

Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille

S
G
N

2
8
2
2
0

P. BONNETAIN
A. COULOMB
P. TIPHANEAU
F. VERGNE
G. WOPPELMANN

FEVRIER 2009

SERVICE DE GÉODESIE ET NIVELLEMENT UNITÉ DES RÉSEAUX DE RÉFÉRENCE MATÉRIALISÉS	SGN / IT/G n° 276 Édition : 1.0 DATE : Février 2009
Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : i.1/6



Université de La Rochelle

Service de Géodésie et Nivellement de l'Institut Géographique National

Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille



Mots Clés	Marégraphe ; étalonnage ; test de Van de Casteele ; nivellement.
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.

	Titre	Nom	Date et signature
Rédacteurs	Chef du département des Réseaux de nivellement (IGN) – En retraite	Paul Bonnetain	18/06/2009 – signé
	Chef du département des Réseaux de référence matérialisés, Service de Géodésie et Nivellement (IGN) Adjoint technique en instrumentation scientifique (ULR) Agent IGN chargé des visites au Marégraphe Maître de conférences, Responsable scientifique de SONEL (ULR)	Alain Coulomb	05/06/2009 – signé
		Pascal Tiphaneau	
		Franck Vergne	10/06/2009 – signé
		Guy Wöppelmann	
Vérificateurs	Maître de conférences, Responsable scientifique de SONEL (ULR)	Guy Wöppelmann	
	IGN/SGN Chargé de mission auprès du chef de service, Responsable Qualité	Hervé Fagard	05/06/2009 – signé
Approbateur	Chef du SGN	Françoise DUQUENNE	26/06/2009 – signé

APPLICABLE A PARTIR DE : Février 2009

Confidentialité :

Gestionnaires du document : A. COULOMB
Nombre de pages total : 36
Nombre de pages liminaires : 6
Nombre d'annexes : 4

SERVICE DE GÉODESIE ET NIVELLEMENT UNITÉ DES RÉSEAUX DE RÉFÉRENCE MATÉRIALISÉS	SGN / IT/G n° 276 Édition : 1.0 DATE : Février 2009
Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : i.2/6

Système hôte : Windows XP Word 2003

DIFFUSION

FONCTION / SERVICE	NOM	Service	Nombre
Chef du projet RONIM	Ronan CREACH	SHOM	3 ex.
Responsable SHOM de la Base opérationnelle de Méditerranée	Jean-Michel PREYNAT	SHOM	1 ex.
Directeur de la Production	Alain PERRET	DPR	1 ex.
Chef du Service de Géodésie et Nivellement	Françoise DUQUENNE	SGN	1 ex.
Maîtrise d'Ouvrage Service Public	Hervé LE MEN	MODSP	1 ex.
Centre de Documentation	Bernard BEZES	SDOG	1 ex.
Département Positionnement terrestre et spatial	Serge BOTTON	ENSG	1 ex.
<u>Service de Géodésie et Nivellement</u>			
Responsable Qualité du Service	Martial JEANNOT	SGN	1 ex.
Chefs d'unités			
- Produits - Développements	Alain HARMEL	SGN/PMT	1 ex.
- Réseaux de Référence Matérialisés	Alain COULOMB	SGN/PMR	5 ex.
- Travaux spéciaux	Thierry PERSON	SGN/PMS	1 ex.
- Information Géodésique	Gilles CANAUD	SGN/PMC	1 ex.
- Réseau GPS Permanent	Thierry DUQUESNOY	SGN/PMP	1 ex.

SERVICE DE GÉODESIE ET NIVELLEMENT UNITÉ DES RÉSEAUX DE RÉFÉRENCE MATÉRIALISÉS	SGN / IT/G n° 276 Édition : 1.0 DATE : Février 2009
Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : i.3/6

MODIFICATIONS

ÉDITION	DATE	PAGES MODIFIÉES
Projet	01/04/2003	Création du document
1.0	Février 2009	Première édition du document

SERVICE DE GÉODESIE ET NIVELLEMENT UNITÉ DES RÉSEAUX DE RÉFÉRENCE MATÉRIALISÉS	SGN / IT/G n° 276 Édition : 1.0 DATE : Février 2009
Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : i.4/6

SERVICE DE GÉODESIE ET NIVELLEMENT UNITÉ DES RÉSEAUX DE RÉFÉRENCE MATÉRIALISÉS	SGN / IT/G n° 276 Édition : 1.0 DATE : Février 2009
Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : i.5/6

SOMMAIRE

1. OBJET DU DOCUMENT.....	1
2. PRESENTATION DE L'OBSERVATOIRE MAREGRAPHIQUE	1
2.1. BREF HISTORIQUE	1
2.2. REGAIN D'INTERET	2
3. LES CONTROLES	3
3.1. OBJECTIF DES CONTROLES	3
3.2. QUELS CONTROLES ?	4
3.3. QUAND REALISER UN ETALONNAGE ?	4
3.4. SUCCESSION DE MAREGRAPHES ?.....	4
4. ÉTALONNAGE DE MAREGRAPHE	5
4.1. PRINCIPE DE L'ÉTALONNAGE.....	5
4.2. TEST DE VAN DE CASTEELE	6
4.3. CHOIX DE LA DATE D'UNE OPERATION D'ÉTALONNAGE	6
5. MOYENS MATERIEL ET HUMAINS	7
5.1. LISTE ET DESCRIPTION DU MATERIEL	7
5.2. VERIFICATIONS ET REGLAGES AVANT DEPART	9
5.3. PERSONNEL NECESSAIRE.....	9
5.4. CONTACTS PREALABLES A LA MISSION.....	9
6. MISE EN PLACE.....	10
6.1. INSTALLATION DU SONDEUR	10
6.2. INSTALLATION DU NIVEAU NA2 DANS LA CRYPTÉ	11
6.3. INSTALLATION DU RUBAN INVAR POUR 'REMONTER' LE NIVELLEMENT	11
7. ACQUISITION DES MESURES.....	12
7.1. DEROULEMENT DES OPERATIONS	12
7.2. HAUTEURS D'EAU.....	13
7.3. ALTITUDE DU ZERO DU CURSEUR PORTE RUBAN	15
7.4. OPERATIONS DE NIVELLEMENT	16
<i>Observation des repères situés dans la crypte.....</i>	<i>16</i>
<i>Rattachement des autres repères au repère fondamental.....</i>	<i>17</i>
Rattachement du repère 0-III situé à côté du marégraphe.	17
Rattachement à partir du repère 0.III.....	18
Rattachement à partir du 0-II ter	18

SERVICE DE GÉODESIE ET NIVELLEMENT UNITÉ DES RÉSEAUX DE RÉFÉRENCE MATÉRIALISÉS	SGN / IT/G n° 276 Édition : 1.0 DATE : Février 2009
Contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : i.6/6

Nivellement complémentaire.....	19
<i>Mise en œuvre des spécifications d'usage en nivellement</i>	19
Contrôle et réglage de la collimation des niveaux.....	19
Egalité des portées.....	19
Mires	19
Stabilité des instruments.....	19
Contrôle des calculs, archivage	20
8. EXPLOITATION DES DONNEES	20
8.1. DETERMINATION DE LA HAUTEUR D'INDEX DE LA SONDE	20
8.2. CONSTRUCTION ET INTERPRETATION DU DIAGRAMME DE VAN DE CASTEELE	20
8.3. DETERMINATION DE LA CONSTANTE DE CALAGE.....	21
8.4. ETALONNAGE INTERNE (APPAREILS).....	21
8.5. ETALONNAGE EXTERNE (PUITS, CHENAL).....	21
9. RAPPORTS DE MISSION.....	22
10. VISITES HEBDOMADAIRES REALISEES PAR LE CIR D'AIX-EN-PROVENCE	22
10.1. MESURES	22
10.2. CALCULS.....	23
10.3. SURVEILLANCE	23
10.4. MAINTENANCE.....	23
11. CONCLUSIONS.....	24
12. REFERENCES	24
13. ANNEXE A : FORMULES ET CONSTANTES DE CALAGE DEPUIS 1993	25
14. ANNEXE B : RATTACHEMENT DU REPERE 0-III AU REPERE FONDAMENTAL	27
15. ANNEXE C : MODE OPERATOIRE POUR LE RATTACHEMENT DU REPERE DE NIVELLEMENT M.AC - 0-III	28
16. ANNEXE D : LECTURES SUR LE DISQUE MOBILE, SUR LES ROULETTES ET SUR LA REGLETTE HORIZONTALE	29

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 1/30

1. Objet du document

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. La motivation première qui a conduit à sa rédaction est le souci de transmettre les connaissances et le savoir-faire acquis ces dernières années au cours des opérations d'étalonnage. Un savoir qui était disséminé dans les archives, des connaissances qu'il a fallu reconstruire à partir de rapports de mission passées, souvent succincts... Il a fallu plusieurs années avant d'aboutir à la parution de cette notice ; des versions provisoires et inachevées sont conservées dans les archives du Marégraphe de Marseille (IGN/SGN 100 13 05/20030319F1). Il reste d'ailleurs probablement encore des choses à découvrir ! Ce document précise également les travaux à réaliser entre les opérations d'étalonnage ainsi que les documents à établir.

2. Présentation de l'observatoire marégraphique

2.1. Bref historique

L'observatoire du niveau de la mer de Marseille fut construit en 1883-1884 à la demande du Service 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 *géοi*de, 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 principal instrument de l'observatoire, qui d'ailleurs donne son nom à ce dernier, est le marégraphe. Celui de Marseille est 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 auraient existé en Europe, l'un à Cadix, en Espagne, et l'autre sur l'île d'Helgoland, en Allemagne.



Fig. 1 : Vue du marégraphe totalisateur

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 2 février 1885 et le 31 décembre 1896 (inclus) ont servi à fixer le zéro du réseau de nivellement français continental. 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.

2.2. Regain d'intérêt

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, pour n'en citer que quelques unes. 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.

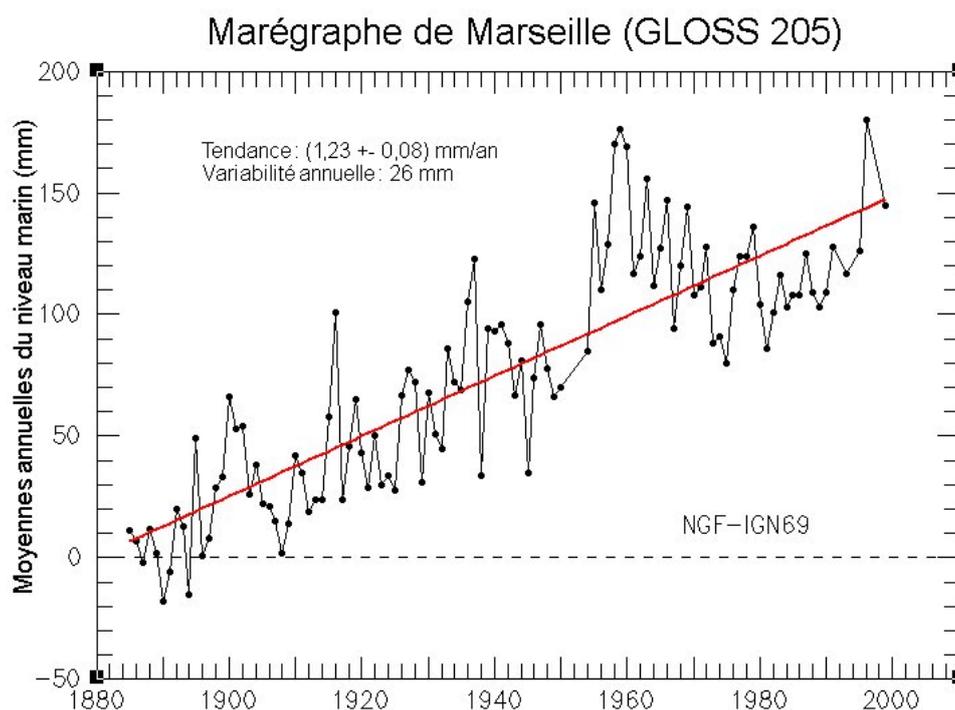


Fig. 2 : Série chronologique des moyennes annuelles du totalisateur de Marseille.

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

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 3/30

Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO (COI/IOC) réunis autour du programme mondial GLOSS¹. 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 PSMSL². Dès lors, et sous l'impulsion d'une recommandation du CNFGG³ émise lors de son Assemblée Générale de 1996, l'IGN a entrepris des actions concrètes visant à remettre à niveau l'observatoire marégraphique de Marseille et à valoriser ce patrimoine historique et scientifique. Mentionnons :

- la numérisation des marégrammes enregistrées entre 1885 et 1987, avec les soutiens du Ministère de l'Environnement et du SHOM⁴ ;
- l'acquisition d'un marégraphe moderne numérique à capteur ultrasons, dit marégraphe côtier numérique ou MCN, installé et géré avec le concours du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) ;
- l'installation d'une station GPS permanente ;
- la réhabilitation des deux bâtiments de l'observatoire ;
- le nettoyage et la consolidation du chenal et de la galerie d'accès au puits ;
- l'installation d'une échelle de marée par le SHOM ;
- le classement de l'observatoire parmi les monuments historiques.

Une convention cadre de coopération entre l'IGN et le SHOM 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). Elle 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. Les contrôles

3.1. 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 pourront 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 affectera 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

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

⁴ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 4/30

et al., 2007). Il est donc important de recalibrer régulièrement, 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 permettra par la suite de situer les performances du marégraphe dans la gamme existante, mais aussi de mettre en place une stratégie de contrôle adaptée.

3.2. Quels contrôles ?

Il s'ensuit les contrôles suivants :

- *l'étalonnage du marégraphe* (objet de ce document, détails section 3) ;
- *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 GPS permanente, dont le repère matériel est inclus dans le réseau local de repères du marégraphe.

3.3. Quand réaliser un étalonnage ?

L'étalonnage doit se faire *au moins une fois par an* suivant les recommandations internationales toujours en vigueur au moment où cette note est rédigée (IOC, 1985, 2006). La fréquence des opérations dépend néanmoins des performances particulières de chaque marégraphe. Si l'expérience montre que l'appareil est très stable dans le temps, les étalonnages seront espacés en conséquence.

Des étalonnages sont également nécessaires à la suite d'entretiens ou de réparations du marégraphe ou d'une de ses composantes. Notons à ce propos que le chenil 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...).

3.4. Succession de marégraphes ?

Le remplacement d'un appareil marégraphe 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.

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 5/30

4. Étalonnage de marégraphe

4.1. 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 quelque 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. 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 : (i) de caler ou de recalcer le marégraphe dans la référence de l'observatoire, (ii) de contrôler les performances de l'instrument, notamment sa précision et son bon fonctionnement.

Signalons que, ces dernières années, nous avons constaté la pratique de l'étalonnage des marégraphes côtiers avec des marégraphes plongeurs à capteur de pression. Les résultats semblent plus précis car le marégraphe plongeur observe pendant un mois, voire plus, mais les questions suivantes se posent :

- comment est calé et contrôlé le marégraphe plongeur ?

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 6/30

- peut-on toujours parler d'étalonnage lorsque les performances de l'étalon sont *a priori* moindres (capteurs à pression, capteurs radar) ?

4.2. 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 travers éventuels du marégraphe. La figure 3 ci-dessous donne quelques diagrammes avec le diagnostique correspondant sur les performances du marégraphe :

Pour construire un diagramme de Van de Castele, 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.

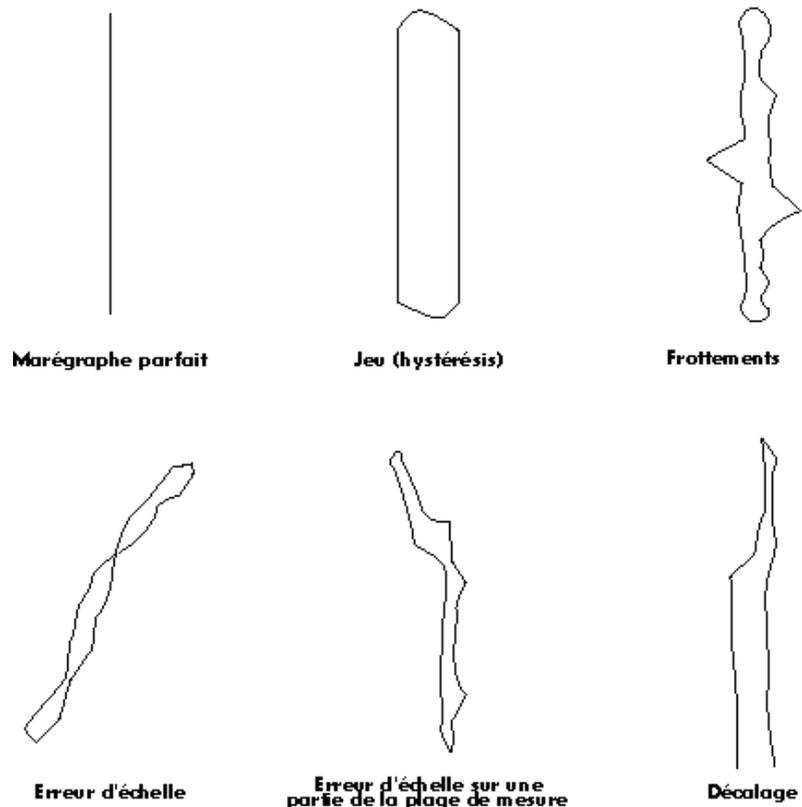


Fig. 3 : Exemples de diagrammes de Van de Castele.

4.3. Choix de la date d'une

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 7/30

opération d'étalonnage

Suivant les recommandations internationales (cf. § II.2) et l'expérience particulière acquise sur les marégraphes totalisateur et acoustiques, l'étalonnage devrait se faire *en moyenne une fois par an à Marseille*.

Le choix précis de la date dépendra 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 seront donc retenus, en examinant par exemple l'annuaire de marée et en choisissant un *coefficient supérieur à 95*, soit une amplitude supérieure à 20 cm. 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, nous insistons sur la nécessité de réaliser un étalonnage *avant et après tout changement de composante de l'appareil marégraphique*. Si une panne survient, l'étalonnage ne pourra bien entendu se faire qu'après, malheureusement, mais le plus tôt possible néanmoins.

5. Moyens matériel et humains

5.1. Liste et description du matériel

Etalonnage :

- 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
- Boîte petit outillage (marteau, pince universelle, tenaille, 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 avec leurs constantes écrites dessus (1 opérationnelle et 1 de secours)
 - 4 piles LR20 1,5 volts pour la sonde lumineuse
 - 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

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 8/30

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

Le Service de la Logistique de l'IGN (SLOG) tient à jour une notice expliquant 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 doit vérifier cette constante avant chaque mission.

Remontée du nivellement :

- 1 masse de 5 kg pour ruban invar
- 2 niveaux NA2
- 2 mires centimétriques IGN de 2 mètres avec chiffraison des échelles 1 et 2 "montante"
- 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 et donc l'utilisation de niveaux mécaniques (pour ces deux opérations, il n'est pas possible d'utiliser de niveaux numériques, qui peuvent par ailleurs être employés pour les autres mesures de nivellement).

Nivellement extérieur

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

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 9/30

5.2. Vérifications et réglages avant départ

Le marégraphe moderne MCN⁵ 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 10 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 demander au SHOM de programmer l'intégration du MCN à 10 secondes (cf. contacts ci-après).

Quelques précautions de bon sens et d'usage en nivellement sont rappelées ici :

- S'assurer de l'étalonnage du ruban invar du sondeur auprès du SLOG.
- Vérifier que les piles sont bien en place dans le sondeur et qu'une ampoule de rechange est disponible.
- Régler les niveaux (collimation).
- Contrôler la verticalité des mires, leur talon, ainsi que l'état des crapauds.

Attention : périodiquement, en accord avec le SLOG, ou à la suite d'un incident, les matériels lui seront envoyés pour vérification, contrôle, remise en état, échange.

5.3. 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).

5.4. Contacts préalables à la mission

Horloge Parlante : 36 99 *Synchronisation horloges opérateurs*

Attention au rafraîchissement de l'affichage de l'heure du GPS qui présente des délais.

CIR Aix-en-Provence : *Clefs et Procédures de sécurité (alarmes...)*.

Contact (en 2009) : Franck VERGNE : 04 42 16 31 13 ou 06 09 86 05 25 (franck.vergne@ign.fr)

SHOM : *Réglage des paramètres du marégraphe MCN ; courbe de marée pour la date d'étalonnage.*

Contacts (en 2009) : François LUCAS : 02 98 22 17 42 (lucas@shom.fr)

Virginie GOIRAND (virginie.goirand@shom.fr)

Ronan CREACH : 02 98 22 15 89 (creach@shom.fr)

⁵ Marégraphe Côtier Numérique (il s'agit ici du marégraphe à capteur à ultrasons)

6. Mise en place

6.1. Installation du sondeur

→ 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.4: 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).

Fig. 5 : Dispositif porte sonde

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 (cf. figure 5).



SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 11/30

→ 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. 6 : Mesure de la constante "b"

→ Relever la constante "a" du sondeur (elle est indiquée dans sa boîte et sur le sondeur, elle doit être vérifiée par le SLOG).

→ 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.**

6.2. Installation du niveau NA2 dans la crypte

→ Placer le niveau sur un trépied à jambes coulissantes. L'emplacement idéal dans la crypte est indiqué dans la figure 15.

→ Bien veiller à ce que les pointes du trépied ne puissent glisser sur le sol.

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.

→ Patienter au moins un quart d'heure avant d'utiliser l'appareil (pour qu'il se mette à température ambiante).

6.3. 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. 7 : Partie supérieure (en haut de l'escalier)



Fig. 8 : Partie inférieure (dans la crypte)



Fig. 9 : Extrémités du ruban (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.

Afin de stabiliser son allongement (température ambiante), le ruban doit être mis en place la veille des mesures de nivellement.

7. Acquisition des mesures

7.1. Déroulement des opérations

Une expérience de contrôle typique, c'est-à-dire sans réparation, ni remplacement d'un composant du marégraphe, comprend un étalonnage et le nivellement des repères de l'environnement immédiat de l'observatoire. Les opérations peuvent s'organiser sur trois jours de la manière suivante :

Premier jour

- Acheminement du matériel dans l'observatoire marégraphique.
- Installation du porte sonde et de la sonde lumineuse, puis vérification par plusieurs essais que tout fonctionne correctement (cf. § 6.1).
- Montage du ruban invar comme indiqué au § 6.3.
- 1^{ère} détermination de l'altitude du zéro du curseur porte-ruban (cf. § 7.3.)

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 13/30

Deuxième jour

- Dès l'arrivée, détermination de l'altitude du zéro du curseur, une autre sera réalisée en cours de journée, et une dernière à la fin (cf. § 7.3).
- Durant toute la journée, mesures simultanées de hauteur d'eau toutes les 10 ou 20 minutes sur tous les appareils, c'est l'étalonnage (cf. § 7.2).
- Pendant les temps morts, entre chaque mesure d'étalonnage, rattachement des repères de la crypte.
- Egalement, toujours entre les mesures d'étalonnage, "remontée" du nivellement de la crypte au rez-de-chaussée, entre le repère fondamental et le repère 0-III situé près du marégraphe totalisateur (cf. § 7.4).

Troisième jour

- Achever toutes les opérations de nivellement à l'intérieur et à l'extérieur de l'observatoire comme indiqué au § 7.4.
- Nettoyer et ranger le matériel.

7.2. Hauteurs d'eau

Les mesures de hauteur d'eau doivent se faire en simultané : (1) sur la réglette du marégraphe mécanique (cf. figure 10) ; (2) sur l'écran de visualisation de la centrale d'acquisition du MCN située dans le bureau du gardien (cf. figure 11) ; (3) sur le ruban porte-sonde par rapport à l'index (cf. figure 12) ; et (4) sur l'échelle de marée si l'état de la mer le permet (cf. figure 13).



Fig. 10 : réglette marégraphe mécanique



Fig. 11 : centrale d'acquisition MCN

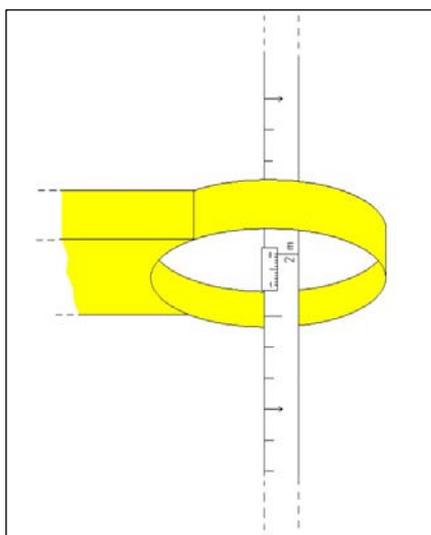


Fig.12 : index porte-sonde



Fig.13 : échelle de marée

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 9h00, 9h10, 9h20...

Les montres des intervenants doivent impérativement être réglées au mieux à un étalon de temps (un réglage à quelques secondes près convient), horloge DCF, horloge parlante (3699) ou GPS. 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 (cf. [1]).

Pour réaliser une mesure à la sonde : mettre le bouton du sondeur sur M (Marche), tester la lampe en appuyant sur 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).

La figure 14 donne un exemple de lecture à la règlette du marégraphe mécanique. On lit 1,10 sur l'échelle du haut, le complément en millimètres est donné par le vernier (dans le cas illustré l'alignement des traits se fait au niveau du 2)

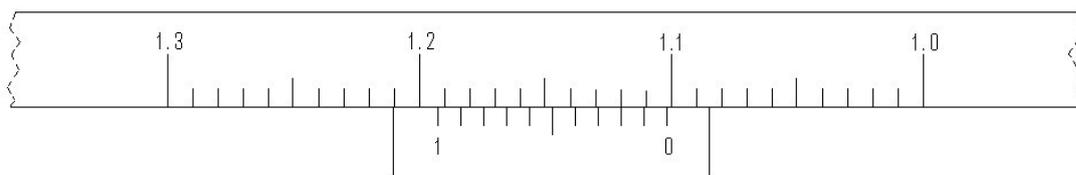


Fig. 14 : Exemple de lecture sur la règlette du marégraphe : 1.102 m

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 15/30

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 les corriger sur place. Une courbe de marée se construit également, elle permet de se situer dans le cycle de marée.

7.3. Altitude du zéro du curseur porte ruban

Le sondeur et le ruban porte-sonde sont en place (cf. § 6). Le ruban est fixé de façon à faire coïncider une de ses graduations rondes avec le 0 de l'index porte-sonde, par exemple la graduation 2,00 mètres (voir figure 12). 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.



Fig. 15 : mesure avec niveau NA2 dans la crypte, la mire est sur le repère fondamental

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 (sur la graduation 0,50) se calcule alors ainsi :

$$\text{Alt}_{\text{index}} = 1,661 + 1,3929 + 0,50 - 0,4439 = 3,1100 \text{ m}$$

$$\text{avec } \text{Alt}_{\phi} = 1,661 \text{ m.}$$

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 mètre donne :

$$\text{Alt}_{\text{index}} = 1,661 + 1,3839 + 2,00 - 0,9351 = 3,1098 \text{ m}$$

7.4. 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.

Lorsque l'occasion se présentera ou le besoin se fera sentir (doutes sur la stabilité, changement d'antenne GPS...), le repère sous l'antenne GPS (cf. figure 16) sera ré-observé. Ce dernier pouvant faire l'objet d'un rattachement indépendant du marégraphe (RGP...), il est important de veiller à être informé et à collecter les résultats.



Fig.16 : antenne GPS et repère hémisphérique situés sur la terrasse du Marégraphe

Observation des repères situés dans la crypte

→ Cheminement en boucle (le rayonnement est proscrit), aller et retour, seul le fil niveleur est lu sur les deux échelles I et II de la mire. Le niveau est positionné comme indiqué précédemment (cf. § 6.2).

→ Le cheminement aller débute sur le repère 0-VIII (repère fondamental), puis sont observés les repères 0-VII, 0-IV (cornière), 0-V, 0-VI, le cheminement se fermant sur le repère fondamental.

→ Le cheminement retour, la hauteur d'appareil étant modifiée, est réalisé dans le sens contraire : 0-III, 0-VI, 0-V, etc.

→ Les dénivelées sont immédiatement calculées, contrôlées entre elles, la dénivelée moyenne étant comparée à la dénivelée issue de l'étalonnage précédent, une réobservation étant immédiatement entreprise en cas d'incohérence ou de faute dans les résultats.

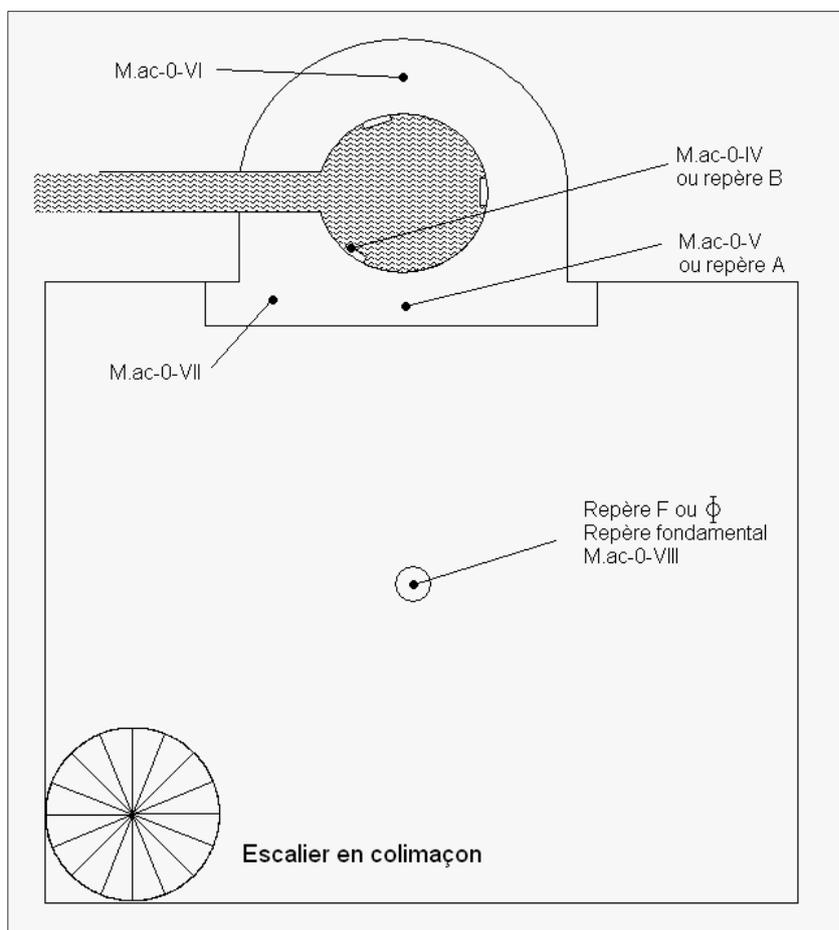


Fig.17 : Emplacement des repères dans la crypte

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 17/30

Rattachement des autres repères au repère fondamental

Rattachement du repère 0-III situé à côté du marégraphe.

Ce rattachement est réalisé à partir du repère fondamental. Un ruban invar est nécessaire (cf. § 6.3) ainsi que deux niveaux NA2.

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

Un NA2 est positionné dans la crypte comme indiqué dans la figure 15. Un autre NA2 est positionné au rez-de-chaussée près de l'escalier dans l'angle (cf. figure 18). La distance minimale de visée du NA2 étant de 1,6 m la possibilité de lecture sur le ruban est préalablement contrôlée. Un crapaud sera positionné derrière le marégraphe en s'assurant que la visée niveau-crapaud est possible.



Fig. 18 : Niveau NA2 au rez-de-chaussée

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

- avec le NA2 dans la crypte, lecture sur une mire tenue sur le repère fondamental,
- simultanément, le top étant donné par un des opérateurs : avec le NA2-crypte, lecture sur le ruban invar partie inférieure ; avec le NA2-rez-de-chaussée, lecture 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 (cf. figure 19).
- 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, lecture sur le crapaud derrière le marégraphe puis sur le repère 0-III situé sur la margelle supérieure, près du marégraphe.



Fig. 19 : partie du ruban invar accrochée au rez-de-chaussée

Calcul des dénivelées, comparaison à la dénivelée issue de l'étalonnage précédent. Ré-observation si incohérence ou faute. Celle-ci est tout à fait possible lors des lectures sur le ruban invar. Aussi, pour

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 18/30

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 chiffres étant respectée.

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

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.

Rattachement à partir du repère 0.III

Ce rattachement est effectué par cheminement aller et retour, rattachement des repères : 0-XV (repère gravimétrique, cf. figures 20 et 21), 0-II ter, 0-IX (rocher), 0-XI (entrée de la galerie, rivet laiton), 0-XIII (échelle de marée, graduation 0,50 m, la mire étant posée sur le bord supérieur du carré rouge le plus haut, avant les carrés noirs), 0-XIV (rocher, rivet hémisphérique "f" du rattachement métrologique du RGP), etc.

Comparaison aux dénivelées issues de l'étalonnage précédent. Ré-observation si écart anormal.

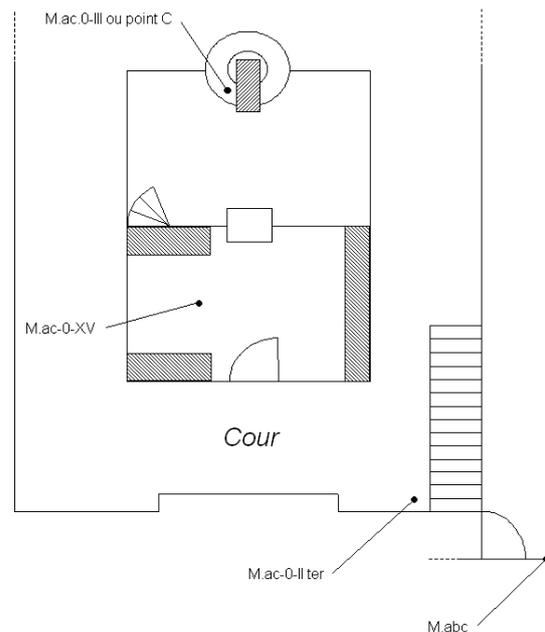


Fig. 20 : Mire sur repère gravimétrique

Rattachement à partir du 0-II ter

En cheminement aller et retour, rattachement des repères 0-I (parapet face au portail d'entrée), M.abc (maison du gardien), M.bc - 68-I (repère "a" du rattachement EUROGAUGE).

Fig. 21 : Rivets de nivellement implantés au rez-de-chaussée



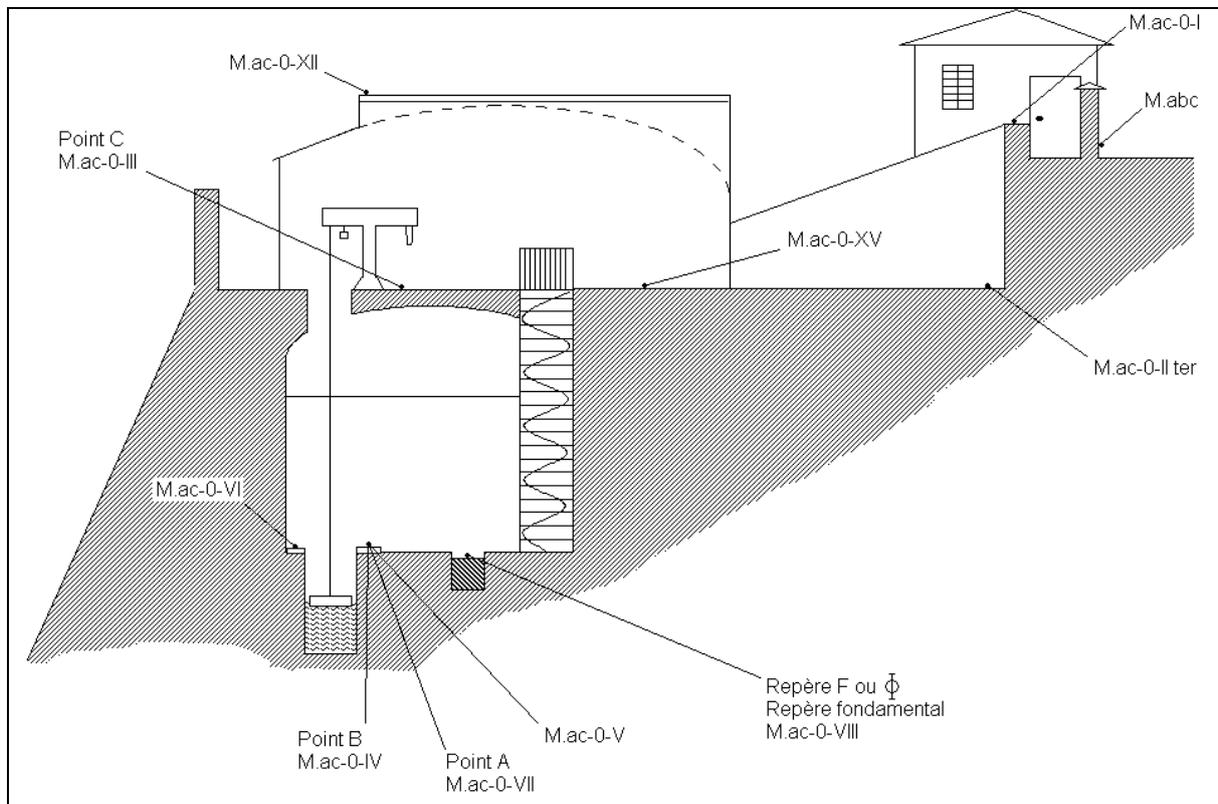


Fig. 22 : Rivets de nivellement implantés au Marégraphe de Marseille

Nivellement complémentaire

Comparaison aux dénivelées issues de l'étalonnage précédent. Ré-observation si écart anormal.

Mise en œuvre des spécifications d'usage en nivellement

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

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

Mires

A tenir verticalement, 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 crapauds.

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 20/30

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. Exploitation des données

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

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.

Pour le détail des calculs, voir § 7.3.

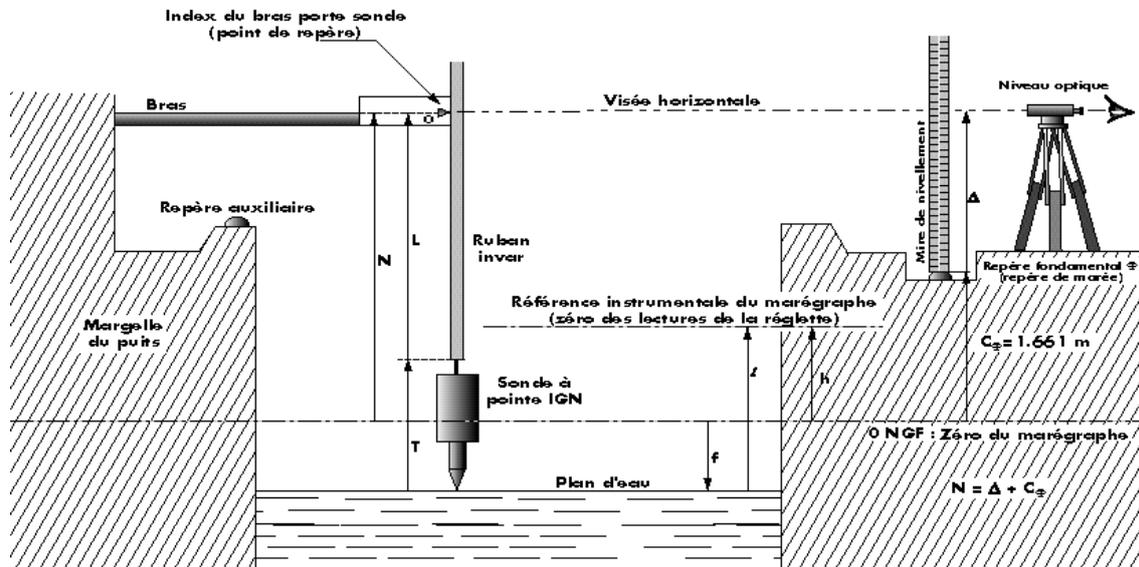


Fig. 23 : Description du dispositif de détermination de la hauteur de l'index de lecture de la sonde lumineuse (Extrait de Wöppelmann, 1997)

8.2. Construction et interprétation du diagramme de Van de Castele

Le diagramme de Van de Castele se construit ainsi : en abscisses, on porte les écarts marégraphe-étalon, et en ordonnées, la hauteur d'eau. Un marégraphe 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. 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.

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 3 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

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 21/30

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.

8.3. 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.

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...

8.4. 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 Castele permettent de déterminer la constante de calage des instruments ainsi que leurs défauts éventuels selon l'allure du diagramme.

8.5. 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 du marégraphe. 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

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 22/30

et d'écart-type σ . L'erreur sur la mesure est alors estimée à $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, n étant le nombre de mesures ou déterminations indépendantes. La mise en application de cette théorie conduit à réaliser un grand nombre de mesures.

9. Rapports de mission

Deux rapports sont rédigés après chaque opération :

- Le chef de mission (ULR, IGN, SHOM, ...) est chargé de relater l'étalonnage proprement dit : 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...).

- l'IGN est notamment chargé de relater les opérations de nivellement et d'entretien des bâtiments.

A l'IGN, les deux rapports sont archivés sous la même référence, selon les spécifications d'archivage en cours (rapport de septembre 2007 : *Compte-rendu CR/G 228* ; *Archive IGN/SGN 28183* ou *IGN/SGN 100 13 05/20070928F1* ; rapport de mars 2008 : *Compte-rendu CR/G 234* ; *Archive IGN/SGN 28196* ou *IGN/SGN/20080322F1*)

Le rapport de l'IGN est communiqué à l'organisme ayant réalisé l'étalonnage, si celui-ci n'est pas l'IGN.

10. Visites hebdomadaires réalisées par le CIR d'Aix-en-Provence

10.1. Mesures

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 compte tour de tambour et son index sur le grand cercle en verre gradué (le temps). Remarque : depuis l'acte de vandalisme de 1997 l'index n'autorise qu'une seule lecture, initialement deux lectures diamétralement opposées, moyennées permettaient de contrôler les lectures.
- 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.

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 23/30

→ Sur le GPS,

- l'heure TU d'observation est affichée par le GPS (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.

10.2. 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.

10.3. Surveillance

Lors de la visite hebdomadaire à l'observatoire marégraphe, 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.

10.4. Maintenance

Annuellement, en liaison avec le SLOG,

- demander à une entreprise spécialisée de nettoyer porte et grille situées dans le chenal, vérifier leur fixation, nettoyer le chenal (pierres, etc.)

Périodiquement, tous les 5 ans et suivant les résultats de l'étalonnage,

- demander à une entreprise spécialisée de nettoyer la galerie.

Régulièrement,

- 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) ;
- huiler le mécanisme de l'horloge selon les instructions de l'horloger ;
- renouveler les sachets de dessiccation qui se trouvent dans la vitrine du marégraphe.

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 24/30

11. 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.

12. 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 100 13 05/20000215M1.

[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/>

[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 100 13 05/19630415M1.

[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.

[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 100 13 05/19620626E1.

[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.

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 25/30

13. 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

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:

$$f_m = 0.353 - 0.1962 \times \frac{(\hat{a}h' + \hat{a}h'')}{\hat{p}} \text{ en mètres}$$

- à partir du 14 septembre 1994, $h \approx 1.358$ m, donc:

$$f_m = 0.358 - 0.1962 \times \frac{(\hat{a}h' + \hat{a}h'')}{\hat{p}} \text{ en mètres}$$

SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 26/30

- à partir du 7 novembre 1996, $h \approx 1.356$ m, donc :

$$f_m = 0.356 - 0.1962 \times \frac{(\delta n' + \delta n'')}{\delta p} \text{ en mètres}$$

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.

En toute rigueur, on devrait prendre la valeur de $\{h\}$ obtenue lors d'un étalonnage, l'introduire dans la formule ci-dessous [IGN, 1963], et l'adopter pour le calcul des données du totalisateur à partir de la date de l'étalonnage.

$$f_m = h - 1.000 - 0.1962 \times \frac{(\delta n' + \delta n'')}{\delta p} \text{ en mètres}$$

Seulement, l'étalonnage de 1993 fournissait une valeur de $\{h\}$ relativement peu précise par rapports aux autres déterminations, en raison du défaut de frottements qui est visible sur son diagramme de Van de Castele. L'étalonnage suivant permit de confirmer cette valeur en donnant une valeur proche, mais plus précise. En conséquence, c'est cette dernière que nous choisissons. 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.

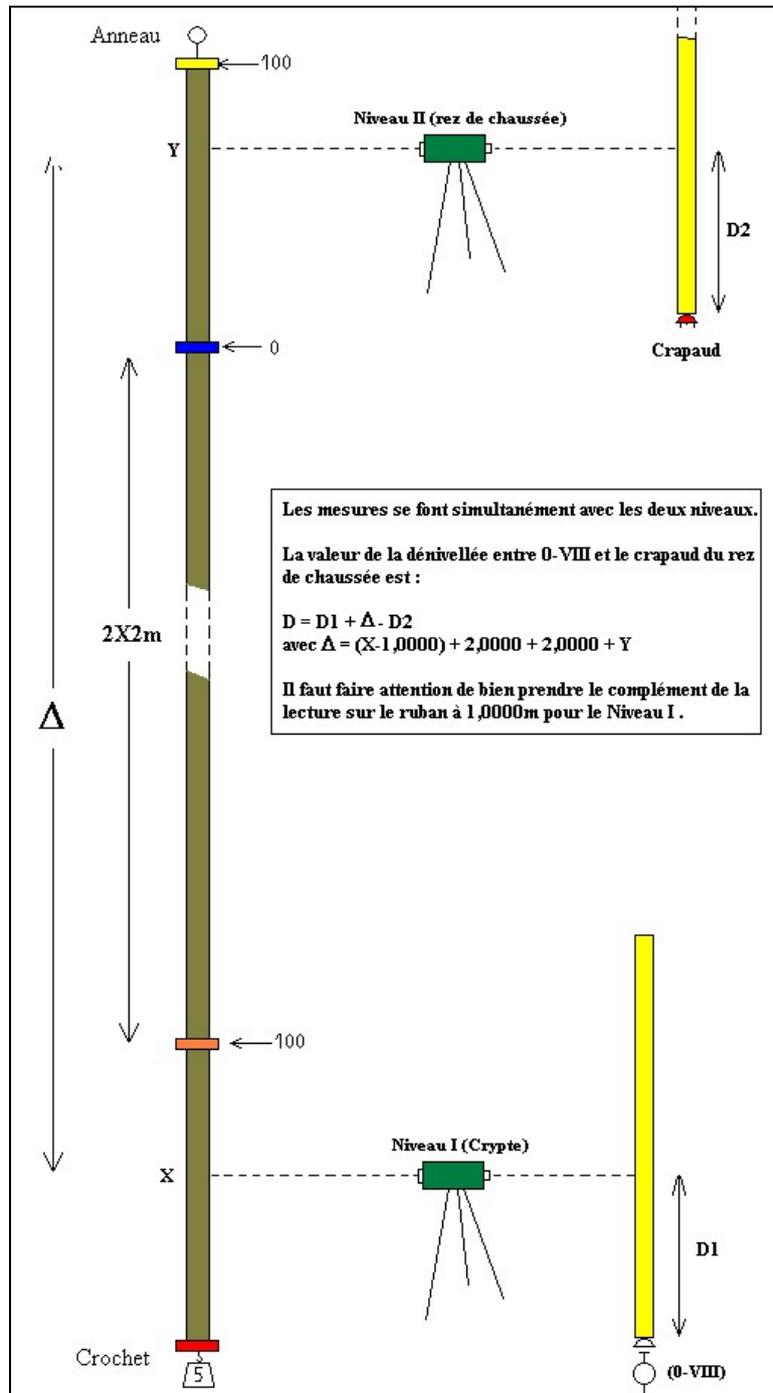
SERVICE DE GEODESIE ET NIVELLEMENT UNITE DES RESEAUX DE REFERENCE MATERIALISES	SGN - IT/G n° 276 Edition : 1.0 DATE : Février 2009
Du contrôle des marégraphes de l'observatoire de Marseille	Page : 27/30

14. Annexe B : Rattachement du repère 0-III au repère fondamental

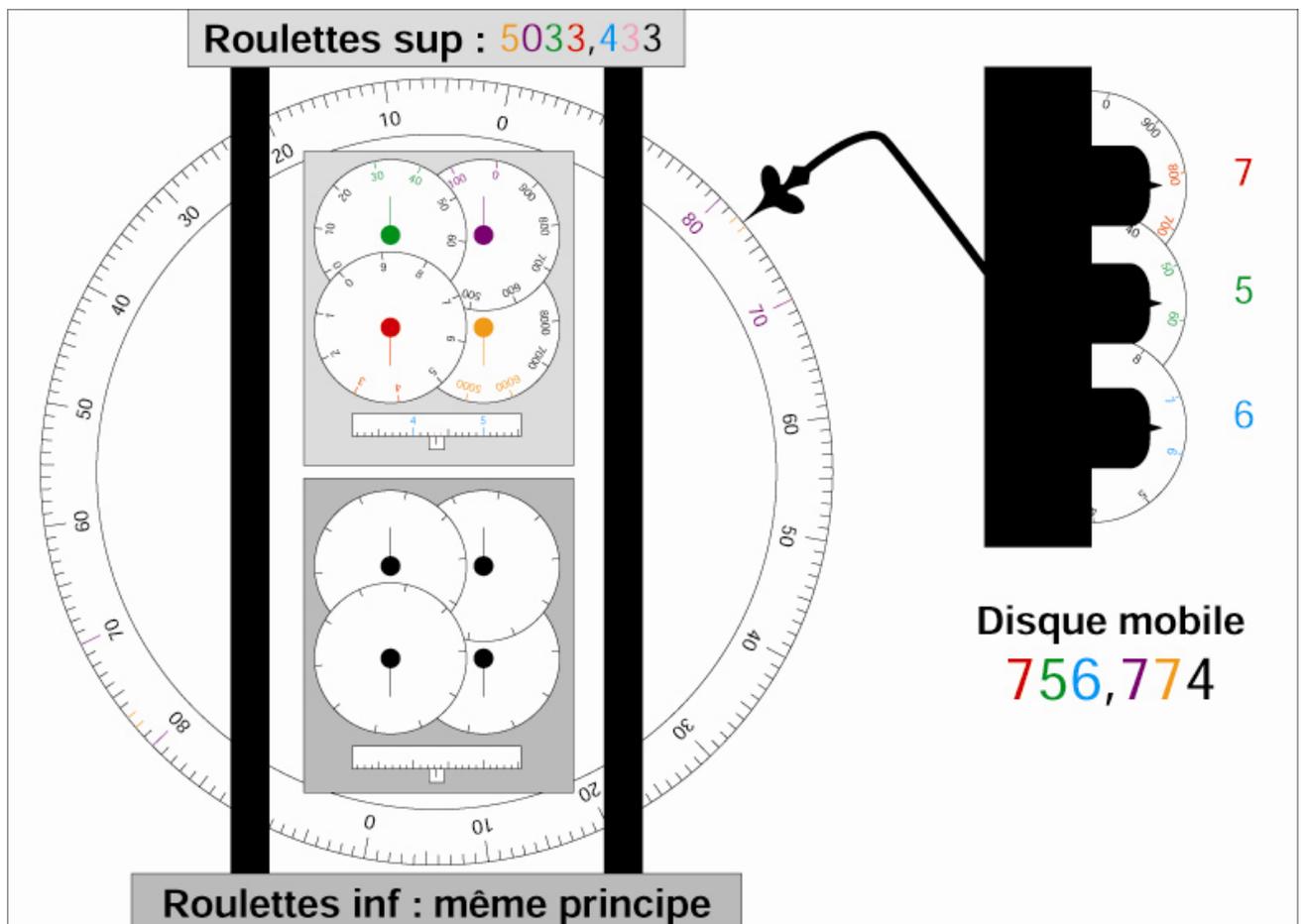
Exemple de feuille d'observation (en rouge les lectures faites avec les niveaux)

		Observation 1	Observation 2 (hauteur du niveau modifiée)	Moyenne
NA2	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	
	1 ^{er} 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	
NA2	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 NA2	Lecture arrière sur le crapaud			0,9672
	Lecture avant sur le repère 0-III près du marégraphe			-1,0482
	Dénivelée totale			5,1626

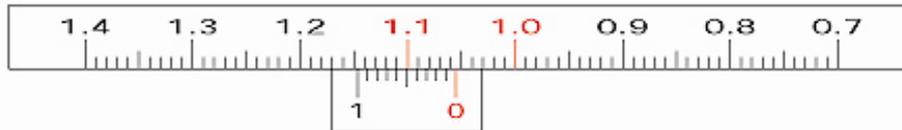
15. Annexe C : Mode opératoire pour le rattachement du repère de nivellement M.ac - 0-III



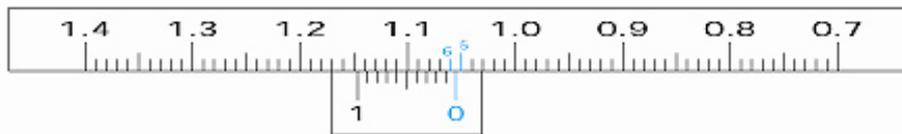
16. Annexe D : Lectures sur le disque mobile, sur les roulettes et sur la réglette horizontale



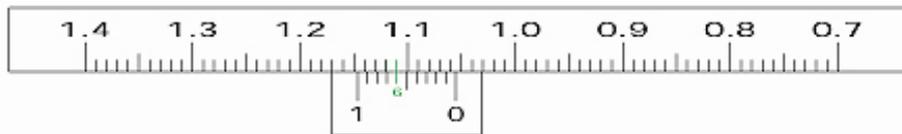
Lecture du VERNIER (réglette horizontale du marégraphe donnant la hauteur de mer)



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



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



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

Exercices de lecture du VERNIER

