

Alain Coulomb

Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille



DIFFUSION OUVERTE

IT/G 276
N° archive 28.220
Date de création 01/04/2003
N° de version 3
Date de mise à jour 15/06/2014

Mots-clé

Test de Van de Casteele ; étalonnage ; nivellement ; RGP

Résumé

Ce document a pour objet de décrire les opérations de contrôle des appareils de mesure du niveau de la mer de l'observatoire marégraphique de Marseille ; de l'organisation des opérations d'étalonnage jusqu'au traitement et à l'analyse des observations.

Matériel

Système d'exploitation	Logiciel
Windows 7 professionnel SP1	Word 2010

Validation

	Fonction	Nom	Visa
Commanditaire	Chef de département	Alain Coulomb	03/06/2014 – signé
Rédacteur principal	Chef de département	Alain Coulomb	03/06/2014 – signé
Lecteur	Technicien d'études	Thomas Donal	18/07/2014 – signé
Approbateur	Chef de service	Thierry Person	11/08/2014 – signé
Vérificateur	Responsable qualité	Thierry Person	11/08/2014 – signé

Modifications par rapport à l'édition précédente

Page	Modification
7	Ajout d'un glossaire
7	Référence à la convention Sonel en cours de signature
	Mises à jour diverses

Diffusion

Organisme / Service	Fonction / Nom	Numérique	Papier
IGN / DPR	Directeur / Philippe Gerbe	oui	-
IGN / DPR	Directeur adjoint / Didier Moisset	oui	-
IGN / DPC / SP / CKP	Chargé MO géodésie / François Becirspahic	oui	-
IGN / DRE / SMG / EKG	Chef du CDoS / Anne Berry	oui	-
IGN / DRE / SRIG / LAREG	Chef de laboratoire / Olivier Jamet	oui	-
IGN / DRE / DE / DPTS	Chef de département / Serge Botton	oui	-
IGN / DPR / SGN	Chef de service / Alain Harmel	oui	-
IGN / DPR / SGN	Resp. qualité / Thierry Person	oui	-
IGN / DPR / SGN / PMC	Resp. documentation / Xavier della Chiesa	non	3
IGN / DPR / SGN / PMT	Resp. produits / François L'Ecu	oui	-
IGN / DPR / SGN	Chefs de départements	oui	-
IGN / DPR / SGN / PMR	Rédacteur / Alain Coulomb	non	4

Sommaire

1.	Objet du document	7
2.	Glossaire.....	7
3.	Présentation de l'observatoire marégraphique de Marseille	8
3.1.	Bref historique	8
3.2.	Un observatoire moderne	9
3.3.	Le MCN à capteur radar.....	11
3.4.	Configuration des lieux.....	12
4.	Les contrôles	13
4.1.	Objectif des contrôles.....	13
4.2.	Quels contrôles ?.....	14
4.3.	Assurer la cohérence de la série temporelle.....	14
5.	Etalonnage de marégraphe	15
5.1.	Principe de l'étalonnage.....	15
5.2.	Test de Van de Casteele	16
5.3.	Choix de la date d'une opération d'étalonnage.....	17
6.	Moyens matériels et humains	18
6.1.	Liste et description du matériel	18
6.1.1.	Matériel d'étalonnage.....	18
6.1.2.	Matériel de nivellement.....	19
6.1.3.	Matériel pour le nivellement extérieur	20
6.2.	Vérifications et réglages avant départ	20
6.2.1.	Matériel technique de PMR.....	20
6.2.2.	Marégraphe numérique.....	21
6.3.	Personnel nécessaire	22
6.4.	Contacts.....	22

7.	Mise en place.....	22
7.1.	Installation du sondeur	22
7.2.	Installation des niveaux.....	24
7.3.	Installation du ruban invar pour « remonter » le nivellement	25
8.	Acquisition des mesures.....	26
8.1.	Hauteurs d'eau	26
8.2.	Altitude du zéro du curseur porte-ruban	29
8.3.	Opérations de nivellement	30
8.3.1.	Mise en œuvre des spécifications d'usage.....	30
8.3.2.	Observation des repères implantés dans la crypte	30
8.3.3.	« Remontée » du nivellement	31
8.4.	Nivellement de l'antenne GNSS	32
8.4.1.	Autres nivellements.....	33
9.	Exploitation des données.....	34
9.1.	Détermination de la hauteur d'index de la sonde.....	34
9.2.	Construction et interprétation du diagramme de Van de Casteele	34
9.3.	Détermination de la constante de calage.....	35
9.4.	Etalonnage interne (appareils)	35
9.5.	Etalonnage externe (puits, chenal)	36
10.	Rapports de missions.....	36
11.	Visites hebdomadaires réalisées par le CIR d'Aix	37
11.1.	Mesures hebdomadaires	37
11.2.	Mesures mensuelles.....	37
11.3.	Calculs	38
11.4.	Surveillance	38
11.5.	Maintenance	39
12.	Conclusions.....	39

13.	Références.....	40
14.	Annexe A : formules et constantes de calage depuis 1993	41
15.	Annexe B : mode opératoire pour la « remontée du nivellement »	43
16.	Annexe C : exemple de calcul pour la « remontée du nivellement »	44
17.	Annexe D : lectures sur le disque mobile et sur les roulettes totalisatrices.....	45
18.	Annexe E : mesures mensuelles à la sonde	46
19.	Annexe F : exemple de diagrammes de Van de Casteele.....	48

1. Objet du document

Ce document décrit les opérations de contrôle des appareils de mesure du niveau de la mer de l'observatoire marégraphique de Marseille, de l'organisation des opérations d'étalonnage jusqu'au traitement et à l'analyse des observations. Il précise également les travaux à réaliser entre les opérations d'étalonnage ainsi que les documents à établir.

Il constitue une troisième version d'une notice validée en février 2009, à l'écriture duquel avaient participé quatre autres rédacteurs : **Guy Wöppelmann et Pascal Tiphaneau**, de l'université de La Rochelle, **Paul Bonnetain**, ancien chef du département des réseaux de nivellement de l'IGN, et **Franck Vergne**, agent IGN d'Aix-en-Provence. **Cette nouvelle version doit encore beaucoup à leur travail originel.**

2. Glossaire

Marégramme : diagramme figurant les mouvements de la mer sur une période donnée, ou, exprimé différemment, courbe de la hauteur d'eau en fonction du temps.

Marégraphe : appareil d'enregistrement du niveau de la mer. Un marégraphe permet localement l'étude de la marée, des variations du niveau de la mer et la détermination du niveau moyen sur une période donnée.

Marégraphie : le terme se rapporte à la description du phénomène de marée et aux instruments qui, par leurs mesures, en permettent une meilleure connaissance.

REFMAR : le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) est le référent national pour le niveau de la mer in situ sur l'ensemble des zones sous juridiction française. À ce titre, il assure à travers le portail REFMAR différentes fonctions de coordination en matière de collecte et de diffusion des données publiques relatives à l'observation de hauteurs d'eau, de manière à promouvoir leur utilisation dans de multiples applications dans le cadre des recommandations internationales.

SONEL : le Système d'observation du niveau des eaux littorales (SONEL) regroupe l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), le Laboratoire littoral environnement et sociétés (LIENSs) rattaché au CNRS et à l'université de la Rochelle, le Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale (LEGOS), rattaché au CNRS et à l'université Toulouse III et le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM).

Le contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille s'inscrit dans le cadre de la convention de collaboration inter-organismes SONEL.

3. Présentation de l'observatoire marégraphique de Marseille

3.1. Bref historique

L'observatoire du niveau de la mer de Marseille fut construit en 1883-1884 à la demande du Comité du Nivellement Général de la France dans le but de déterminer le niveau moyen de la mer et par suite de fixer l'origine des altitudes sur le territoire français continental. Cette origine devait approcher au mieux le *géoïde*, surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre coïncidant en moyenne avec le niveau des mers. Le plus grand soin fut apporté pour mesurer le niveau marin et atteindre cet objectif. Tout d'abord, en choisissant un site peu influencé par les marées, à l'abri de tout apport notable d'eau douce. Ensuite, en construisant un observatoire solidement ancré sur le socle rocheux. Enfin, en imaginant un appareil de mesure original dont les qualités métrologiques rivalisent encore aujourd'hui avec celles des appareils les plus modernes.

Cet observatoire est situé à Marseille, près de l'Anse Calvo, 174 boulevard Kennedy, sur la promenade de la Corniche. Il est constitué de deux bâtiments : l'un abrite les instruments de mesure, l'autre est l'ancien logement du gardien chargé de son entretien et des relevés. Le dernier gardien s'est retiré en 1988.

Le plus ancien instrument de l'observatoire est un marégraphe exceptionnel à plusieurs titres. Il s'agit à première vue d'un appareil classique : un marégraphe mécanique à flotteur. Il est toutefois équipé d'un dispositif original de planimètre totalisateur. Cet instrument fût construit à Altona, en Allemagne, en prenant en compte les exigences formulées par Charles Lallemand (1857-1938), alors Secrétaire du Comité du Nivellement général de la France. Seuls deux autres appareils de ce type de marégraphe totalisateur ont existé en Europe, l'un à Cadix, en Espagne, et l'autre sur l'île d'Helgoland, en Allemagne.

Fig. 1 : le marégraphe totalisateur photographié en 1930



Le totalisateur est un dispositif ingénieux qui facilite le calcul du niveau moyen de la mer en faisant mécaniquement la somme des valeurs partielles de cette grandeur, enregistrée en continu. Autrement dit, il intègre les valeurs instantanées du niveau de la mer en fonction du temps [4].

Les observations du niveau moyen de la mer réalisées entre le 3 février 1885 et le 31 décembre 1896 (inclus) ont servi à fixer l'origine du réseau de nivellement français continental (l'altitude 0). Le marégraphe a pourtant continué à fonctionner au-delà de son objectif premier, avec un intérêt variable au cours des décennies, d'abord de la part du service du Nivellement Général de la France, puis de l'IGN.

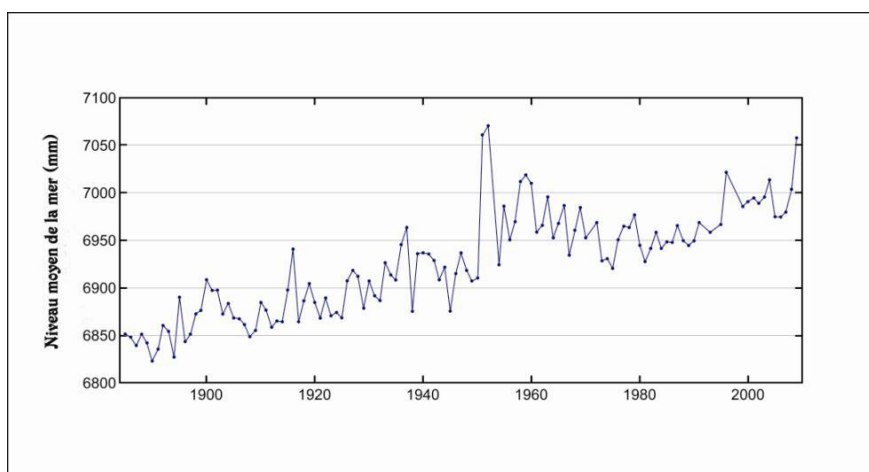
3.2. Un observatoire moderne

Aujourd'hui, l'intérêt de la marégraphie dépasse largement les seules applications de prédiction de la marée ou de l'établissement des origines des systèmes d'altitude. L'exploitation des données marégraphiques intéresse des applications aussi variées que :

- l'évaluation et la validation des résultats d'altimétrie spatiale ;
- l'estimation et la surveillance des variations climatiques du niveau marin ;
- l'étude des références verticales et leurs relations ;
- l'étude statistique des niveaux extrêmes et la mise au point de modèles prédictifs des surcotes et décotes ;
- etc.

Ces études ont parfois des applications pratiques non négligeables, par exemple, la délimitation du domaine public maritime, ou encore, la détermination des périodes de retour des surcotes liées aux ondes de tempêtes. Ces dernières sont très utiles pour l'aménagement du littoral.

Fig. 2 : série chronologique des moyennes annuelles du totalisateur de Marseille.



L'intérêt du marégraphe de Marseille est étroitement lié à la longueur exceptionnelle de son enregistrement. Ainsi, l'exploration de la très large gamme spectrale des signaux océaniques, de quelques minutes au siècle, est possible. Cette caractéristique n'a pas échappé aux océanographes de la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO (COI/IOC) réunis autour du programme mondial GLOSS ¹. Depuis 1985, Marseille contribue au réseau mondial de marégraphes GLOSS, portant l'identifiant No. 205. Les valeurs mensuelles et annuelles mesurées à Marseille sont envoyées tous les ans au Service permanent du niveau moyen de la mer, le PSMSL ².

Sous l'impulsion d'une recommandation du CNFGG ³ émise lors de son assemblée générale de 1996, l'IGN a entrepris des actions concrètes visant à remettre à niveau l'observatoire marégraphe de Marseille et à valoriser ce patrimoine historique et scientifique. Mentionnons :

- la numérisation des marégrammes enregistrés entre 1885 et 1987, avec les soutiens du ministère de l'Environnement et du SHOM (1996 à 2001). Ces données horaires numérisées sont disponibles sur le site internet de SONEL. Des fichiers de niveaux moyens se trouvent aussi copiés sur ce site ;

- l'acquisition d'un premier marégraphe moderne numérique à capteur ultrasons (1998). Ce Marégraphe Côtier Numérique (MCN), a été installé et est géré avec le concours du SHOM ;

- l'installation d'une station GPS permanente (1998) ;
- l'installation d'une échelle de marée par le SHOM (2001) ;

Fig. 3 : échelle de marée à l'entrée de la galerie de communication du puits avec la mer.



- le classement de l'observatoire parmi les monuments historiques (2002) ;

- la rénovation compète des bâtiments (2006-2007) ;

- la modernisation de la station GNSS permanente qui reçoit depuis 2008 les données des deux constellations GPS et GLONASS ;

- le remplacement du MCN à capteur à ultrasons par un MCN à capteur radar (avril 2009) et la signature du contrat n°151/2008 – SHOM / IGN ayant pour objet de formaliser les conditions de ce

¹ Global sea-level observing system: <http://www.gloss-sealevel.org/>

² Permanent service for mean sea level: <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>

³ Comité national français de géodésie et de géophysique

remplacement. Ce contrat est établi dans le cadre d'une convention de coopération entre l'IGN et le SHOM, qui couvre, depuis 2000, les domaines d'activité d'intérêt commun en géodésie et en marégraphie (convention n°269 SHOM/EG/NP du 22 mai 2000). Il assure une expertise optimale en termes d'entretien, de maintenance, de métrologie et de contrôle qualité de l'observatoire de Marseille, mais aussi dans l'exploitation de ses mesures et dans la diffusion des résultats.

3.3. Le MCN à capteur radar

L'installation relative au MCN est constituée de trois parties :

- l'infrastructure, qui comprend : un coffret mural pour l'hébergement de la centrale et du télémètre, raccordé aux réseaux électrique et téléphonique et implanté dans le bureau de l'ancien gardien du marégraphe, au rez-de-chaussée du bâtiment ; un coffret d'alimentation et une batterie, installés non loin du coffret ci-dessus.

Figure 4 : coffrets muraux du MCN



- le marégraphe côtier numérique qui comprend un télémètre à émission radar et une centrale d'acquisition numérique. La centrale est alimentée électriquement et est connectée au réseau téléphonique.



Elle est exploitable par voie téléphonique à l'aide de logiciels pour micro-ordinateurs. La mise en place de la centrale a pour but de recueillir les mesures de hauteur de niveau de la mer à une période d'échantillonnage inférieure ou égale à 10 minutes. Son fonctionnement est permanent. La précision des mesures attendue est meilleure que 2 cm à 99,5 %.

Figure 5 : télémètre à émission radar

- le système de transmission temps réel des données. Les données, disponibles à la cadence du capteur (une seconde), sont transmises en temps réel au SHOM et à l'IGN.

3.4. Configuration des lieux

L'observatoire est situé dans le septième arrondissement de Marseille, dans l'Anse Calvo, au n°174 boulevard Kennedy, sur la promenade de la Corniche. Il est constitué de deux bâtiments : l'un abrite les instruments de mesure, l'autre est l'ancien logement du gardien chargé de son entretien et des relevés. Le dernier gardien s'est retiré en 1988.

Le bâtiment qui abrite les instruments de mesure, construit sur deux niveaux, est implanté au centre d'une cour, en contrebas de la Corniche.

Le rez-de-chaussée de l'édifice comprend deux pièces : la première (bureau de l'ancien gardien) héberge notamment les coffrets muraux du MCN (voir figure 4) et le récepteur de la station GNSS permanente ; la seconde abrite le marégraphe totalisateur (voir figure 1).

La chambre souterraine, accessible par un étroit escalier en colimaçon, est ouverte sur la partie inférieure du puits (voir figure 6), où sont réalisées certaines des mesures de contrôle des marégraphes.

Figure 6 : puits du marégraphe de Marseille photographié lors du test de Van de Casteele de mars 2014.



Ce puits est en communication avec la mer au moyen d'une galerie souterraine d'environ 8 mètres de longueur. Cet élément, primordial dans le fonctionnement d'un marégraphe mécanique, doit permettre de mettre à l'abri des intempéries les appareils de mesure et de filtrer les fluctuations du niveau de l'eau liées aux vagues et à la houle, afin d'obtenir dans le puits une surface horizontale dont l'altitude est identique à celle du niveau extérieur moyennée sur un laps de temps donné. Il faut à la fois que les variations lentes du niveau de la mer se transmettent sans retard jusqu'au puits et que les changements rapides dus aux mouvements des vagues n'y soient pas sensibles. Il y a là un équilibre difficile à trouver.

La galerie du Marégraphe de Marseille est arasée au même niveau que celui du culot du puits, c'est-à-dire à soixante centimètres au-dessous du niveau de la basse mer. Sa section permet d'en opérer relativement aisément le nettoyage (possibilité de passage d'un homme).

On communique du puits à la galerie au moyen d'une porte en bronze (voir figure 6 et 7), et c'est par l'intérieur du bâtiment du marégraphe que peut être assurée le plus aisément une visite de la galerie. Cette

porte est percée, dans sa partie inférieure, d'une série de trous que l'on ferme à volonté au moyen d'une vanne se manœuvrant de l'intérieur du puits.

A cinq mètres soixante de la porte en bronze, est hérissée une cloison maçonnée, percée à sa partie inférieure de quatre barbacanes et à sa partie supérieure d'un trou permettant le passage d'un homme. Cet ouvrage rend le nettoyage de la galerie assez difficile en supprimant la possibilité de chasses vers l'extérieur.

A l'autre extrémité du chenal, la galerie est fermée par une porte dont la partie supérieure est maçonnée et dont la partie inférieure comprend une partie métallique amovible permettant le passage d'un homme (voir figure 3).



Figure 7 : la galerie du marégraphe de Marseille et la porte en bronze.

Afin de mieux garantir la galerie contre l'envahissement du sable et de la vase, un puisard est creusé en avant de la porte en fer extérieure. **Il doit être curé périodiquement au moyen d'une pelle spéciale.** Une grille est posée en avant de ce puisard, dans le but d'arrêter les cailloux, les bouchons, les débris de bois et de liège, etc. (voir figure 3).

N. B. : la galerie comprend encore d'autres aménagements de moindre importance qui ne sont pas détaillés ici.

4. Les contrôles

4.1. Objectif des contrôles

Comme la plupart des instruments, les marégraphes présentent des défauts qu'il convient de caractériser et de suivre dans le temps. En particulier, le plus grand soin doit être porté à la surveillance de la stabilité de la référence du marégraphe, aussi bien interne et propre à l'appareil qu'externe et liée au socle sur lequel il repose. Une telle surveillance est indispensable *pour construire une série temporelle du niveau marin cohérente et de grande qualité métrologique*. Ce n'est que dans ces conditions que des analyses fines peuvent être menées afin, par exemple, d'étudier des signaux océaniques d'origine climatique. Ces derniers sont généralement ténus. Aussi, une dérive instrumentale du millimètre par an affecte sensiblement l'estimation de la tendance du niveau de la mer. Rappelons que le niveau global de la mer s'élèverait d'environ 2 mm/an depuis un siècle (Bindoff et al. - 2007). Il est donc important de recalibrer régulièrement et

avec précision, la référence interne de l'appareil à celle de l'observatoire. La référence de l'observatoire est indépendante des appareils qui pourraient se succéder. Elle est matérialisée par un réseau local de repères de nivellement. Aussi, est-il également important de surveiller la stabilité de ces repères. L'ensemble des critères auxquels doit satisfaire un marégraphe du programme mondial GLOSS sont rappelés dans IOC (2006, p. 56) [2].

Enfin, une caractérisation fine des erreurs systématiques qui affectent le marégraphe est une étape préalable à l'étude de leurs causes. Elle permet par la suite de situer les performances du marégraphe dans la gamme existante, mais aussi de mettre en place une stratégie de contrôle adaptée.

4.2. Quels contrôles ?

Il s'ensuit les contrôles suivants :

- l'étalonnage du marégraphe ;
- le contrôle de stabilité des repères du réseau local par nivellement de précision.

La stabilité régionale du socle sur lequel repose le marégraphe est surveillée par les résultats de l'analyse des mesures de la station GNSS permanente, dont le repère matériel est inclus dans le réseau local de repères du marégraphe.

4.3. Assurer la cohérence de la série temporelle

Le remplacement d'un appareil marégraphique par un autre doit se faire avec un minimum de précautions. Il ne suffit pas toujours de les raccorder au même réseau de repères matériels définissant la référence de l'observatoire. En effet, les marégraphes peuvent présenter des erreurs systématiques propres, que seul un fonctionnement en parallèle permettra de mettre en évidence et, par suite, d'assurer une transition idéale pour la cohérence de l'ensemble de la série temporelle, indépendamment des appareils qui se succèdent. C'est pourquoi, le groupe d'experts GLOSS recommande une *période de recouvrement de 5 à 10 ans*, lorsque cela est possible bien entendu.

5. Etalonnage de marégraphe

5.1. Principe de l'étalonnage

L'étalonnage ou étalonnement est l'action d'étalonner, autrement dit de vérifier par comparaison avec un étalon l'exactitude des indications d'un instrument de mesure.

L'opération consiste donc à mesurer la même grandeur que le marégraphe par un procédé technique indépendant supposé plus juste et *a priori* plus précis. Mais nous verrons que la précision n'est pas la qualité première recherchée dans l'étalon, c'est plutôt l'exactitude ou la justesse [3].

La grandeur mesurée par le marégraphe est le niveau de la mer, et non la marée comme d'aucuns le croient. Le terme de marégraphe est souvent associé à tort à la fonction de mesure de la marée, alors qu'en réalité il mesure des hauteurs d'eau, dont l'exploitation sert effectivement à l'étude et à la prédiction de la marée. Mais nombreux sont les processus physiques, autres que la marée, qui affectent le niveau de la mer. Il convient donc plutôt de se rappeler que "mare" signifie mer en latin.

Deux dispositifs sont traditionnellement utilisés comme étalons de marégraphe :

- la sonde lumineuse à pointe et à ruban (elle est souvent aussi sonore) ;
- l'échelle de marée (échelle graduée plaquée contre une paroi verticale).

A première vue, les échelles de marée paraissent grossières et peu utiles avec leurs graduations parfois décimétriques. Pourtant l'expérience montre qu'il n'en est rien. Elles présentent un intérêt considérable. En premier lieu, elles fournissent une *lecture directe* du niveau de la mer. Il s'agit d'une lecture extérieure au puits de tranquillisation. L'étalonnage porte alors sur l'ensemble formé par le puits de tranquillisation et le marégraphe. Or, lorsqu'on cherche une grande précision instrumentale, il est intéressant de pouvoir distinguer l'origine des sources d'erreur : s'agit-il de défauts dus au filtrage du puits de tranquillisation ou à l'appareil lui-même ?

En second lieu, les expériences menées à Brest en 2000 et en 2002, montrent que la lecture à l'échelle de marée se fait avec une précision de 2 cm avec un niveau de confiance statistique de 95% par conditions de mer favorables. Lorsqu'on sait par ailleurs que la précision de la lecture à l'échelle peut se confondre avec exactitude ou justesse, il suffit de répéter les lectures à l'échelle de marée pour réussir un étalonnage idéal du marégraphe.

L'exploitation des mesures d'étalonnage permet de déterminer la relation existant entre les indications d'un appareil de mesure et les valeurs de la grandeur à mesurer, en l'occurrence le niveau de la mer. Si cette

relation s'exprime par un simple décalage constant, aux incertitudes de mesure près, le résultat de l'opération d'étalonnage sera le calage ou le recalage de la référence interne du marégraphe par rapport à celle de l'observatoire, matérialisée par le réseau local de repères de nivellement. Si cette relation se révèle plus complexe, elle mettra en évidence des erreurs systématiques et par suite des défauts qu'il conviendra d'étudier afin d'essayer de les corriger.

En conclusion, les fonctions de l'étalonnage sont, d'une part, de caler ou de recalier le marégraphe dans la référence de l'observatoire, et d'autre part de contrôler les performances de l'instrument, notamment sa précision et son bon fonctionnement.

5.2. Test de Van de Castele

Lors d'une communication sur l'activité de son service au cours de la séance de la Section d'océanographie physique du CNFGG, le 26 juin 1962, Charles Van de Castele, ingénieur en chef géographe de l'IGN, exposa une méthode expérimentale qu'il avait imaginée pour apprécier la qualité et le fonctionnement d'un marégraphe enregistreur [6].

Connue sous la désignation de *test de Van de Castele*, cette méthode apparaît toujours dans le « manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer » de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO [2], preuve supplémentaire de l'excellence passée des ingénieurs géographes de l'IGN dans le domaine de la marégraphie. Elle est remise au goût du jour dans une publication récente dans un journal spécialisé [5].

Selon Van de Castele, la qualité et la marche d'un marégraphe peuvent être appréciées seulement de manière expérimentale en vérifiant avec précision le calage du zéro. 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 est parfait et bien réglé. En revanche, si la référence interne du marégraphe s'est décalée par rapport à la référence de l'observatoire, la différence des sondages sera différente de zéro. Mais elle restera toujours constante, aux incertitudes d'observation près, si le marégraphe ne présente aucun autre défaut. L'ingéniosité du test de Van de Castele réside dans l'utilisation de ces résultats pour construire un diagramme, dont la forme permet d'apprécier les défauts éventuels du marégraphe. La figure 3 ci-après donne quelques diagrammes avec le diagnostic correspondant sur les performances du marégraphe :

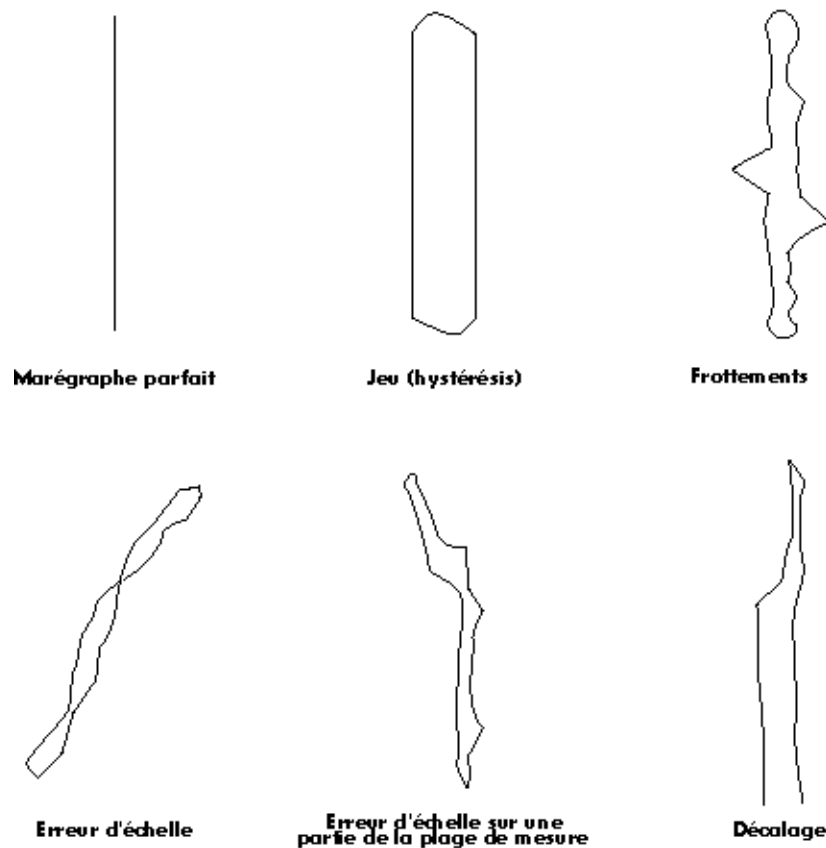


Fig. 8 : exemples de diagrammes de Van de Casteele.

Pour construire un diagramme de Van de Casteele, l'opération d'étalonnage s'effectue pendant la durée d'un cycle complet de marée, soit 12h25 sur les côtes françaises atlantiques et méditerranéennes, en espaçant les points de sondage sur toute l'amplitude de la marée, d'une part, pour s'assurer l'hypothèse d'indépendance des erreurs, d'autre part, pour explorer une plage de mesure aussi large que possible et ainsi contrôler un certain degré de fidélité du marégraphe.

5.3. Choix de la date d'une opération d'étalonnage

Suivant les recommandations internationales et l'expérience particulière acquise sur les marégraphes totalisateur et numériques, l'étalonnage devrait se faire **en moyenne une fois par an à Marseille**.

Le choix précis de la date dépend des conditions de marée. Nous avons vu qu'il est important d'explorer la plus grande plage de mesure possible car des défauts peuvent exister seulement sur une partie de cette plage [5] et [7]. Les jours de fort marnage sont donc retenus, en examinant par exemple l'annuaire de marée et en choisissant un *coefficient supérieur à 95*, soit une amplitude supérieure à 20 centimètres.

Pratiquement, les jours de plus fort marnage coïncident avec la nouvelle et la pleine lune. Dans la mesure du possible, il est également recommandé de varier les saisons.

Par ailleurs, **il est important de réaliser un étalonnage avant et après tout changement de composante de l'appareil marégraphique**. Si une panne survient, l'étalonnage ne peut bien entendu se faire qu'après, malheureusement, mais le plus tôt possible néanmoins. Notons à ce propos que le chenal et la galerie d'accès au puits de tranquillisation influencent la mesure du niveau de la mer et doivent être considérés comme partie intégrante du marégraphe. L'expérience montre que le changement d'une pièce du marégraphe, voire le nettoyage de certains éléments, par exemple les rails de guidage du flotteur, peuvent modifier les performances et les caractéristiques du marégraphe (constante de calage...).

6. Moyens matériels et humains

6.1. Liste et description du matériel

6.1.1. Matériel d'étalonnage

- 1 PC portable pour acquisition des mesures d'étalonnage comprenant le logiciel Excel et la feuille Excel de saisie.

- 1 clé USB pour sauvegarde de sécurité.
- 1 boîte de petit outillage (marteau, pince universelle, tenailles, etc.).
- Chiffons et huile pour écrous cornière porte sonde.
- 1 table, 2 chaises, papier, crayon, ficelle, scotch...
- 1 boîte « Marégraphe de Marseille » contenant les matériels suivants :
 - 1 portique démontable et 1 dévidoir de ruban (ruban de 4 mètres gradué et étalonné)
 - Des vis de secours (les vis servent à fixer la sonde sur le ruban)
 - 1 tournevis
 - 2 sondes lumineuses IGN avec leurs constantes écrites dessus (1 opérationnelle et 1 de secours)
 - 4 piles LR20 1.5 volts pour sonde lumineuse IGN
 - 1 cornière
 - 1 réglet métallique de 10 centimètres

- 1 support avec curseur orientable
- Des boulons pour fixer le curseur orientable sur la cornière et la cornière dans le puits du marégraphe
- 1 clé de 10 et 1 clé de 19
- 1 fiche d'étalonnage du ruban

A noter qu'il est possible d'exploiter ce matériel sur d'autres sites que Marseille, en employant un trépied standard.

Une notice spécifique explique le fonctionnement de ce sondeur, ses performances et son utilisation [1]. A chaque sondeur correspond une constante qu'il convient de relever dans la boîte car elle intervient dans les mesures. **Le SLOG vérifie cette constante une fois par an.**

Depuis mars 2014, le matériel de contrôle comprend aussi une autre sonde lumineuse cédée par le SHOM.

6.1.2. Matériel de nivellement

- 1 masse de 5 kg pour ruban invar
- 2 niveaux NA2 (l'un d'entre eux est maintenant entreposé au marégraphe)
- 2 mires centimétriques IGN de 2 mètres (l'une d'entre elles est maintenant entreposée au marégraphe)
- 2 trépieds à jambes coulissantes
- 1 carnet d'observation de nivellement
- 1 boîte appelée « Ruban invar à suspension verticale », lot petit modèle numéro 5, contenant les matériels suivants :
 - 2 rubans de deux mètres non gradués
 - 1 ruban de un mètre non gradué (non utilisé)
 - 2 rubans de un mètre gradués
 - 1 œil tournant (non utilisé)
 - 1 anneau tournant
 - 1 crochet
 - 16 vis d'assemblage
 - 1 tournevis de diamètre 6 mm

- 1 perche en bambou de deux mètres à crochet (non utilisée)
- 1 perche en bambou de deux mètres sans crochet (non utilisée)
- 1 fiche d'étalonnage

Avertissement : le rattachement en nivellement du ruban porte-sonde au repère fondamental et la « remontée » du nivellement depuis le repère fondamental jusqu'au rez-de-chaussée du bâtiment, nécessitent des lectures sur des rubans à graduations centimétriques. Ces lectures peuvent être effectuées, soit avec des niveaux mécaniques (Wild NA2), soit avec des niveaux numériques qui exigent cependant une distance niveau-mire un peu plus longue.

6.1.3. Matériel pour le nivellement extérieur

- 1 niveau numérique
- 1 trépied rigide de nivellement
- 1 paire de mires code-barre de 3 mètres
- 2 crapauds auto-stables
- 1 PC portable comprenant le logiciel RISCA

6.2. Vérifications et réglages avant départ

6.2.1. Matériel technique de PMR

Tous les équipements de mesure utilisés dans le cadre des activités de l'unité des Réseaux de référence matérialisés du Service de géodésie et nivellement de l'IGN (unité PMR), et donc en particulier ceux qui sont utilisés pour le contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille, sont gérés dans une base de donnée qui permet leur surveillance et leur gestion (base MATPMR). La procédure de gestion est détaillée dans le document technique : « IT/G 327 – V1 – Lavoué – Gestion des équipements de mesure dimensionnelle et du matériel à l'unité des réseaux de référence matérialisés – 2011 ».

Vérifier avant le départ que tous les matériels susceptibles d'être utilisés sont bien conformes aux exigences d'utilisation prévue.

6.2.2. Marégraphe numérique

Le MCN est programmé pour acquérir des mesures toutes les dix minutes. Il s'agit cependant de mesures intégrées (moyennées) sur deux minutes. Des mesures élémentaires sont donc effectuées toutes les secondes, une minute avant et une minute après l'acquisition de dix minutes.

Afin d'obtenir des grandeurs comparables pour l'étalonnage, il est important que l'intégration du MCN soit réduite à **3 secondes**, le temps nécessaire pour faire une mesure correcte à la sonde lumineuse. Il est en effet très pénible d'observer pendant deux minutes à la sonde lumineuse, puis d'en faire une moyenne. En conséquence, il faut **demandeur au SHOM de programmer à distance l'intégration du MCN à 3 secondes** (cf. contacts ci-après).

Avec l'accord du SHOM, l'intégration peut aussi être programmée sur place en suivant la procédure suivante :

- Au bas de l'écran d'affichage des mesures de hauteur d'eau et de pression atmosphérique doit apparaître « *Programmation MCN* », sinon l'obtenir avec les flèches montante ou descendante.

- Taper $\leftrightarrow$

- Code 1-2-3-4

- Taper 2 « *Prog distance* »

- Taper 3 « *Intégration Ti* »

- Avec ' , baisser la période d'intégration jusqu'à 3 secondes

- Validation par « CR » $\leftrightarrow$

- = = > apparait devant la nouvelle valeur

- Revenir au menu de départ par « *Escape* »

ATTENTION : ne pas oublier de rétablir les réglages d'origine en fin d'étalonnage.

6.3. Personnel nécessaire

Les mesures de hauteur d'eau demandent la participation d'au moins deux personnes (une troisième si lectures sur l'échelle de marée). Des effectifs plus importants permettent de travailler plus confortablement et d'effectuer simultanément plusieurs types de mesure (hauteur d'eau et nivellement par exemple).

6.4. Contacts

Horloge Parlante : 36 99 Synchronisation horloges opérateurs. Attention au rafraîchissement de l'heure du GPS qui présente des délais.

CIR Aix-en-Provence : clefs et procédures de sécurité (alarmes, etc.)

- Franck VERGNE 04-42-16-31-13 ou franck.vergne@ign.fr

- Jean FORNONI 04-42-16-31-14 ou jean.fornoni@ign.fr

- Pierre LAULIER (chef de CIR) 04-42-16-31-01 ou pierre.laulier@ign.fr

SHOM : réglage des paramètres du marégraphe MCN, courbe de marée pour la date d'étalonnage, etc.

- Ronan LE GALL : 02-98-22-17-55 ou ronan.le.gall@shom.fr

- Virginie GOIRAND : 02-98-22-17-55 ou virginie.goirand@shom.fr

- Guillaume VOINESON : 02-98-22-15-89 ou guillaume.voineson@shom.fr ou ronim.gest@shom.fr

7. Mise en place

7.1. Installation du sondeur

N.B. : ce paragraphe décrit l'installation complète du sondeur. Néanmoins, une bonne partie du matériel reste en permanence au-dessus du puits, afin d'accélérer les contrôles mensuels.

→ Assembler le portique et le dévidoir du ruban porte-sonde à l'extérieur du puits.

→ Fixer l'ensemble au mur grâce à deux boulons vissés dans deux chevilles métalliques (clé de 10). Pour la vis de gauche, intercaler une entretoise. Cette entretoise et les deux vis restent fixées au mur entre deux étalonnages.



Fig. 9 : installation du portique et du dévidoir du ruban porte-sonde au-dessus du puits.

→ Desserrer les boulons de la plaque horizontale (clé de 19) située sur la petite corniche, la nettoyer.

Attention à ne pas faire tomber les boulons dans le puits !

→ Fixer la cornière sur la plaque horizontale avec les deux boulons légèrement huilés. Serrer les boulons progressivement et sans forcer jusqu'au contact solidaire des deux éléments plaque et cornière.

→ Fixer, avec le boulon fourni dans la boîte, le support avec curseur orientable au bout de la cornière. Veiller à installer cet élément dans le bon sens, **sinon en desserrant le curseur orientable il tombe dans le puits (vernier gradué vers le bas)**. Avant de fixer la cornière, réaliser un essai hors du puits (fixation du support avec curseur sur celle-ci).

La façon d'installer le support d'index (sens) explique les différences constatées dans la détermination de l'altitude de l'index de lecture d'un étalonnage à l'autre. Inutile de trop serrer les boulons. Penser à les nettoyer et à les huiler à la fin de l'opération, la cornière étant enlevée.

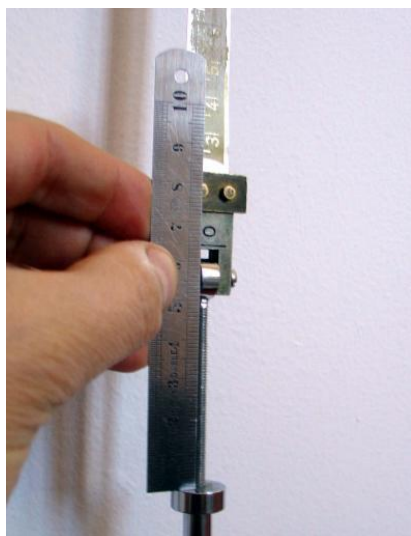
→ Placer le ruban porte sonde à l'intérieur du curseur orientable (voir figure 10).

Fig. 10 : dispositif porte-sonde.



→ Placer deux piles à l'intérieur de la sonde lumineuse et vérifier le fonctionnement de la lampe (bouton de test, voir notice). **Veiller au bon sens des piles, schéma à l'intérieur de la sonde.**

→ Nettoyer la pointe de la sonde avec un chiffon.



→ **A l'écart du puits**, fixer la sonde au ruban.

→ Avec la réglette métallique, mesurer la constante "b" : distance du sommet de l'écrou sonde au milieu de la graduation zéro du ruban (voir notice de la sonde). Réaliser de préférence la mesure en tenant le ruban et en laissant pendre la sonde pour prendre en compte le léger jeu d'assemblage. Faire la moyenne de quelques mesures réalisées par plusieurs personnes en prenant garde à la parallaxe de lecture. **S'assurer au préalable que l'écrou est bien vissé.**

Fig. 11 : mesure de la constante "b".

→ Relever la constante "a" du sondeur (elle est indiquée dans sa boîte et sur le sondeur, elle doit avoir été déterminée depuis moins d'un an).

→ A l'achèvement de l'opération d'étalonnage, **enlever les piles, nettoyer et essuyer la sonde, ainsi que la pointe et l'intérieur du capot amovible.**

7.2. Installation des niveaux

→ Sortir les niveaux de leur boîtes au moins un quart d'heure avant d'utiliser les appareils (pour qu'ils se mettent à température ambiante).

→ Placer les niveaux sur des trépieds à jambes coulissantes. Les meilleurs emplacements sont indiqués par les figures 12 et 13.

→ Bien veiller à ce que les pointes du trépied ne puissent glisser sur le sol (surtout sur le carrelage de la chambre du marégraphe totalisateur).

Dans la chambre souterraine, l'axe optique du niveau doit se trouver au-dessous du support à curseur orientable dans lequel "glisse" le ruban du sondeur. La hauteur du trépied est choisie de façon à pouvoir viser le ruban de la sonde sous le curseur.



Fig. 12 : emplacement du niveau dans la chambre souterraine.



Fig. 13 : emplacement du niveau au rez-de-chaussée (près du panneau renseignant sur les médimarémètres).

7.3. Installation du ruban invar pour « remonter » le nivellement

→ Assembler les rubans selon les couleurs des extrémités des rubans, dans l'ordre 1m gradué - 2m - 2m - 1m gradué. **Il est important que deux personnes réalisent ensemble l'assemblage au risque de déformer les rubans métalliques.** L'assemblage des rubans se fera en commençant par la partie basse du tout et en le faisant glisser progressivement le long de la rambarde, côté extérieur de celle-ci. **Cette façon d'opérer évite de tordre le ruban.**



Fig. 14 : partie haute.

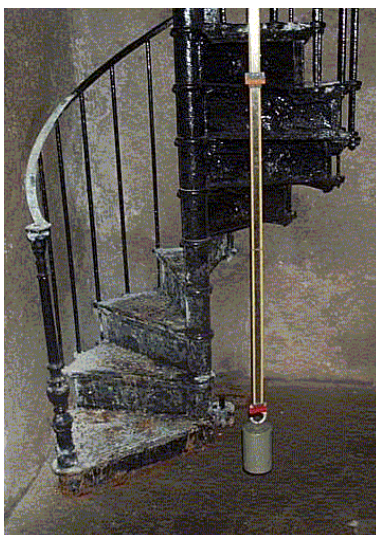


Fig. 15 : partie basse.



Fig. 16 : crochet en bas, anneau en haut.

On commencera donc par fixer le crochet rouge à l'extrémité rouge du ruban gradué 1 m, puis l'extrémité orange de ce ruban de 1 m à l'extrémité orange du ruban de 2 m. On fera alors glisser l'ensemble le long de la rampe d'escalier, puis on fixera l'extrémité bleue de ce ruban de 2 m à l'extrémité bleue du deuxième ruban de 2 m. On continuera à faire glisser l'ensemble le long de la rampe, puis on fixera l'extrémité jaune de ce ruban de 2 m à l'extrémité jaune du deuxième ruban de 1 m gradué, l'extrémité grise de ce ruban de 1 m sera fixée à l'anneau. Cet anneau sera suspendu au crochet scellé sur la paroi en haut de l'escalier (le démontage se fera en sens inverse, en remontant progressivement le ruban).

→ Suspendre la masse de 5 kg en bas, sur le crochet (crochet en bas et anneau en haut !). Afin de stabiliser son allongement (température ambiante), le ruban doit être mis en place la veille des mesures de nivellement.

8. Acquisition des mesures

8.1. Hauteurs d'eau

Les mesures de hauteur d'eau doivent se faire en simultané : (1) sur la règle du marégraphe mécanique (voir figures 17 et 18) ; (2) sur l'écran de visualisation de la centrale d'acquisition du MCN située dans le bureau du gardien (voir figure 19) ; (3) sur le ruban porte-sonde par rapport à l'index (voir figure 20) ; (4) sur l'échelle de marée si l'état de la mer le permet (voir figure 3) ; et (5) sur le ruban porte-sonde du SHOM si le nombre d'opérateurs le permet.

Ces mesures se font toutes les 10 ou 20 minutes sur un cycle de marée, soit 12h25. La simultanéité est dictée par la centrale d'acquisition MCN qui enregistre toutes les 10 minutes en démarrant aux heures rondes, soit par exemple 09h00, 09h10, 09h20...

Les montres des intervenants doivent impérativement être réglées à un étalon de temps, horloge DCF, horloge parlante (3699) ou GPS.

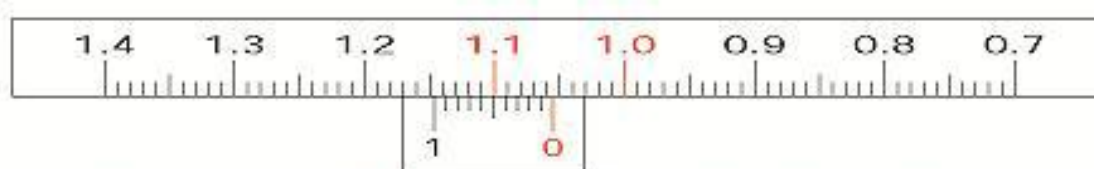
N. B. : remettre le MCN à l'heure si l'écart constaté est supérieur à 5 secondes.

L'opérateur du haut, posté près du marégraphe totalisateur, donne le « top ». Il peut décompter ainsi : « -30s, ...-5s, -4s, -3s, -2s, -1s, TOP ! ! ! » ; ceci afin de laisser le temps à l'opérateur du bas, posté près du ruban porte-sonde, de bien se préparer avant le « top » pour établir le contact le plus fin possible entre la pointe de la sonde et le niveau de l'eau en alternant voyant allumé - voyant éteint. Le contact avec l'eau correspond au voyant allumé, la mesure se fait voyant allumé (voir la notice "Sondeur IGN pour marégraphe" [1]).

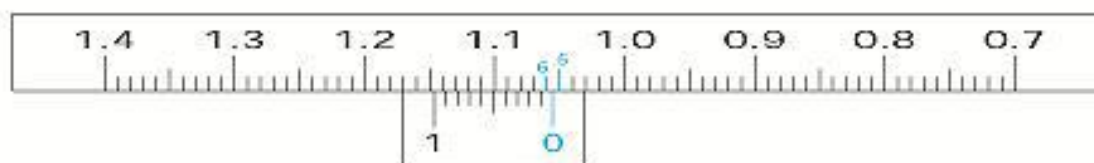
Pour réaliser une mesure à la sonde : mettre le bouton du sondeur sur M (Marche), tester la lampe en appuyant le téton, dévisser le bouton du curseur orientable retenant le ruban de la sonde, et descendre la sonde en faisant glisser le ruban dans ce curseur (plus de détails sont fournis dans la notice du sondeur [1]).

Les mesures sont immédiatement saisies sur la feuille Excel « etalonnage.xls », enregistrée dans le PC portable avant la mission.

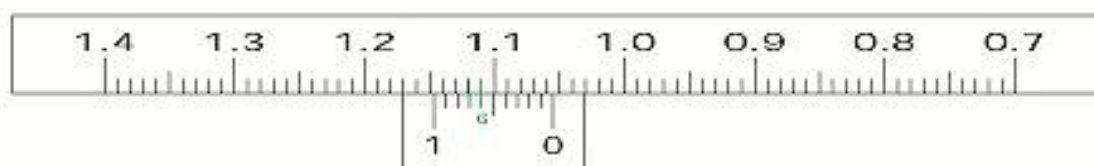
Un diagramme de Van de Casteele se construit au fur et à mesure de la saisie dans cette feuille pour chacun des marégraphes, totalisateur et MCN, et, le cas échéant, pour l'échelle de marée. La visualisation des diagrammes après chaque mesure aide à détecter des fautes de lecture et éventuellement à les corriger sur place. Une courbe de marée se construit également, elle permet de se situer dans le cycle de marée.



1) repérer entre quels chiffres de la règlette du haut se situe le 0 de la règlette du bas entre 1.0 et 1.1 prendre la plus petite donc (1,0..)



2) repérer entre quelles graduations de la règlette du haut se situe le 0 de la règlette du bas entre 5 et 6 prendre la plus petite (5) donc (1,05.)



3) repérer un alignement précis entre une graduation de la règlette du haut et une de la règlette du bas prendre la valeur sur la **règlette du bas** (6) donc (1,056)

Fig. 17 : lecture sur la règlette du marégraphe mécanique.

La figure 18 donne d'autres exemples de lectures sur la règlette du marégraphe mécanique.

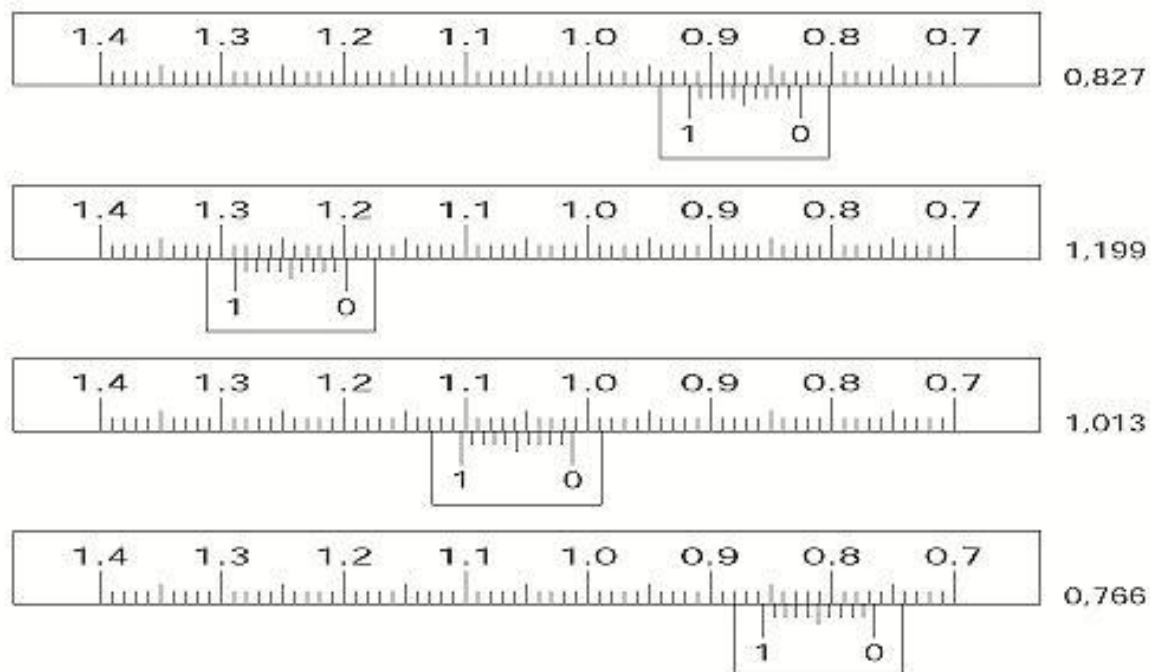


Fig. 18 : exemple de lectures sur la réglette du marégraphe mécanique

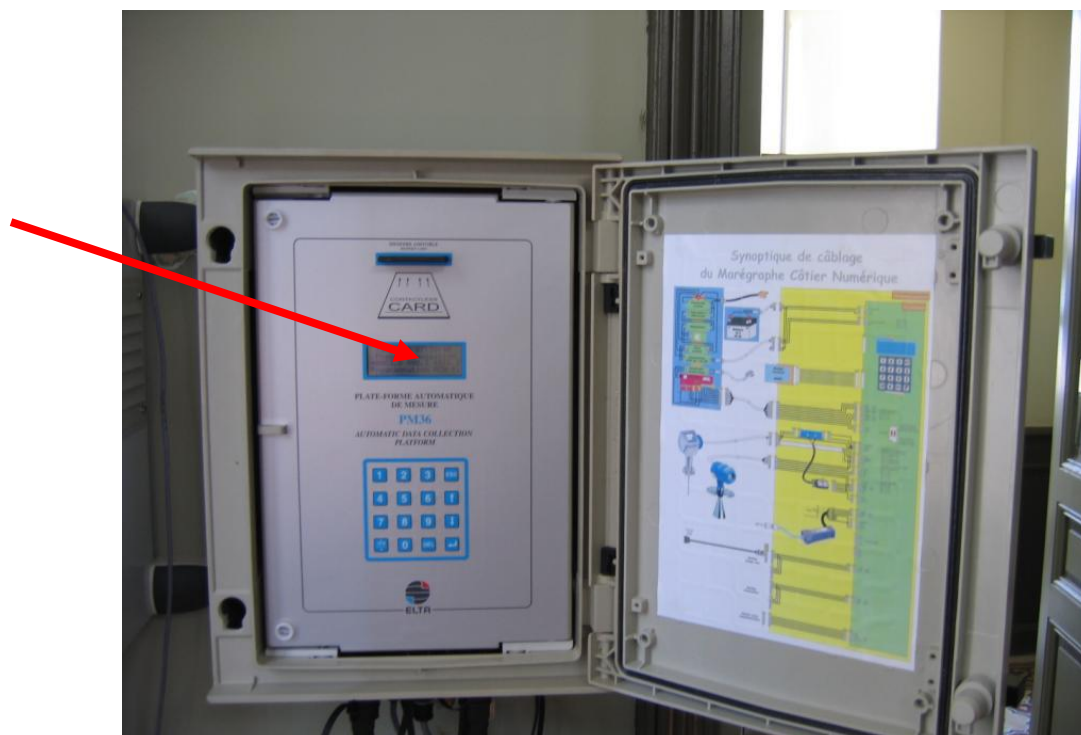


Fig. 19 : lecture sur l'écran du MCN

8.2. Altitude du zéro du curseur porte-ruban

Le ruban est fixé de façon à faire coïncider une de ses graduations rondes devant le 0 de l'index porte-sonde, par exemple la graduation 0,50 mètres. Le niveau est placé de façon à viser sur le ruban sous cet index. La mire est placée sur le repère fondamental, également connu sous la désignation ϕ . On fait une lecture sur la mire, puis une lecture sur le ruban.

Dans l'exemple ci-dessous nous obtenons les lectures suivantes sur les fils niveleurs des échelles I et II : 13929 et 44979, soit un contrôle de marche parfait de 31050. La lecture sur le ruban est de 0,4439 mètres. L'altitude de l'index se calcule alors ainsi :

$$Alt_{index} = Alt_{\phi} + 1,3929 + 0,50 - 0,4439 = 3,1100 \text{ m (avec } Alt_{\phi} = 1,661 \text{ m)}$$

Plusieurs déterminations de l'altitude de l'index doivent être réalisées au cours de l'opération d'étalonnage avec des hauteurs de niveau différentes et/ou des graduations de ruban différentes.

Une autre détermination de cette altitude avec un index sur la graduation 2,00 mètres donne (voir figure 20) :

$$Alt_{index} = Alt_{\phi} + 1,3839 + 2,00 - 0,9351 = 3,1098 \text{ m}$$

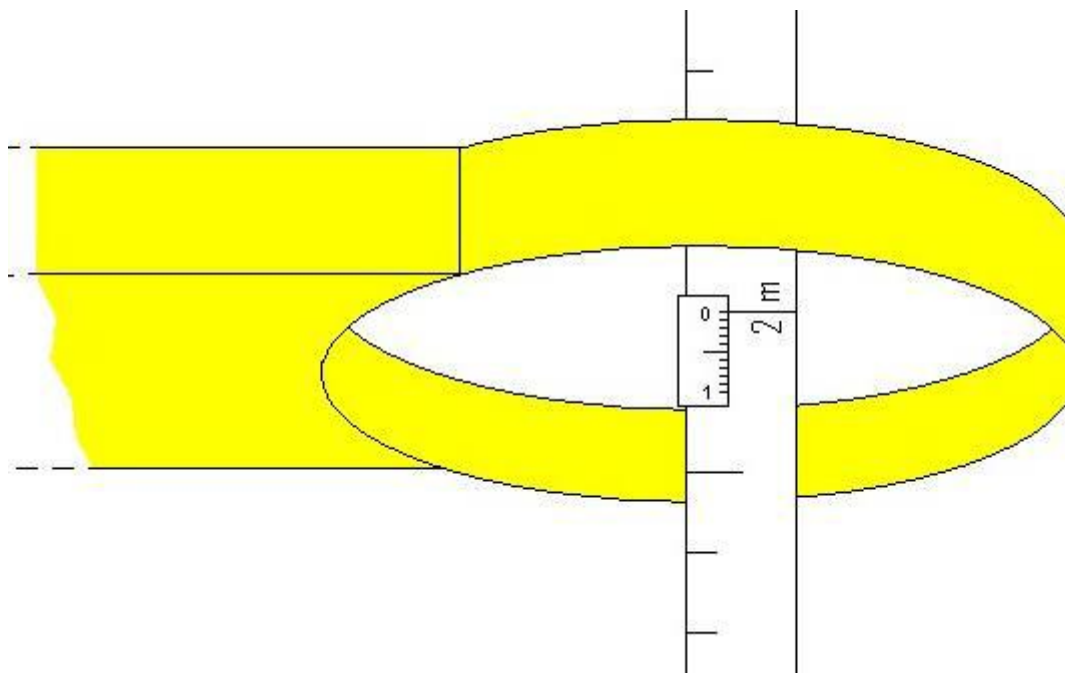


Fig. 20 : lecture sur le ruban porte-sonde par rapport à l'index.

8.3. Opérations de nivellement

Elles ont pour objet de contrôler la stabilité des repères situés sur le site de l'observatoire. Cette stabilité sera élargie à des repères éloignés du site à périodes régulières.

8.3.1. Mise en œuvre des spécifications d'usage

Contrôle et réglage de la collimation des niveaux : on se référera à la méthode préconisée dans la notice du constructeur jointe à l'appareil.

Egalité des portées : à respecter impérativement en cheminement extérieur, au mieux en cheminement à l'intérieur du bâtiment, d'où l'obligation d'une collimation très faible.

Mires : à tenir verticalement (nécessité d'avoir deux « bulles » cohérentes, notamment lors des mesures dans les escaliers, les lectures trop hautes et trop basses étant à éviter.

Stabilité des instruments : on veillera au serrage des jambes coulissantes des trépieds et à leur stabilité sur les sols en carrelage (attention aux glissements). Idem pour les supports de mire.

Contrôle des calculs, archivage : un registre de calcul (RISCA) est systématiquement établi et archivé. Les fiches descriptives des repères publiés sont mises à jour.

8.3.2. Observation des repères implantés dans la crypte

Cheminement en boucle (le rayonnement est proscrit), aller et retour. Le niveau est positionné comme indiqué sur la figure 12.

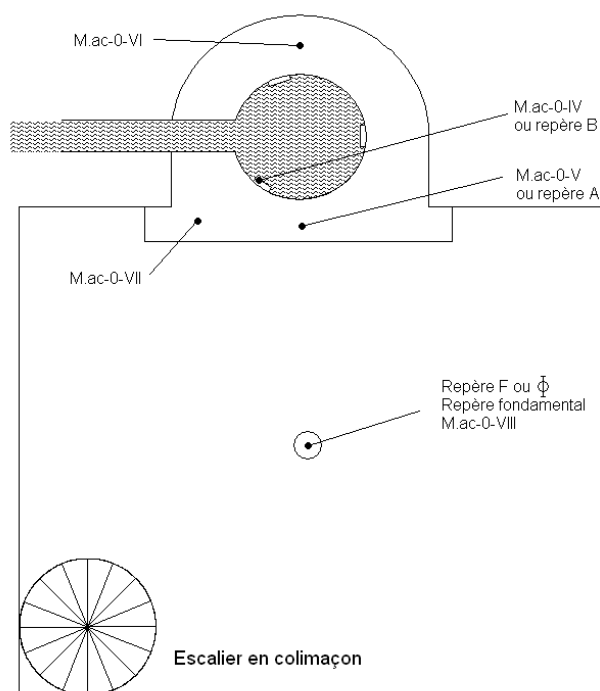


Fig. 21 : rivets de nivellement implantés dans la chambre souterraine.

8.3.3. « Remontée » du nivellement

Le ruban invar étant stabilisé (veiller à ce que personne ne soit sur l'escalier et à ce que le ruban ne touche pas la rambarde), les lectures sur les extrémités du ruban sont faites simultanément.

Un niveau est positionné dans la crypte comme indiqué dans la figure 12. Un autre est positionné au rez-de-chaussée (voir figure 13). Les lieux étant relativement exigus et les visées étant très proches des distances minimales imposées par les appareils, la possibilité de lecture est préalablement contrôlée. Un crapaud est positionné derrière le marégraphe en s'assurant que la visée niveau-crapaud est possible.

Les équipements étant en place, la faisabilité des visées contrôlée, la chronologie des opérations est la suivante :

- avec le niveau dans la crypte, lecture sur une mire tenue sur le repère fondamental,
- simultanément, le top étant donné par un des opérateurs, avec le niveau - crypte, lecture sur le ruban invar partie inférieure, lecture avec le niveau - rez-de-chaussée) sur le ruban invar, partie supérieure. Pour faciliter la lecture, il pourra être nécessaire de légèrement tourner le ruban en direction du niveau. On y parviendra avec du scotch fixé entre le ruban et le montant de la porte.
- lecture sur la mire tenue sur le crapaud qui se trouve derrière le marégraphe.
- l'opération est réalisée une seconde fois en modifiant la hauteur des deux niveaux.
- enfin, déplacement du niveau du rez-de-chaussée, lecture sur le crapaud derrière le marégraphe puis sur le repère 0-III situé près du marégraphe (margelle supérieure du puits).
- calcul des dénivelées, comparaison à la dénivelée issue de l'étalonnage précédent. Réobservation si incohérence ou faute. Celle-ci est tout à fait possible lors des lectures sur le ruban invar. Aussi, pour chaque observation sur le ruban invar, est établi un croquis de la partie de ruban vue dans l'oculaire des deux niveaux, l'image inverse des chiffraisons étant respectée.

L'annexe B contient un croquis décrivant le mode opératoire et l'annexe C présente un exemple de feuille d'observation.

La faible correction à apporter aux lectures sur le ruban invar n'est pas prise en compte car elle ne l'a pas été dès le premier étalonnage. Toutefois, les résultats des futurs étalonnages peuvent nécessiter sa prise en compte.

8.4. Nivellement de l'antenne GNSS

Le repère sous l'antenne GNSS (Global navigation satellite system) peut être nivelé à l'occasion d'un changement d'antenne.

L'altitude de l'ARP⁴ de l'antenne (voir figure 22) peut être déterminée en plaçant le niveau sur le toit du bâtiment. Première nivelée : coup arrière sur le rivet implanté sur le parapet de la terrasse et coup avant sur un crapaud déposé sur le bord du toit (voir figure 23). Deuxième nivelée (niveau installé comme sur la figure 24, à hauteur de l'ARP) : coup arrière sur le crapaud précédent et coup avant sur l'ARP.

N.B. : toute autre configuration (mesures depuis la Corniche) impose des visées longues et rasantes, donc peu précises.



Fig. 22 : antenne GNSS.



Fig. 23 : nivelée 1.



Fig. 24 : visée au niveau de l'ARP.

⁴ Antenna reference point.

8.4.1. Autres nivellements

Fig. 25 : rivets de nivellement implantés au rez-de-chaussée.

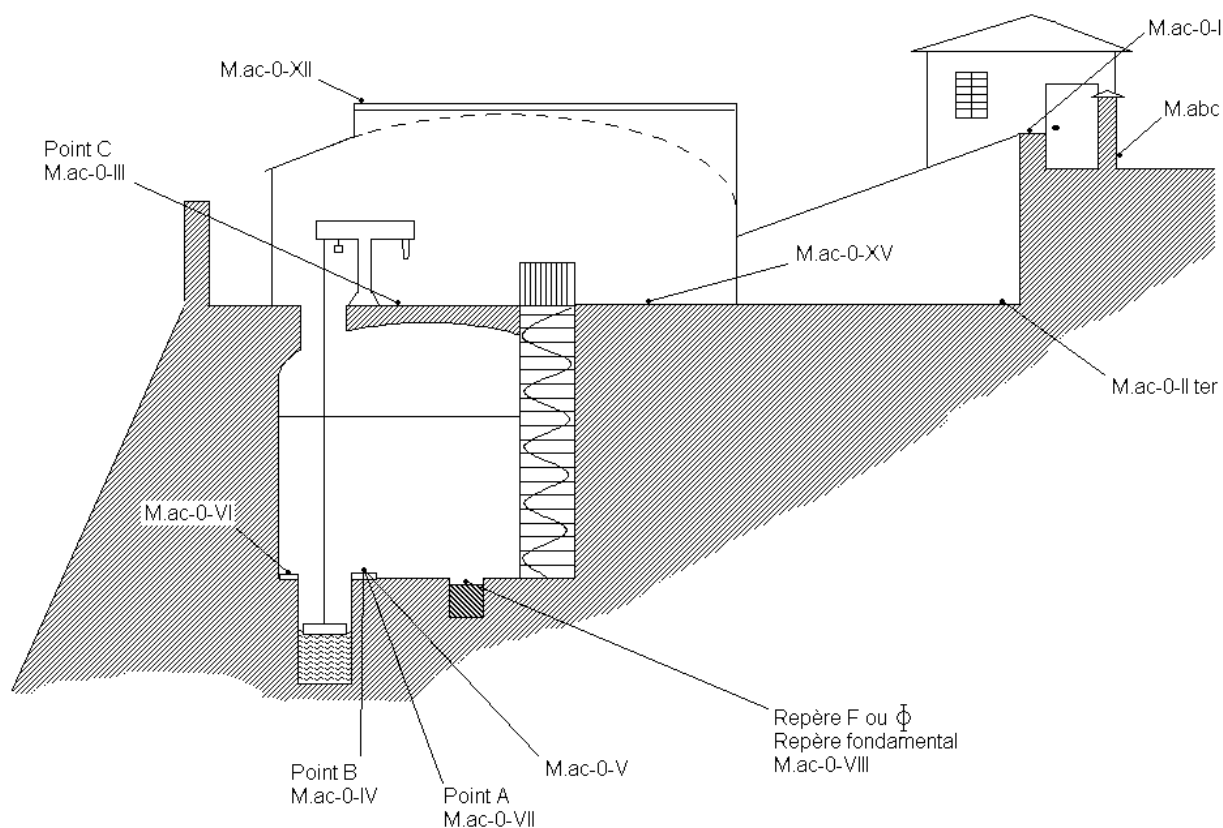
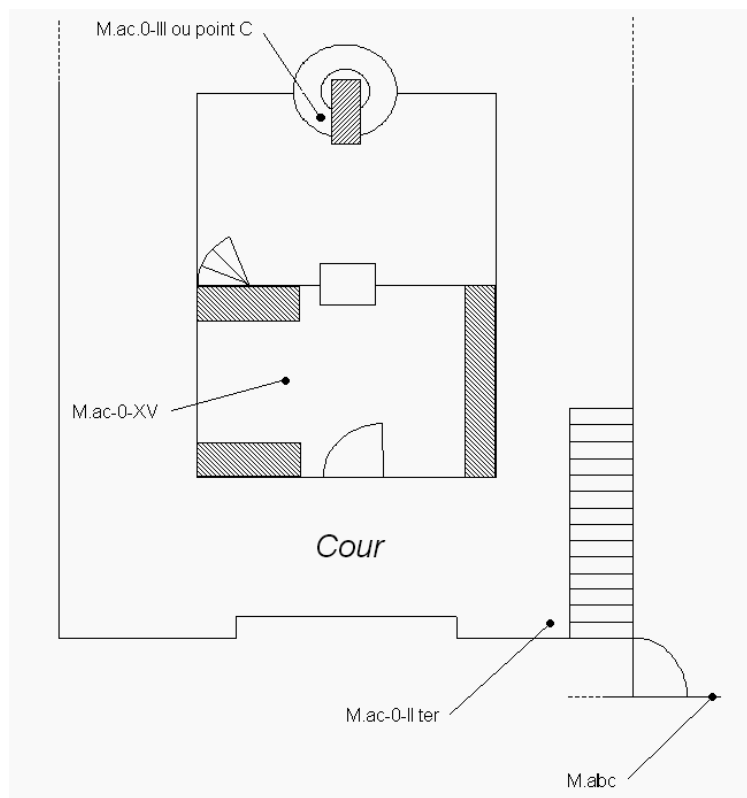


Fig. 26 : repères de nivellement implantés au marégraphe de Marseille.

9. Exploitation des données

9.1. Détermination de la hauteur d'index de la sonde

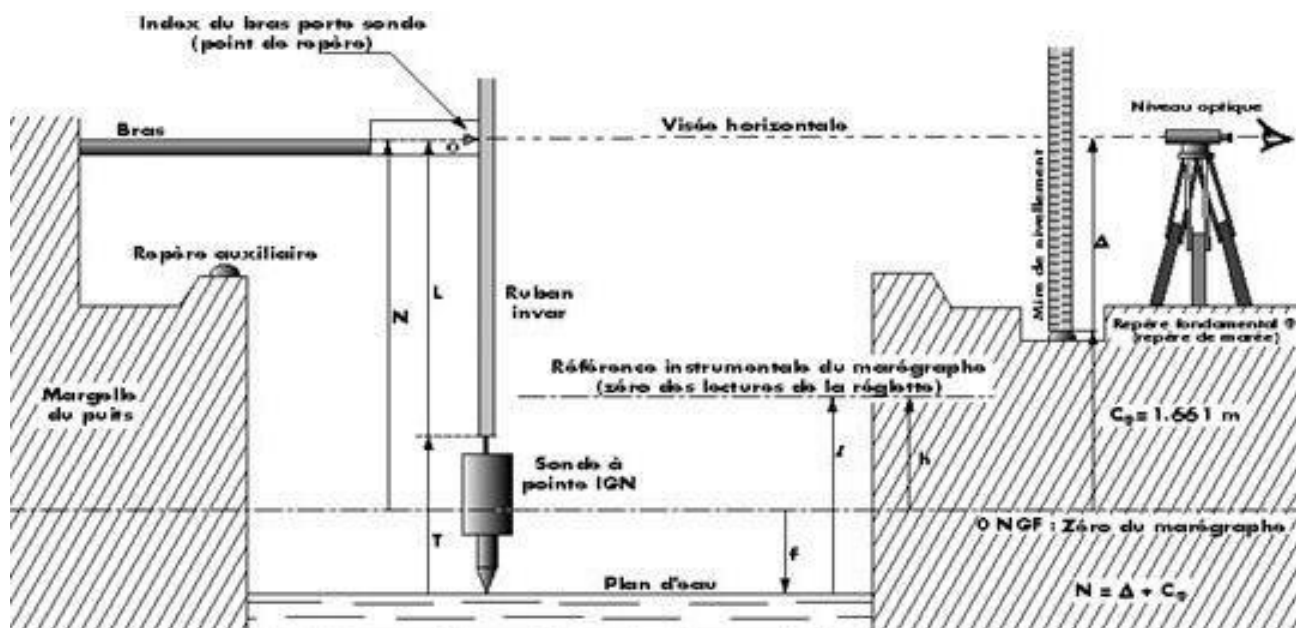


Fig. 27 : description du dispositif de détermination de la hauteur de l'index de lecture de la sonde lumineuse IGN (extrait de Wöppelmann – 1997).

Les différentes mesures pour la détermination de la hauteur d'index de la sonde doivent être saisies dans la feuille de calcul Excel d'étalonnage. Préciser l'heure de la détermination et le nom de l'opérateur.

9.2. Construction et interprétation du diagramme de Van de Casteele

Le diagramme de Van de Casteele se construit ainsi : en abscisses, on porte les écarts marégraphe-étalon, et en ordonnées, la hauteur d'eau. Un marégraphe mécanique parfait donne une courbe réduite à une droite parallèle à l'axe des ordonnées. Mais, plus généralement, les points se répartissent sur deux branches verticales (voir figure 8). L'une correspond aux mesures effectuées en marée montante, et l'autre aux mesures effectuées en marée descendante. En ajoutant les points obtenus pendant les marées étales, la courbe complète forme ce que l'on appelle un cycle d'hystérésis. L'écart entre les deux branches verticales témoigne des jeux ou des retards du marégraphe mécanique (voir en annexe F des exemples de diagrammes de Van de Casteele).

L'interprétation de l'allure des diagrammes de Van de Casteele met en évidence un certain nombre d'imperfections, et permet de ce fait d'apprécier la qualité et le fonctionnement du marégraphe. La figure 8

donne l'allure caractéristique de quelques défauts typiques du marégraphe à flotteur : frottements, jeux, retards, erreurs d'échelle ou décalages. Par ailleurs, le centre de la courbe fournit la meilleure valeur de la constante de calage de la référence instrumentale par rapport à la référence externe du marégraphe. Il convient par conséquent d'avoir autant de points de comparaison à marée montante qu'à marée descendante. Les passages à marée étale sont à éviter, car il est difficile d'identifier leur appartenance à la branche ascendante ou à la branche descendante.

9.3. Détermination de la constante de calage

Une expérience d'étalonnage de marégraphe mécanique (parfois aussi pour des marégraphes faisant appel à d'autres technologies [5]), réalisée par de bonnes conditions météorologiques, c'est-à-dire par vent et mer calmes, produit un diagramme de Van de Castelle montrant un cycle d'hystérésis bien marqué.

Chaque branche verticale du cycle d'hystérésis fournit une valeur de calage pour la marée montante et une autre pour la marée descendante. La valeur à adopter est la valeur centrale du cycle.

Lorsque les sondages sont bien espacés dans le temps, nous avons un nombre équivalent de points sur chacune des branches, la moyenne de l'ensemble convient alors. Il est toutefois recommandé d'écarter les points de la marée étale. En pratique, le nombre de données à marée descendante n'est pas égal à celui de la marée ascendante. Par conséquent, la procédure consiste à calculer d'abord l'abscisse moyenne de chacune des branches verticales du cycle d'hystérésis, puis leur moyenne (voir annexe A).

En revanche, si les mesures se font par mauvais temps, la réponse du puits au ressac extérieur se traduit par une oscillation de basse fréquence dans le puits. Il arrive donc tout au long de l'expérience que, bien qu'étant sur la branche descendante (ou ascendante), certaines mesures de hauteur d'eau mesurées soient supérieures (ou inférieures) à la précédente. Il en résulte un diagramme de VDC pour lequel les points de mesures passent d'une branche à l'autre selon que le niveau d'eau monte ou descend. Dans ce cas, la constante de calage est la moyenne des mesures...

9.4. Etalonnage interne (appareils)

Les instruments à l'intérieur du puits du marégraphe, MCN et totalisateur, présentent l'avantage d'effectuer des mesures de niveau de la mer filtré de la houle et du clapot. Les mesures de contrôle à la sonde lumineuse sont de ce fait facilitées et réalisées avec une précision meilleure que le millimètre, ce qui correspond à la précision du totalisateur. A chaque expérience, la hauteur de l'index de lecture de la sonde est re-déterminée par rapport au repère fondamental de l'observatoire (M.ac - 0-VIII ou Φ), référencé à 1,661 mètre au-dessus du niveau moyen de la mer à Marseille adopté en 1897, zéro de l'observatoire. Cette

précaution permet d'assurer la continuité de la référence des différents instruments. Les résultats des tests de Van de Casteele permettent de déterminer la constante de calage des instruments ainsi que leurs défauts éventuels selon l'allure du diagramme.

9.5. Etalonnage externe (puits, chenal)

Le principal inconvénient de l'échelle de marée est la précision des lectures qui peuvent y être faites, notamment à cause des vagues, du clapot, et d'autres oscillations du niveau de la mer de courte période. Celle-ci est typiquement de quelques centimètres. Mais, l'échelle de marée étant un objet matériel, elle peut jouer le rôle de repère de marée, et fournir de manière simple et rapide des observations directement comparables à celles des marégraphes. D'autant que le zéro du marégraphe est choisi en coïncidence avec le zéro de l'échelle de marée. Par ailleurs, si l'échelle de marée est un instrument exact, seules subsisteront les erreurs d'observation ou erreurs accidentelles.

Celles-ci sont a priori de nature aléatoire, autrement dit, elles se produisent tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Sous couvert de certaines hypothèses, à savoir que les erreurs accidentelles sont nombreuses, indépendantes, indifféremment positives ou négatives et où chacune d'elles est petite par rapport à la somme de toutes les autres, on admet qu'elles suivent une loi de probabilité normale de moyenne nulle et d'écart-type σ . L'erreur sur la mesure est alors estimée à σ / n (n étant le nombre de mesures ou déterminations indépendantes). La mise en application de cette théorie conduit à réaliser un grand nombre de mesures.

10. Rapports de missions

Un rapport est rédigé après chaque opération : description de l'objet particulier de la mission qui peut par exemple être motivée par un dysfonctionnement constaté, ou alors une maintenance de routine annuelle, ... ; description des conditions générales d'expérience ; description des travaux réalisés ; description des événements pendant la mission ; description des données ; analyse des données et résultats ; constantes de calage et nouvelle formule à appliquer (totalisateur) ; interprétation des résultats en termes de performances ; conclusions sur les travaux à réaliser (nettoyages, changements de fils...) ; s'il y a lieu, opérations de nivellement et d'entretien des bâtiments...

Le rapport est rédigé par l'IGN et l'Université de La Rochelle prête son concours pour la partie « analyse des données et résultats ; constantes de calage et nouvelle formule à appliquer (totalisateur) ; interprétation des résultats en termes de performances... ».

Ce document est archivé selon les spécifications d'archivage en cours à l'IGN et communiqué au SHOM et à l'Université de La Rochelle.

11. Visites hebdomadaires réalisées par le CIR d'Aix

11.1. Mesures hebdomadaires

Choisir un jour de la semaine et une heure régulière, s'y tenir autant que possible. Les habitudes sont le mercredi entre 14h et 15h.

Faire les observations suivantes :

→ Sur le marégraphe analogique,

- une lecture sur la réglette du marégraphe mécanique ;

- une lecture sur le compteur de tours du tambour et son index sur le grand cercle en verre gradué (le temps).

- les lectures des compteurs des roulettes hautes et basses en contact avec le disque en verre (voir annexe D).

→ Sur le MCN,

- l'indication de hauteur d'eau affichée sur la centrale d'acquisition.

- l'heure TU d'observation (heure et minute), noter aussi la date du jour d'observation.

Remonter le contrepoids de l'horloge à balancier du marégraphe analogique. Attention cependant à ne pas la remonter jusqu'à la butée.

11.2. Mesures mensuelles

→ ☐ Tous les mois, réaliser 3 mesures de hauteur d'eau à la sonde, séparées de 10 minutes, et noter les valeurs correspondantes affichées par le MCN.

→ Saisir le résultat de ces observations dans un tableau fourni par le SHOM (voir exemple en annexe D).

→ Envoyer le tableau au SHOM (Virginie GOIRAND en 2014).

11.3. Calculs

Les calculs sont exécutés par une macro sous Excel dès l'entrée des observations. On obtient une hauteur moyenne d'eau à chaque observation, à chaque fin de mois et une moyenne annuelle.

Un tableau des valeurs de moyennes annuelles doit être actualisé à chaque fin d'année pour ce qui concerne le marégraphe mécanique.

Un graphe indiquant la courbe d'évolution des niveaux moyens annuels de la mer doit être également actualisé chaque fin d'année.

11.4. Surveillance

Lors de la visite hebdomadaire à l'observatoire marégraphique, en complément des mesures à réaliser et indiquées ci-dessus :

→ Descendre dans la crypte et vérifier le bon état du flotteur, des différents câbles, de l'absence d'objet dans le puits ou sur la centrale d'acquisition du MCN, etc.

→ Vérifier que la grille située près de la porte extérieure d'accès à la galerie, dans le chenal d'accès est toujours en place et qu'elle n'est pas obstruée par des algues, débris, détritus, etc.

→ Vérifier que la porte d'accès à la galerie, située dans le chenal, est toujours en place, fermée par les barres de fixation et qu'elle n'est pas, elle aussi, obstruée par des algues, débris, détritus, etc.

→ Vérifier la présence et la fixation de l'échelle de marée.

En conclusion, rechercher toute anomalie ou évolution pouvant nuire au bon fonctionnement des instruments et par conséquent à la qualité des mesures.

11.5. Maintenance

Régulièrement,

→ renouveler les sachets de dessiccation qui se trouvent dans la vitrine du marégraphe (fréquence annuelle).

→ dès que l'état de la mer le permet, curer le puisard situé entre la porte extérieure et la grille au moyen de la pelle spéciale.

→ vérifier l'usure des câbles et anticiper leur changement si nécessaire (les références du fil en place sont : A.OTT / KEMPTEN ; 30 m / 0,6 Ø (NIRO) ; 27.150.012.4.2 ; made in West Germany).

Tous les deux ou trois ans (ou éventuellement plus fréquemment en fonction des résultats des expériences d'étalonnage),

→ demander à une entreprise spécialisée de nettoyer la galerie, et de vérifier la fixation de la porte extérieure et de la grille située dans le chenal. **Les joints en caoutchouc de la porte doivent être changés à chaque fois que la porte est ouverte.**

Cette opération doit être réalisée en liaison avec le SLOG (il faut la prévoir au PROBAT (PROgramme de travaux sur les BÂTiments) du SLOG). Par exemple, le dernier nettoyage ayant été exécuté en 2013, le prochain est a priori à prévoir au cours de l'année 2016, donc il faut demander au SLOG de l'inscrire à son PROBAT en novembre 2015.

12. Conclusions

L'intérêt du marégraphe de Marseille est étroitement lié à la longueur exceptionnelle de son enregistrement. Il est du devoir de l'IGN, à qui ont été attribués le bâtiment et ses appareils, de ne pas interrompre la série temporelle en cours, commencée en 1885.

L'observatoire de Marseille est au cœur d'une coopération scientifique avec des organismes nationaux (SHOM, SONEL, etc.) et internationaux (GLOSS, PSMSL, etc.). Le contrôle régulier des marégraphes de cet observatoire est indispensable pour assurer la qualité des données fournies à ces organismes.

13. Références

- [1] : IGN – Service de la logistique – Département de maintenance des instruments – *Sondeur IGN pour marégraphe et règle d'horizontalité* – Archive du Marégraphe de Marseille IGN/SGN 1001305/20000215M1.
- [2] : Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO (1985, 1994, 2002, 2006) – *Manual on sea-level measurement and interpretation : basic procedures* – Manuels disponibles à l'adresse : <http://www.pol.ac.uk/psmsl/manuals/>
- [2a] : COULOMB Alain – Le marégraphe de Marseille. De la détermination de l'origine des altitudes au suivi des changements climatiques. 130 ans d'observation du niveau de la mer – Presses des Ponts – 640 pp, 400 illustrations, ISBN 978-2-85978-481-2
- [3] : LACHENAUD M. – *La précision instrumentale d'ordre scientifique* – Masson et Cie, éditeurs, 1970, 194 pp.
- [4] : MAILLARD Jean – *Le marégraphe fondamental* – Archives du marégraphe de Marseille IGN/SGN/1001305/19630415M1.
- [5] : MARTIN MIGUEZ Belen, TESTUT Laurent and WÖPPELMANN Guy – The VAN DE CASTEELE test revisited : an efficient approach to the tide gauge error characterization – Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 25, pp. 1238-1244 – Archive IGN/SGN/1001306
- [6] : VAN de CASTEELE Charles – *Comparaison des marégraphes et des médimarémètres pour l'obtention des niveaux moyens* – Communication sur l'activité de la Section du Nivellement de l'IGN présentée à la Section d'Océanographie Physique du Comité National Français de Géodésie et Géophysique le 26 juin 1962 – Archives du marégraphe de Marseille IGN/SGN 1001305/19620626E1.
- [7] : WÖPPELMANN Guy – Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale – Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, 1997, 263 pp. – Archive IGN/SGN/1001306
- [8] : WÖPPELMANN Guy et al. – Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849-1851 – Journal of Geodesy, juin 2014

14. Annexe A : formules et constantes de calage depuis 1993

Tableau récapitulatif des constantes de calages h du marégraphe totalisateur de Marseille déterminées depuis 1993.

Date de l'étalonnage	h (en m)	Δh_{t2-t1} (en m)
7 juillet 1993	1.3542 ± 0.0012	---
4 août 1994	1.3526 ± 0.0005	- 0.0016
14 septembre 1994	1.3579 ± 0.0005	+ 0.0053
7 novembre 1996	1.3559 ± 0.0004	- 0.002
10 décembre 1996	1.3569 ± 0.0005	+ 0.001
3 février 1999	1.5618 ± 0.0005	+ 0.2049
5 juin 2000	1.5621 ± 0.0002	+ 0.0003
7 juin 2000	1.2743 ± 0.0002	- 0.2878
18 septembre 2001	1.2758 ± 0.0004	+ 0.0012
08 octobre 2002	1.2776 ± 0.0003	+ 0.0018
19 mars 2003	1.2763 ± 0.0004	- 0.0013
02 juin 2004	1.2763 ± 0.0004	0.0000
25 avril 2005	1.2754 ± 0.0007	- 0.0009
25 octobre 2005	1.2760 ± 0.0002	+ 0.0006
17 janvier 2006	1.2742 ± 0.0003	- 0.0018
27 septembre 2007	1.2746 ± 0.0003	+ 0.0004
27 mars 2008	1.2736 ± 0.0002	- 0.0010
8 avril 2009	1.2728 ± 0.0004	- 0.0008
29 juin 2010	1.2735 ± 0.0003	+ 0.0007
5 janvier 2011	1.2768 ± 0.0003	Changement des fils le 3 janvier
9 février 2013	1.2771 ± 0.0005	+ 0.0003

Calcul du niveau moyen de la mer à Marseille d'après les données fournies par le marégraphe totalisateur :

$f_m = h - 1.000 - 0.1962 \times (\delta n' + \delta n'') / \delta p \text{ en mètres}$	[IGN, 1963]
---	-------------

avec :

f_m : niveau moyen de la mer au-dessus du zéro NGF-IGN69 sur l'intervalle δp ;

$\delta n'$ et $\delta n''$: nombre de tours de roulettes sur δp ;

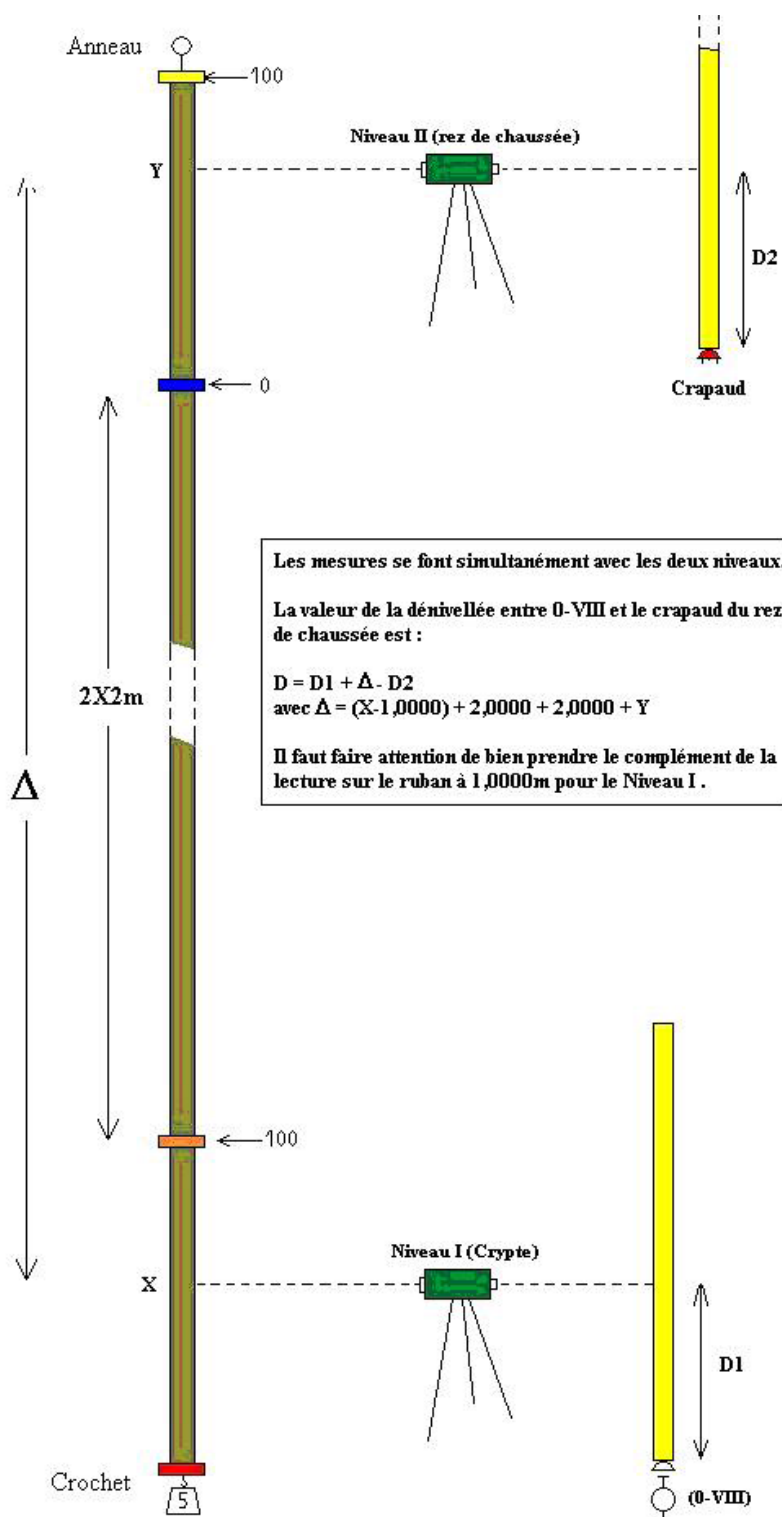
δp : intervalle de temps entre deux relevés des roulettes, en jours.

Cependant, l'étalonnage de 1993 fournissait une valeur de h relativement peu précise par rapport aux autres déterminations, en raison du défaut de frottements qui est visible sur son diagramme de Van de Casteele. L'étalonnage suivant permit de confirmer cette valeur en donnant une valeur proche, mais plus précise. Par ailleurs, l'étalonnage de décembre confirme le résultat de celui de novembre 1996. Le défaut d'échelle est à l'origine de l'écart trouvé.

En conséquence, compte tenu des incertitudes des estimations, voici quelles sont les formules qui devraient être adoptées pour le calcul des observations du totalisateur suivant les périodes spécifiées :

- à partir du 7 juillet 1993, $h \approx 1.353$ m, donc : $f_m = 0.353 - 0.1962 \times (\partial n' + \partial n'') / \partial p$ en mètres
- à partir du 14 septembre 1994, $h \approx 1.358$ m, donc : $f_m = 0.358 - 0.1962 \times (\partial n' + \partial n'') / \partial p$ en mètres
- à partir du 7 novembre 1996, $h \approx 1.356$ m, donc : $f_m = 0.356 - 0.1962 \times (\partial n' + \partial n'') / \partial p$ en mètres

15. Annexe B : mode opératoire pour la « remontée du nivellement »

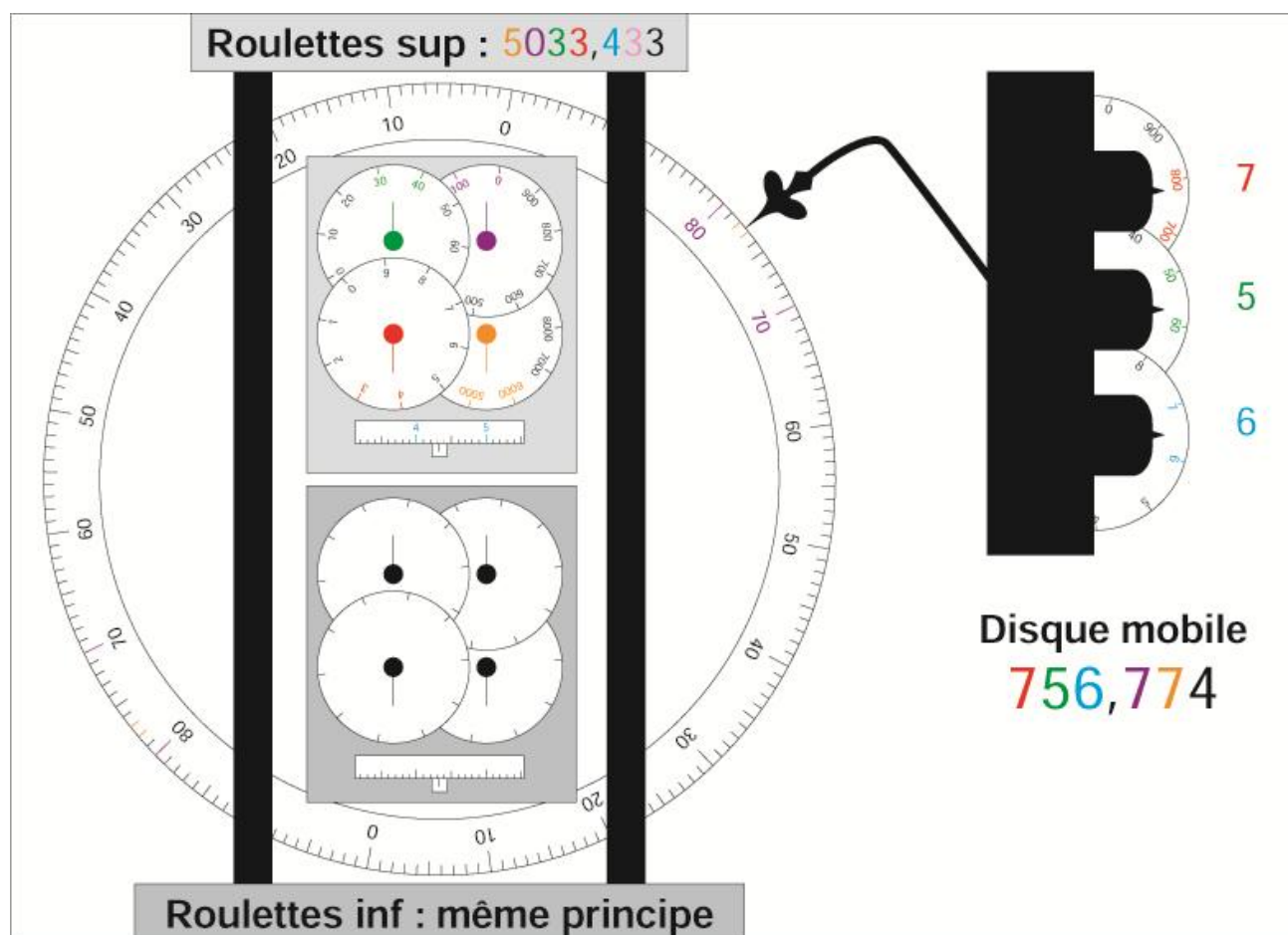


16. Annexe C : exemple de calcul pour la « remontée du nivellement »

Exemple de feuille d'observation (en rouge les lectures faites avec les niveaux)

		Observation 1	Observation 2 (hauteur du niveau modifiée)	Moyenne
Niveau	Lecture sur le repère fondamental	1,3202	1,3276	
	Valeur de la référence du ruban (bas escalier) de 1 m	1,0000	1,0000	
	Lecture sur le ruban (bas escalier) de 1 m	- 0,8297	-0,8374	
	Correction d'étalonnage	0,0000	0,0000	
	1er Ruban de 2 m	2,0000	2,0000	
	Correction d'étalonnage	0,0000	0,0000	
	2ème ruban de 2 m	2,0000	2,0000	
	Correction d'étalonnage	0,0000	0,0000	
Niveau	Lecture sur le ruban (haut escalier) de 1 m	0,7837	0,7660	
	Correction d'étalonnage	0,0000	0,0000	
	Lecture avant sur le crapaud	-1,0304	-1,0127	
	Valeur de la dénivelée	5,2438	5,2435	
Déplacement du niveau	Lecture arrière sur le crapaud			0,9672
	Lecture avant sur le repère 0-III près du marégraphe			-1,0482
	Dénivelée totale			5,1626

17. Annexe D : lectures sur le disque mobile et sur les roulettes totalisatrices



18. Annexe E : mesures mensuelles à la sonde

Les champs à remplir sont en Jaune			
PORT :	MARSEILLE	DATE:	26/08/2010
		SYSTEME HORAIRE:	
		COEFFICIENT:	
CÔTE (cm):	343,87	Observations:	
REGLE (cm):	4,15		
Const. Sonde:	46,52		
Nom du repère TA :			
Année de la côte :			
Fruit du quai:			
Echelle utilisée:			
Dérive de l'horloge:		Nom de l'organisme:	
		Opérateur(s) :	Mr Vergne
N° Centrale:			
N° Capteur:			
MOYENNE des écarts à BM:	-0,38	bon	Retour historique
écart type BM:	0,04		
MOYENNE des écarts à PM:			Performances
écart type PM:			
Moyenne des écart à l'extérieur du puits (ou tube) :		BM	
		écart type:	
		PM	
		écart type:	
Attention : Pour les mesures à la sonde lumineuse, précision au millimètre			
Résultat :	Bon		

MESURES A BASSE MER (Intérieur)						
Heure : minutes	Secondes	Tirant air sonde (cm)	Moy. TA	H. Eau sonde	H. Eau MCN (sur centrale)	Ecart
07:39	0					
	15					
	30					
	45					
07:40	0	245,37	245,37	47,83	48,2	-0,37
	15		OK			
	30					
	45					
07:41	0					
MESURES A BASSE MER						
Heure : minutes	Secondes	Tirant air sonde (cm)	Moy. TA	H. Eau sonde	H. Eau MCN (sur centrale)	Ecart
07:49	0					
	15					
	30					
	45					
07:50	0	245,12	245,12	48,08	48,5	-0,42
	15		OK			
	30					
	45					
07:51	0					
MESURES A BASSE MER						
Heure : minutes	Secondes	Tirant air sonde (cm)	Moy. TA	H. Eau sonde	H. Eau MCN (sur centrale)	Ecart
07:59	0					
	15					
	30					
	45					
08:00	0	244,84	244,84	48,36	48,7	-0,34
	15		OK			
	30					
	45					
08:01	0					
MESURES A BASSE MER						
Heure : minutes	Secondes	Tirant air sonde (cm)	Moy. TA	H. Eau sonde	H. Eau MCN (sur centrale)	Ecart
08:09	0					
	15					
	30					
	45					
08:10	0					
	15					
	30					
	45					
08:11	0					
MESURES A BASSE MER						
Heure : minutes	Secondes	Tirant air sonde (cm)	Moy. TA	H. Eau sonde	H. Eau MCN (sur centrale)	Ecart
08:19	0					

19. Annexe F : exemple de diagrammes de Van de Castele

Test de Van de Castele d'avril 2009. Le diagramme n°1 montre que les mesures du MCN sont affectées par une légère erreur d'échelle. Le diagramme n°2 indique que la mécanique du marégraphe totalisateur possède un jeu (hystérésis) d'environ 5 mm, ce qui est classique pour cet instrument.

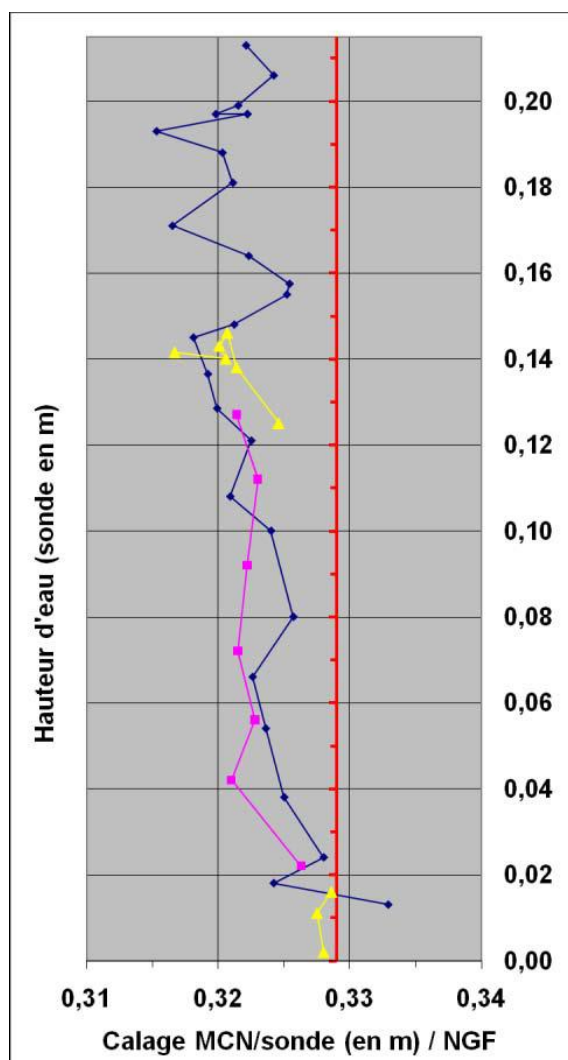


Diagramme n°1

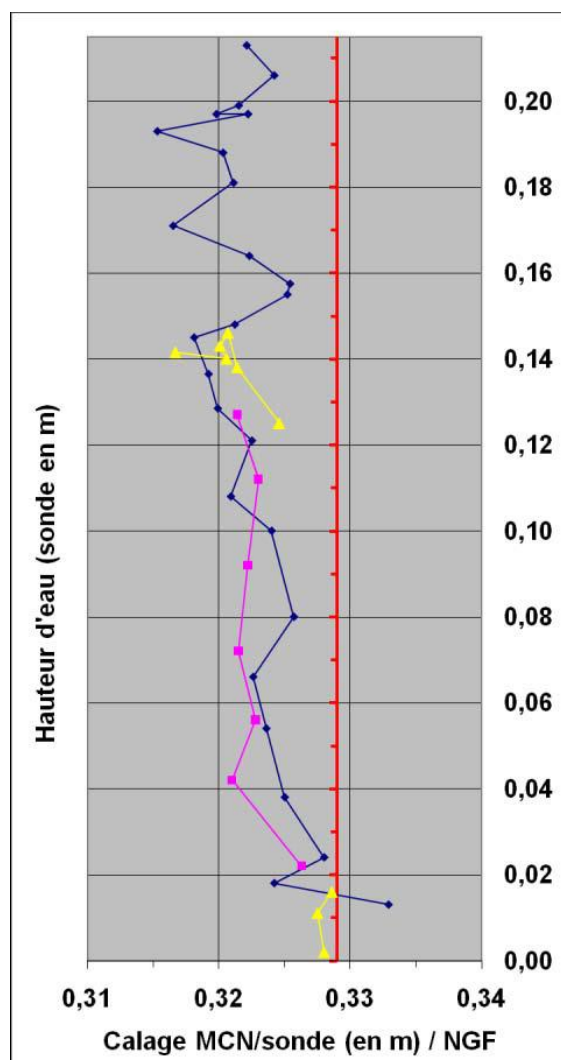


Diagramme n°2