

SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE

Février 2006

Rapport d'étude n° 001/06

**EVALUATION DES PERFORMANCES DES TELEMETRES
RADAR POUR LA MESURE DES HAUTEURS D'EAU**

par

Ronan Le Roy

EPSHOM
BP 30316
29603 BREST CEDEX

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

SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE

FICHE DOCUMENTAIRE

Rapport d'étude n° 001/06		
Titre : EVALUATION DES PERFORMANCES DES TELEMETRES RADAR POUR LA MESURE DES HAUTEURS D'EAU		
Auteurs : Ronan LE ROY et affiliations : EPSHOM		
Date : février 2006	Nombre de pages : 49	Commande : sans objet
Organismes d'origine : EPSHOM – Centre d'Hydrographie – Section Géodésie-Géophysique 13, rue du Chatellier - BP 30316 - 29603 BREST CEDEX		
Organisme émetteur de la recherche : EPSHOM – Centre d'Hydrographie - Section Géodésie-Géophysique Adresse : 13, rue du Chatellier BP 30316, 29603 BREST CEDEX		
Référence attribuée par cet organisme : n° EPSHOM/CH/GG/NP du		
Mention de protection : Non protégé		
Diffusion (externe, interne, réservée) : Externe et interne		
Observations diverses : Ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche et d'investigation pour améliorer la qualité de la mesure des hauteurs d'eau.		
Mots-clés : Marée – Observation – Mesures – VDC (Van de Casteele) – Erreur - Incertitude - Exactitude – RONIM – Télémètre – MCN (marégraphe côtier numérique)		
Résumé : au verso		

RÉSUMÉ

Le réseau d'observations du niveau marin (RONIM) est le réseau national français d'observatoires du niveau de la mer. Ce réseau, qui a vu le jour en 1993, comprend à l'heure actuelle 25 observatoires de marée, installés dans les ports principaux de France métropolitaine et d'outre-mer. Toutes les mesures des observatoires de marée sont basées sur l'évaluation d'une distance dans l'air entre un télémètre et la surface de l'eau, convertie en hauteur d'eau rapportée au zéro hydrographique.

Les observatoires les plus anciens du réseau (au nombre de 8) sont équipés de télémètres acoustiques à ultrasons. Les observatoires les plus modernes sont équipés de télémètres radar, plus performants et atteignant des portées suffisantes pour mesurer les marnages les plus importants.

Pour apprécier les performances des télémètres radar, un certain nombre de tests de Van de Casteele ont été effectués entre 2002 et 2005, en prenant comme référence une sonde lumineuse calibrée. Les diagrammes de Van de Casteele ont ainsi permis de constater les bonnes performances de ces systèmes et leur compatibilité avec les normes internationales, à condition que les dispositifs de tranquillisation soient adaptés.

La mise en œuvre de ces tests de Van de Casteele était également l'occasion de comparer entre eux plusieurs types d'instruments de mesure de la hauteur d'eau (télémètres radar, télémètres acoustiques, capteurs de pression, jaugeurs à flotteur, échelles de marée) et ainsi de mettre en évidence des défauts propres à chacun. En particulier, les tests de Van de Casteele ont permis de mettre en évidence les erreurs systématiques importantes des télémètres acoustiques, causées par des gradients de température importants dans les puits de tranquillisation.

ABSTRACT : Evaluation of the quality of radar telemeters

The “Réseau national du Niveau de la Mer” (RONIM) is the French sea level observing system. This network, which was initiated in 1993, is composed of 25 tide gauges, installed in French territories. Measurements are based on the evaluation of a distance in the air between the transducer and the water level, by means of acoustic or radar tide gauges. The distance in the air is converted in a water height above Chart Datum.

Eight tide observatories (the older ones) are equipped with acoustic transducers. The remaining 17, more recent, are equipped with radar tide gauges; they are more accurate and adapted to large tidal ranges.

In order to appreciate the performances of radar gauges, several tests of Van de Castele were carried out between 2002 and 2005, by choosing a calibrated light probe as a reference. The Van de Castele diagrams show the good precision of these instruments and their compatibility with international standards, provided that they should be associated with adapted stilling well.

Carrying out those Van de Castele tests also offered the opportunity to compare between them several types of instruments (radar gauges, acoustic gauges, pressure sensors, floating gauges, tide staffs) and to point out some defaults of each of them. In particular, the Van de Castele diagrams highlighted systematic errors of acoustic gauges, caused by strong temperature gradients in the stilling wells.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	6
2	LE RESEAU RONIM	6
2.1	HISTORIQUE	6
2.2	LES BESOINS.....	7
2.3	OBJECTIFS DE PERFORMANCE.....	8
2.4	OBJECTIFS DE DIFFUSION	8
2.5	ETENDUE DU RESEAU.....	8
3	LE MAREGRAPHE COTIER NUMERIQUE (MCN)	9
3.1	LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	9
3.2	LE DISPOSITIF DE TRANQUILLISATION	10
3.3	LA CENTRALE D'ACQUISITION	11
3.4	LE TELEMETRE	12
3.4.1	<i>Le télémètre acoustique.....</i>	<i>13</i>
3.4.2	<i>Les télémètres radar.....</i>	<i>14</i>
4	LE TEST DE VAN DE CASTEELE.....	16
4.1	PRINCIPE	16
4.2	MISE EN ŒUVRE	17
4.3	CHOIX DE LA REFERENCE.....	19
5	RESULTATS	20
5.1	PERFORMANCE DU TELEMETRE RADAR KROHNE BM70	20
5.1.1	<i>Observatoire de Brest.....</i>	<i>20</i>
5.1.2	<i>Observatoire de La Rochelle.....</i>	<i>21</i>
5.1.3	<i>Observatoire des Sables d'Olonne</i>	<i>23</i>
5.1.4	<i>Observatoire du Conquet</i>	<i>25</i>
5.1.5	<i>Observatoire de Saint-Malo</i>	<i>26</i>
5.2	PERFORMANCE DU TELEMETRE RADAR KROHNE BM100	30
5.2.1	<i>Observatoire de Brest.....</i>	<i>30</i>
5.2.2	<i>Observatoire de Roscoff.....</i>	<i>31</i>
5.3	METHODE DE CORRECTION DES ERREURS	34
5.4	DISCUSSION DES RESULTATS	34
5.5	COMPARAISON DES OBSERVATIONS DES MCN AVEC LES OBSERVATIONS ANCIENNES	37
6	CONCLUSION	40
7	ANNEXES	42
7.1	INCERTITUDE DES SONDES LUMINEUSES	42
7.1.1	<i>La sonde OTT.....</i>	<i>42</i>
7.1.2	<i>La sonde Lepont</i>	<i>44</i>
7.2	INCERTITUDE DE L'ECHELLE DE MAREE	44
7.3	INCERTITUDE DU TELEMETRE ACOUSTIQUE	45
7.4	INCERTITUDE DU JAUGEUR WHESSEO	48

REFERENCES :

- [1] IOC Manual and Guides n° 14, 3 volumes : Manual on sea level measurement and interpretation
- [2] NR2005-009 : Norme du SHOM sur la mesure des hauteurs d'eau
- [3] Rapport d'étude n°010/86 n°403 EPSHOM/E/OC/NP du 14 octobre 1986 : résultats d'étalonnage de marégraphes Suber SLS13 et SLS23
- [4] Rapport d'étude n°005/92 de mars 1992 par Pierre-Yves Dupuy et Christian Batany : évaluation d'un marégraphe côtier numérique à ultrasons
- [5] Thèse de doctorat de Guy Woppelmann : rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale (soutenue le 23 juin 1997 à l'observatoire de Paris)
- [6] Rapport d'étude n°002/02 de mai 2002 par Joseph Gonella et Bernard Simon ; erreur induite par l'évolution diurne de la température sur deux marégraphes acoustiques en Méditerranée
- [7] Rapport d'étude n°005/02 de septembre 2002 par Olivier Devauchelle : mesure du gradient de température dans le puits du marégraphe de Penfeld (Brest)
- [8] Ouvrage de Bernard Simon, « la marée océanique côtière », à paraître en coédition par le SHOM, l'Institut océanographique et l'OHI

1 INTRODUCTION

L'étude présentée dans ce document s'attache à décrire les performances des télémètres radar, en les confrontant d'une part à des instruments de mesure plus classiques (marégraphe à capteur de pression, capteurs acoustiques), d'autre part à des systèmes de mesure directe (sonde lumineuse, échelle de marée). En raison de la précision recherchée, ces derniers ont fait l'objet d'une étude particulière afin d'en détecter les défauts éventuels.

Des ouvrages traitant des incertitudes d'instruments de mesure de la hauteur d'eau sont déjà parus. Il faut en particulier considérer :

- l'ouvrage en référence [8] : le chapitre 2 de cet ouvrage traite notamment des différents types d'instruments utilisés pour mesurer les hauteurs d'eau, et les sources d'erreur propres à chacun ;
- le rapport d'étude en référence [3] : cet ouvrage traite des défauts des marégraphes à capteur de pression.

2 LE RESEAU RONIM

2.1 HISTORIQUE

Avant la création du réseau RONIM, la mesure des hauteurs d'eau en France se répartissait de manière indépendante entre divers organismes : les DDE, les ports autonomes, l'EDF. Le SHOM ne disposait jusqu'au début des années 1990 que de 5 observatoires permanents, dont 3 dans les ports militaires de Brest, Toulon et Cherbourg.

La marégraphie fait l'objet, depuis quelques décennies, d'un regain d'intérêt en raison d'un besoin croissant de mesures de bonne qualité et de longue durée, notamment pour l'aménagement du littoral et pour répondre aux besoins de la communauté scientifique. A contrario, la qualité des mesures au niveau national s'est dégradée à partir des années 1970, en grande partie en raison de la vétusté des appareils de mesure.

Cette situation a incité le SHOM à mettre en place un réseau national fédérant l'observation de la marée en France et constituant le portail de référence pour satisfaire les besoins nationaux et internationaux en matière de marégraphie. C'est ainsi qu'est né le projet RONIM en 1993.

Aujourd'hui, les données du réseau RONIM sont disponibles sur le serveur du système Sonel (www.sonel.org).

2.2 LES BESOINS

La nécessité de disposer d'observations de hauteur d'eau de longue durée et d'excellente qualité procède des besoins suivants :

- la détermination des constantes harmoniques nécessaires à la prédiction de la marée ; l'exigence toujours plus grande de précision a entraîné l'abandon de la méthode de Laplace au profit de la méthode harmonique pour le calcul de l'annuaire des marées, qui nécessite des observations de grande qualité et de longue durée ;
- le régime des marées n'est pas immuable ; on s'en est aperçu de manière évidente à Saint-Nazaire où il a fallu modifier le zéro des cartes car le niveau des plus basses mers y est plus bas aujourd'hui qu'il ne l'était au siècle dernier. D'une manière générale, le régime des marées dans les estuaires est affecté par les modifications (naturelles ou artificielles) des conditions de propagation ; on constate également que les constantes harmoniques présentent souvent des variations à long terme, même en dehors des zones d'estuaire (à Saint-Malo, l'amplitude moyenne de la marée a diminué de 10 cm depuis le début du siècle) ;
- l'étude de l'évolution du niveau moyen des océans ; l'évolution du niveau moyen des mers est devenue un sujet d'étude important à l'échelle mondiale en raison évidemment des préoccupations sur l'avenir des zones littorales, mais également par le fait que le niveau des mers contient des signatures de certains paramètres océano-climatiques qu'il peut, de ce fait, aider à mieux comprendre ;
- l'étude des références verticales et la surveillance géodésique des marégraphes ;
- la réduction des sondages bathymétriques (modélisation et mesures in situ) ;
- l'étude statistique des surcotes et décotes et des niveaux extrêmes ;
- l'étude de la circulation océanique (WOCE) ;
- l'unification des réseaux de nivellement ;
- la calibration des radars altimètres Topex-Poséidon, ERS et Jason ;
- l'observation de la hauteur d'eau en temps réel pour la sécurité à l'entrée des chenaux et des ports, ainsi que pour l'étude et la prévention des risques naturels tels que les montées du niveau marin provoquées par les tempêtes ou les tsunamis.

Ces différents objectifs ne peuvent être atteints pour un site donné que si les observations de niveau de la mer sont suffisamment précises et de longue durée.

Ainsi, la détermination de constantes harmoniques précises et complètes en un lieu demande une durée d'observation optimum de dix-neuf ans. L'étude du niveau moyen des océans exige l'observation en continu des hauteurs d'eau sans limite de temps. La durée d'observation en un lieu pour réaliser une étude statistique des niveaux extrêmes **doit être supérieure à dix ans.**

2.3 OBJECTIFS DE PERFORMANCE

Les objectifs de performance du réseau RONIM visent à disposer d'un parc d'observatoires doté de systèmes d'observation de la hauteur d'eau imposant à chaque mesure validée les critères de qualité suivants :

- un intervalle d'échantillonnage des mesures instantanées du niveau de la mer de typiquement 6, 10 ou 15 min, mais devant être toujours strictement inférieur à 1 heure ;
- l'intégration (moyenne) des mesures instantanées sur une durée permettant le filtrage de la houle et du clapot, soit typiquement sur 2 ou 4 min ;
- une précision de la mesure individuelle meilleure que 1 cm, à tout moment et quelles que soient les conditions, avec un taux de confiance de 68 % ;
- une précision de la datation des mesures échantillonnées meilleure que 10 s ;
- des mesures rapportées au zéro hydrographique, cette référence verticale devant être nécessairement et en permanence définie par sa cote par rapport à au moins 3 repères matériels fixes, dont un repère fondamental choisi en raison de sa grande stabilité ;
- le nivellement des repères entre eux, effectué avec une précision millimétrique ; l'altitude d'un repère au moins doit être connue dans le nivellement général lorsque celui-ci existe ;
- la pérennité de toutes les performances citées précédemment.

Ces objectifs de performance sont indiqués dans la norme en référence [2]. Ils sont également inscrits dans les recommandations du programme international GLOSS de l'UNESCO pour la mesure du niveau de la mer (cf. référence [1] et en particulier l'annexe 1 du volume 3).

2.4 OBJECTIFS DE DIFFUSION

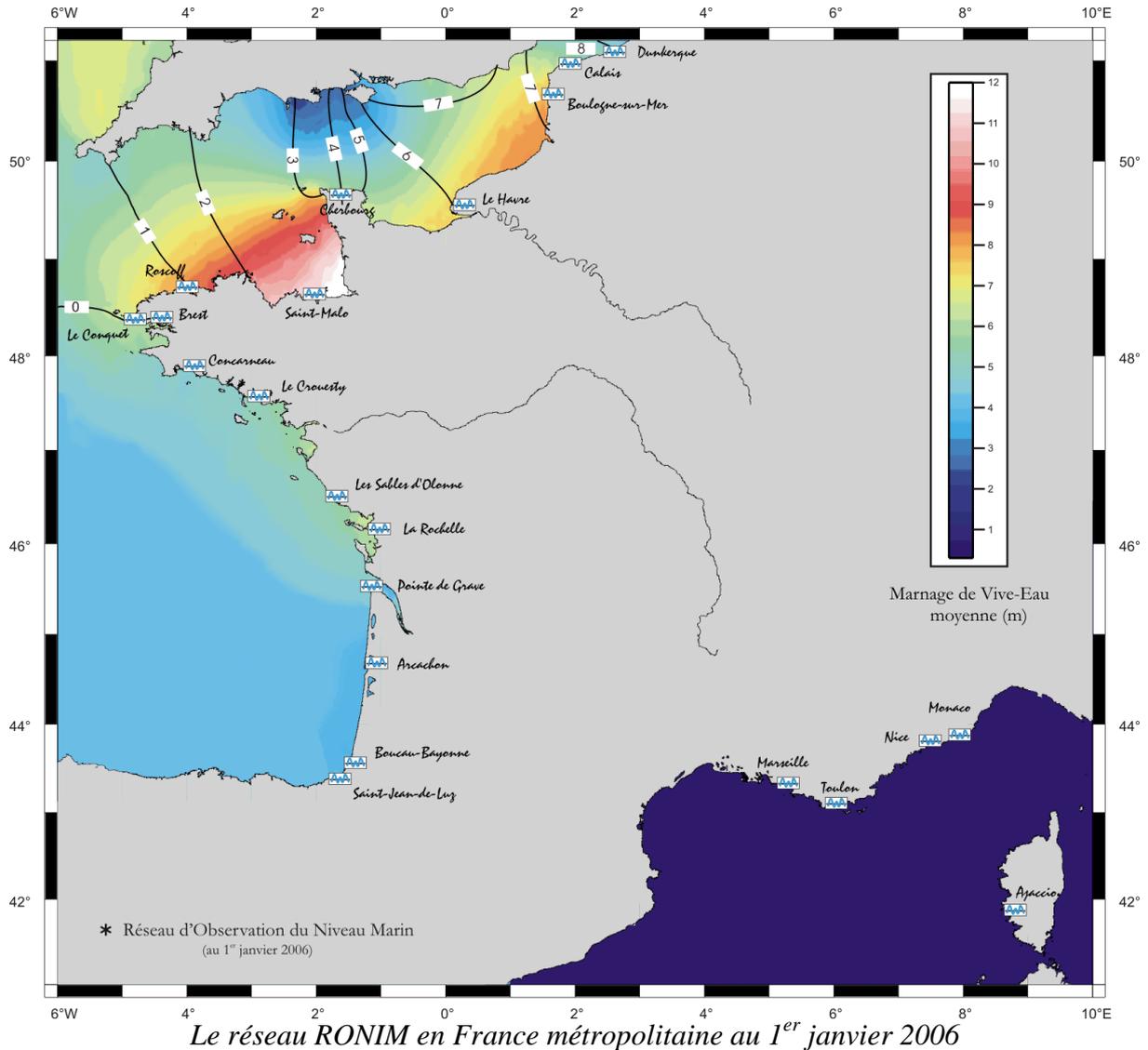
Les mesures du réseau sont prioritairement destinées au SHOM mais elles sont également mises à la disposition de la communauté scientifique, par le biais du projet SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux littorales), projet en coopération entre le SHOM, l'IGN et le Centre Littoral de Géophysique (basé à l'Université de La Rochelle). Les mesures du réseau sont ainsi accessibles dans un délai d'une semaine en se connectant au site de SONEL www.sonel.org.

Le tragique tsunami survenu le 26 décembre 2004 dans l'Océan Indien a conduit la Commission Océanographique Internationale (COI) à créer le projet IOTWS (Indian Ocean Tsunami Warning System) dont le but est la mise en place d'un système d'alerte aux tsunamis dans l'Océan Indien, sur le modèle du PTWS (Pacific Tsunami Warning System). D'autres projets de systèmes d'alerte sont en cours de lancement, notamment en Europe ; on parle désormais de systèmes d'alerte multirisque (cyclones, tempêtes, tsunamis). Ces systèmes nécessitent l'accès en temps réel aux données de hauteurs d'eau. En temps que principal réseau d'observation national du niveau marin, le réseau RONIM est destiné à être intégré à de tels systèmes et la diffusion en temps réel des mesures de RONIM est à l'étude.

2.5 ETENDUE DU RESEAU

Le réseau RONIM couvre actuellement 22 ports principaux en France métropolitaine et 3 ports d'outre-mer (Nouméa, Fort-de-France et Pointe-à-Pitre). Les observatoires de marée de ces ports sont pourvus de Marégraphes Côtiers Numériques, que nous appellerons MCN dans la suite du document. Sur les 25 MCN de RONIM, 17 d'entre eux sont équipés de télémètres radar, les autres (les plus anciens) sont équipés de télémètres acoustiques.

Le projet RONIM vise à équiper en tout 27 ports en France métropolitaine et 6 ports d'outre-mer.



3 LE MAREGRAPHE COTIER NUMERIQUE (MCN)

3.1 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le MCN est un système permettant la mesure de la hauteur d'eau par rapport à une référence verticale. Le MCN est équipé d'un télémètre. Ce télémètre, placé au-dessus de la surface de l'eau, peut être un transducteur à ultrasons ou un télémètre à ondes électromagnétiques (radar). Il émet un court train d'impulsions et détecte le signal réfléchi. Le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal est traduit en hauteur d'eau comme suit :

$$H = D - L$$

En exprimant L en fonction du temps de propagation de l'onde de célérité c, on obtient :

$$H = D - \frac{1}{2} c \Delta t$$

L : distance entre le télémètre et la surface de l'eau

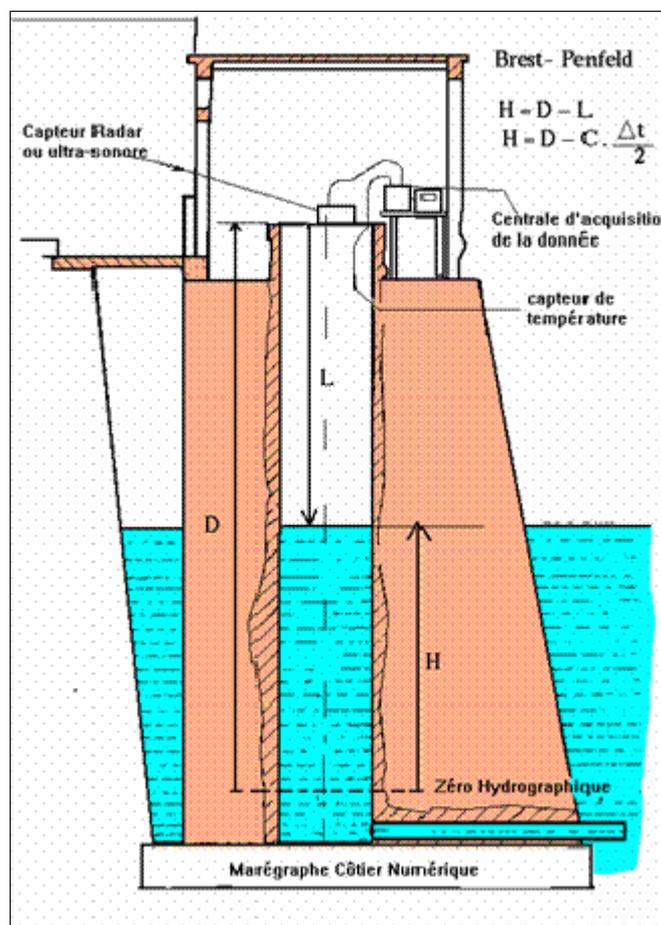
H : hauteur d'eau rapportée au zéro hydrographique.

D : cote (en m) du télémètre au-dessus du zéro hydrographique.

c : célérité de l'onde dans l'air en m/s.

Δt : intervalle de temps correspondant au trajet aller-retour de l'onde en secondes.

Le schéma de l'observatoire de Brest-Penfeld illustre ce principe.



3.2 LE DISPOSITIF DE TRANQUILLISATION

Le télémètre est placé dans un puits ou un tube de tranquillisation permettant de filtrer mécaniquement la houle (période moyenne : 5 à 8 secondes) et les vagues (période moyenne : 2 à 5 secondes).

Le dispositif de tranquillisation apporte également d'autres avantages selon le type de télémètre employé :

- pour les télémètres à ultrasons, il sert de guide d'onde et empêche l'onde d'être perturbée par les flux d'air (vent) ; globalement un transducteur à ultrasons perd 50% de sa portée hors puits ou conduit ;
- pour les télémètres radar, le dispositif de tranquillisation permet d'aplanir la surface de l'eau qui offre ainsi un meilleur indice de réverbération de l'onde électromagnétique.

Le puits communique avec l'extérieur par un orifice situé au-dessous des plus basses mers. Diverses études ont montré qu'un diamètre de l'orifice de 1/10 du diamètre du puits fournit des résultats satisfaisants pour les marégraphe à flotteur. Il faut éviter un rapport inférieur à

1/25 car dans ce cas, les composantes de marée à fréquence élevée sont sensiblement atténuées et déphasées. Une inspection et un nettoyage réguliers du conduit de communication sont nécessaires afin d'éviter une obturation partielle par les salissures, souvent indécélable a priori mais pouvant compromettre gravement la qualité des mesures.

La hauteur d'eau dans le puits devrait être la même qu'à l'extérieur. Cependant, le puits de tranquillisation n'étant pas un filtre linéaire, sa réponse dépend non seulement de facteurs tels que les dimensions relatives du puits et de l'orifice, la forme de l'orifice, mais aussi de la présence ou l'absence de vagues, de courant, de différence de densité entre l'extérieur et l'intérieur du puits, des salissures ou de l'envasement au niveau de l'orifice.

Les variations de pression dues à la présence de vagues peuvent provoquer un abaissement du niveau à l'intérieur du puits qui peut atteindre 10 à 15 cm pour des vagues importantes, et un courant perpendiculaire à l'axe de l'orifice provoque un abaissement du niveau qui peut atteindre 18 cm pour un courant de 3 noeuds. Des améliorations du dispositif peuvent être apportées par une forme et une disposition judicieuses des orifices.

3.3 LA CENTRALE D'ACQUISITION

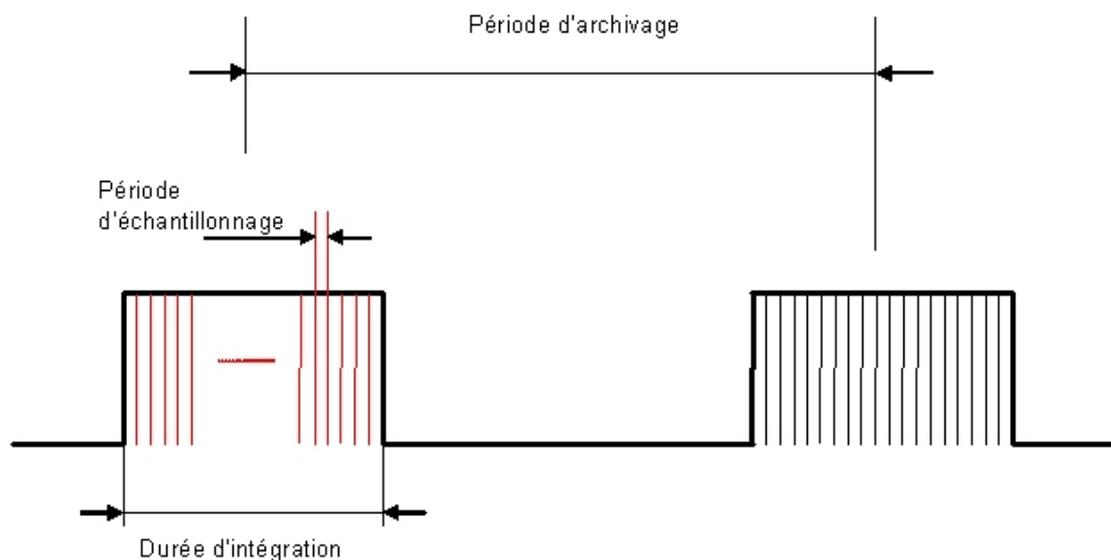
Le MCN est également équipé d'une centrale d'acquisition qui permet de traiter le signal émis par le télémètre.



La centrale enregistre une mesure périodiquement. Cette mesure est une moyenne effectuée sur une série continue de mesures réalisées durant une période fixée par l'opérateur, appelée durée d'intégration.

Afin de filtrer numériquement la houle et le clapot résiduels, les mesures enregistrées sont intégrées sur une période de temps de 2 minutes (durée d'intégration), avec une cadence de mesure de 10 minutes (période d'archivage).

La valeur moyenne est archivée à une date correspondant au milieu de la période d'intégration.



La centrale d'acquisition permet également d'affecter des corrections aux mesures en fonction des résultats d'étalonnage (cf. 4.3).

Elle permet aussi d'émettre des alarmes en cas de dépassement de la mémoire, de dépassement de seuils de hauteurs d'eau, de coupure d'alimentation électrique.

Les données stockées dans la centrale d'acquisition sont transmises régulièrement, via le réseau téléphonique, vers un logiciel superviseur installé à l'Établissement Principal du SHOM et le cas échéant vers les autorités portuaires intéressées par ces données pour leur propre usage. Les alarmes générées par la centrale sont immédiatement transmises par le réseau téléphonique de la centrale vers le logiciel superviseur.

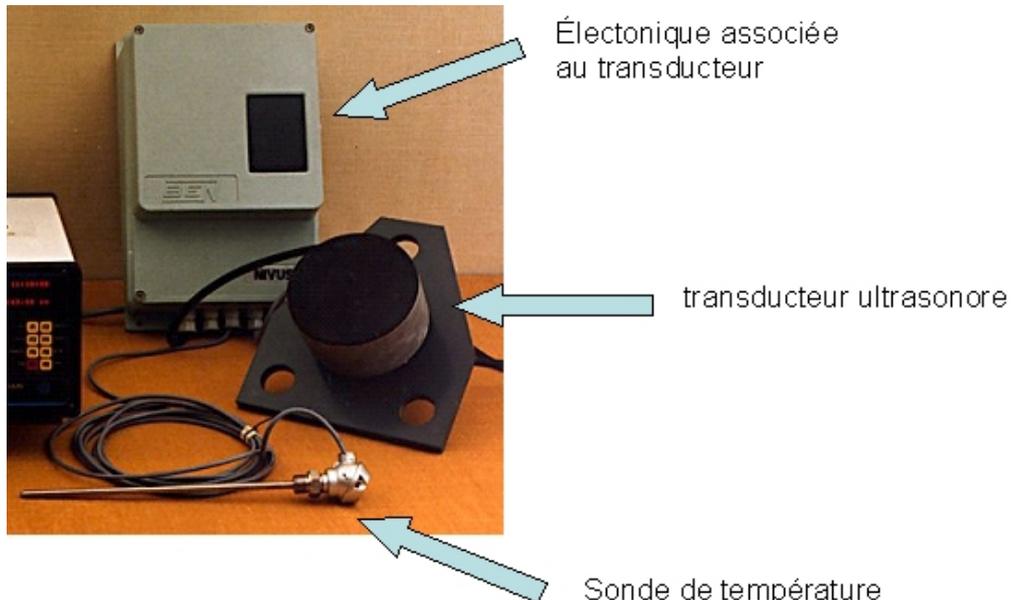
Par ailleurs, la centrale d'acquisition est équipée de sorties séries RS232 permettant la récupération et l'exploitation en temps réel des hauteurs d'eau (affichage de la hauteur d'eau en temps réel à l'entrée de ports, réseaux d'alerte ...). Ainsi, le Port Autonome du Havre a équipé ses vedettes hydrographiques d'un système VHF qui récupère en temps réel les hauteurs d'eau mesurées par le MCN du Havre, afin de réduire les sondages en cours.

La fiabilité à long terme des Marégraphes Côtiers Numériques est garantie d'une part grâce à l'absence de toute pièce mobile et la limitation des interventions humaines (potentiellement sources d'erreurs), d'autre part grâce à l'installation du télémètre hors de l'eau, ce qui supprime les risques de chalutage, de corrosion, etc.

3.4 LE TELEMETRE

La technique de mesure employée par les MCN est basée sur la mesure du tirant d'air soit par ultrasons, soit par ondes électromagnétiques (RADAR).

3.4.1 Le télémètre acoustique



Le télémètre acoustique est un transducteur ultrasonore qui émet dans l'air à 41,5 kHz pour un angle d'émission de 5° à -3 db et une portée de 0,6 à 15 mètres. La portée s'entend avec une réflexion sur un liquide au repos, en plein air (sans puits ou tube), il faut prévoir une réduction de 50% par grand vent.

Une sonde de température située au niveau du transducteur permet une compensation automatique en température.

Un coffret électronique étanche contient l'électronique d'excitation du transducteur et de mesure des signaux reçus ; cette électronique assure également la correction de mesure de niveau en température.

Le MCN effectue la mesure de la température de l'air ambiant pour corriger la mesure de tirant d'air. La célérité acoustique dans l'air varie et dépend en effet des paramètres suivants : pression, température, humidité, selon la formule suivante :

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

C : célérité acoustique dans l'air en m/s.

P : pression atmosphérique en hPa

T : température de l'air en °C

U : humidité relative de l'air

Les variations de la pression atmosphérique et de l'humidité relative de l'air ont peu d'effet sur la célérité : les négliger engendre une erreur de mesure sur la hauteur d'eau inférieure à 1 cm pour un transducteur placé à 10 m au-dessus de l'eau (le terme $0,97 \frac{U}{P}$ est inférieur à 10^{-3}).

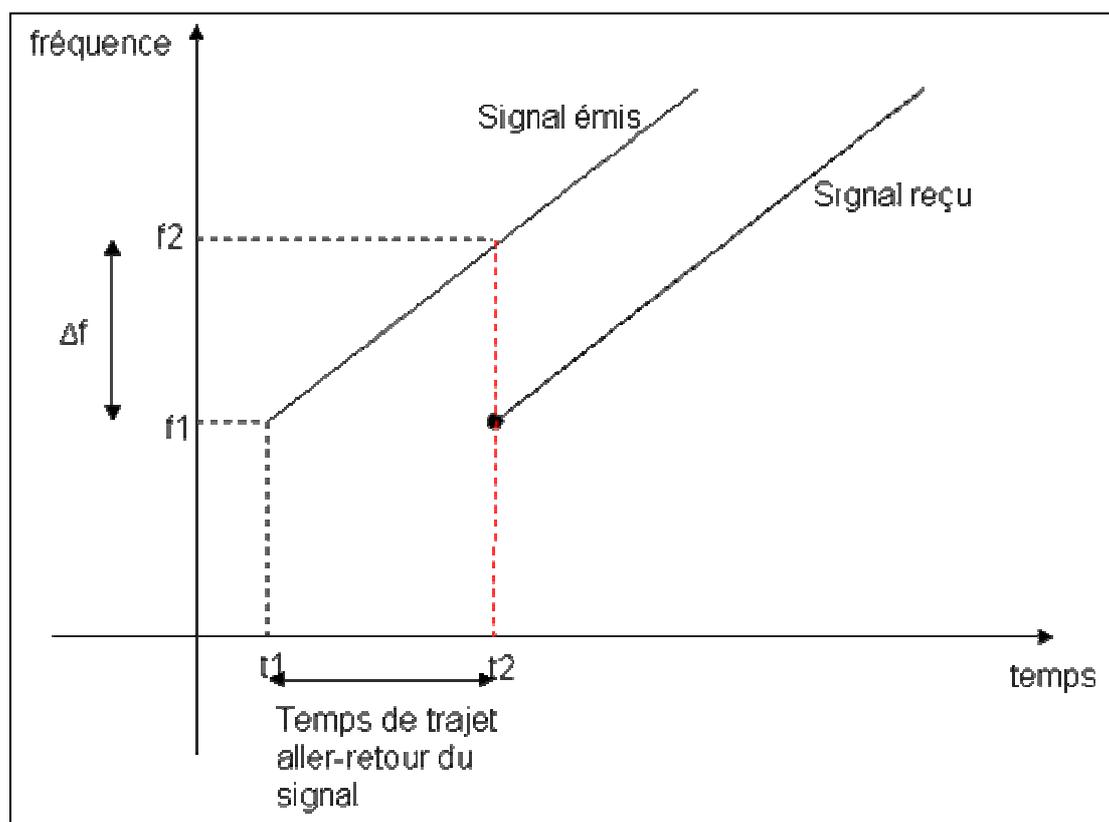
La température est par contre un paramètre important. Négliger ce paramètre cause une erreur de mesure sur la hauteur de près de 2 cm/°C, pour un transducteur placé à 10 m au-dessus du niveau de l'eau.

En raison de la source d'erreur importante que constitue le gradient de température dans le puits (ou tube de tranquillisation), les transducteurs ultrasonores ne sont plus installés que dans les ports à faibles marnages, soit les ports de la Méditerranée.

3.4.2 Les télémètres radar

Le mot **radar** est un néologisme provenant de l'acronyme anglais : *radio detection and ranging*. C'est un système électronique utilisé pour détecter la présence et déterminer la distance d'un objet (auto, bateau, pluie, surface de l'eau ...). L'antenne du radar émet de fortes ondes radio à haute fréquence et reçoit les échos de cette émission réfléchis par l'objet. L'analyse du signal réfléchi permet de localiser le réflecteur, et parfois de l'identifier. Bien que le signal reçu soit faible, il peut être facilement détecté et amplifié.

Les télémètres radar utilisés au SHOM pour mesurer les hauteurs d'eau sont de la marque Krohne et des types BM70 et BM100. Ils sont basés sur le principe du **FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave**. Ce principe est illustré sur le schéma suivant. Il repose sur la variation linéaire de la fréquence d'un signal électromagnétique entre 8,5 et 9,5 GHz. Emis à une fréquence f_1 à l'instant t_1 , le signal est rétrodiffusé par la surface de l'eau et est reçu par l'antenne du capteur à un instant t_2 , à la même fréquence f_1 (pas d'effet Doppler, le plan d'eau est fixe). Entre l'instant t_1 et l'instant t_2 , la fréquence d'émission du signal généré par le capteur augmente linéairement (balayage fréquence). A l'instant t_2 , la fréquence du signal généré est f_2 . La différence de fréquence $f_2 - f_1$ est directement proportionnelle au temps de trajet aller-retour du signal, donc à la distance entre la surface de l'eau et l'antenne. Cette différence de fréquence est transformée en spectre de fréquence via une transformation de Fourier rapide (FFT) et la distance est calculée à partir du spectre.



Principe de fonctionnement du télémètre radar

La veille technologique effectuée à l'EPSHOM a conduit à adopter à partir de 1997 ces télémètres à émission électromagnétique en lieu et place des télémètres acoustiques dans les ports à fort marnage (plus de 5 mètres en vive-eau moyenne).

Deux types de télémètres radar sont utilisés à l'EPSHOM : le BM70 et le BM100 de la société Krohne.¹ Le premier émet un train d'impulsions électromagnétiques dans l'air grâce à une antenne d'émission alors que le deuxième émet ce même train d'impulsions le long d'un câble spécial, ce qui permet de détecter avec une grande précision l'interface air-eau.

Les télémètres radar cumulent les avantages de pouvoir mesurer les marnages les plus importants grâce à une portée théorique du signal d'environ 30 m et d'être insensibles aux variations de température, de par la nature même du signal. Cependant, l'usage de puits ou tube de tranquillisation demeure nécessaire pour aplanir la surface de la mer sur laquelle s'exerce la réflexion et ainsi permettre le retour du signal avec la meilleure directivité et la plus grande puissance possibles. Mais la forme et le matériau de ces dispositifs de tranquillisation ont un impact (réflexions multiples, ...) sur la qualité des mesures. Ainsi, l'expérience montre que le BM70 doit être mis en œuvre dans un tube de tranquillisation en acier inoxydable de diamètre 90 mm, tandis qu'il est recommandé de mettre en œuvre le capteur BM100 dans un puits ou tube de tranquillisation en PVC de diamètre supérieur à 300 mm. On verra plus loin l'importance du choix de ces dispositifs de tranquillisation.



télémètre radar Krohne BM100.

¹ La société Krohne envisage de remplacer ces deux types de télémètres par un unique télémètre, l'Optiflex, de performances équivalentes.

4 LE TEST DE VAN DE CASTEELE

4.1 PRINCIPE

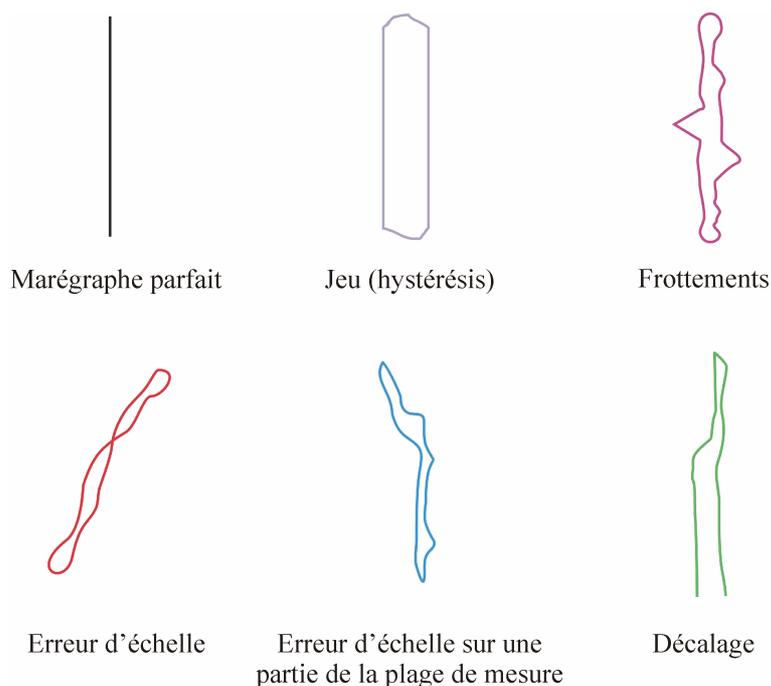
Ce test a été imaginé par l'ingénieur en Chef géographe de l'IGN, Charles de Van de Castele en 1962, pour apprécier la qualité d'un marégraphe. Le rapport de thèse en référence [5] a montré tout l'intérêt de mettre en œuvre ce test pour détecter les erreurs des marégraphes, les causes de ces erreurs et les moyens d'y remédier.

Selon Van de Castele, la qualité et la marche d'un marégraphe peuvent être appréciées seulement de manière expérimentale. Le test s'appuie sur la comparaison, pendant un cycle de marée complet, des relevés simultanés du marégraphe et du dispositif de mesure indépendant mis en place pour l'étalonnage. La différence des valeurs doit rester en théorie constante et égale à zéro si le marégraphe et le dispositif de mesure indépendants ont la même référence verticale.

Le diagramme de Van de Castele se construit ainsi : en abscisses, on porte les écarts marégraphe-étalon, et en ordonnées, la hauteur d'eau. Dans cette étude, nous avons relié les points successifs par des segments de droite et nous avons choisi de représenter de deux couleurs différentes les points correspondant au perdant de la marée et ceux correspondant au montant.

Un marégraphe parfait donne une courbe réduite à une droite parallèle à l'axe des ordonnées. Mais plus généralement, l'interprétation de l'allure des diagrammes de Van de Castele met en évidence un certain nombre d'imperfections, et permet de ce fait d'apprécier la qualité et le fonctionnement du marégraphe. La figure suivante donne l'allure caractéristique de quelques défauts typiques d'un marégraphe :

- hystérésis : pour une même hauteur théorique, la hauteur mesurée est différente au montant et au perdant lors d'un cycle de marée (ce phénomène peut traduire un retard de la marée entre l'intérieur et l'extérieur du dispositif de tranquillisation) ;
- frottements : ce phénomène traduit des irrégularités de l'enregistrement (le frottement des parties mécaniques (rouages, contrepoids, fils, tambour, ...) des marégraphes à flotteur peut engendrer ce type d'erreur) ;
- erreurs d'échelles : erreur linéaire (le grippage ou l'usure des rouages des marégraphes à flotteur peut changer le rapport de réduction et causer ce type d'erreur) ;
- décalages : décalage de l'erreur d'une constante (défaut rencontré parfois sur les marégraphes à flotteur et créé par un mauvais enroulement des câbles).



4.2 MISE EN ŒUVRE

Le test de Van de Castele a été mis en œuvre entre 2002 et 2005 sur un certain nombre d'observatoires du réseau RONIM pour tester les performances de l'ensemble des instruments de mesure des hauteurs d'eau utilisés au SHOM et en particulier les différents types d'installations utilisant des MCN à télémètres radar. Les instruments ainsi intercomparés sont :

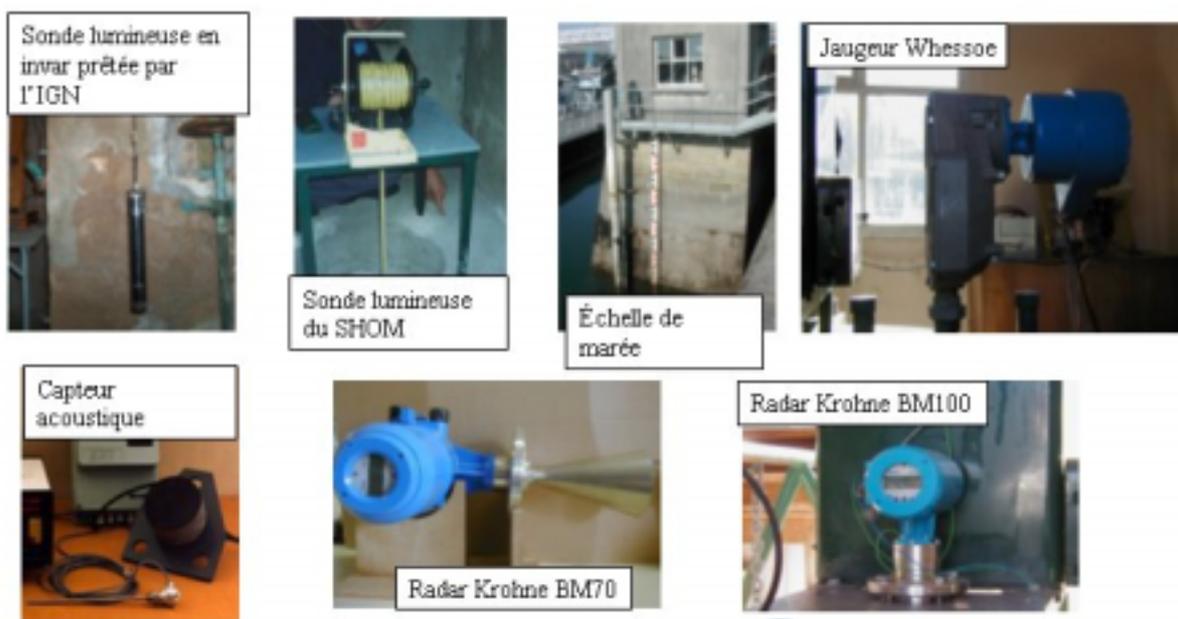
- la sonde lumineuse du SHOM
- l'échelle de marée
- le télémètre radar Krohne BM70 émettant dans un tube en PVC
- le télémètre radar Krohne BM70 émettant dans un tube en acier inox
- le télémètre radar Krohne BM100 émettant dans un puits.

Sur le site de Brest-Penfeld², on a pu également évaluer les performances des instruments de mesure suivants :

- le jaugeur Whessoe
- le télémètre acoustique Ben I2E émettant dans le puits de tranquillisation de Brest-Penfeld
- une sonde lumineuse en invar prêtée par l'IGN.

Par ailleurs nous rendrons compte également de la comparaison avec un marégraphe plongeur Seabird SBE26, génération de marégraphe succédant aux Suber SLS23 et OT660.

² Le marégraphe à flotteur OT20030 de Brest-Penfeld est hors service depuis l'année 2002 et n'a donc pas pu être intégré aux expériences.



Ensemble des instruments de mesure en présence lors du test de VDC à Brest le 17 avril 2003

Les caractéristiques des différentes expériences de Van de Casteele sont décrites dans le tableau suivant :

<i>Lieu</i>	<i>Date</i>	<i>Marée</i>	<i>Etat de mer</i>
Observatoire de marée de Brest-Penfeld	29 mars 2002	Coefficients de marée : 115 et 117 Marnage : 7,5 m	Clapot nul
Observatoire de marée de Brest-Penfeld	17 avril 2003	Coefficient 112 et 114 Marnage : 7 m	Clapot nul
Observatoire du Conquet	18 avril 2003	Coefficient 114 et 113 Marnage : 7 m	Clapot de 30 cm matin et soir, nul le restant de la journée
Observatoire de la Rochelle	2 juillet 2004	Coefficient 89 et 92 Marnage : 5 m	Clapot de 5 cm
Observatoire de Roscoff	9 février 2005	Coefficient : 100 et 104 Marnage : 8 m	Clapot de 30 cm
Observatoire de Brest-Penfeld	27,28 et 30 septembre 2004	Coefficient de 88 à 100. Marnage : de 5,4 m à 6,1 m	Clapot nul
Observatoire Saint-Malo	11 mars 2005	Coefficient : 109 et 110 Marnage : 12 m	Clapot de 20 à 30 cm.
Observatoire des Sables d'Olonne	22 août 2005	Coefficient : 109 et 106 Marnage : 5 m	Clapot de 5 cm

La plupart des expériences ont été menées dans les conditions suivantes :

- en vive-eau, le coefficient de marée étant dans la plupart des cas supérieur à 100 ;
- de façon continue, depuis la pleine mer du matin jusqu'à la pleine mer du soir, sauf en septembre 2004 à Brest, où l'expérience s'est déroulée sur plusieurs jours ;
- la durée d'intégration des MCN a été fixée à 10 secondes, afin de tester la qualité des mesures instantanées (donc brutes) des marégraphes plutôt que les mesures moyennées sur 2 min ;
- les mesures étaient répétées toutes les 5 ou 10 min ;

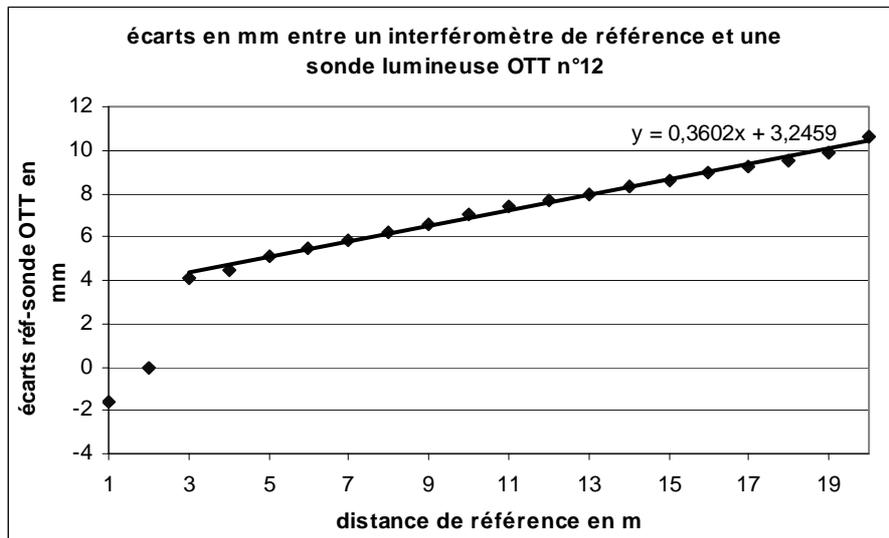
- la sonde lumineuse du SHOM a servi de référence (étalon) pour tous les tests, étant donné ses bonnes performances (cf. annexe au § 7.1).

4.3 CHOIX DE LA REFERENCE

Pour mesurer l'exactitude d'un instrument de mesure, il convient de choisir une référence, un étalon de mesure.

A priori, l'expérience acquise par le SHOM dans les domaines de la marégraphie et de la métrologie a conduit à privilégier les instruments de mesure à lecture directe, soit la sonde lumineuse ou l'échelle de marée.

Nous avons déterminé l'incertitude de la sonde lumineuse OTT grâce à un étalonnage au laboratoire de métrologie de l'Ecole des Mines de Douai. L'annexe (cf. § 7.1.1) décrit l'expérience et montre que la sonde lumineuse OTT est exacte à mieux que 1 cm pour des distances inférieures à 20 m, dans les conditions normales de température et de pression. Cela est meilleur que l'incertitude annoncée par le constructeur (1 cm pour 10 m).



Cependant, l'étalonnage en fonction de la température n'a pas été réalisé, de telle sorte que le coefficient de dilatation de la sonde lumineuse donné par le constructeur n'a pu être déterminé précisément.

Nous avons donc déterminé le modèle de correction suivant de la lecture de la sonde lumineuse en fonction de la distance mesurée :

- jusqu'à 3 m, la sonde est parfaitement exacte, $T_c = T_m$
- à partir d'un tirant d'air de 3 m, nous avons appliqué une correction linéaire selon

$$\text{l'équation suivante : } T_c = \frac{T_m + 0,0032}{1 - 0,00036}$$

T_m = tirant d'air mesuré en mètres

T_c = tirant d'air corrigé en mètres

L'équation correspond à la droite de régression linéaire que nous avons fait passer dans le nuage de points de la courbe d'étalonnage de la sonde lumineuse (cf. courbe précédente).

L'annexe (§ 7.2) décrit les performances de l'échelle de marée en présentant son diagramme de VDC, par comparaison avec la sonde lumineuse. On constate la cohérence des 2 instruments. L'échelle de marée constitue donc a priori un bon étalon de mesure.

Cela dit, contrairement à la sonde lumineuse, aucun étalonnage de l'échelle de marée n'a été réalisé à notre connaissance. Il est donc difficile d'estimer l'incertitude de cet instrument. Par ailleurs, le fruit de l'échelle est un paramètre difficile à mesurer précisément. Enfin, les mesures à l'échelle sont soumises au clapot, alors que les sondes lumineuses ont été mises en œuvre dans un dispositif de tranquillisation, souvent le même que celui du télémètre.

C'est donc finalement la sonde lumineuse OTT qui a été utilisée comme étalon de mesure pour tous les tests, car cet instrument a fait l'objet d'un étalonnage précis en laboratoire et permet des lectures plus précises lorsque la surface de l'eau est stable.

Remarque importante : dans tous les tests de VDC qui vont être présentés, l'écart porté en abscisse est la différence entre la hauteur d'eau obtenue à la sonde lumineuse, corrigée selon les formules précédentes, et la hauteur d'eau mesurée par le MCN.

Il reste que la sonde lumineuse est manipulée par un opérateur. Or celui-ci commet également des erreurs de lecture (erreurs ponctuelles, erreurs systématiques). Par conséquent, le véritable étalon utilisé n'est pas seulement la sonde lumineuse mais le couple [sonde lumineuse/opérateur], étalon caractérisé d'emblée par deux sources d'incertitude non corrigées : celle liée à la dilatation possible du ruban de la sonde et celle liée aux erreurs commises par l'opérateur.

5 RESULTATS

5.1 PERFORMANCE DU TELEMETRE RADAR KROHNE BM70

Les télémètres radar Krohne BM70 sont mis en œuvre au sein du réseau RONIM avec 2 types d'infrastructure différente.

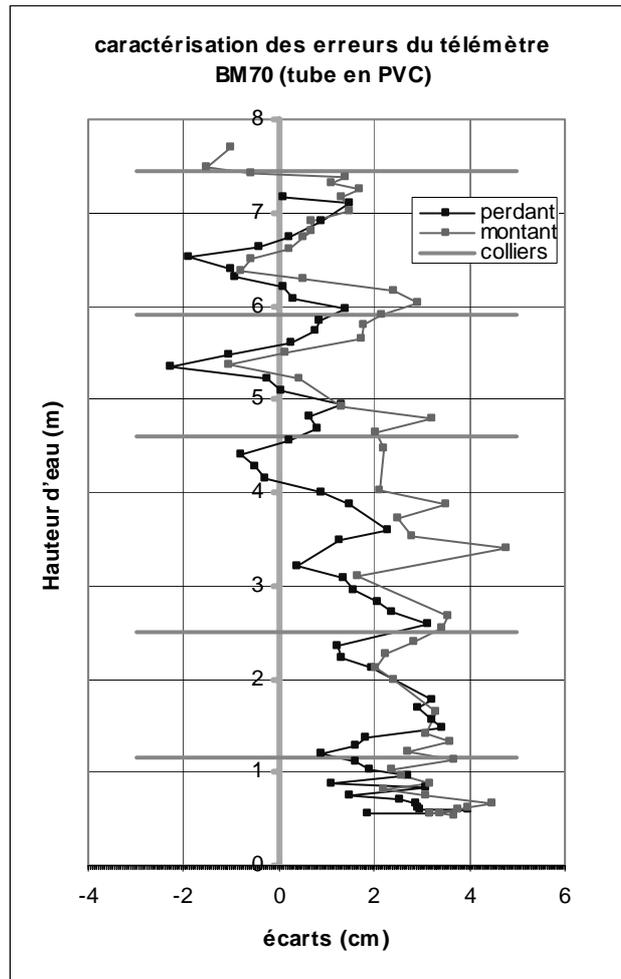
Dans les observatoires les plus anciens, ils sont mis associés à des tubes de tranquillisation en PVC de 300 millimètres de diamètre, fixés au quai au moyen de colliers métalliques. C'est le cas des observatoires de Brest (pour une période de test seulement), de La Rochelle et des Sables d'Olonne. Le tube en lui-même, étant donné le matériau dans lequel il est confectionné (PVC) n'a en principe aucune influence sur la propagation du signal. En revanche, les colliers de fixation sont susceptibles d'avoir un impact.

Dans les observatoires du Conquet et de Saint-Malo, le dispositif de tranquillisation est un tube en acier inoxydable de 90 mm de diamètre. Ce dispositif permet de mieux guider l'onde radar et est de ce fait mieux adapté a priori au Krohne BM70.

Les tests de VDC ont été effectués dans chacun de ces sites.

5.1.1 Observatoire de Brest

Une première expérience s'est déroulée le 17 avril 2003 à l'observatoire de Brest-Penfeld. Un télémètre radar à antenne Krohne BM70 a été placé au sommet d'un tube de tranquillisation en PVC de 300 mm de diamètre intérieur. Le diagramme de VDC des erreurs du BM70 (référence : la sonde lumineuse mesurant dans le puits de tranquillisation) est illustré sur la figure suivante. On y a représenté l'emplacement des colliers de fixation du tube.



L'erreur moyenne sur le cycle de marée est de 3 mm et l'écart-type à 6 mm.

On remarque en outre plusieurs défauts :

- une pente des écarts, donc une erreur d'échelle ;
- une « ondulation » de la courbe, selon une longueur d'onde d'environ 1 mètre ;
- une faible hystérésis.

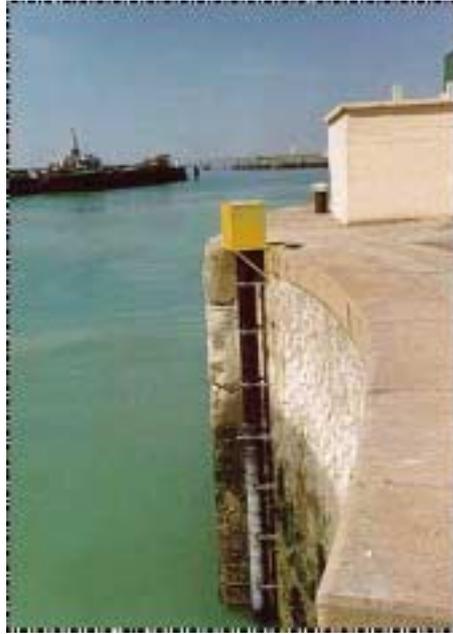
La pente des écarts peut s'expliquer par des problèmes d'atténuation du signal.

Il est probable que la modulation de la pente des écarts soit due à la présence des colliers métalliques, espacés d'environ 1 mètre et dont l'emplacement correspond à peu près à une crête de la courbe.

L'hystérésis n'a pu être expliqué.

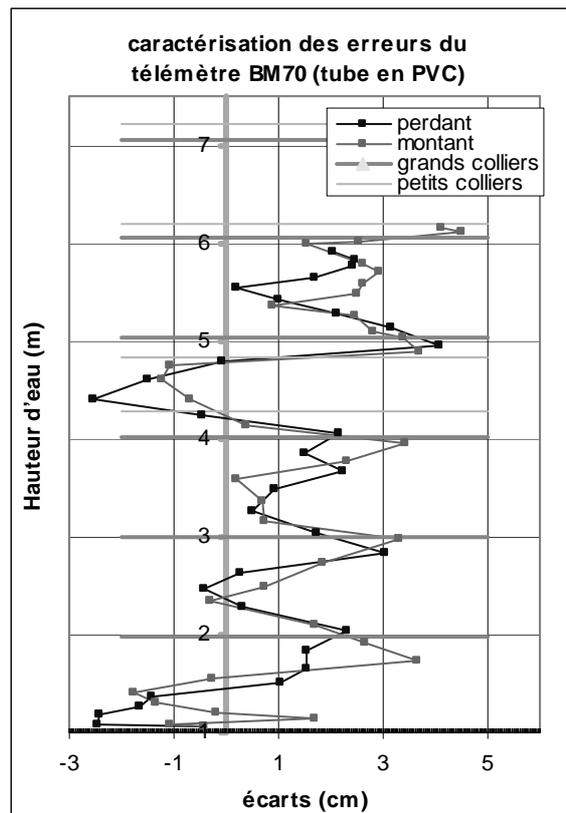
5.1.2 Observatoire de La Rochelle

Un test de VDC a été effectué en juillet 2004 à l'observatoire de La Rochelle, également équipé d'un télémètre radar à antenne BM70 émettant dans un tube en PVC de diamètre 300 mm.



Observatoire de marée de La Rochelle

Le diagramme de VDC des erreurs du BM70 (référence : la sonde lumineuse mesurant dans le tube de tranquillisation) est illustré sur la figure suivante. On y a représenté l'emplacement des colliers de fixation du tube.



Courbe de VDC : La Rochelle, le 2 juillet 2004

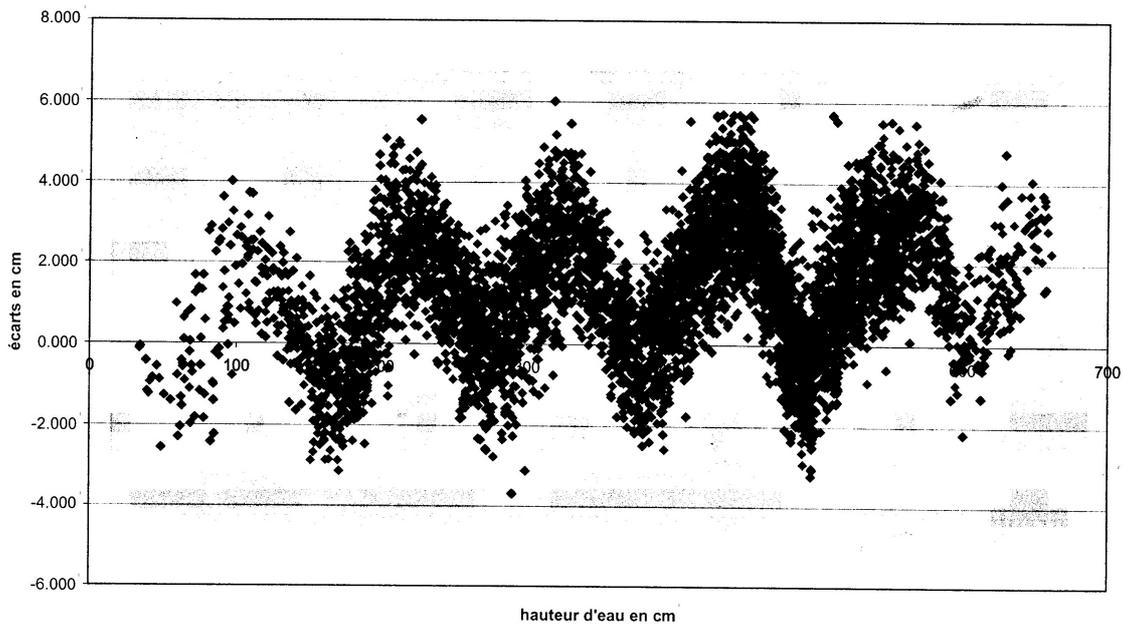
L'écart moyen est de 1,2 cm et l'écart-type des écarts est de 1,8 cm.

On remarque les défauts suivants :

- une légère pente des écarts (atténuée grâce à la prise en compte d'une formule de correction de type parabolique),
- une « ondulation » de la courbe, selon une longueur d'onde d'environ 1 mètre.

Dans ce cas également, l'ondulation de la courbe s'explique probablement par la présence des 2 séries de colliers métalliques de fixation (une série de gros colliers et une série de petits colliers). L'écart entre les gros colliers est égal à mètre, soit la valeur de la longueur d'onde de la courbe, et l'emplacement de chaque collier correspond à un pic de la courbe.

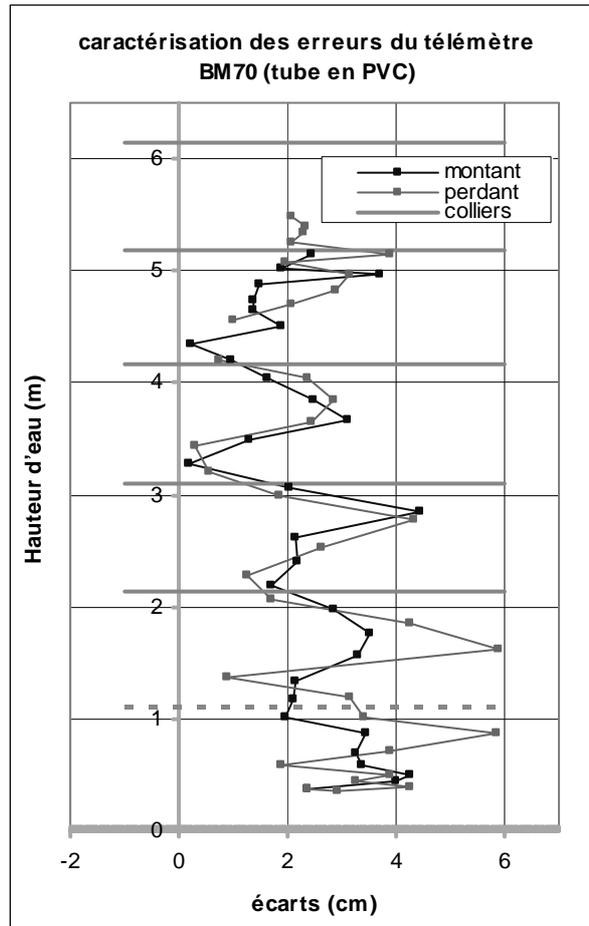
Une comparaison sur une vingtaine de jours entre le MCN et un marégraphe à capteur de pression Seabird SBE26 confirme les oscillations, comme le montre la figure suivante.



5.1.3 Observatoire des Sables d'Olonne

Une troisième expérience s'est déroulée à l'observatoire des Sables d'Olonne, également équipé d'un radar à antenne (Krohne BM70) émettant dans un tube en PVC de diamètre 300 mm. L'observatoire n'a pas fait l'objet d'une calibration précise hormis le calage du zéro instrumental.

Le diagramme de VDC des erreurs du BM70 (référence : la sonde lumineuse mesurant dans le tube de tranquillisation) est illustré sur la figure suivante. On y a représenté l'emplacement des colliers métalliques de fixation du tube.



Courbe de VDC : Les Sables d'Olonne, le 22 août 2005

L'écart moyen est de 2,5 cm et l'écart-type des écarts est de 0,26 cm.

Outre un important défaut de calage du zéro instrumental du marégraphe (2,5 cm), corrigé depuis cette date, une légère pente de la courbe traduit le défaut de linéarité du télémètre.

La courbe met encore une fois en évidence des ondulations marquées, de longueur d'onde d'environ 1 mètre. L'emplacement des colliers de fixation métalliques, représenté en marron sur la courbe, correspond assez bien à un pic droit de la courbe. Le repérage des colliers de fixation ayant eu lieu en période de morte-eau, le collier le plus bas qui a pu être mesuré est situé à 2,1 mètres au-dessus du zéro hydrographique. Mais il est très probable qu'il existe un autre collier vers 1,1 m. Nous l'avons représenté en traits pointillés sur le graphe de VDC.

En conclusion, les 3 expériences décrites précédemment mettent en évidence des erreurs systématiques des télémètres radar à antenne dans un tube en PVC fixé par des colliers métalliques. Ces erreurs semblent correspondre à des défauts de propagation du signal radar sous l'effet des colliers métalliques cerclant le tube en PVC : il est probable que, lorsque le niveau de l'eau est proche d'un collier, le télémètre détecte le collier et non le niveau de l'eau. L'amplitude de ces défauts peut atteindre plusieurs centimètres.

La mise en évidence de ces défauts a conduit à tester un autre type de dispositif de tranquillisation sur les sites du Conquet et de Saint-Malo.

5.1.4 Observatoire du Conquet

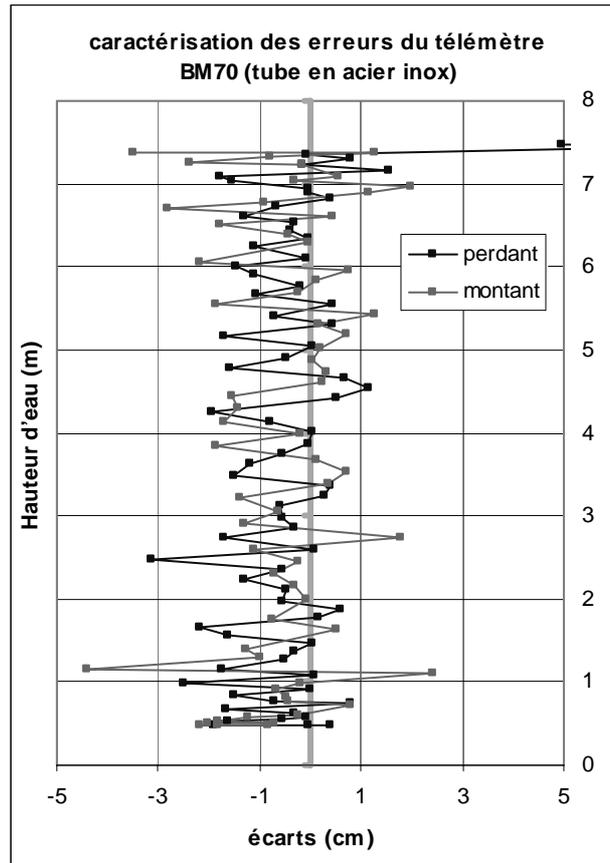
Un test de VDC a été effectué le 18 avril 2003 à l'observatoire de marée du Conquet, par grand beau temps et une température d'environ 20 °C. A noter un clapot d'une trentaine de cm autour des deux pleines mers. Dans l'intervalle, le clapot était quasi nul.

La photo suivante illustre l'observatoire du Conquet. Il est équipé d'un télémètre à antenne Krohne BM70 émettant dans un tube en acier inoxydable de diamètre 90 mm, fixé le long du quai de la gare maritime. Un deuxième tube de même diamètre et en PVC, installé à côté, permet d'effectuer des mesures à la sonde lumineuse.



L'observatoire du Conquet.

Les mesures simultanées à la sonde lumineuse et au MCN ont permis d'établir le diagramme de Van de Casteele suivant, qui représente les erreurs des mesures brutes du télémètre.



Courbe de VDC : Le Conquet, le 18 avril 2003

Le diagramme montre des performances excellentes.

L'erreur moyenne (écart moyen entre le MCN et la sonde lumineuse) est de 4 mm, traduisant un léger défaut de calage du marégraphe. L'écart-type des écarts est de 1,5 cm.

On ne constate pas de pente, pas d'hystérésis, pas de défaut de propagation du signal.

Ces performances vont bien au-delà des recommandations du SHOM et de GLOSS. Ce MCN satisfait pleinement les critères de précision exigés et énoncés au § 2.3.

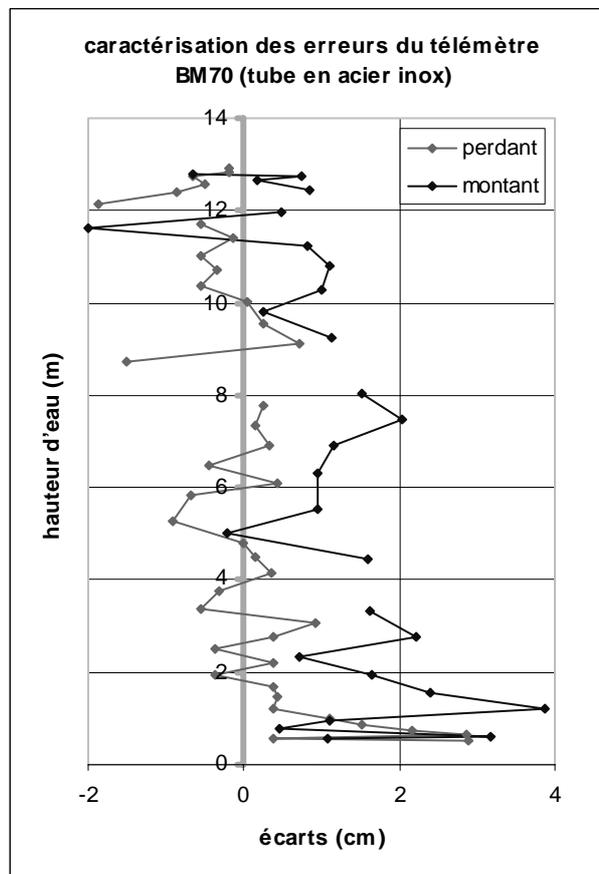
5.1.5 Observatoire de Saint-Malo

L'autre expérience a été menée à Saint-Malo, le 11 mars 2005, de 8h à 20h, par une température de l'ordre de 10°C. Le MCN de Saint-Malo est exactement du même type que celui du Conquet : il y a ainsi 2 tubes de tranquillisation, l'un en acier inox pour la propagation du signal radar, l'autre en PVC utilisé pour les lectures de contrôle à la sonde lumineuse.



L'intérieur du local du marégraphe de Saint-Malo.

La météo s'est montrée relativement clémente avec toutefois un forçage continu du vent au cours de la journée, le clapot atteignant 30 cm en fin d'expérience. Le diagramme de VDC est représenté sur la figure suivante. Les allées et venues des bateaux au quai des Ferries, où est installé le marégraphe, ont perturbé quelques mesures, comme le montrent les discontinuités de la courbe.



Courbe de VDC : Saint-Malo, le 11 mars 2005

La moyenne des écarts est de 3 mm et l'écart-type de 9 mm. Ces résultats sont très satisfaisants, compte tenu du tirant d'air important (plus de 15 mètres). On constate toutefois une pente linéaire des écarts et un accroissement de l'erreur vers les basses mers.

Les raisons suivantes pourraient expliquer la pente des écarts :

- un défaut du télémètre : des problèmes d'atténuation du signal ont été rencontrés lors de la mise en œuvre de l'instrument par l'EPSHOM et la société Krohne, en raison du marnage extrêmement important de la marée de Saint-Malo, ce marnage obligeant à mesurer des tirants d'air jusqu'à 16 m ;
- une éventuelle imprécision de la sonde lumineuse (rappelons que l'étalonnage de la sonde lumineuse ne prenait pas en compte les éventuels défauts liés à la dilatation thermique, or la température atmosphérique était de l'ordre de 10 degrés lors de l'expérience) ;
- des erreurs systématiques lors de la lecture à la sonde lumineuse.

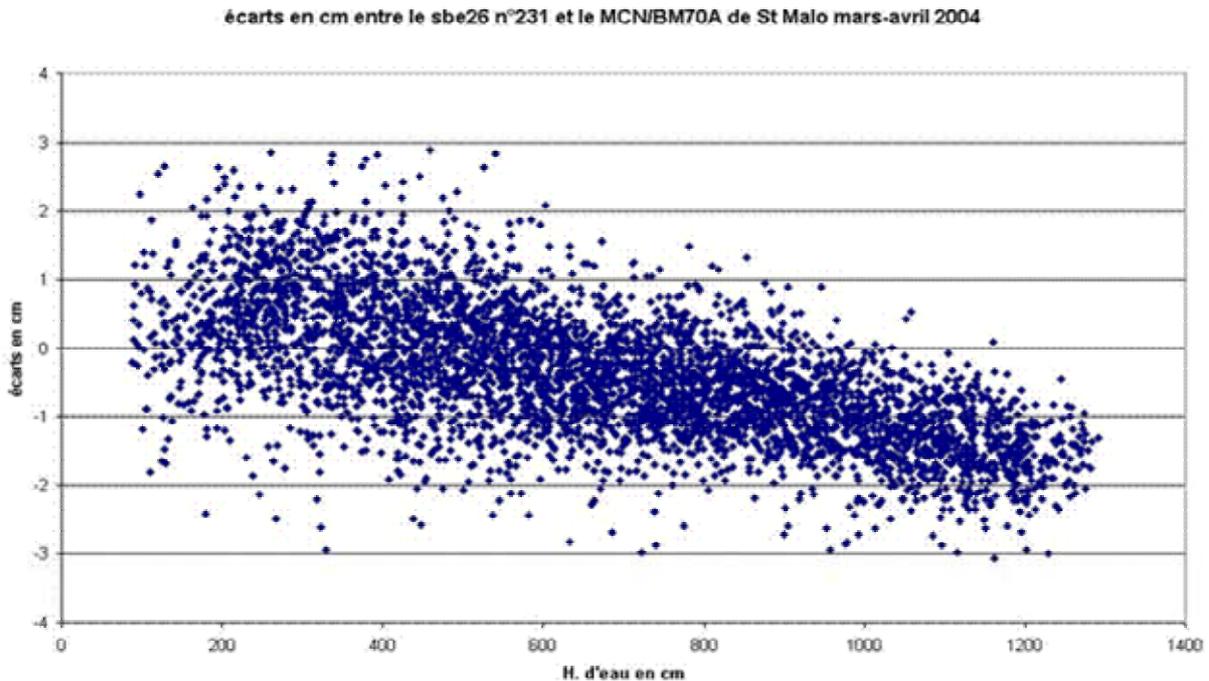
Une comparaison du MCN de Saint-Malo avec un marégraphe plongeur Seabird, mouillé juste à côté et juste au-dessous du zéro hydrographique, a été faite sur une durée commune de 2 mois, de mars à avril 2004.



Marégraphe plongeur Seabird SBE26

Pour les 2 appareils, la cadence d'intégration des mesures est de 2 min et la cadence d'archivage de 10 min. Le marégraphe plongeur Seabird était immergé à environ 5 mètres sous le zéro hydrographique.

Le graphe suivant représente les écarts entre les 2 appareils de mesure (hauteur SBE26 – hauteur MCN).



On remarque une pente systématique allant de +1 à -2 cm. Cette fois-ci, les écarts sont plus importants à pleine mer (-2 cm) qu'à basse mer (+1 cm).

Comment interpréter ces résultats ?

Le MCN mesurant un tirant d'air et le marégraphe plongeur la pression de l'eau, il est probable que le MCN donne de meilleurs résultats que le marégraphe plongeur vers les pleines mers, le tirant d'air à mesurer étant plus faible (hypothèse confirmée par l'équivalence entre les mesures du MCN et les mesures à la sonde lumineuse vers les pleines mers), et qu'inversement le marégraphe plongeur puisse donner de meilleurs résultats que le MCN vers les basses mers (on remarque en effet qu'à basse mer, la différence [hauteur sonde lumineuse - hauteur MCN] \approx + 1 cm et la différence [hauteur Seabird - hauteur MCN] = + 1 cm (la sonde lumineuse et la marégraphe plongeur donnent donc des résultats similaires à basse mer)).

Le marégraphe Seabird SBE26 utilisé est un marégraphe dont la mesure de pression est précise à 0,01% de la pleine échelle. Il peut mesurer des pressions de 100 PSI, soit 6,89 bars. La précision pour cette pression est donc de 0,689 mbar, soit, à densité constante, une précision sur la mesure de hauteur d'eau d'environ 7 mm.

Mais le fait de mesurer la pression avec une bonne précision ne garantit pas seul une hauteur d'eau précise.

La relation liant la pression mesurée au niveau du capteur à la hauteur d'eau est la suivante :

$$H = (P - P_a) / \rho g$$

Dans cette expression,

P = pression mesurée

P_a = pression atmosphérique au niveau de la mer

ρ = masse volumique moyenne de la colonne d'eau

g = accélération de la pesanteur

H = hauteur d'eau au-dessus du capteur

La précision de la hauteur d'eau dépend également et notamment de la précision de la détermination de la densité moyenne de l'eau de mer sur la colonne d'eau, ainsi que de la

détermination de la pression atmosphérique et de celle de la pesanteur. Or l'estimation de la densité moyenne sur la colonne d'eau de l'eau de mer pour chaque mesure est en pratique difficile à obtenir et sujette à une incertitude non négligeable.

Le marégraphe Seabird est équipé d'un capteur de température et d'un capteur de conductivité, ce qui permet d'obtenir une estimation de la densité au niveau du capteur (donc à un seul niveau et non sur la colonne d'eau). Dans le cas présent, le calcul des hauteurs d'eau a été fait en considérant la moyenne de toutes les densités obtenues sur la période de 2 mois. Malheureusement, les mesures du Seabird n'ont pas été conservées, on n'a donc pas d'idée sur la variation de la densité pendant les 2 mois de mesure.

On renvoie vers le chapitre 2 du document en référence [8] et l'annexe 5 du rapport d'étude en référence [3] pour l'étude de l'influence de la densité sur la précision de la hauteur d'eau. L'annexe 5 du rapport en référence [3] présente le budget des erreurs de calcul des hauteurs d'eau des marégraphe à capteurs de pression. Il est dit notamment que « si on veut une marée à mieux que 1 cm près et que le marnage est de 10 m, alors l'erreur de température doit être inférieure à 2,5 ° et l'erreur de salinité à 0,7 pour mille », et cela si la masse volumique du milieu ne varie pas au cours du temps.

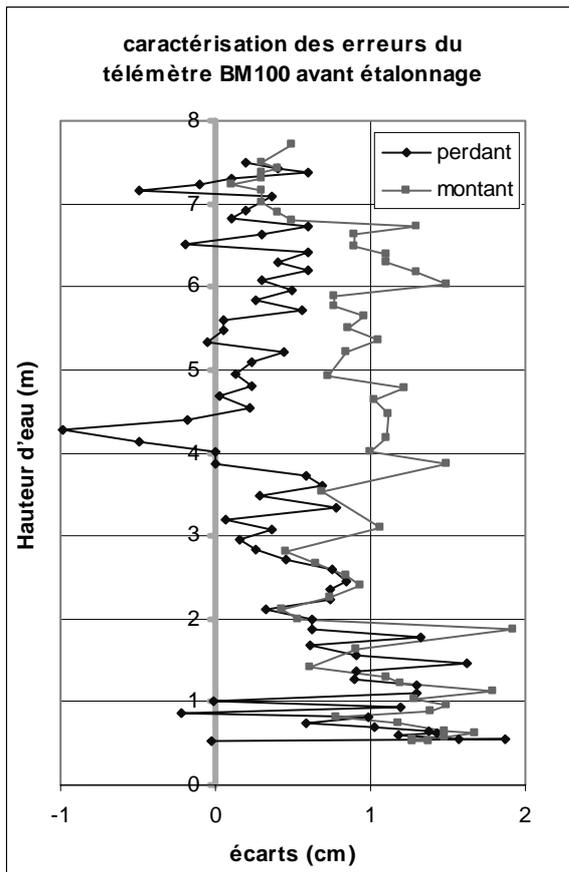
5.2 PERFORMANCE DU TELEMETRE RADAR KROHNE BM100

Equiper la plupart des observatoires de RONIM de tubes de tranquillisation en acier inoxydable reviendrait trop cher, par conséquent, la veille technologique s'est poursuivie pour trouver un système s'adaptant aux dispositifs de tranquillisation courants (puits ou tubes en PVC). Le télémètre Krohne BM100 ressemble au BM70, mais au lieu d'être équipé d'une antenne conique, c'est un câble d'acier reliant le télémètre à la surface de l'eau qui transporte le signal. Ce mécanisme permet d'une part de mieux détecter l'interface air-eau, d'autre part de mieux guider l'onde en resserrant son lobe principal autour du câble d'acier. Il est ainsi mieux adapté que le BM70 aux tubes en PVC.

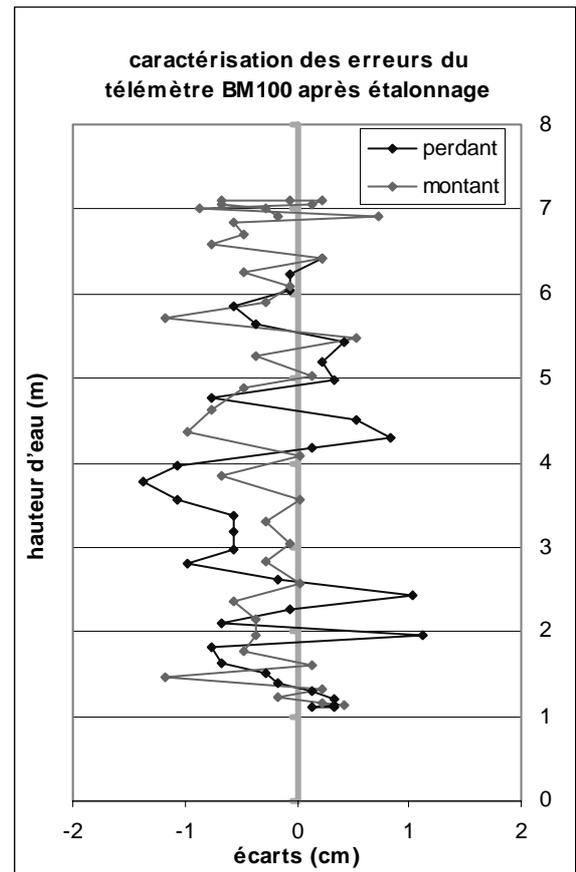
5.2.1 Observatoire de Brest

Ce type de télémètre a été installé à l'observatoire de Brest-Penfeld en 2003. Un premier test a été effectué le 17 avril 2003, le télémètre étant simplement calé au zéro hydrographique mais non étalonné (cf. figure de gauche ci-dessous). Il est possible que l'encombrement du puits par d'autres appareils de mesure altère la qualité du signal à mesure que la mer descend, le lobe d'émission de l'onde s'élargissant et étant susceptible de rencontrer des obstacles (le flotteur du marégraphe à flotteur, celui du jaugeur ...).

Un deuxième test a été réalisé du 27 au 30 septembre 2004, le télémètre ayant été étalonné selon une formule de correction parabolique (cf. § 5.3). La pente de la courbe (cf. figure de droite ci-dessous) est sensiblement corrigée mais les coefficients de marée n'étaient pas suffisamment importants (de 88 à 100) pour apprécier l'effet des corrections vers les plus hautes et les plus basses mers. Toutefois, l'erreur moyenne durant le test n'est que de 0,2 cm et l'écart-type des écarts de 0,5 cm.



Courbe de VDC : Brest, le 17 avril 2003



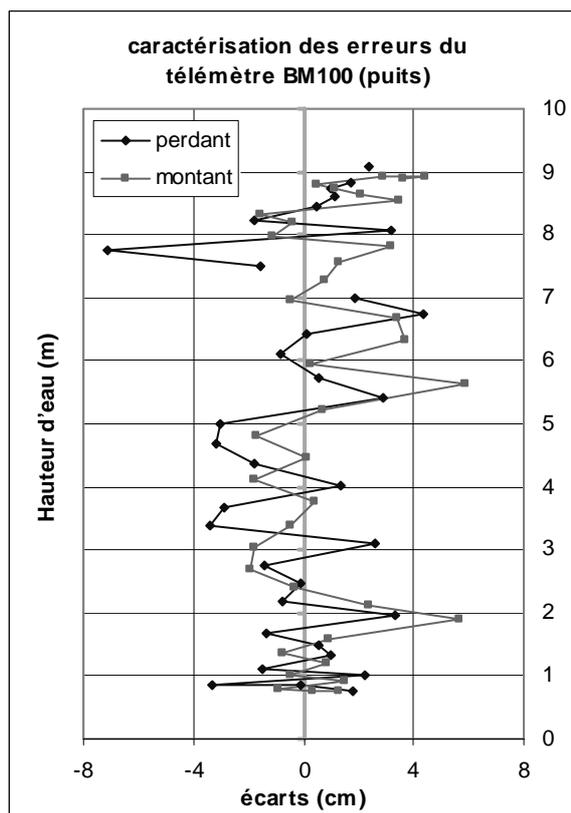
Courbe de VDC : Brest, 27 au 30 sept. 2004

5.2.2 Observatoire de Roscoff

Un autre test du télémètre BM100 a été effectué à l'observatoire de Roscoff le 9 février 2005. Cette installation, similaire à celle de Brest, a été mise en place en 2004 sur le nouveau port de pêche de Roscoff-Bloscon. L'observatoire de marée de Roscoff est constitué d'un puits de tranquillisation de section carrée d'1 mètre de côté, percé dans un des caissons du quai de la criée. Ce puits est fermé par un local abritant l'instrument de mesure, un télémètre radar Krohne BM100.



Les mesures à l'échelle de marée ont été perturbées par un clapot important. Les mesures à la sonde lumineuse ont quant à elles été perturbées par l'état visqueux de la surface de la mer dans le puits de tranquillisation. Le diagramme de VDC est représenté sur la figure suivante.



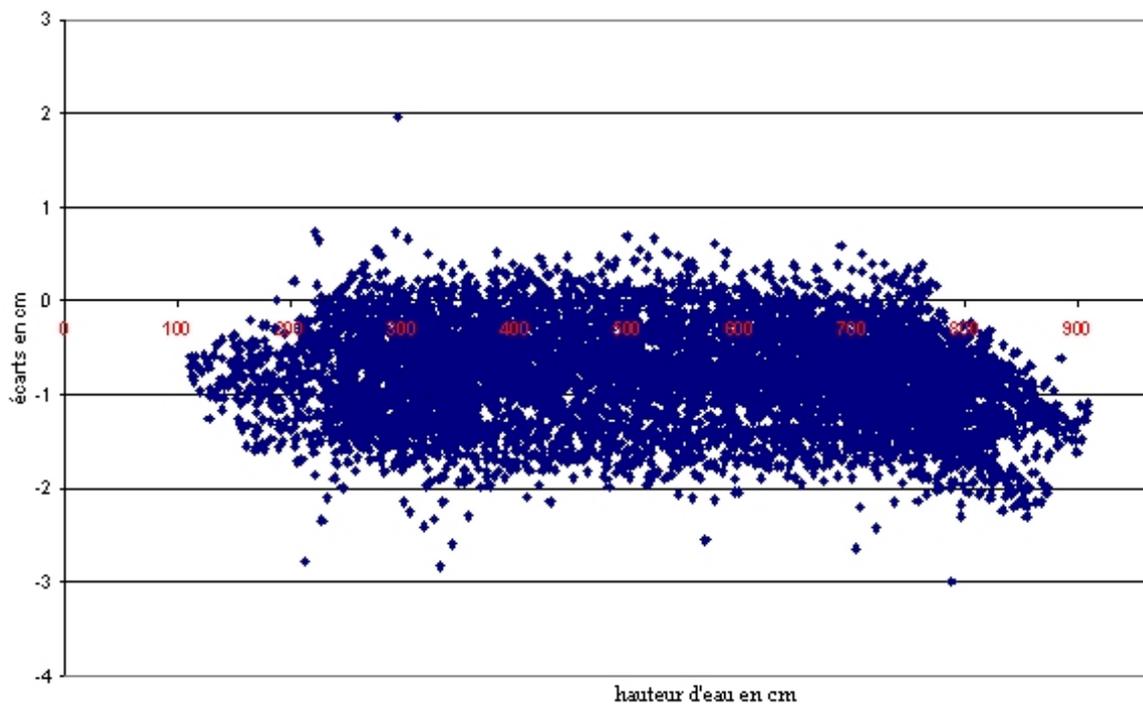
Courbe de VDC : Roscoff, le 9 février 2005

La courbe ne montre pas de pente significative (donc pas d'erreur d'échelle), pas d'hystérésis (le montant ne se distingue pas du perdant). L'écart moyen est de 5 mm, il est centré sur 0 jusqu'à 5 m puis se décale (pas d'explication à ce décalage), l'écart-type est égale à 2,3 cm.

La courbe semble présenter de légères ondulations, à l'image de celles, beaucoup plus marquées, qu'on peut observer avec le BM70 dans un tube en PVC. Mais les ondulations observées ici semblent plutôt refléter la dispersion des points de mesure (donc des erreurs de lecture à la sonde lumineuse) que des défauts propres au télémètre (entre 5m et 7m ces ondulations sont bien visibles mais on voit qu'entre 3 et 5 m, les écarts au jusant et au montant sont opposés).

Il conviendrait donc, pour lever le doute sur cet éventuel systématisme et pour s'assurer des performances de ce marégraphe, de refaire un test de VDC par mer plus calme.

Des comparaisons entre le MCN de Roscoff et un marégraphe Seabird SBE26 ont également été réalisées sur une période de 2 mois. Les mesures comparées sont des mesures moyennées sur une cadence d'intégration de 2 min. La figure suivante indique les écarts entre les 2 instruments. L'écart moyen d'environ 1 cm provient d'un défaut de calage du marégraphe plongeur. Les écarts restent centrés jusqu'à la pleine mer et accusent une légère augmentation croissante entre 8 et 9 m. On a donc une bonne corrélation entre les mesures des 2 appareils sur toute la plage de mesure sauf vers la pleine mer. Les ondulations qu'on pouvait soupçonner d'après le test précédent n'apparaissent pas ici, ce qui confirme l'hypothèse évoquée plus haut. Les mêmes hypothèses que celles émises pour caractériser les différences entre instruments à Saint-Malo peuvent être avancées, sans possibilité de conclure avec certitude.



Écarts entre le MCN de Roscoff et un marégraphe Seabird SBE26

5.3 METHODE DE CORRECTION DES ERREURS

Selon le type d'erreur, nous disposons d'outils pour les corriger.

Les erreurs dues à l'ondulation du signal électromagnétique dans le tube en PVC cerclé de colliers métalliques sont corrigées à l'aide de « tables de hauteurs », que l'on peut entrer directement dans le télémètre, grâce à un procédé développé par le constructeur. Le principe consiste à appliquer à chaque tranche de hauteur d'eau une correction ; on peut ainsi appliquer jusqu'à 50 points de correction.

Les erreurs d'hystérésis sont corrigées en adoptant comme correction pour une hauteur donnée la moyenne des erreurs au flot et au jusant.

Les erreurs d'échelle sont corrigées dans la centrale d'acquisition selon une loi linéaire du type $H' = aH + b$ ou parabolique du type $H' = aH^2 + bH + c$ (H étant la hauteur d'eau mesurée, H' la hauteur d'eau corrigée). Les coefficients a , b et c sont calculés à partir des résultats de l'étalonnage de l'instrument.

5.4 DISCUSSION DES RESULTATS

La méthode du test de Van De Castele (VDC) est une méthode efficace pour détecter des erreurs des instruments de mesure, et en particulier les erreurs systématiques, pour peu que les mesures faites avec l'instrument étalon soient d'excellente qualité.

En l'absence d'erreurs systématiques, les courbes de Van de Castele permettent aussi, grâce au calcul de l'écart-type des écarts, de donner une indication de la précision des mesures.

Dans les expériences présentées plus haut, les courbes de Van de Castele des télémètres radar ont révélé des erreurs systématiques (déformations dues aux colliers de fixation,

hystérésis, pentes) mais ces erreurs sont suffisamment faibles et centrées pour qu'on puisse considérer que l'écart observé est la somme de 2 variables aléatoires :

- l'erreur de mesure à l'étalon
- l'erreur de mesure du MCN.

Ces erreurs étant des variables discrètes indépendantes, la variance des écarts est la somme des variances des 2 variables. Par conséquent si on note :

- σ l'écart-type des écarts mesurés
- σ_1 l'écart-type des erreurs de mesure de l'étalon, soit la précision de l'étalon avec un taux de confiance proche de 68 % si l'on admet que les erreurs suivent une distribution de loi normale ;
- σ_2 l'écart-type des erreurs de mesure du MCN, soit la précision du MCN avec un taux de confiance proche de 68 %.

$$\text{on a } \sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

Pour évaluer σ_1 , il faut considérer que l'étalon, ou plus exactement le procédé d'étalonnage choisi est le couple [sonde lumineuse/opérateur]. L'incertitude de ce procédé d'étalonnage comprend donc, l'incertitude de la mesure de la sonde lumineuse (les étalonnages réalisés en laboratoire ont permis de connaître l'erreur de la sonde dans les conditions normales de température et de pression mais n'ont pas permis de connaître l'effet du milieu ambiant sur la dilatation de la sonde lumineuse) ainsi que l'incertitude liée aux erreurs commises par l'opérateur (erreurs de lecture, systématismes ...), qui sont dues en grande partie aux conditions de l'expérience (clapot, viscosité de l'eau ...). On a ainsi estimé σ_1 à 0,5 cm lorsque les conditions de mesure étaient bonnes (clapot faible), à 1 cm lorsque le clapot était de 20 cm et à 1,5 cm lorsque les conditions de mesure étaient dégradées. L'exploitation d'un plus grand nombre d'étalonnages permettrait d'établir une relation moins arbitraire entre cette erreur et le clapot.

On en déduit donc σ_2 , l'erreur du MCN. Le tableau suivant fournit les résultats pour chaque expérience et type de MCN.

<i>Type de MCN</i>	<i>Ecart-type des écarts (cm)</i>	<i>Erreur estimée de l'étalon (cm)</i>	<i>Erreur estimée du MCN (cm)</i>
BM70 associé à un tube en PVC (Brest)	0,6	0,5 cm	0,3
BM70 associé à un tube en PVC (La Rochelle)	1,8	1,5	1
BM70 associé à un tube en PVC (Les Sables d'Olonne)	0,3	-	0,3
BM70 associé à un tube en acier inox (Le Conquet)	1,04	0,5	0,9
BM70 associé à un tube en acier inox (Saint-Malo)	1,13	1	0,5
BM100 associé à un puits (Roscoff)	2,3	1,5	1,7
BM100 associé à un puits (Brest)	0,53	0,5	0,2

Dans tous les cas (sauf pour Roscoff), l'erreur estimée sur la mesure individuelle du MCN est inférieure à 1 cm, avec un taux de confiance de 68 % ; la recommandation internationale la plus exigeante est ainsi vérifiée. Dans le cas de Roscoff, les erreurs de mesure à l'étalon sont trop importantes pour évaluer correctement la qualité du MCN.

On constate que malgré la correction d'étalonnage des lectures à la sonde lumineuse selon l'équation du § 4.3, la plupart des tests de Van De Castele présentent des écarts moyens légèrement positifs (rappelons que l'écart porté en abscisse est l'écart <mesure sonde lumineuse – mesure MCN>). Cet écart positif n'est-il pas à mettre au compte d'un systématisme du procédé de lecture par l'opérateur ? En effet, l'eau, dans le puits ou le tube de tranquillisation est une eau stagnante, et comme telle, elle est très souvent visqueuse, grasse et chargée d'impuretés. Or la sonde lumineuse est très sensible à la viscosité de la surface de l'eau car une bulle se forme entre les électrodes et le contact entre celles-ci reste fermé, faisant retentir la sonnerie ou allumer le voyant de façon intempestive et faussant ainsi la mesure. Pour éviter ce fâcheux inconvénient, l'opérateur peut avoir tendance à ne retenir la lecture qu'au moment où le clapot atteint son maximum (crête du signal) et par conséquent à surévaluer la hauteur d'eau. Une autre explication possible viendrait de l'hystérésis et de l'opération de calage du MCN sur 1 heure environ lors de son installation. L'échantillon des expériences d'étalonnage n'est pas suffisant pour conclure.

Notons par ailleurs que la comparaison entre les lectures à l'échelle et les lectures à la sonde lumineuse ne montrent pas d'écarts significatifs entre ces 2 instruments. Ceux-ci faisant intervenir un facteur humain et des méthodes de lectures assez similaires (interpolation à vue ...), il est possible qu'ils fassent apparaître les mêmes erreurs systématiques. Les défauts propres à l'échelle et à la sonde (dilatation des matériaux, défaut de construction) ne sont pas distinguables. L'adéquation entre les deux instruments indique également le bon fonctionnement des dispositifs de tranquillisation.

Notons que la sonde lumineuse est plus adaptée pour contrôler l'instrument de mesure car elle permet d'effectuer des mesures précises (peu affecté par le clapot qui est amorti par le dispositif de tranquillisation). En revanche l'échelle de marée est à utiliser lorsqu'on veut évaluer l'ensemble de l'observatoire de marée, c'est-à-dire le MCN et le dispositif de tranquillisation. En particulier, il est recommandé d'utiliser l'échelle de marée lors des opérations « de routine » (calage d'un marégraphe plongeur, contrôle semestriel rapide d'un marégraphe permanent ...) car elle est plus facile d'utilisation et plus précise que la sonde lumineuse mise en œuvre en plein air, notamment en cas de clapot important (on a vu que l'interpolation à vue à l'échelle permet de filtrer assez bien un clapot d'une trentaine de cm).

Par ailleurs, lorsque l'intercomparaison de la sonde lumineuse, de l'échelle, du marégraphe plongeur Seabird et du MCN à télémètre radar montre des écarts, il est assez difficile, compte tenu du rapport signal sur bruit et des inconnues liées au fonctionnement des instruments (histoire, dérive, budget d'erreur), de savoir d'où vient l'erreur. Celle-ci peut en effet provenir :

- d'erreurs systématiques de lecture par l'opérateur à la sonde lumineuse ou à l'échelle, (mais de quelle nature ?) ;
- de l'imprécision intrinsèque des instruments à lecture directe, échelle ou sonde lumineuse (la sonde lumineuse est donnée pour 1 ‰ et est a priori sensible aux variations de température) ;
- d'erreurs de propagation de l'onde électromagnétique dans son environnement ;
- des défauts inhérents aux dispositifs de tranquillisation (emprisonnement d'eau douce, non linéarités du filtrage), occasionnant un niveau différent à l'intérieur et à l'extérieur du puits ;
- de l'imprécision de la détermination de la hauteur d'eau par un marégraphe plongeur du fait de l'imprécision sur la détermination de la densité moyenne de l'eau sur la colonne d'eau.

L'instrument étalon était, pour tous les tests, une sonde lumineuse de type OTT, qui présente des défauts presque du même ordre de grandeur que les défauts qu'on cherche à mettre en évidence, obligeant à prendre en compte une correction d'étalonnage. Il aurait été plus judicieux d'utiliser la sonde de type Lepont (cf. annexe § 7.1.2), dont les défauts sont très faibles (de l'ordre du millimètre) au regard des défauts à détecter. Hélas, cette sonde et surtout ses performances nous étaient pratiquement inconnues avant la mise en œuvre de ces tests.

Il est donc important de renouveler les contrôles d'étalonnage ainsi réalisés pour mieux comprendre l'origine des erreurs, étudier la dérive des capteurs et pouvoir affiner les corrections à appliquer.

5.5 COMPARAISON DES OBSERVATIONS DES MCN AVEC LES OBSERVATIONS ANCIENNES

L'observatoire de marée de Brest-Penfeld est l'un des plus anciens de la planète. On y mesure les hauteurs d'eau de façon continue depuis 1846. Depuis cette date, les instruments de mesure ont bien sûr évolué et il est donc opportun de comparer rapidement³ la qualité des mesures des MCN avec les mesures anciennes.

Trois types de marégraphes se sont succédés :

- de 1846 à 1944, le marégraphe à flotteur de Chazallon
- de 1953 à 1993, des marégraphes à flotteur de type OTT20030
- de 1993 à nos jours, les MCN (acoustiques jusqu'au début 2004, radar depuis début 2004).

On déplore un trou de 8 ans dans la série entre 1944 et 1953, consécutif à la destruction du marégraphe après la guerre (une étude récente a permis de retrouver les années 1949 à 1952).

Un moyen rapide et efficace de comparer la qualité des observations des MCN avec celle des observations anciennes consiste à se servir des prédictions. Celles-ci ont la propriété d'être de qualité constante dans le temps puisqu'elles sont basées sur des constantes harmoniques, elles-mêmes issues de l'analyse harmonique d'une série d'observations. Nous avons choisi l'ensemble de la période d'observations (de 1846 à nos jours) pour effectuer l'analyse harmonique.⁴

Les prédictions servent ainsi de référence à toute la série temporelle d'observations. La comparaison entre les prédictions et les observations a consisté à déterminer pour chaque année :

- l'écart moyen annuel entre hauteurs horaires observées et hauteurs horaires prédites ;
- l'écart moyen annuel en temps (calcul journalier des phases de l'espèce semi-diurne) ;
- l'écart-type annuel des écarts en hauteur ;
- l'écart-type annuel des écarts en temps.

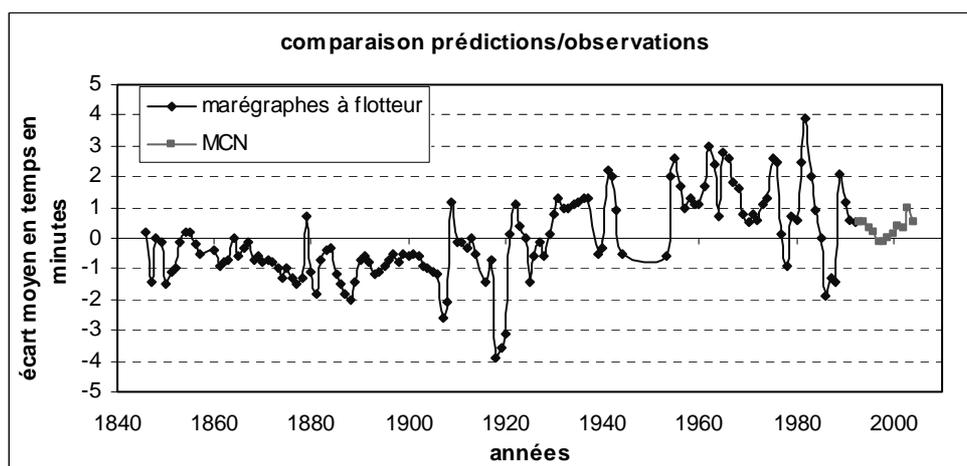
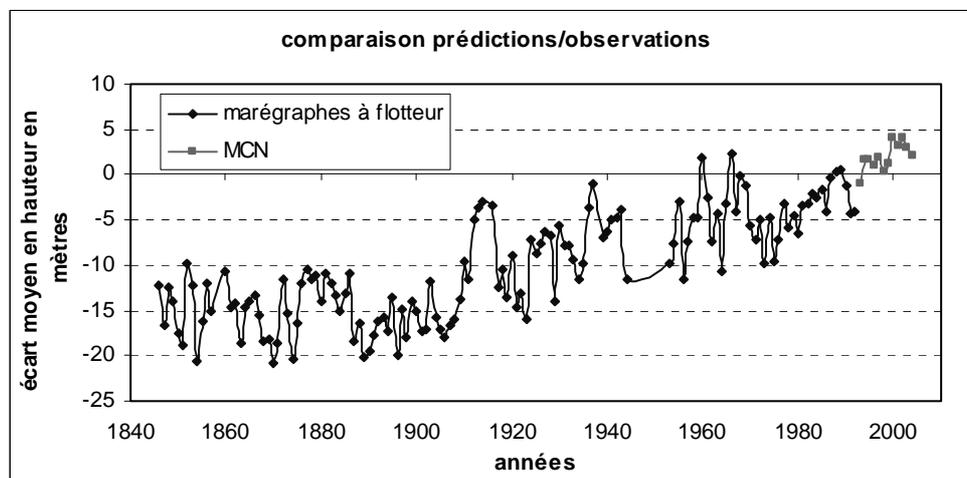
Les écarts moyens et écarts-types sont calculés sur un an afin de filtrer les effets météorologiques saisonniers qui pourraient apparaître. Il est vrai qu'une période plus courte (le trimestre ou le mois) pourrait permettre de mettre en évidence plus de défauts.

³ Des études plus poussées de la qualité des données historiques de Brest sont en cours.

⁴ Le choix de la période d'observation pour effectuer cette analyse n'a que peu d'incidence sur les résultats finaux (l'analyse harmonique de la série de 1846 jusqu'à 1944 et l'analyse harmonique de 1993 à 2005 (période des MCN) ont fourni des résultats sensiblement équivalents).

L'examen des écarts moyens n'apporte pas de renseignements significatifs quant à la qualité des mesures, il pourrait tout au plus mettre en évidence un défaut flagrant de calage d'un instrument à une époque donnée, ce qui n'est pas le cas.

La pente quasi linéaire des écarts moyens en hauteur (graphe ci-dessous) traduit l'évolution du niveau moyen au cours du temps (sans intérêt pour l'étude).



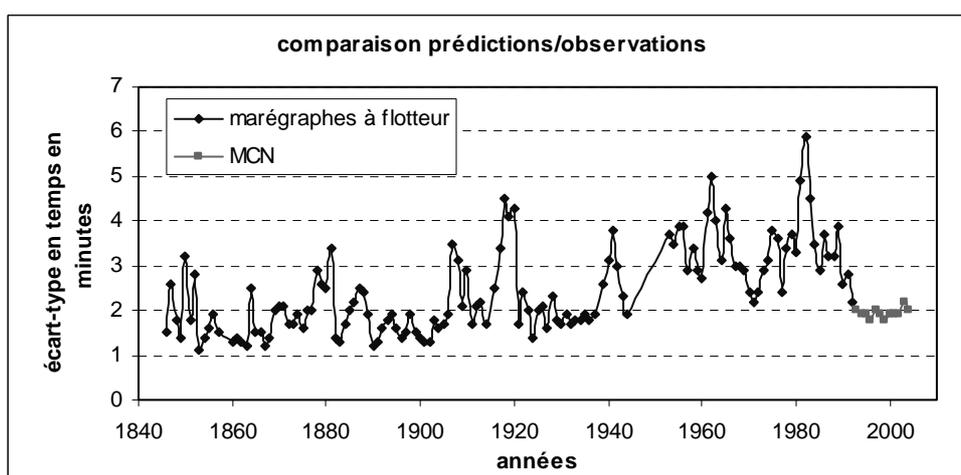
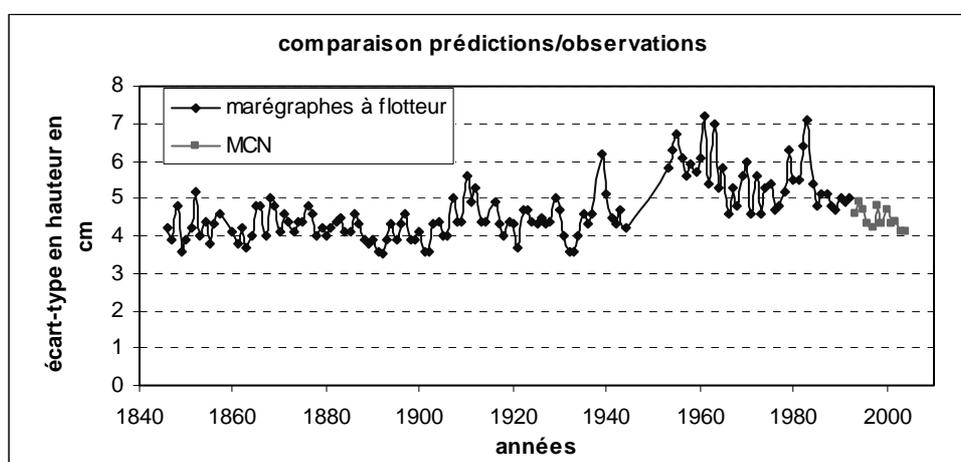
L'examen des écarts-types, représentés sur les graphiques suivants, donne plus d'indications. Pour permettre d'évaluer la qualité des mesures, les écarts d'origine météorologiques sont filtrés en adoptant le même niveau moyen journalier pour les prédictions et les observations. Il subsiste néanmoins dans la valeur de l'écart-type des résidus météorologiques à courte période. Par conséquent l'écart-type des écarts est révélateur :

- de défauts des observations ;
- d'écarts météorologiques de courte période, écarts qui devraient être relativement constants d'année en année ;
- dans une bien moindre mesure, de défauts de prédiction (celle-ci est très bonne puisque l'analyse harmonique est faite à partir de 150 années d'observations).

En l'absence de défauts des instruments de mesure, on obtiendrait donc une allure ayant la forme d'un bruit blanc, traduisant les écarts résiduels d'origine météorologique.

Les courbes suivantes représentent respectivement les écarts-types en hauteurs et les écarts-types en temps. Elles mettent en évidence :

- des écarts-types de l'ordre de 4 cm en hauteur et de l'ordre de 2 minutes en temps du début de la série jusqu'à 1944, ces écarts demeurant assez constants tout au long de la période. Cependant, on constate une dispersion relativement importante, surtout pour les écarts-types en temps qui montrent des fluctuations de 2 voire 3 minutes selon les années ; ces fluctuations traduisent des irrégularités dans le suivi des marégraphes ; l'examen des données a ainsi révélé la très mauvaise qualité de certains marégrammes ;
- une dégradation très nette et chronique des écarts-types à partir de 1953 jusque dans les années 1970 ; cette période de remise à niveau est en effet marquée par des difficultés à renouer avec l'expérience du passé, des changements intempestifs de responsabilités pour la gestion du marégraphe ;
- un retour à la normale à partir des années 1980 avec des écarts-types ne dépassant pas 5 cm en hauteur et 2 minutes en temps ; depuis l'arrivée des MCN en 1993, les écarts-types en hauteurs tendent à décroître progressivement et les écarts-types en temps restent constants d'année en année, ce qui montre dans une certaine mesure la stabilité (absence de dérive) des MCN dans le temps (à confirmer sur le long terme).



Ces courbes mériteraient des études plus approfondies. Toutefois, les comparaisons prédictions / observations permettent ainsi de dresser rapidement un état des lieux de la qualité des observations au cours des années.

6 CONCLUSION

La méthode du test de Van De Casteele (VDC) est une méthode efficace pour détecter des erreurs des instruments de mesure, et en particulier les erreurs systématiques. Il est important de pouvoir en effet détecter et corriger toute erreur systématique, c'est-à-dire des erreurs qui se produisent toujours dans les mêmes conditions (par exemple, des écarts plus importants à basse mer qu'à pleine mer, une dérive de l'horloge, l'influence des conditions météo, l'influence des conditions hydrologiques ...). L'analyse harmonique des signaux de marée est très sensible à ces erreurs et celles-ci se retrouvent dans les prédictions. Par contre elle est peu sensible aux erreurs aléatoires, même si elles sont importantes.

Il faudrait aussi évaluer la dérive des télémètres. La dérive n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique. Seuls les contrôles semestriels à la sonde lumineuse et les comparaisons avec les prédictions permettent, à l'heure actuelle, de se faire une idée et n'indiquent pas de dérive significative. Estimer la dérive d'un capteur est difficile : elle est difficilement modélisable car elle diffère d'un capteur à l'autre et dépend de son histoire ; l'estimation de la dérive suppose que le télémètre fonctionne pendant une longue durée or des changements de télémètres peuvent intervenir en cas de panne. Elle n'affecte pas en pratique les mesures d'amplitude, mais elle est très gênante pour l'étude de l'évolution du niveau moyen.

Ces tests ont ainsi permis d'aboutir aux résultats suivants :

- la conformité des performances des télémètres radar avec les applications du SHOM en matière d'observation et d'analyse du niveau de la mer ;
- la conformité des performances des télémètres radar avec les recommandations du programme GLOSS ;
- la confirmation de la supériorité des télémètres radar sur les télémètres acoustiques, justifiant le remplacement progressif de ces derniers par les télémètres radar sur l'ensemble du réseau ;
- la nécessité de choisir un dispositif de tranquillisation adapté au télémètre pour ne pas dégrader les performances de ce dernier ;
- l'intérêt de l'étalon constitué de l'association [sonde lumineuse/opérateur] comme moyen de contrôle des marégraphes.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Guy Woppelmann, maître de conférences à l'université de La Rochelle, pour sa participation à la plupart des expériences menées sur le terrain, dont il était souvent l'instigateur. M. Woppelmann est chercheur au Centre Littoral de Géophysique (Université de La Rochelle) et travaille sur le thème de la surveillance géodésique des marégraphes et l'évolution du niveau des mers.

Je remercie Pascal Tiphaneau, technicien à l'Université de La Rochelle, qui a participé avec l'équipe de projet RONIM, à de nombreuses expériences sur le terrain, effectué de nombreux rattachements géodésiques et mis en forme les résultats.

Cette étude a également pu être menée grâce à la collaboration de l'ensemble de l'équipe de projet RONIM du SHOM.

7 ANNEXES

7.1 INCERTITUDE DES SONDES LUMINEUSES

La sonde lumineuse est un décamètre ruban au bout duquel est fixée une sonde. Ce ruban est enroulé sur un touret. On se place sur un repère nivelé au bord du quai. Le ruban est déroulé le long du quai. Lorsque la sonde est en contact avec l'eau, une ampoule s'allume ou une sonnerie retentit sur le touret. On lit alors la graduation sur le ruban.

7.1.1 La sonde OTT

Le type de sonde lumineuse couramment utilisé au SHOM est une sonde de type OTT.



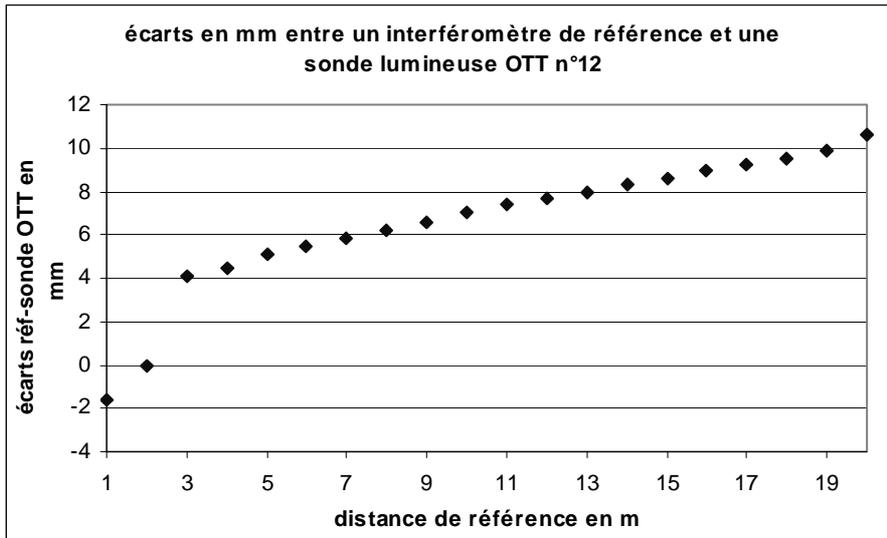
Sonde lumineuse OTT

La précision de la sonde lumineuse OTT est donnée par le constructeur pour 0,1 %, soit 1 cm pour 10 m.

Un exemplaire de ce type de sonde a été envoyé le 13 mai 2005 au laboratoire de métrologie de l'école des Mines de Douai pour être calibré (cf. rapport d'étalonnage n° GL0505059). L'étalonnage a consisté en une comparaison de la sonde avec un interféromètre à comptage de franges à source laser Hewlett-Packard n°3020 A 03026. L'étalonnage a été réalisé dans des conditions normales de pression et de température.⁵

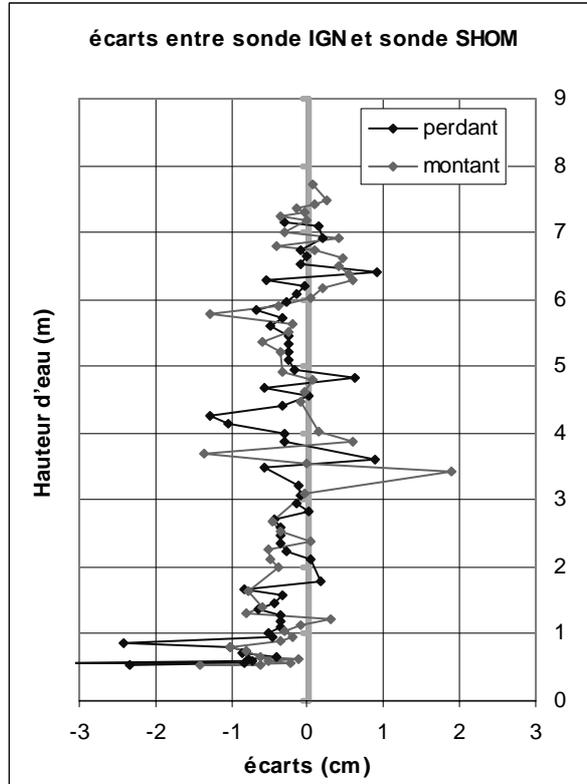
Le résultat de l'étalonnage est illustré sur le graphe suivant.

⁵ Il n'y a pas eu d'évaluation de l'erreur de la sonde en fonction de la température. Cette erreur n'est peut-être pas négligeable et il conviendrait, en prévision de futurs étalonnages, d'évaluer la dilatation linéaire des sondes lumineuses (constituées pour partie de métal et pour partie de matériau plastique). A l'heure actuelle, nous n'avons aucune information sur ce point.



L'erreur atteint 1 cm à 20 mètres pour une température normale, ce qui est mieux que l'incertitude annoncée par le constructeur.

D'autre part, la sonde lumineuse en invar prêtée par l'IGN lors du test de VDC d'avril 2003, considérée comme un bon étalon en raison de l'absence de dilatation de son ruban en invar a permis de mettre en évidence les bonnes performances de la sonde lumineuse OTT, comme l'indique le diagramme de VDC suivant (les mesures aberrantes sont imputables à la sonde IGN, difficile à mettre en œuvre).



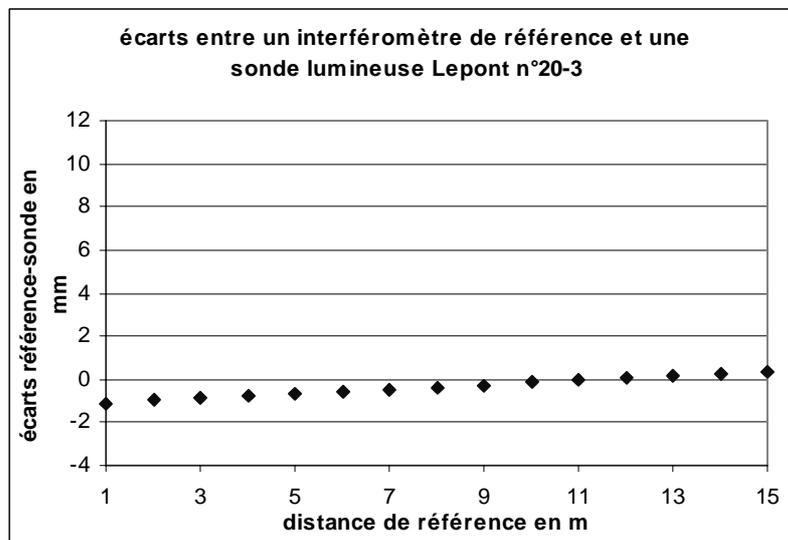
Courbe de VDC : Brest, le 17 avril 2003

L'écart moyen entre les 2 instruments était de 0,09 cm et l'écart-type de 0,57 cm. Le diagramme de VDC précédent ne montre pas de dilatation particulière du ruban de la sonde lumineuse OTT mais il faut préciser que la température lors de ces mesures (une vingtaine de degrés) était proche de celle qui régnait lors de la calibration à l'école des Mines de Douai.

7.1.2 La sonde Lepont

Un autre type de sonde lumineuse, la sonde Lepont, en très petite quantité au SHOM et donc peu utilisée, a également subi un étalonnage le 13 mai 2005 au laboratoire de métrologie de l'école des Mines de Douai (cf. rapport d'étalonnage n° GL0505060). L'étalonnage a consisté en une comparaison de la sonde avec un interféromètre à comptage de franges à source laser Hewlett-Packard n°3020 A 03026. L'étalonnage a été réalisé dans des conditions normales de pression et de température. Il n'y a pas eu d'évaluation de l'erreur de la sonde en fonction de la température.

Les résultats de la comparaison sont illustrés sur la courbe suivante.



L'erreur maximum est de 1 mm, ce qui est excellent. Ce type de sonde devrait se généraliser à l'avenir, notamment pour l'étalonnage des MCN.

7.2 INCERTITUDE DE L'ECHELLE DE MAREE

L'échelle de marée est une mire graduée en bois ou en plastique, placée verticalement le long d'un quai ou d'un échafaudage ou selon la plus grande pente du quai s'il présente du fruit. La graduation est formée de deux bandes de carreaux de dix centimètres de côté, alternativement rouges et noirs.

Le niveau de l'eau est lu au centimètre près en interpolant à vue dans le carreau et en moyennant sur quelques secondes. S'il y a de la houle, on moyenne à vue sur dix à vingt secondes. S'il y a du clapot, on moyenne sur cinq à dix secondes.

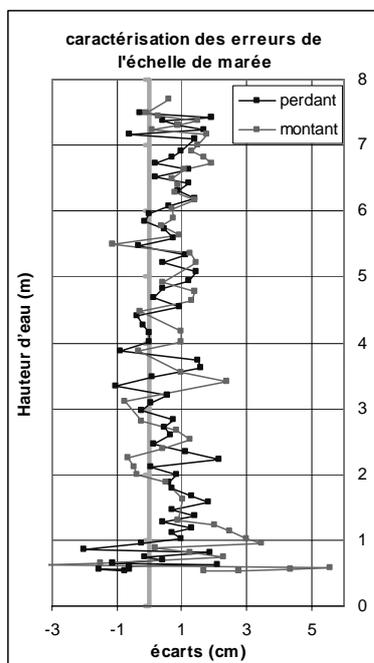
Les tests de comparaison réalisés soulignent les bonnes performances de l'échelle de marée. Cet instrument de lecture directe des hauteurs d'eau, qui pourrait paraître trop grossier pour de telles comparaisons, permet au contraire des lectures aisées. En effet, l'interpolation à vue entre les carreaux de l'échelle est facile, d'autant plus que les graduations sont moins détaillées : une échelle formée de carreaux de 10 cm est plus facile à lire qu'une échelle de marée formée de graduations plus resserrées (tous les cm par exemple).

Les 3 graphes suivants représentent les diagrammes de VDC des échelles de marée de Brest (à gauche), Le Conquet (au milieu) et Roscoff (à droite). La référence des hauteurs est la sonde du SHOM mise en œuvre à l'intérieur du puits ou tube de tranquillisation. Les conditions de mer étaient différentes pour chacun des tests.

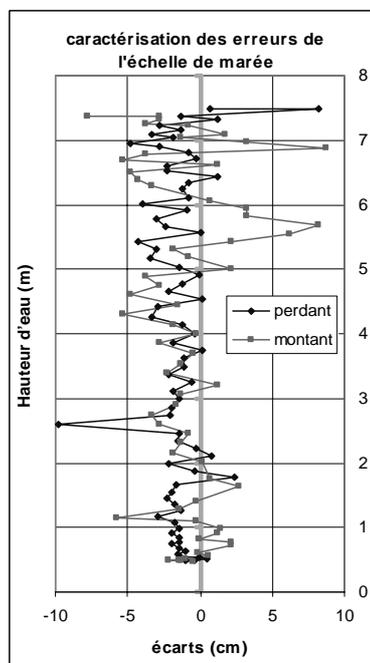
A Brest, les mesures ont été effectuées par beau temps, la surface de la mer était tranquille tout au long de l'expérience. Le graphe montre une faible dispersion des points autour de la moyenne (écart-type des écarts égal à 1,3 cm pour une moyenne des écarts de 0,7 cm).

Au Conquet, la mer était également calme sauf lors des 2 pleines mers (hauteur d'eau supérieure à 7m) périodes pendant lesquelles se manifestait un clapot d'une trentaine de centimètres, rendant l'interpolation à vue difficile et imprécise, et donc des erreurs de lecture plus importantes. Ainsi le graphe du milieu fait apparaître une dispersion des écarts plus grande en haut de la courbe. L'écart-type des erreurs de l'échelle atteint 2,5 cm.

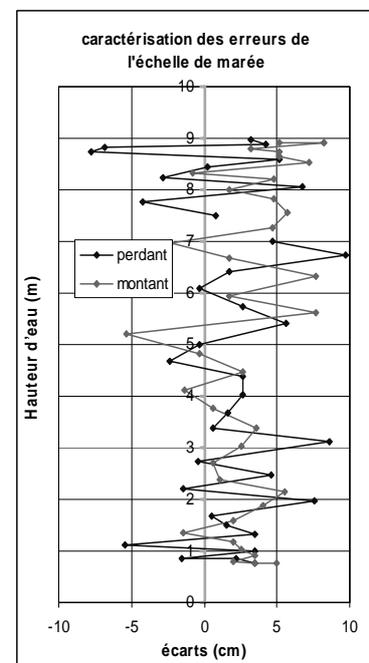
Le test de Roscoff a été réalisé par condition de mer agitée, avec un clapot d'une trentaine de centimètres, constant pendant toute l'expérience. La dispersion des mesures (écart-type des écarts égal à 3 cm) est visible sur le graphe.



Brest, 17 avril 2003



Le Conquet, 18 avril 2003



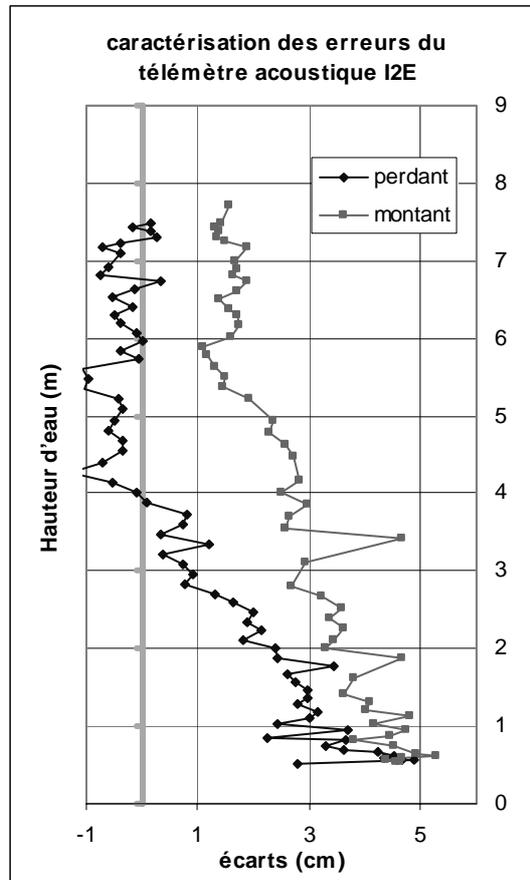
Roscoff, 9 février 2005

7.3 INCERTITUDE DU TELEMETRE ACOUSTIQUE

L'objet de cette étude n'est pas de caractériser les défauts du télémètre acoustique. Ce paragraphe décrit toutefois les performances du télémètre acoustique BEN I2E, utilisé comme instrument de mesure de 1993 à 2003 dans l'observatoire de Brest-Penfeld. Elle montre l'influence non négligeable du gradient de température sur ces appareils, pouvant causer des erreurs systématiques pouvant atteindre 7 cm à basse mer. La mise en œuvre d'un procédé de correction de ces erreurs, proposé par le rapport d'étude en référence [7] est à l'étude. Le télémètre acoustique de Brest-Penfeld a été remplacé en 2004 par un télémètre radar de type Krohne BM100, jugé plus exact.

Les performances du télémètre acoustique ont déjà fait l'objet du rapport d'étude en référence [4].

Le test de VDC effectué le 17 avril 2003, par grand beau temps et coefficient de marée de 117, met en évidence un systématisme des erreurs du télémètre acoustique, qu'illustre le diagramme de VDC suivant.



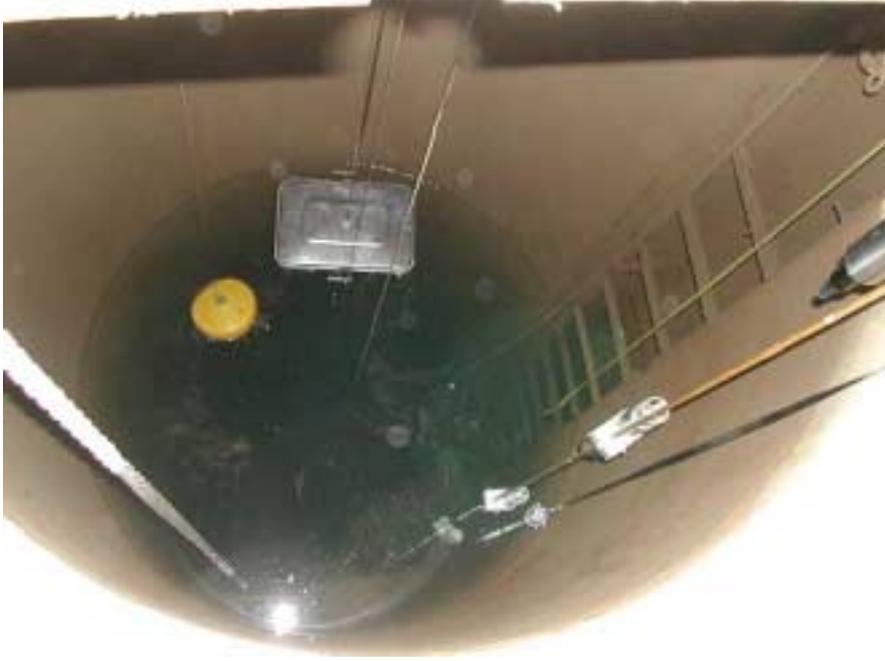
Courbe de VDC : Brest le 17 avril 2003

La figure illustre les défauts suivants :

- une erreur d'échelle (pente des écarts)
- une hystérésis : la courbe des écarts au montant est différente de la courbe des écarts au perdant
- des erreurs non centrées
- un écart moyen des mesures de 2,3 cm
- un écart-type des écarts de 1,9 cm
- une erreur maximum individuelle de 5,9 cm

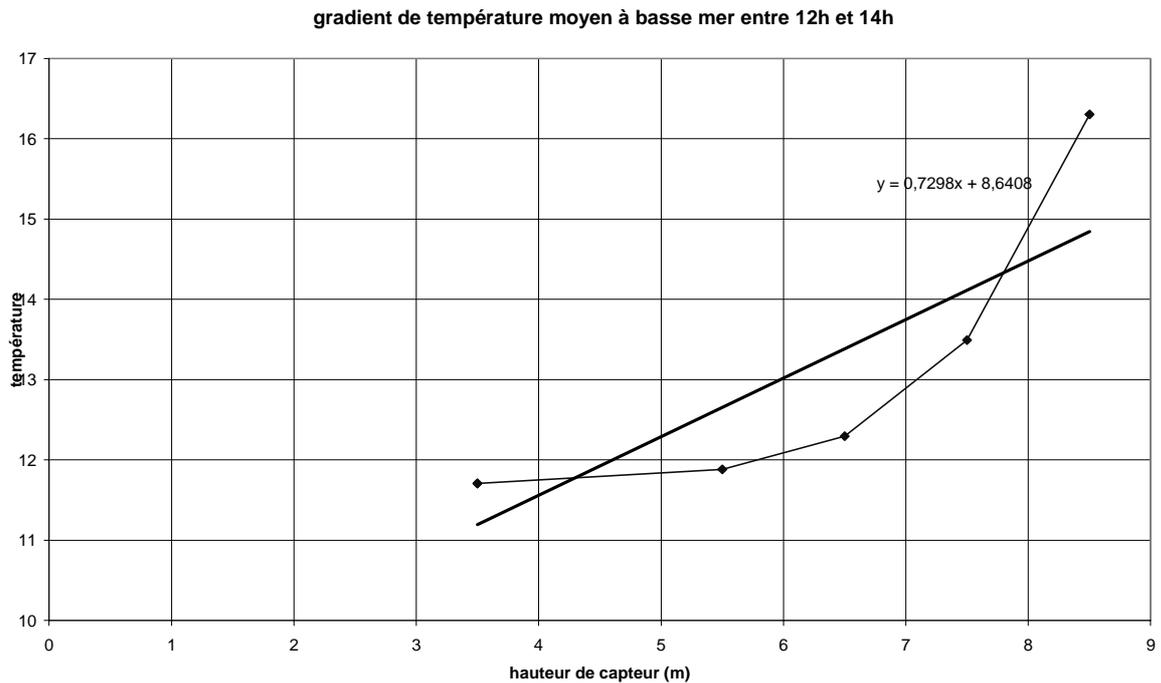
L'exigence du programme GLOSS de disposer à tout moment et quelques soient les conditions de mesures individuelles précises à mieux que 1 centimètre n'est pas respectée.

La pente des écarts s'explique par le gradient de température important qui régnait dans le puits lors de l'expérience. Ce gradient de température a été mesuré grâce à une chaîne de thermistances déployées le long du puits, comme le montre la photo suivante.



Chaîne de thermistance installée le long du puits de Brest-Penfeld le 17 avril 2003.

Le gradient de température dans le puits du marégraphe est illustré sur le graphe suivant.



L'hystérésis des écarts s'explique probablement par l'augmentation de la température au cours de la journée dans le puits.

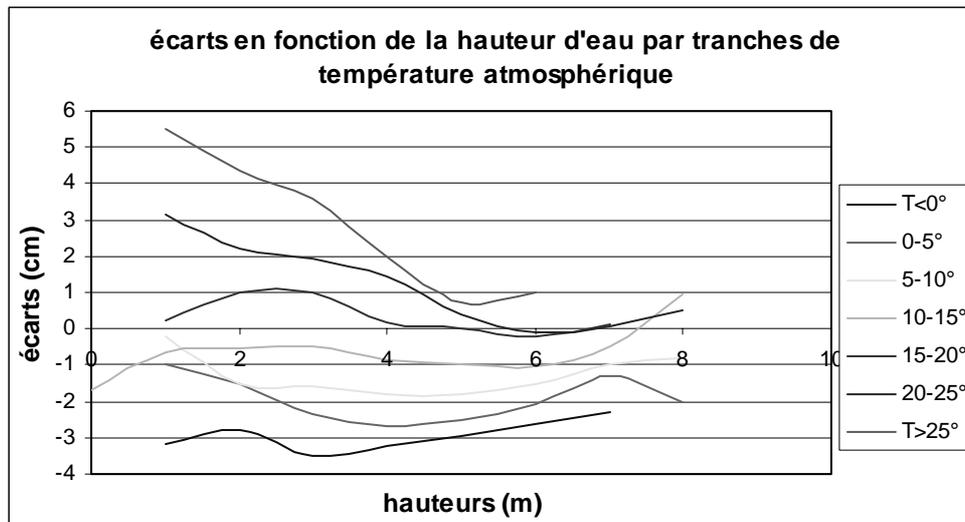
On en conclut que la fermeture du puits, censée homogénéiser la température (selon le rapport en référence [4]), ne produit pas l'effet escompté. La sonde de température située au niveau du télémètre et destinée à compenser la mesure en température présente l'inconvénient de ne

mesurer la température qu'à un seul niveau, elle ne permet pas de corriger la mesure de l'effet du gradient vertical de température.

Le rapport d'étude en référence [6] avait également mis en évidence l'erreur induite par l'évolution diurne de la température sur les télémètres acoustiques des marégraphes de Nice et Monaco.

L'influence de la température sur les erreurs du télémètre acoustique est confirmée par les relevés de température atmosphérique fournis par la station météorologique de Guipavas en 2003. Ces relevés ont permis d'établir une corrélation forte entre la température ambiante et les écarts entre le télémètre radar et le télémètre acoustique.

Le graphe suivant indique, pour des tranches de température différentes, la relation entre la hauteur d'eau et l'écart entre le télémètre radar et le télémètre I2E.



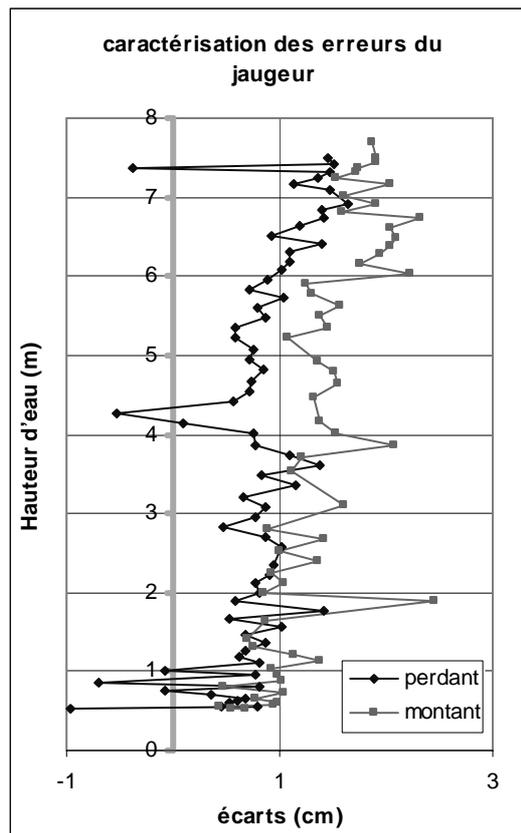
On constate bien que plus la température atmosphérique est élevée, plus les écarts vers les basses mers sont importants. Les écarts les plus importants, situés entre 5 et 6 cm, sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus lors du test de VDC du 17 avril 2003.

7.4 INCERTITUDE DU JAUGEUR WHESOE

Le jaugeur Whessoe, installé dans le puits du marégraphe de Penfeld, est un instrument équipé d'un flotteur et d'une roue compteuse qui permet de lire la hauteur d'eau.



Les performances du jaugeur sont illustrées sur le graphe suivant.



Courbe de VDC : Brest, le 17 avril 2003

On remarque une légère hystérésis entre le perdant et le montant, qui s'explique très vraisemblablement par l'erreur de lecture, celle-ci étant rendue difficile par l'oscillation du compteur qui amplifie l'effet du léger clapot dans le puits. Par ailleurs, on ne remarque pas de pente significative. A noter l'écart moyen de 1,45 cm traduisant un défaut de calage du jaugeur.