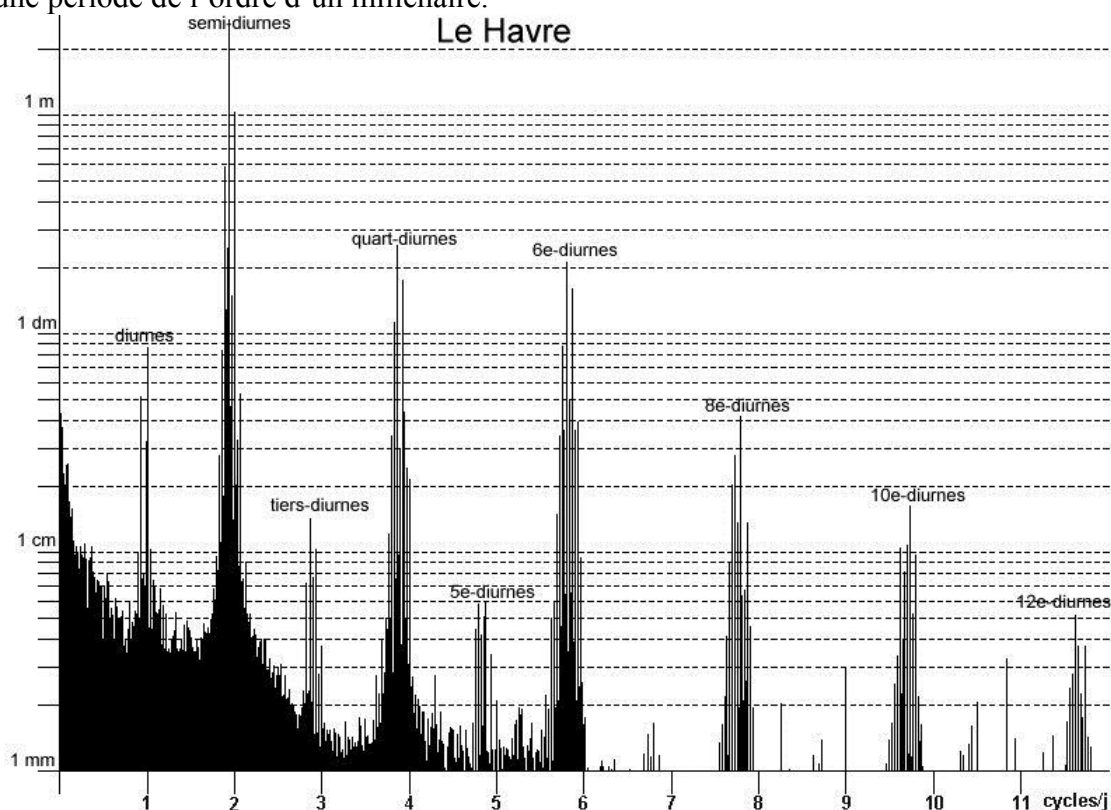


Figure 3: spectre basse résolution au Havre

Les figures 3 et 4 donnent des exemples de spectres à différentes résolutions, qui mettent en évidence les caractéristiques fondamentales. La figure 3, à basse résolution montre un certain nombre de concentrations de raies spectrales autour des harmoniques de la fréquence fondamentale de la marée qui est égale à un cycle par jour lunaire dont la durée est approximativement 24 heures et 50 minutes. Ceci n'est pas vrai pour les marées d'estuaire, où

il est fréquent de détecter des raies spectrales bien au delà, ce qui nécessite un échantillonnage plus serré des observations.

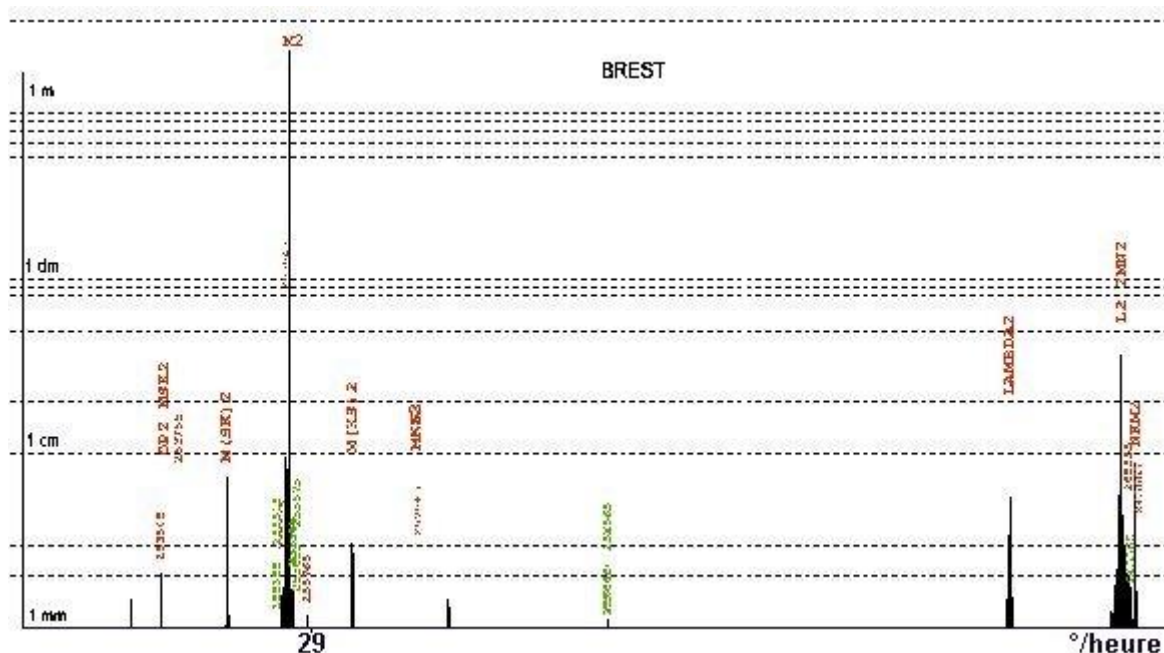


Figure 4 partie du spectre semi-diurne à Brest

La figure 4 montre un agrandissement du spectre au voisinage de la partie centrale des semi-diurnes. Il s'agit du résultat de l'analyse de 120 années d'observations recueillies à l'observatoire de Brest. Cette très longue durée permet d'obtenir la résolution nécessaire pour distinguer pratiquement toutes les composantes du spectre. Quelques ambiguïtés subsistent néanmoins concernant des composantes d'interactions non linéaires, à cause de la proximité de la période de révolution du nœud ascendant de la lune (18,6 ans) et du double de la période de révolution du périgée lunaire (8,8 ans). Plus d'un siècle et demi d'observations seraient nécessaires pour les résoudre.

Analyse harmonique

Ces spectres illustrent le fait que la marée peut être représentée par une série de fonctions périodiques. Seul le domaine des basses fréquences (entre 0 et 1 cycle par jour) échappe à une représentation sous forme de raies spectrales bien définies. C'est en effet le domaine où les variations de niveau sont en grande partie d'origine météorologique, à caractère essentiellement aléatoire. La contribution de la marée gravitationnelle est noyée dans ce bruit et ne peut pas le plus souvent être détectée. Seules deux raies spectrales correspondant à des oscillations annuelles et semi-annuelles (non visibles sur le spectre à basse résolution du Havre) émergent en général, mais ce sont des manifestations des variations climatiques saisonnières.

La marée peut donc être considérée comme la superposition d'une série de fonctions périodiques et d'une fonction aléatoire que nous appellerons surcotes-décotes (SD). La notation habituelle est la suivante :

$$h(t) = Z_0 + \sum_i A_i \cos(V_i - G_i) + SD$$

Dans cette expression, Z_0 est le niveau moyen, A_i l'amplitude, V_i l'argument du cosinus dans le développement harmonique du potentiel générateur de la marée, et G_i la « situation » de la composante i . La situation d'une composante harmonique de la marée représente son retard exprimé en angle, par rapport à la composante correspondante du potentiel (pour obtenir son retard exprimé en temps, il suffit de la diviser par la vitesse angulaire $\frac{dV_i}{dt}$). Z_0 , A_i et G_i sont constants en un lieu donné.

Seul V_i dépend du temps. On l'exprime généralement à l'aide des éléments astronomiques suivants dans lesquels T est le temps exprimé en siècles juliens de 36525 jours de temps moyen, écoulés depuis le 1^{er} janvier 2000 à midi temps civil local. t est l'heure, exprimée également en temps civil local.

Symbole	Valeur en fonction du temps (°)	
τ	$15t + h - s$	Temps lunaire moyen local
s	$218,3165 + 481267,8804 T - 0,0016 T^2$	Longitude moyenne de la lune
h	$280,4661 + 36000,7698 T + 0,0003 T^2$	Longitude moyenne du soleil
p	$83,3535 + 4069,0215 T - 0,103 T^2$	Longitude moyenne du périégée lunaire
N'	$234,555 + 1934,1363 T + 0,0021 T^2$	Opposé de la longitude moyenne du nœud ascendant de la lune
p_1	$282,9384 + 1,7195 T + 0,0005 T^2$	Longitude moyenne du périégée solaire

On montre que ces six paramètres indépendants suffisent à décrire le mouvement des trois corps terre, lune et soleil, et la rotation terrestre. Les termes en T^2 peuvent être négligés sur une période de quelques siècles.

$$V_i = n_{1i}\tau + n_{2i}s + n_{3i}h + n_{4i}p + n_{5i}N' + n_{6i}p_1 + n_{7i}\frac{\pi}{2}$$

Une expression légèrement différente de la formule harmonique de la marée est souvent proposée :

$$h(t) = Z_0 + \sum_i f_i A_i \cos(V_i - G_i + u_i) + SD$$

Les facteurs f_i et les déphasages u_i sont des termes correctifs introduits pour pallier le fait que le développement harmonique n'est pas complet et ne comprend que les composantes séparables avec simplement un an d'observations. Ils sont appelés facteurs nodaux car ils dépendent essentiellement de la position du nœud ascendant de la lune. Le fait qu'ils aient une périodicité de 18,6 ans est probablement à l'origine de l'idée très répandue mais néanmoins fautive qu'il s'agit de la période de la marée.

L'analyse harmonique consiste à calculer les amplitudes A_i et les situations G_i .

Des méthodes originales ont été développées au SHOM pour tirer le meilleur parti des observations disponibles, selon leur durée, le fait qu'elles comportent ou non des lacunes, les connaissances a priori. Les constantes harmoniques ainsi obtenues permettent de calculer une marée théorique

$$h_{th}(t) = Z_0 + \sum_i A_i \cos(V_i - G_i)$$

Contrôles

L'étape suivante consiste à comparer cette marée théorique à la marée observée. L'analyse de la différence ne doit pas révéler de raies spectrales significatives qui seraient le signe que l'analyse n'est pas complète. Si tel est le cas, il faut identifier ces composantes en leur attribuant une origine (force génératrice ou interactions non linéaires). Et recommencer l'analyse harmonique en les prenant en compte. On s'aperçoit généralement qu'au voisinage des composantes importantes, qui ont disparu de la différence, subsiste un résidu ayant l'allure d'un bruit. Il s'agit effectivement d'un bruit provenant de légères variations en amplitude et phase de ces composantes dues à des interactions non linéaires avec les surcotes-décotes. Son niveau donne une indication sur l'incertitude relative attachée à la détermination des constantes. Enfin il subsiste évidemment les surcotes-décotes dans la partie basse du spectre.

L'analyse du spectre permet aussi parfois de détecter des dysfonctionnements du marégraphe quand ceux-ci ont un caractère périodique, comme par exemple la mauvaise adaptation de la feuille sur le tambour d'un marégraphe analogique, mais les périodes correspondantes sont souvent confondues avec celles de certaines composantes harmoniques et sont de ce fait indécélables.

Prédictions

Les constantes harmoniques ainsi calculées alimentent un fichier utilisé pour les besoins de l'hydrographie et pour le calcul des annuaires. Elles permettent également de fournir des prédictions « à façon » pour des supports publicitaires, des calendriers, des services portuaires.

Ces fichiers de constantes harmoniques calculées au SHOM sont complétés par des données d'origines diverses provenant le plus souvent de la Banque des constantes harmoniques de l'OHI, aujourd'hui disparue, d'autres services hydrographiques ou d'organismes de recherche (WOCE, NOAA, MAST).

Toutes ces données ont été utilisées pour alimenter les logiciels mis au point au SHOM pour permettre aux usagers de faire eux-mêmes leurs prédictions de marée grâce aux moyens de calcul disponibles. Ce fut d'abord, dans les années 80 « la Table des Marées des Grands Ports du Monde », qui fournissait les principales composantes harmoniques de plus de 800 ports importants du monde et une méthode de calcul adaptée aux calculatrices programmables de cette époque. Encore aujourd'hui, de nombreux sites Internet proposant des prédictions de marée s'appuient sur cet ouvrage.

Lorsqu'il a été question de faire évoluer ce produit, plutôt que de continuer dans la voie des calculatrices programmables, il a été jugé préférable, compte tenu de l'évolution prévisible de l'informatique individuelle, de proposer un produit adapté aux micro ordinateurs. Ce fut la mise au point de la Table Universelle des Marées, associées au logiciel SHOMAR fonctionnant sur PC, qui permet le calcul de la marée dans un millier de ports du monde avec

la meilleure précision permise par les composantes harmoniques disponibles. Pour les ports français, en particulier, on obtient la précision des annuaires.

Un autre produit, le logiciel « PREDIT », est fourni avec les composantes harmoniques de quelques ports. Il est destiné à un usage professionnel.

La prochaine étape est la commercialisation en 2002 d'un logiciel associé à des fichiers de constantes et au trait de côte mondial, permettant de calculer la marée en tout point en mer.

Les modèles numériques de marée océanique permettent de compléter les manques d'informations loin des points où la marée a été observée.

Traitements statistiques

Après élimination, dans les hauteurs observées, de la marée théorique et les corrections d'éventuelles erreurs de mesures, il reste les surcotes-décotes (*SD*), qui par définition constituent un signal aléatoire, devant de ce fait être étudié à l'aide de méthodes statistiques. Le SHOM s'est évidemment intéressé depuis longtemps à ce « bruit » pour évaluer la qualité de ses prédictions, mais c'est à la demande de la Direction des Ports du ministère de l'environnement qu'une étude plus complète a été menée sur les niveaux extrêmes. Il faut avoir à l'esprit que la manifestation de ces variations de hauteur d'eau ne peut être détectée qu'au travers des enregistrements disponibles qui se caractérisent généralement par un échantillonnage horaire après lissage de la courbe marégraphique et des durées d'observations très rarement supérieures au siècle. Il en résulte que les parties extrêmes du spectre : les vague, la houle et les seiches, ainsi que les variations à très longues périodes sortent du cadre de cette étude.

Variation séculaire

En France, seuls les sites de Brest et de Marseille possèdent les données requises pour détecter une tendance à long terme du niveau de la mer. En effet, les fluctuations des niveaux moyens annuels sont telles que la tendance ne peut être détectée que si la durée des observations est voisine du siècle.

Plusieurs enseignements peuvent être déduits des tracés des moyennes annuelles des hauteurs d'eau relevées sur ces marégraphes, présentés sur les figures 5 et 6 :

- 1) Les niveaux, tant à Brest qu'à Marseille augmentent en moyenne approximativement de 1,2 mm par an.
- 2) L'élévation du niveau moyen à Brest était déjà sensible avant le début de l'ère industrielle et ne présente pas d'accélération perceptible, ce qui semble exclure l'influence de l'effet de serre.
- 3) Les fluctuations sont telles qu'une tendance ne peut être détectée avec un degré de confiance suffisant que si l'on dispose d'une durée minimale d'observation de l'ordre du siècle : les conclusions qui peuvent être déduites de durées plus courtes n'ont que peu de valeur.
- 4) A Marseille, on constate une diminution sensible depuis le début des années 60 (cette diminution est également constatée en d'autres sites méditerranéens). Une publication récente avance l'hypothèse d'une augmentation de la densité de la Méditerranée due à un déficit en apport d'eau douce par les fleuves et les précipitations.

BREST (MAREGRAPHE) – Moyennes annuelles du niveau de la mer

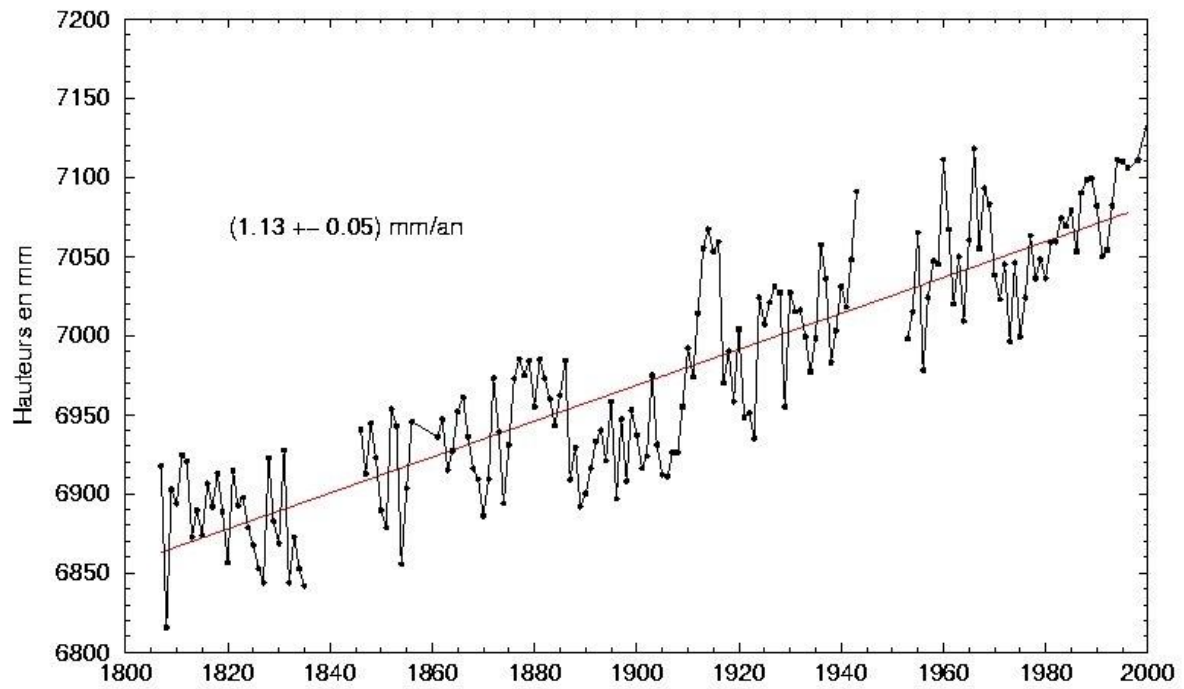


Figure 5

MARSEILLE (MAREGRAPHE) – Moyennes annuelles du niveau de la mer

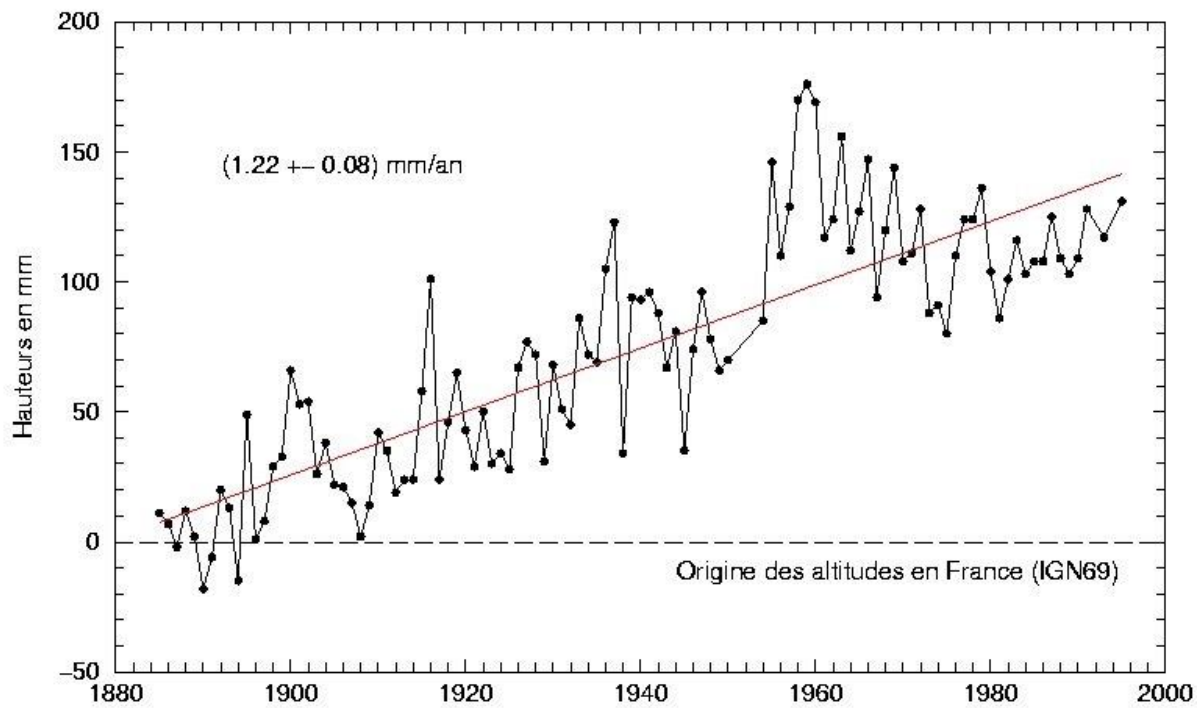


Figure 6

En ces deux sites, le niveau moyen a augmenté d'environ 12 cm en 100 ans. Il est remarquable qu'à Brest, le niveau moyen de l'année 2000 soit le plus élevé jamais observé depuis près de 200 ans.

Niveaux extrêmes

Les variations du niveau de la mer dans les échelles de temps allant de quelques heures à quelques années sont la manifestation de deux phénomènes: des mouvements aléatoires d'origine essentiellement météorologique, appelés surcotes-décotes, se superposent à la marée astronomique, phénomène déterministe, modélisable (fournie par les annuaires de marée). Il en résulte que le niveau des plus hautes mers, dont une composante est aléatoire, est une notion qui n'a de sens que si elle est exprimée en termes de probabilités: on est amené à chercher l'intervalle moyen de temps, appelé **période de retour**, qui sépare les observations des hauteurs de pleines mers supérieures à un certain seuil.

Exprimé de cette manière, le problème semble se limiter à un simple calcul de moyenne; mais pour que la moyenne soit significative, il faut disposer de durées d'observations très supérieures aux périodes de retour recherchées. Compte tenu des observations disponibles pour les ports principaux des côtes de France, on ne pourrait guère estimer des périodes de retour supérieures à deux ou trois ans dans la plupart des cas.

Ce problème a été traité dans un premier temps pour les ports où plus de 10 années d'observations de marée sont disponibles.

Le fait que les surcotes-décotes et la marée soient des phénomènes très largement indépendants a permis de traiter ce problème efficacement. En effet, si l'on dispose de nombreuses observations de marée, il peut être aisé de calculer les lois de probabilité régissant des événements rares mais non exceptionnels tels que les grandes vives-eaux ou les surcotes très importantes, mais la simultanéité de deux de ces événements peut être si rare qu'elle n'a jamais été observée. Pourtant, sa période de retour peut être calculée avec un bon degré de confiance en combinant les lois de probabilité liées d'une part à la marée, d'autre part aux surcotes.

Les figures 7 à 9 montrent, à titre d'exemple, les résultats obtenus pour Brest

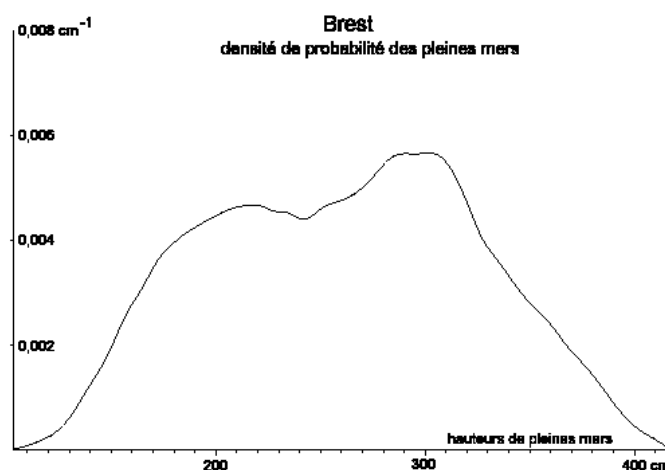


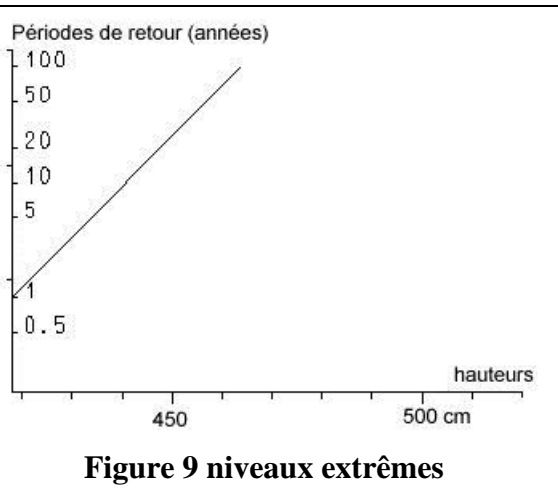
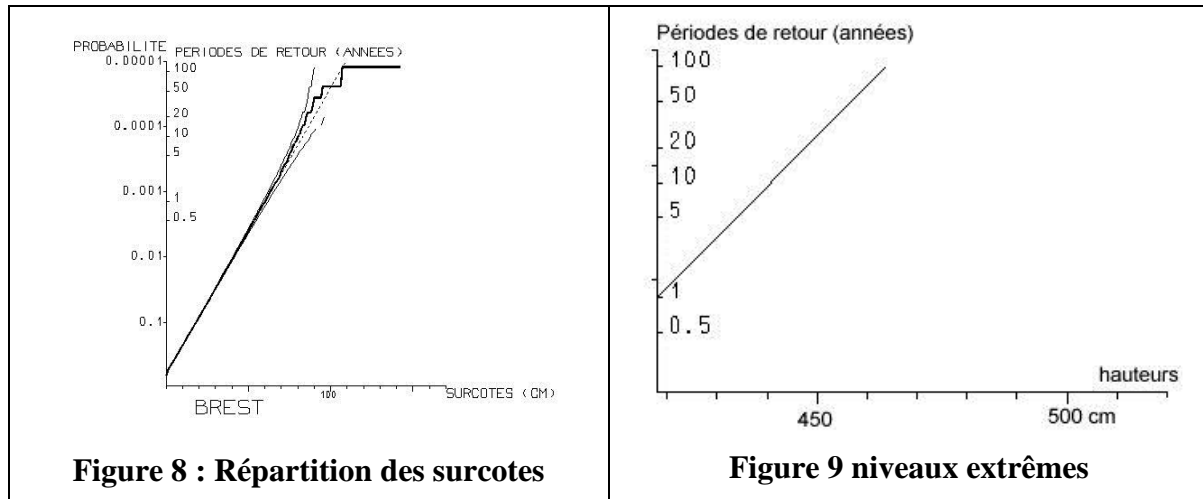
Figure 7 Densité de probabilité des hauteurs de pleines mers

La figure 7 présente la probabilité pour une pleine mer prédite d'être égale à une valeur donnée à 1 cm près.

Le problème qui se pose à propos des surcotes est le calcul de la probabilité associée à une surcote supérieure à une valeur donnée.

Une difficulté vient du fait que des surcotes très importantes, donc très rares ne peuvent pas être négligées. Des événements qui n'ont jamais été observés doivent être pris en compte à l'aide d'un modèle d'extrapolation. Le modèle choisi, dit "loi de Gumbel" est largement utilisé pour les estimations de crues de rivières. Il est très bien adapté à la plus longue série disponible, celle de Brest où près de 120 années d'observations ont été traitées.

Il s'avère en outre que grâce au traitement séparé des surcotes et de la marée astronomique, le choix du modèle d'extrapolation n'est pas réellement critique pour l'estimation des périodes de retour des hauteurs extrêmes.



La figure 8 présente la probabilité pour une surcote d'excéder une certaine valeur, dans un système de coordonnées tel que si la loi de Gumbel était respectée, les valeurs expérimentales, représentées en traits gras, seraient alignées. La droite pointillée est celle qui passe au mieux par les points expérimentaux. Les courbes en traits fins limitent la zone où doivent se situer 90% de point expérimentaux si le modèle d'extrapolation est bien choisi.

La figure 9 est le résultat de la combinaison des lois de probabilité précédentes. Elle présente les probabilités d'observer des hauteurs de pleines mers supérieures à une valeur donnée, traduite en terme de périodes de retour associées. On s'est volontairement limité à la représentation des hauteurs supérieures à la hauteur de marée astronomique maximale (on évite ainsi de traiter les décotes).

Grâce aux points de mesure disponibles issues des capteurs de pression disposés par le SHOM lors des travaux de sondages hydrographiques, l'estimation des périodes de retour en tout point de la côte a pu être obtenue en exploitant les données de durée supérieure à un mois. Il est possible, en effet, de tirer profit des relations existant entre ces hauteurs et les hauteurs observées simultanément au port de référence le plus proche afin d'estimer les lois de probabilité nécessaires au calcul des périodes de retour des marées extrêmes en ces points. Leur densité étant suffisante compte tenu de la variabilité spatiale des phénomènes étudiés, il a été ensuite possible, par interpolation, d'estimer ces valeurs en tout point et de tracer les lignes d'égaux hauteurs de marée extrêmes.

Un exemple de tracé des hauteurs atteintes par la mer avec une période de retour de 75 ans est présenté par la figure 10

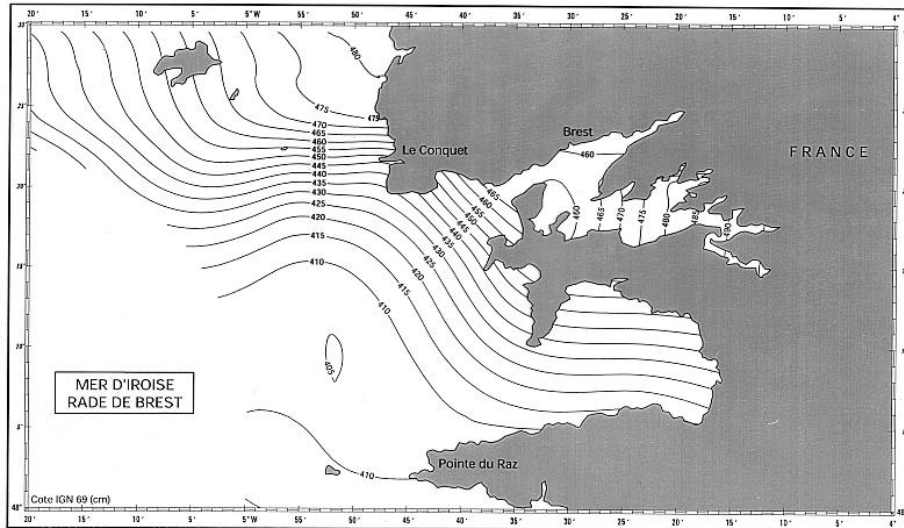


Figure 10 Niveaux extrêmes de pleine mer, période de retour 75 ans

Les résultats sont disponibles pour les périodes de retour égales à 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75, et 100 ans le long des côtes de France, à l'exception de la Méditerranée.

Les incertitudes sur les valeurs obtenues ont été calculées. En certaines zones, comme la Rade de Brest ou la Manche-Est, elles sont partout inférieures à 5 cm. Mais dans d'autres zones, par exemple la baie de Saint-Brieuc, les résultats ne sont pas satisfaisants. On met alors en évidence certains défauts du réseau d'observatoires ce qui permet de détecter les endroits où des observations de marée supplémentaires sont souhaitables.

Modélisation

Elaboration des atlas de courants

Le SHOM a commencé à pratiquer la modélisation hydrodynamique pour réaliser des atlas de courants pour la navigation maritime.

Le premier atlas réalisé à l'aide d'un modèle numérique, celui du Pas de Calais, a été publié en 1988. Les moyens de calcul ne permettaient pas alors de calculer les courants avec une résolution suffisante aux abords de Calais et de Dunkerque. Les courants mesurés ont dû être utilisés afin de pallier ces insuffisances. Les atlas suivants ont bénéficié des progrès très rapides des moyens de calcul, permettant une diminution de la taille des mailles et donc une augmentation progressive de la résolution.

Les premiers modèles développés au SHOM avaient des mailles carrées. Ce type de modèle est dit « aux différences finies ». Grâce à l'évolution des moyens de calcul, leur dimension a pu être ramenée de 2 km pour le Pas de Calais en 1988 à 150 m pour le modèle de la Rade de Brest en 1994. Les atlas suivants ont été réalisés à l'aide du système « TELEMAC » développé par le Laboratoire National d'Hydraulique de l'EDF. Ce système, dit « aux éléments finis » utilise des mailles triangulaires qui permettent une plus grande souplesse, la taille des mailles pouvant s'adapter à la variabilité du milieu et à la complexité du trait de côte. La figure 11 présente un exemple de maillage réalisé pour une modélisation de la Manche ouest.

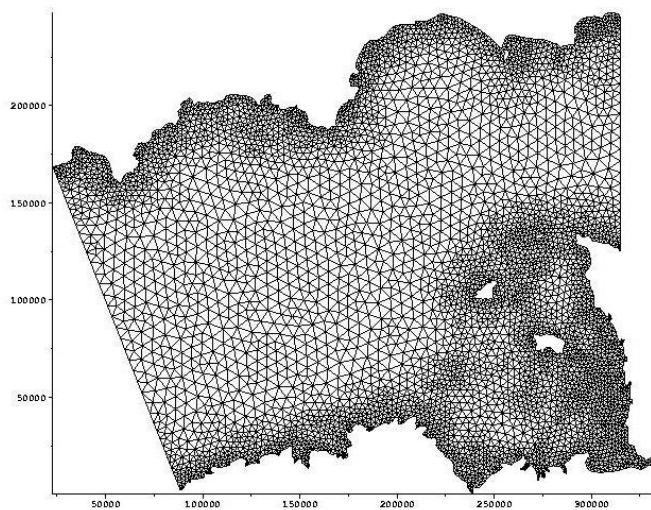


Figure 11 Maillage de la Manche ouest

Pour des modèles destinés à une représentation à grande échelle, certaines mailles, en particulier aux abords des ports, ont des dimensions de l'ordre d'une dizaine de mètres. Une limitation importante est la connaissance de la bathymétrie. Il est en effet illusoire de vouloir affiner la résolution d'un modèle si la description du milieu n'est pas réalisée à une échelle équivalente. Or les cartes marines ne sont pas établies en vue de fournir une bathymétrie adaptée à la modélisation hydrodynamique. La représentation des profondeurs est en effet issue d'un choix de sondes dont la fonction essentielle est de faire ressortir les éléments intéressant la sécurité de la navigation. Si celle-ci est assurée, la densité des informations est souvent sacrifiée au profit de la lisibilité des cartes, et les reliefs susceptibles de présenter un danger sont accentués, ce qui fausse la représentation objective des fonds.

Le SHOM a entrepris en 1995 de constituer une Base de Données Bathymétriques (BDBS) destinée à rassembler sous forme numérique l'ensemble des données bathymétriques dont il dispose. La modélisation numérique des courants a bénéficié pleinement de ce progrès qui a permis d'atteindre aujourd'hui la résolution souhaitée dans les zones où les fonds tourmentés génèrent des courants très variables.

L'évolution des modèles numériques s'est traduite non seulement par une meilleure résolution spatiale, mais également, grâce essentiellement à une meilleure prise en compte de la bathymétrie, par une augmentation de la précision des résultats.

Modélisation de la marée

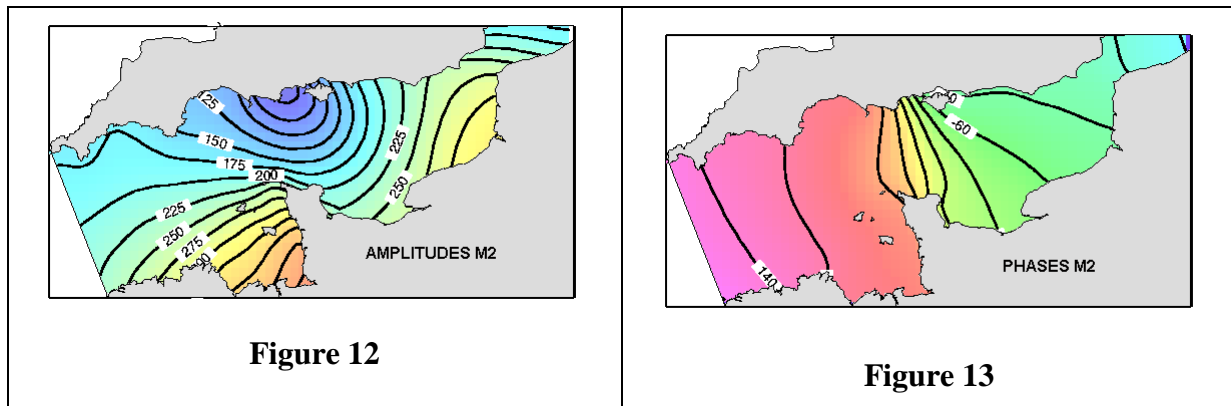
Jusqu'à une époque récente, les résultats de la modélisation numérique ne permettaient pas d'atteindre la précision requise pour les calculs de marée.

Les travaux récents effectués au SHOM ont permis de franchir une étape importante dans cette direction, même si des progrès restent encore à accomplir, le calage avec les données observées restant encore requis.

Des simulations d'une année de variations de hauteurs d'eau ont permis de calculer les 143 composantes harmoniques de la liste standard du SHOM en tout point des modèles. Les résultats ont été comparés aux données disponibles aux points d'observation et ajustés plus ou

moins en fonction du degré de confiance accordé aux mesures, par une méthode d'interpolation spline avec pondération. Ainsi, le résultat doit coïncider parfaitement aux observations à la position des marégraphes permanents, mais pour les observations de courte durée, une plus grande confiance est accordée au modèle, différente selon l'amplitude de la composante considérée.

Les figures 12 et 13 montrent les résultats obtenus pour la composante M_2 .



Ce travail a été réalisé pour toutes les composantes et a abouti à une très bonne connaissance de la marée en tout point du plateau continental au large des côtes de France.

Aide à la correction des sondages au large

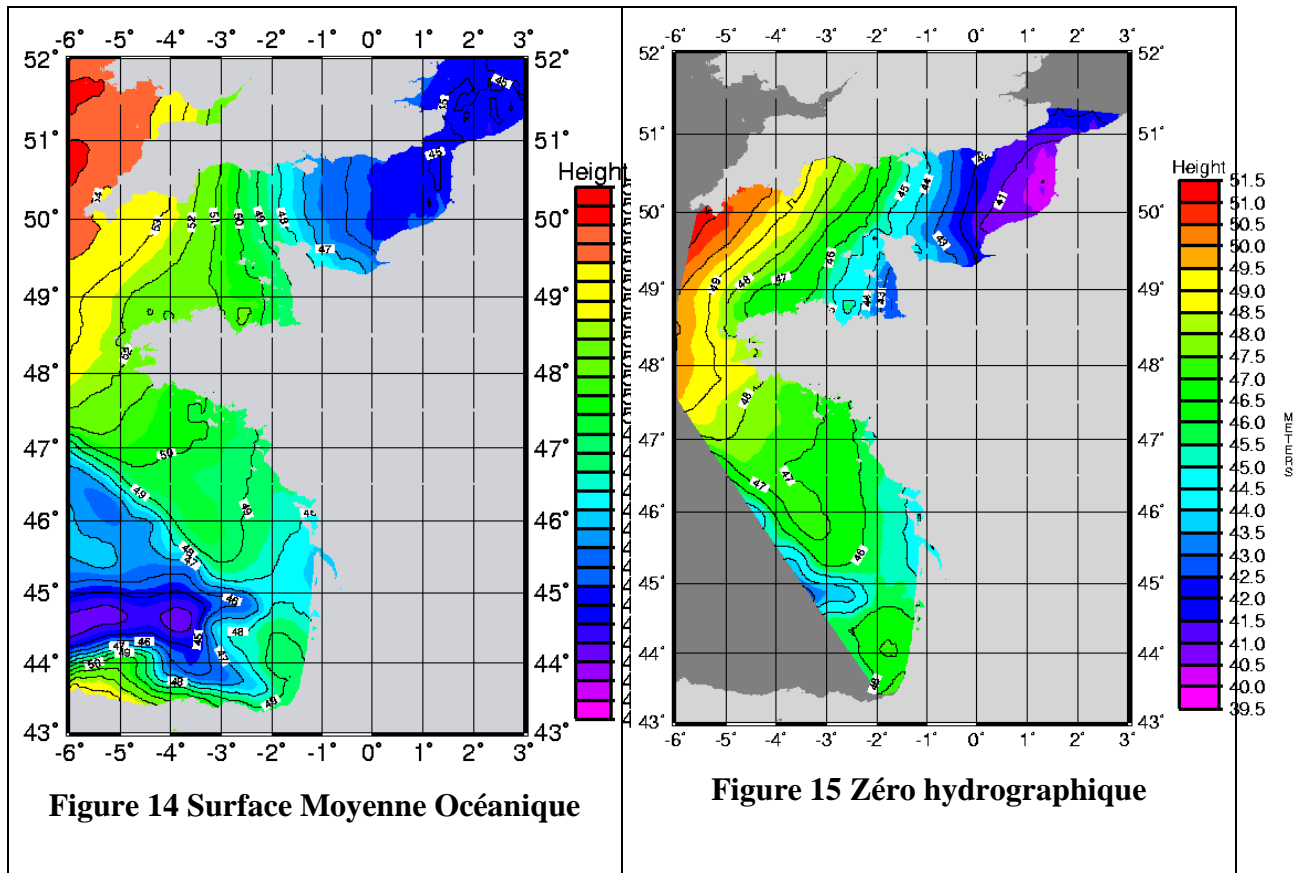
Méthode traditionnelle

Une application très importante de ces résultats, qui intéresse tout particulièrement l'hydrographie est la cartographie du niveau des plus basses mers rapporté au niveau moyen. En effet, le niveau des plus basses mers est en principe la référence des sondes portées sur les cartes marines, et il est par ailleurs aisé, grâce aux constantes harmoniques de calculer la marée à tout instant et en tout point des zones couvertes par les modèles. Le problème de la correction des sondages serait résolu si les surcotes-décotes pouvaient être négligées, ce qui n'est pas le cas. Faute d'un modèle permettant de les calculer (Météo-France travaille sur ce sujet), la procédure utilisée consiste simplement à corriger la marée théorique de la surcote-décote observée en un port de référence proche. Si l'on a disposé un marégraphe dans la zone de sondage, les résultats peuvent être améliorés. Cette méthode donne de bons résultats, mais à condition que le marégraphe sur zone effectue des mesures pendant au moins un mois, ce qui n'est pas toujours possible ; par ailleurs, une pente du niveau moyen entre le marégraphe sur zone et le port de référence pendant la durée des mesures, due par exemple à un système météorologique particulier, ne peut pas être détectée.

GPS cinématique et Surface Moyenne Océanique

Des travaux sont en cours au SHOM pour tirer parti des possibilités offertes par les techniques spatiales. Le GPS cinématique permet de positionner verticalement, dans l'ITRS (International Terrestrial Reference system) un mobile avec une précision de l'ordre de la dizaine de centimètres, compatible avec les normes requises pour les sondages bathymétriques. Par ailleurs, l'altimétrie satellitale fournit une Surface Moyenne Océanique (SMO) que l'on sait également rapporter à l'ITRS. Connaissant, grâce à la modélisation hydrodynamique, la position du zéro hydrographique par rapport au niveau moyen, il est possible de situer le zéro hydrographique dans l'ITRS et donc la position du mobile par

rapport au zéro hydrographique. Ce principe étant posé, quelques difficultés de mise en œuvre apparaissent, principalement à cause de l'imprécision de la SMO près de la côte. L'idée est de prendre en compte le positionnement géodésique des marégraphes afin de fournir une possibilité d'interpolation.



Une étude menée au SHOM a montré la validité de cette approche, et a mis en évidence les progrès à attendre d'une amélioration de la SMO et de la mise en place de stations marégraphiques afin de combler certaines lacunes. Mais en fait, le positionnement du zéro hydrographique dans l'ITRS ne requiert pas une précision importante. Il suffit en effet qu'il soit situé « à proximité » du niveau des plus basses mers, les points importants étant que :

- cette référence soit commune aux annuaires de marée et aux cartes marines,
- sa cote, une fois fixée ne soit plus modifiée.

Le problème peut être comparé à celui des zéros hydrographiques fixés dans les ports au siècle dernier, à une époque où ni les observations disponibles, ni les moyens de calcul ne pouvaient déterminer avec précision le niveau des plus basses mers. Ces références, cotées par rapport à des repères fixes à terre, sont (sauf exception), toujours en vigueur malgré les progrès réalisés dans ce domaine.

Conclusion

L'hydrographie, face à l'ampleur du travail à accomplir, est confrontée depuis toujours à l'obligation d'adapter les priorités aux possibilités offertes par les moyens techniques et financiers du moment. Les techniques spatiales et les moyens de calcul modernes, avec l'approche globale qu'ils permettent d'envisager, offrent la possibilité d'aborder ces problèmes sous un angle nouveau. Ceci est particulièrement vrai pour la marée, dont une connaissance précise n'était envisageable, il y a encore peu de temps, que dans un nombre limité de ports dotés de stations marégraphiques. Celles-ci restent indispensables pour la calibration des altimètres et le calage des modèles, mais leur rôle s'est trouvé considérablement élargi, passant du simple soutien à la confection des annuaires à la fourniture de données pour la communauté scientifique. L'opportunité d'une collaboration est ainsi offerte.

Bibliographie

- P. Paskoff 1987:** *Les variations du niveau de la mer*, La Recherche n°191, septembre 1987, volume 18 - pp 1010-1019
- P.A. Pirazzoli 1989** Present and near future global sea level changes - *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* -75 1989 pp 241-258
- Élévation du niveau de la mer le long des côtes de France, Mesures-Impacts-Réponses*, Séminaire Eaux - Environnement n°4, mai 1994, Ministère de l'Environnement, Direction Générale de l'Administration et du Développement.
- B. SIMON** Calcul de la marée au large pour la réduction des sondages.
— *Revue Hydrographique Internationale*, Monaco, LXVII(2), juillet 1990.
- B. SIMON** Species concordance method of tide prediction.
— Hydrodynamic Bruce B. Parker (ed.), NOS, NOAA, US Department of Commerce, 1991.
- B. SIMON** Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France. Rapport d'étude SHOM n° 001/94, 1994.
- G. WÖPPELMANN, S. ALLAIN, P. BAHUREL, S. LANNUZEL, B. SIMON** : Zéro hydrographique, vers une détermination globale, XYZ n° 79 2^e trimestre 1999.
- L. PINEAU** : Amélioration du modèle de prédiction de marée en Manche, Rapport SHOM n°77 EPHOM/CH/GG/ET/NP du 12/02/99, 1999.