

Rapport d'étude n° 005/02

Septembre 2002

MESURE DU GRADIENT DE TEMPÉRATURE  
DANS LE Puits DU MARÉGRAPHE  
DE PENFELD (BREST)

par

Olivier DEVAUCHELLE

Sous la direction de

Bernard SIMON et Ronan LE ROY

EPSHOM  
BP 30316  
29603 BREST CEDEX

Site Internet : <http://www.shom.fr>

## SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE

## FICHE DOCUMENTAIRE

<i>Rapport d'étude n° 005/02</i>		
<b>Titre :</b> MESURE DU GRADIENT DE TEMPÉRATURE DANS LE PUITTS DU MARÉGRAPHE DE PENFELD		
<b>Auteurs :</b> <b>et</b> <b>affiliations :</b>	Olivier DEVAUCHELLE (1) sous la direction de Bernard SIMON et Ronan LE ROY(2)	
	(1) Ecole Normale Supérieure (2) EPSHOM	
<b>Date :</b> septembre 2002	<b>Nombre de pages :</b> 66	<b>Commande :</b> sans objet
<b>Organismes d'origine :</b>	EPSHOM – Centre d'Hydrographie – Section Géodésie-Géophysique 13, rue du Chatellier - BP 30316 - 29603 BREST CEDEX	
	Ecole Normale Supérieure 45 rue d'Ulm – 75005 Paris	
<b>Organisme émetteur de la recherche :</b>	EPSHOM – Centre d'Hydrographie - Section Géodésie- Géophysique	
<b>Adresse :</b>	13, rue du Chatellier BP 30316, 29603 BREST CEDEX	
<b>Référence attribuée par cet organisme :</b>	n° 461 EPSHOM/CH/GG/NP du 20 décembre 2002	
<b>Mention de protection :</b>	Non protégé	
<b>Diffusion (externe, interne, réservée) :</b>	Externe et interne	
<b>Observations diverses :</b>	Ce travail est issu d'un stage de maîtrise de physique	
<b>Mots-clés :</b>	Marée – Observation – Mesures – Marégraphes	
<b>Résumé :</b>	au verso	

## RÉSUMÉ :

La mesure du niveau des mers est essentielle non seulement pour effectuer des prévisions marégraphiques, mais également pour des recherches plus récentes telles que l'étude de la montée du niveau moyen des mers.

Le marégraphe de la Penfeld, à Brest, fonctionne selon le principe du sonar : la hauteur d'eau est déduite du temps de parcours dans l'air d'une onde ultrasonore. L'existence d'un gradient de température dans l'air surplombant la surface de l'eau est susceptible de fausser les mesures.

L'objectif de ce stage est de mesurer l'ampleur de ce gradient de température, en disposant des capteurs de température le long du puits de tranquillisation. Ce compte-rendu présente le protocole opératoire et les résultats de l'expérience effectuée à Brest en juillet 2002, ainsi qu'une première interprétation.

En utilisant ces résultats expérimentaux, il est possible de calculer l'erreur de mesure du marégraphe à ultrason. Cette erreur pourrait atteindre quelques centimètres pour les plus forts gradients mesurés en juillet 2002. Toutefois, ces extrapolations n'ont pas, à ce jour, été confrontées à des mesures directes d'erreur, et la validité des modèles utilisés reste à démontrer.

Bien que la présente étude soit insuffisante pour proposer une méthode de correction des mesures qui tienne compte du gradient de température, elle semble cependant indiquer que la précision des marégraphes à ultrasons ne saurait être améliorée sans une évaluation précise de ce gradient.

## ABSTRACT :

Sea level measurements are required, not only for tidal prediction, but also for topical research needs such as mean sea level variations analysis.

The Penfeld River tidal gauge in Brest, France is an acoustical device: the travel time in air of an ultrasonic wave leads to water level value. As sound velocity is function of temperature, in order to permit its computation, a thermometer is set close to the transducer. However, a possible temperature gradient in the tidal gauge stilling well may lead to inadequate correction.

The study aims to measure temperature gradient in air above water surface and compute related sea level error. This paper describes the operational procedure implemented in Brest during July 2002, in addition to results and prime interpretations.

Using these experimental results enable computing measurement errors of the acoustical tide gauge. They might reach a few centimetres for the maximum gradients observed in July 2002. However, in order to assess the results, these computed error estimations have to be compared with direct error measurements.

This study is not sufficient to propose a method for correcting sea level measurement, but it shows that precision improvement requires a precise evaluation of temperature gradient.

---

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction à la marégraphie</b>	<b>6</b>
1.1	Historique	6
1.2	Diverses théories de la marée	6
1.2.1	Newton	6
1.2.2	Laplace	7
1.2.3	Méthode harmonique	7
1.2.4	Modélisations numériques	7
<b>2</b>	<b>Le marégraphe de Brest</b>	<b>8</b>
2.1	Situation	8
2.2	Puits de tranquillisation	8
2.2.1	Intérêt	8
2.2.2	Principe	9
2.2.3	Le puits de tranquillisation de Brest	9
2.3	Le marégraphe à ultrason	9
2.4	La sonde lumineuse	11
<b>3</b>	<b>Justification de l'expérience</b>	<b>12</b>
3.1	Les doutes quant à la fiabilité des marégraphes à ultrason	12
3.2	L'étude des performances des marégraphes de 2002	12
3.2.1	Diagrammes d'erreurs	12
3.2.2	Le diagramme de Van de Castele	15
3.2.3	Intérêt d'une mesure de gradient	17
<b>4</b>	<b>Influence théorique de la température</b>	<b>18</b>
4.1	Ordres de grandeur	18
4.2	Traitement d'un gradient de température	20
4.2.1	Hypothèses et équation exacte	20
4.2.2	Approximations	20
<b>5</b>	<b>La mesure du gradient de température du puits de Penfeld</b>	<b>25</b>
5.1	Principe	25
5.1.1	Cahier des charges des capteurs	25
5.1.2	Durée de l'expérience	25
5.2	Les différents paramètres de l'expérience	25
5.2.1	les capteurs	25
5.2.2	Disposition des thermistances	26
5.2.3	Programmation des capteurs	27
5.2.4	Installation de la chaîne de capteurs	29
5.2.5	Paramètres météorologiques	29
5.3	Estimation de l'incertitude de positionnement des capteurs	30

<b>6</b>	<b>Interprétation des résultats</b>	<b>31</b>
6.1	Analyse des données . . . . .	31
6.1.1	Ensemble des données . . . . .	31
6.1.2	Le gradient de température . . . . .	31
6.2	Influence du gradient sur la mesure . . . . .	43
6.2.1	Correction par régression linéaire, ordres de grandeur . . . . .	43
6.2.2	Corrections apportées par une modélisation exponentielle du gradient . . . . .	44
6.2.3	Incertitudes quant aux corrections . . . . .	49
6.2.4	Accord avec les courbes d'étalonnage . . . . .	50
<b>7</b>	<b>Propositions pour une nouvelle expérience de mesure du gradient de température dans le puits de Penfeld</b>	<b>55</b>
7.1	Objectifs . . . . .	55
7.2	Mise en place . . . . .	55
7.2.1	Position des capteurs . . . . .	55
7.2.2	Intervalle de mesure . . . . .	56
7.2.3	Données météorologiques . . . . .	57
7.3	Exploitation des données . . . . .	57
7.4	Dernière minute . . . . .	57
	<b>Conclusion</b>	<b>59</b>
	<b>Appendice</b>	<b>62</b>

---

# Chapitre 1

## Introduction à la marégraphie

### 1.1 Historique

Les premières mesures marégraphiques ont été effectuées dans l'antiquité, mais elles prirent leur essor au *XVIII<sup>e</sup>* siècle, époque des plus anciennes mesures conservées sans discontinuité jusqu'à ce jour. C'est également à cette époque que Laplace envisage une théorie plus apte à décrire le phénomène des marées que la théorie statique proposée par Newton au siècle précédent.

Les mesures de hauteur d'eau étaient alors lues sur un simple repère gradué : l'échelle de marée. L'invention des marégraphes à flotteur, plus précis et surtout plus autonomes, est due à l'ingénieur Chazalon. Ils furent implantés sur le littoral français au milieu du *XIX<sup>e</sup>* siècle et sont toujours utilisés sur certains sites (notamment à Brest).

Diverses technologies sont mises en oeuvre dans les marégraphes d'aujourd'hui, dont les principales sont la propagation d'ondes sonores ou électromagnétiques réfléchies à la surface de l'eau, ou la mesure de la pression hydrostatique par des capteurs placés au fond de l'eau. Ces marégraphes présentent la grande qualité de pouvoir stocker et transmettre des données numériques, ce qui en facilite l'exploitation informatique. Ils sont en outre moins exigeants que leurs équivalents à flotteurs quant aux travaux de génie civil de leur installation. Cependant, comme nous pourrions le voir, ils ne sont pas à l'abri d'erreurs de mesure sensibles.

### 1.2 Diverses théories de la marée

Le lien entre marée et phase de la Lune est apparu très tôt chez les philosophes et les scientifiques, mais il a bien sûr fallu attendre la découverte de la loi de la gravitation pour comprendre le lien entre mouvement des astres et océans.

#### 1.2.1 Newton

La théorie de Newton, dite théorie statique, fut la première à présenter les forces gravitationnelles exercées par la Lune et le Soleil sur les masses d'eau comme les causes des marées. Selon cette théorie, les mouvements des astres sont suffisamment lents pour considérer qu'à chaque instant la surface des océans est une équipotentielle, laquelle se déforme dans le référentiel terrestre suite aux mouvements célestes.

Cependant, les calculs de la position de cette équipotentielle conduisent à des amplitudes d'environ un mètre, ce qui est insuffisant pour expliquer les observations sur de nombreuses côtes.

### 1.2.2 Laplace

La théorie de Laplace est plus fidèle à la réalité, puisqu'elle conduit à une formule, du même nom, qui a permis d'éditer les premiers annuaires des marées dont les prédictions étaient scientifiquement calculées.

Dans cette théorie, la force génératrice est essentiellement la même que dans celle de Newton, mais cette fois la réponse des masses d'eau est traitée dynamiquement. Ce traitement dynamique repose sur le principe de la réponse linéaire : en un lieu donné, la variation de la hauteur d'eau est une somme de variations sinusoïdales de fréquences égales aux fréquences des forces excitatrices.

La marée est donc considérée comme une superposition d'ondes de gravité, dont on connaît précisément les périodes grâce à l'astronomie, et dont on détermine empiriquement le déphasage (appelé âge de la marée) et la réponse en amplitude.

### 1.2.3 Méthode harmonique

Due aux Anglais Darwin et Kelvin, cette méthode est un développement mathématique plus poussé de la méthode de Laplace, proche de la transformation de Fourier. En effet, le phénomène de marée est presque périodique, c'est pourquoi il se prête bien à une décomposition en harmoniques. Cependant, il n'existe pas de période commune à toutes les harmoniques de la force génératrice et un développement exact est donc impossible. On se contente d'un développement dont les coefficients sont des variables lentes du temps :

$$A(t) = \sum_{k=1}^N c_k(t) \cos(\omega_k t + a_k)$$

Où les  $c_k(t)$  sont des fonctions lentes du temps, déterminées, ainsi que les  $a_k$  appelés âges de la marée, par des mesures marégraphiques. De la précision des mesures dépend directement la qualité des prédictions, et si la précision requise pour la navigation est largement atteinte de nos jours, d'autres applications telles que la mesure de l'évolution séculaire du niveau de la mer sont beaucoup plus exigeantes.

L'analyse harmonique, nous le voyons, requiert une connaissance locale sur une durée suffisante de l'évolution du niveau de la mer. C'est pourquoi cette méthode ne fournit que des prévisions locales : dès que l'on s'éloigne de la zone de mesure, les prédictions sont faussées par la propagation des ondes de marée.

### 1.2.4 Modélisations numériques

Les moyens de calcul informatiques actuels ont permis les progrès considérables de la modélisation numérique de l'apparition et de la propagation des ondes de marée, ouvrant ainsi la voie à des possibilités de prédiction loin des sites de mesure. Cependant, outre le fait que ce problème est rendu fort complexe par l'irrégularité de la bathymétrie des bassins océaniques, sa résolution numérique suppose une connaissance précise des conditions aux limites imposées à la solution. Ces conditions aux limites sont nécessairement déterminées par des mesures marégraphiques.

## Chapitre 2

# Le marégraphe de Brest

### 2.1 Situation

L'installation sur laquelle porte notre étude est située dans l'arsenal de Brest, à l'embouchure de la Penfeld. Il s'agit d'un ouvrage lourd réalisé en granit capable d'assurer la stabilité à long terme du repère de nivellement (bench mark) régulièrement contrôlé par l'Institut Géographique National.



Figure 2.1: Le puits de tranquillisation de Penfeld.

### 2.2 Puits de tranquillisation

#### 2.2.1 Intérêt

Comme chacun sait, la surface de la mer n'est que rarement plane, et de nombreuses perturbations autres que la marée modifient son altitude. La plupart des marégraphes, et notamment les marégraphes à flotteur, ne supporteraient pas une installation en extérieur où leur précision serait affectée par les perturbations hautes fréquences citées plus haut, et où ils seraient endommagés lors de mauvaises conditions météorologiques. L'installation d'un marégraphe doit donc filtrer au mieux les ondes dont la fréquence est plus haute que toutes les harmoniques de la marée : ce doit être un filtre passe-bas appliqué aux variations de hauteur d'eau.



### 2.2.2 Principe

Un puits de tranquillisation (stilling well) consiste essentiellement en un tube vertical en communication avec la mer par un ou plusieurs orifices plus petits situés sous le niveau des plus basses mers. Le marégraphe à proprement parler est bien sûr installé à l'intérieur du puits. Diverses formes d'entrées d'eau ont été testées pour améliorer la sélectivité des puits, et il semble que la plus efficace soit constituée d'un tube dont le diamètre est faible par rapport à celui du puits, et d'axe quasiment horizontal appelé tube d'admission [WOP97].

### 2.2.3 Le puits de tranquillisation de Brest

Le puits de tranquillisation de Brest est constitué selon le principe évoqué plus haut; le diamètre du puits est de 1,5 mètre, celui du tube d'admission de 15 centimètres (cf. figure 2.2 page 10). Ce dernier est incliné de façon à favoriser l'écoulement de la vase. Notons que ce puits est protégé des intempéries et surtout du soleil par un abri de béton, ce qui est rarement le cas pour les installations plus récentes. Malgré cela, nous verrons que l'existence d'un gradient de température, variable au cours de la journée, à l'intérieur du puits est probable. S'il s'avère qu'il s'agit bien là d'une source d'erreur systématique, son effet risque d'être plus sensible sur des sites moins protégés.

Remarquons également l'important marnage possible à Brest, où les plus hautes mers sont cotées à 7,79 mètres et les plus basses à 17 centimètres [EPS02]. Ceci impose bien évidemment un puits profond, donc plus sujet aux gradients de température.

## 2.3 Le marégraphe à ultrason

Bien que plusieurs types de marégraphes soient installés simultanément dans le puits de Penfeld, le marégraphe à ultrason (MCN 1076) est aujourd'hui la référence officielle de ce site, grâce à sa précision et à son autonomie.

Ce marégraphe est constitué de deux capteurs gérés par une centrale d'acquisition. Le premier est un émetteur-récepteur d'ondes sonores hautes fréquences (4,5 kHz) et le second, un capteur de température. La centrale d'acquisition, dont le modèle est commun à divers marégraphes, est capable :

- d'alimenter les capteurs par le secteur ou des batteries,
- de convertir les signaux analogiques en données numériques,
- de stocker ces données,
- de les transmettre à distance par une ligne téléphonique.

En supposant connue la vitesse du son dans l'air, il est possible de calculer le tirant d'air à partir de l'intervalle de temps qui sépare l'émission du signal ultrasonore de sa réception. La vitesse du son dans l'air, déterminée pour des ondes harmoniques en faisant abstraction des non-linéarités de l'équation de propagation, est donnée par [JAR02]:

$$c = 331,2 * (1 + 0,97 \frac{U}{P} + 1,9 * 10^{-3} * T)$$

où :

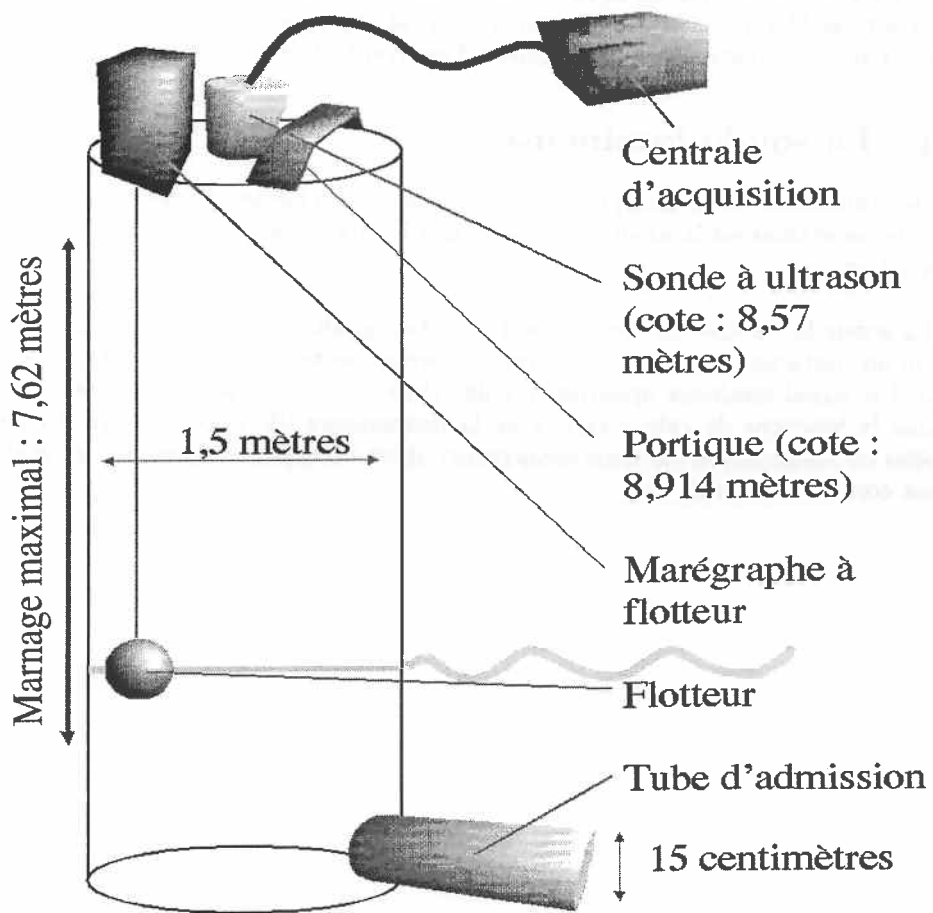


Figure 2.2: Schéma du puits de Penfeld.

- $c$  est la célérité du son [ $ms^{-1}$ ],
- $P$  est la pression atmosphérique [ $hPa$ ],
- $U$  est l'humidité relative de l'air,
- $T$  est la température de l'air [ $^{\circ}C$ ].

ces valeurs étant appliquées en unités du système international.

Le capteur de température doit permettre à la centrale de corriger selon cette loi les erreurs dues à la variation de la vitesse du son. Il est bien clair que ces corrections ne seront valables que si la température de l'air est uniforme, ce qui n'est pas certain *a priori* pour un puits d'une profondeur d'environ huit mètres.

## 2.4 La sonde lumineuse

Un des problèmes de la marégraphie est le choix des systèmes de mesure étalons. L'un de ces étalons est la sonde lumineuse, dont le principe fort simple mérite d'être présenté ici.

La sonde lumineuse est constituée d'un ruban gradué, au bout duquel est suspendu un contacteur électrique qui ferme un circuit électrique lorsqu'il trempe dans l'eau. Un signal lumineux apparaît, il suffit alors de lire la graduation. Toutefois, comme la longueur du ruban varie avec la température (de façon linéaire sur les échelles de température qui nous concernent), il est nécessaire d'appliquer un coefficient correctif au résultat.