



Contrôles du Marégraphe de Socoa (Saint Jean-de-Luz) – Missions du 10-12 mai 2017 et du 23-24 août 2017 –

Rédacteurs : E. POIRIER, M. GRAVELLE, G. WOPPELMANN
Avec relecture de : T. DONAL, S. ENET, L. TESTUT



De gauche à droite: Etienne Poirier, Paul Velut, Thomas Donal, Séverine Enet, Laurent Testut, Médéric Gravelle, Swann Lorrette-Riberolles, Guy Wöppelmann, Philippe Lurton

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	4
2. PRESENTATION DU MAREGRAPHE	5
3. ORGANISATION DE LA MISSION.....	7
3.1. CONTACTS PRATIQUES	7
3.2. PARTICIPANTS & MATERIEL EMPORTE.....	7
3.3. ECHANTILLONNAGE – CENTRALE D’ACQUISITION	7
4. MESURES & RESULTATS	8
4.1. NIVELLEMENT DES REPERES ET ANTENNE GPS	8
4.2. ETALONNAGE DU MAREGRAPHE.....	10
4.2.1. <i>Marégraphe MCN (radar Krohne Optiwave 7300C)</i>	11
4.2.2. <i>Effet du puits de tranquillisation : Echelle de marée DDE & Micro-nappe GPS</i>	13
4.3. EXPERIENCE AVEC LES MAREGRAPHES TEMPORAIRES.....	18
5. CONCLUSIONS	19
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	21
ANNEXE 1 : TABLEAU DES REPERES & RESULTATS DU 11 MAI 2017.....	22
ANNEXE 2 : SCHEMA DE SITUATION DES REPERES & ZEROS DE REFERENCE	23
ANNEXE 3 : POINT DE REFERENCE DE L’ANTENNE GPS DE SCOA.....	24
ANNEXE 4 : SCHEMA DU QUAI & ECHELLE DE MAREE DDE.....	25
ANNEXE 5 : DESCRIPTION DE LA μNAPPE-GPS & ANALYSE DES MESURES	26
ANNEXE 6 : TABLEAU DES MESURES D’ETALONNAGE DU 11 MAI 2017	28

Listes de diffusion

Extérieure :

Alain Roudil, DGA du Développement Economique et Territorial
Frédéric Jocou, DGA du Développement Economique et Territorial

Interne (équipes SONEL) :

Au Shom : V. Donato, S. Enet, P. Lurton, N. Pouvreau, P. Velut, R. Le Gall
A l’IGN : T. Donal, B. Garayt, T. Person
Au LIENSs : M. Gravelle, E. Poirier, E. Prouteau, G. Wöppelmann
Au LEGOS : L. Testut

1. Introduction

Le service d'observation SONEL, qui regroupe entre autres le Shom, l'IGN et le LIENSs, est animé par l'objectif commun de diffuser des informations de niveau moyen de la mer de haute qualité métrologique. Pour atteindre ce but il est nécessaire d'organiser des missions de contrôle afin de déceler d'éventuels dysfonctionnement qui pourraient altérer la qualité des mesures.

L'objectif principal de la mission du 10-11 mai 2017 était le contrôle exhaustif du marégraphe de Socoa (Saint Jean-de-Luz), tel qu'il est recommandé de le réaliser au minimum tous les trois ans pour les marégraphes du réseau RONIM [Lannuzel, 2011]. Cela comprend notamment des opérations de :

- Contrôle de la stabilité locale du site par nivellement de précision des repères de l'observatoire de marée, incluant l'antenne de la station GPS permanente ;
- Calage du marégraphe par rapport au zéro hydrographique ;
- Vérification métrologique du marégraphe (test de Van de Casteele).

L'intérêt de ces opérations est démontré par ailleurs, en particulier le test de Van de Casteele, suite aux études menées par le Shom lors de la rénovation du réseau RONIM par des capteurs radar [Martin Miguez et al., 2008]. Ces opérations concourent à assurer la qualité des observations en accord avec les standards internationaux du programme mondial GLOSS de la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO [COI, 2006].

La Figure 1 montre des résultats de l'analyse des mesures de l'antenne GPS de Socoa (SCOA) fournis par la dernière solution de l'université de la Rochelle (ULR6), indiquant une subsidence importante de -2.7 ± 0.3 mm/an dans le repère géocentrique ITRF2008.

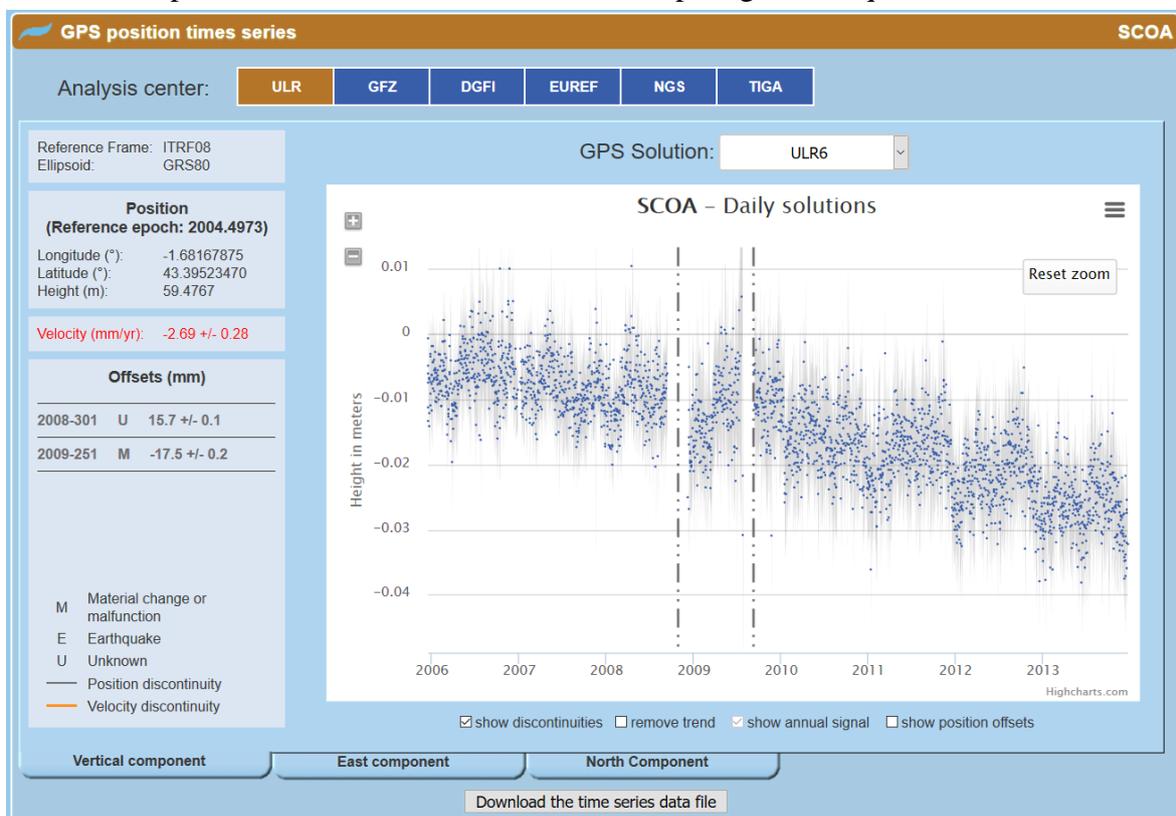


Fig.1 : Série temporelle de hauteurs de la station GPS de Socoa (Source : www.sonel.org).

La mission avait donc aussi pour objet de vérifier, à partir de mesures de nivellement de précision, si l'origine de la vitesse verticale GPS de -2.7 mm/an était un mouvement local, par exemple un affaissement du bout du quai du marégraphe.

2. Présentation du marégraphe

Des observations marégraphiques existent à Socoa depuis 1942, avec deux grosses lacunes entre 1944 et 1964, et entre 1996 et 2004. Cependant, *Pouvreau* [2008] signale l'existence d'observations plus anciennes entre 1875 et 1920, mais au format papier. Ces observations historiques ont été effectuées dans le même puits de tranquillisation avec un marégraphe de type Chazallon, préalablement installé à La Rochelle entre 1863 à 1874 [*Gouriou*, 2012].

Compte tenu de la longueur de la série de mesures, et donc son intérêt pour la connaissance de l'évolution climatique du niveau de la mer, l'installation d'une station GPS permanente à un mètre du marégraphe (Figure 2, gauche) est une initiative excellente de l'IGN [*Beilin*, 2006]. Le quai est plusieurs fois centenaire, bien ancré dans le socle rocheux. La question de sa stabilité locale et/ou géocentrique se pose néanmoins à présent (Figure 1).



Fig.2 : Vue de gauche : marégraphe et antenne GPS permanente (haut à gauche) de Socoa.
Vue de droite : télémètres radar Krohne Optiwave 7300C (en couleur métal) et Vega PS61 (en jaune).

La Figure 2 de droite montre l'installation du marégraphe côtier numérique (MCN), la sonde lumineuse avec son ruban décimétrique et un télémètre radar Vega (en jaune) installé temporairement pendant la campagne d'étalonnage pour être testé (détails en Section 4.3.1). Rappelons que *depuis le 05 mai 2004*, le marégraphe MCN (Marégraphe Côtier Numérique) de Socoa est composé d'un télémètre radar et d'une centrale d'acquisition Marelta. Il fait ainsi

partie du réseau RONIM du Shom et, par conséquent, enregistre des mesures de hauteur du niveau de la mer toutes les 10 min. avec une période d'intégration de 2 min. suivant les spécifications actuelles de ce réseau. Cependant, le télémètre radar n'est plus un Krohne BM70A [Tiphaneau et al., 2007]. Depuis le 11 septembre 2014, il s'agit d'un Krohne Optiwave 7300C [Shom, 2015], dont l'onde se propage dans le même tube en acier inoxydable de 9 cm de diamètre que son prédécesseur.

Les observations brutes haute fréquence (horaires, 10 min) du marégraphe sont accessibles en ligne sur REFMAR (<http://data.shom.fr/donnees/refmar>), alors que les produits de moyennes journalières, mensuelles et annuelles calculés en accord avec les spécifications internationales le sont sur SONEL (<http://www.sonel.org>). Les observations à la seconde sont quant à elles archivées uniquement au CEA et au Shom pour des missions ponctuelles comme celle-ci. La Figure 3 montre la localisation du marégraphe permanent de Socoa (M4) au bout de la digue du marégraphe, ainsi que la répartition des repères de nivellement de l'observatoire.



Fig.3 : Situation de l'observatoire (M4) avec les repères nivelés. Extrait geoportail.gouv.fr [Shom, 2015]

3. Organisation de la mission

3.1. Contacts pratiques

Sur place à Socoa :

- M. Alain ROUDIL, Ingénieur territorial, DGA TEVE, Mission Pêche et Ports.
Tél : 05.59.47.65.18 ; E-mail : Alain.Roudil@le64.fr
 - Frédéric JOCOU, Technicien maritime, DGA TEVE – DTCV, Mission Pêche et Ports.
Tél : 05.59.47.72.52 ; E-mail : Frederic.Jocou@le64.fr
- Il succèdera à M. Roudil comme contact principal pour le marégraphe de Socoa.
- Julien LE CORFF, Responsable d'Atelier Maritime, DGA DET – Pôle Pêche et Ports.
Tél : 06.88.84.85.22 ; E-mail : Julien.Le-corff@le64.fr
- À contacter pour avoir le trousseau de clés du marégraphe.

3.2. Participants & Matériel emporté

Equipe LIENSs (M. Gravelle, S. Lorrette-Riberolles, E. Poirier, L. Testut, G. Wöppelmann) :

- 1 PC pour la saisie des mesures sur fichier Excel au format préétabli.
- 1 Micro-nappe GNSS et le mouillage associé.
- 1 station GNSS mobile pour stationner temporairement un repère : récepteur Leica GR25 S/N 1831209 et antenne Leica AR10 S/N 18196029.

Equipe Shom (S. Enet, P. Lurton, P. Velut) :

- Capteur Radar de Distance Autonome VEGAPULS PS62 S/N 34043400.
Identifiant Shom 06012016T00092
- Capteur Radar de Distance Autonome VEGAPULS PS61 S/N 36336268.
Identifiant Shom 06012017T00042
- Sonde lumineuse et sonore calibrée n°30-02.

Equipe IGN (T. Donal) :

- Niveau optique électronique Leica. Identifiant IGN : DNA03/GPS500. Trépied IGN en bois n° S30109
- Mires Invar IGN à codes-barres vérifiées.

3.3. Echantillonnage – Centrale d'acquisition

La cadence d'archivage de 10 min. des marégraphes RONIM est suffisante d'un point de vue pratique pour l'exécution des mesures d'étalonnage à la sonde lumineuse. Elle représente près de 75 mesures sur un cycle de marée complet (12h25min.), ce qui commence à devenir intéressant pour tirer des résultats statistiquement significatifs, en particulier sur le calage de la référence du marégraphe.

En revanche, une période d'intégration de 10s conviendrait mieux que 2 min. En effet, cette préférence est motivée par des considérations métrologiques et pratiques. L'objectif est d'apprécier la capacité du marégraphe à mesurer avec précision et fidélité (justesse) la hauteur instantanée du niveau de la mer. Or, pendant la durée d'intégration de 2 min. le niveau de la mer subit une variabilité naturelle liée au mouvement de la marée. Celle-ci n'est pas négligeable ; elle peut représenter quelque 2 cm en 2 min. à Socoa, et peut atteindre 6 cm à

Saint-Malo. Il convient donc d'éviter d'introduire dans la comparaison des hauteurs d'eau une source de variation et d'incertitude extérieure à l'instrumentation. Par ailleurs, l'effet d'une moyenne, et la relation entre valeur moyenne et valeur individuelle est connue si les erreurs de mesure sont bien aléatoires et indépendantes.

4. Mesures & Résultats

4.1. Nivellement des repères et antenne GPS

Dix repères proches du marégraphe ont été observés par nivellement de précision en aller – retour. Ils font tous partie de la dernière Fiche d'Observatoire de Marée (FOM) [Shom, 2015]. Le tableau de l'**annexe 1** donne les résultats obtenus sur place en suivant le format et les désignations de la FOM. À noter que le repère Q indiqué dans la FOM de 2015 n'a pas été retrouvé. Le sommet de l'échelle de port de la DDE et les repères matériels sur les marégraphes radar temporaires sont ajoutés. Cette échelle remplace celle mentionnée dans *Tiphaneau et al.* [2015] depuis le 21/07/2016, date de son installation. La section 4.2.2 détaille son exploitation comme étalon extérieur au puits de tranquillisation, avec toutefois quelques précautions puisqu'elle présente **un fruit de 7 degrés avec la verticale** (Annexe 4).

La cote du repère fondamental D de *5,802 mètres par rapport au zéro IGN69* est fixée dans l'analyse des mesures de nivellement pour le calcul des cotes des autres repères. Elle est de *7,975 mètres par rapport au zéro hydrographique (ZH)*, ou zéro de réduction des sondes [Shom, 2015]. Le Tableau 1 (dernière colonne) fournit les écarts de hauteur des dix repères par rapport au repère fondamental D, et les complète par les résultats passés, rapportés dans *Tiphaneau et al.* [2007] et dans *Shom* [2015].

Repère	Ecart /D (2004) +/- 0,001 m	Ecart /D (2007) +/- 0,0005 m	Ecart /D (2015) +/- 0,001 m	Ecart /D (2017) < +/- 0,001 m
D	0	0	0	0
O	0,148	0,1495	0,1500	0,1512
R	–	0,1564	0,1580	0,1595
N	0,161	0,1623	0,1640	0,1638
L	–	–	–	-0,3102
L (capuchon)	–	–	-0,3020	-0,3020
U (SCOA)	–	–	4,8620	4,8878
J	-0,003	-0,0053 m	-0,0010	-0,0002
S	–	–	-1,6960	-1,6940
T	–	–	-1,1030	-1,1021
H	–	–	-1,4900	-1,4880
Haut Echelle	–	–	–	-1.9739

Tableau 1 : Ecart de hauteurs par rapport au repère D (en mètres).

Colonne 2 et 3 issues de *Tiphaneau et al.* (2007) ; col. 4 du *Shom* [2015] et col. 5 (cette étude)

La comparaison avec les résultats passés révèle des différences d'au plus deux millimètres, sauf à première vue pour l'antenne GPS (repère U) où l'écart avec la valeur indiquée dans la FOM du *Shom* [2015] est de +26 mm. Cependant, un examen plus attentif du rapport de l'IGN [Beilin, 2006] indique une altitude (IGN69) de 10,690 m, alors que nos résultats donnent $10,6898 \pm 0,0004$ m, soit une différence de 0,2 mm.

La valeur fournie dans la FOM semble donc suspecte [Shom, 2015]. Est-ce que la différence de 26 mm, ou une partie de celle-ci, serait liée au changement d'antenne GNSS et à l'ambiguïté des marques matérielles de celle-ci ? L'annexe 3 reprend pour mémoire les

diagrammes de l'ancienne et de la nouvelle antenne GPS de Socoa (SCOA). Elle a peut-être aussi pour origine la valeur donnée dans un autre rapport de l'IGN sur le changement de matériel GNSS [Roesch, 2009]. Quoiqu'il en soit, nous retiendrons **le résultat d'un écart négligeable de 0,2 mm en près de onze ans, qui montre une stabilité locale remarquable du support de l'antenne GNSS.**

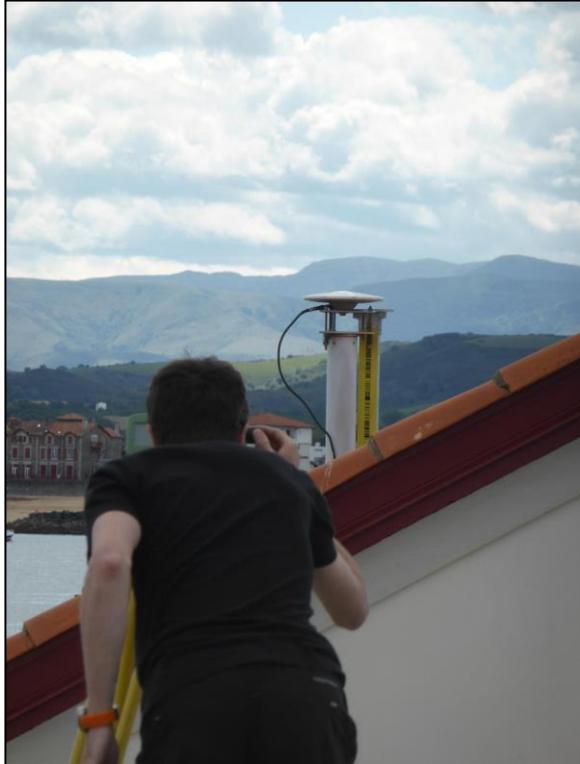


Fig.4 : Opération de nivellement du point de référence de l'antenne (ARP) GPS de Socoa (SCOA)

L'annexe 2 reprend de manière schématique les données de hauteur du tableau des repères et résultats du nivellement de l'annexe 1. Par ailleurs, les résultats de nivellement confirment **une confusion qui s'est glissée dans la FOM du Shom [2015] entre le sommet du capuchon du repère L (campagnes EUROGAUGE 1993 et 1994) et le repère L lui-même, qui se trouve dessous, une fois le capuchon dévissé, avec une forme hémisphérique.**



Fig.5: Photo du repère L. Le capuchon du repère est dévissé et posé à droite du repère sur la photo.

En conclusion, l'évolution des écarts de hauteur des repères de l'observatoire avec les données passées ne sont pas statistiquement significatifs. On peut conclure qu'ils n'ont pas bougé les uns par rapport aux autres au niveau millimétrique. L'ensemble est localement stable. L'origine de la subsidence de $-2,7$ mm/an indiquée par les résultats GPS de SCOA (Figure 1) n'est donc pas liée à un affaissement local de l'extrémité du quai. L'explication doit être trouvée ailleurs, soit dans une subsidence plus large (ville, littoral, région), soit dans un artéfact de l'analyse des mesures GPS. Mais, les résultats du JPL¹ ($-1,8 \pm 0,6$ mm/an) ou encore du EPN² ($-1,7 \pm 0,1$ mm/an) confirment une vitesse GPS négative pour SCOA, quoique moins prononcée que celle publiée dans ULR6 ($-2,7 \pm 0,3$ mm/an).

4.2. Etalonnage du Marégraphe

La vérification métrologique des marégraphes passe par la réalisation d'un test de Van de Casteele [Lannuzel, 2011], dont l'intérêt est de mettre en évidence des erreurs systématiques sur une grande plage de mesure explorée au cours d'un cycle complet de marée (12h25). L'application de ce type de contrôle une fois par an était déjà recommandée dans le premier manuel COI [1985]. Dans les esprits, il était resté associé à tort aux marégraphes mécaniques alors qu'il est indépendant de la technique de marégraphie [Martin Miguez et al., 2008].

La Figure 6 indique les cotes des différents zéros instrumentaux utiles pour l'étalonnage. Elles proviennent de l'opération de nivellement du 11 mai 2017, sauf la hauteur ellipsoïdale de l'antenne GPS de SCOA, qui provient du RGP³.

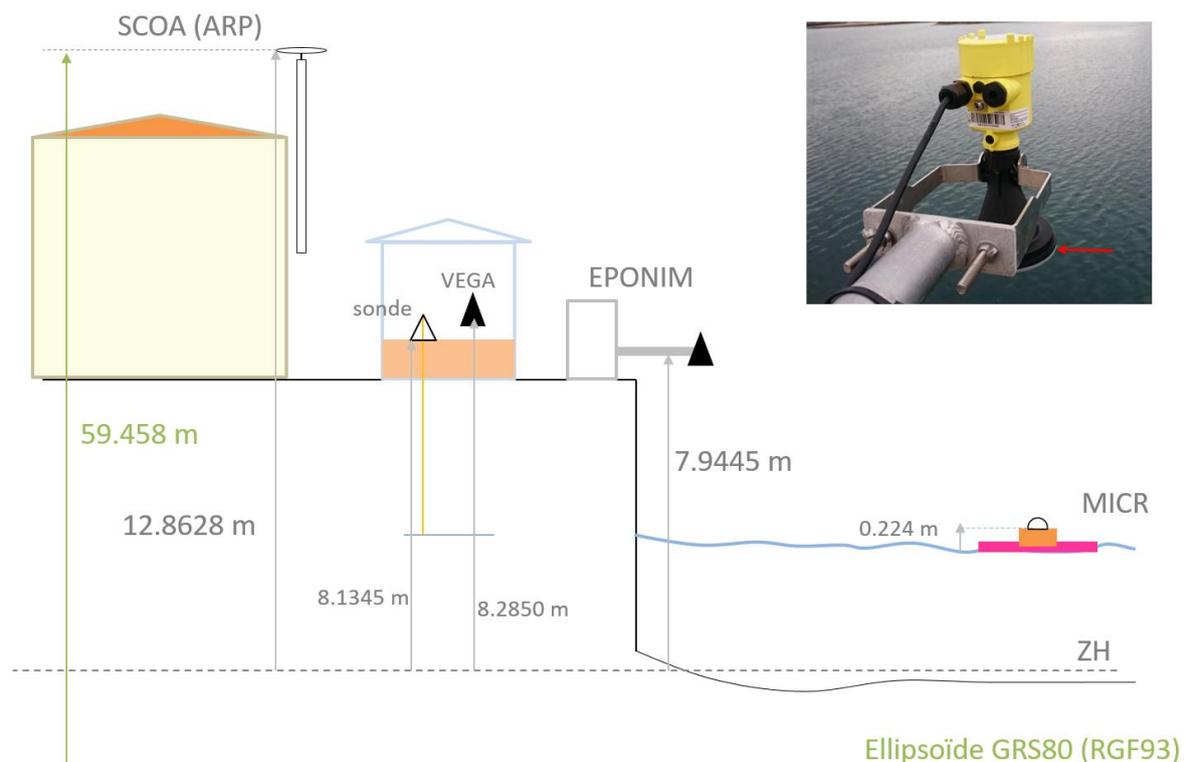


Fig.6 : Cotes des zéros des instruments de Socoa déterminés lors de l'opération de nivellement du 11 mai 2017

¹ <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/links/SCOA.html> (Lien consulté en mai 2017)

² http://www.epncb.oma.be/_productsservices/timeseries/index.php?station=SCOA00FRA (Consulté mai 2017)

³ <http://rgp.ign.fr/STATIONS/#SCOA> (Consulté mai 2017)

Les résultats des mesures d'étalonnage sont fournis en annexe 7. Il s'agit de mesures réalisées dans le puits à la sonde lumineuse simultanément aux mesures du marégraphe MCN (Krohne Optiwave 7300C), soit une lecture au ruban de la sonde toutes les 10 min. pendant près d'un cycle de marée. L'index où est prise la lecture au ruban porte-sonde (Figure 2) correspond au repère R de hauteur 8,1345 m par rapport au zéro hydrographique (Figure 6). En parallèle, des mesures à l'extérieur du puits de tranquillisation ont été réalisées à l'échelle de marée DDE et à la Micro-nappe GPS. Les annexes 4 et 5 apportent des compléments techniques sur les données issues de ces deux instruments. Ces données apportent des éléments de réponse importants à la question du rôle du puits, s'il introduit un retard ou un amortissement aux mesures du MCN (question traitée dans la section 4.2.2). Par ailleurs, deux marégraphe radar Vega ont temporairement été déployés à l'intérieur du puits (Vega PS61, Figure 2) et à l'extérieur (Vega PS62) ; ce dernier est désigné par EPONIM dans la Figure 6.

4.2.1. Marégraphe MCN (radar Krohne Optiwave 7300C)

L'exploitation des mesures d'étalonnage acquises simultanément au marégraphe et à la sonde est réalisée de façon à construire un graphique qui porte le nom de *diagramme de Van de Castele*. Dans ce diagramme, sont portées en abscisses les différences de hauteur du niveau de la mer obtenues à partir des deux instruments (marégraphe – sonde), et en ordonnées les hauteurs d'eau correspondantes, obtenues à partir de la sonde qui est considérée ici comme étalon. La hauteur fournie par la sonde est obtenue en retranchant la valeur lue au ruban porte-sonde à la hauteur de l'index de lecture (repère R).

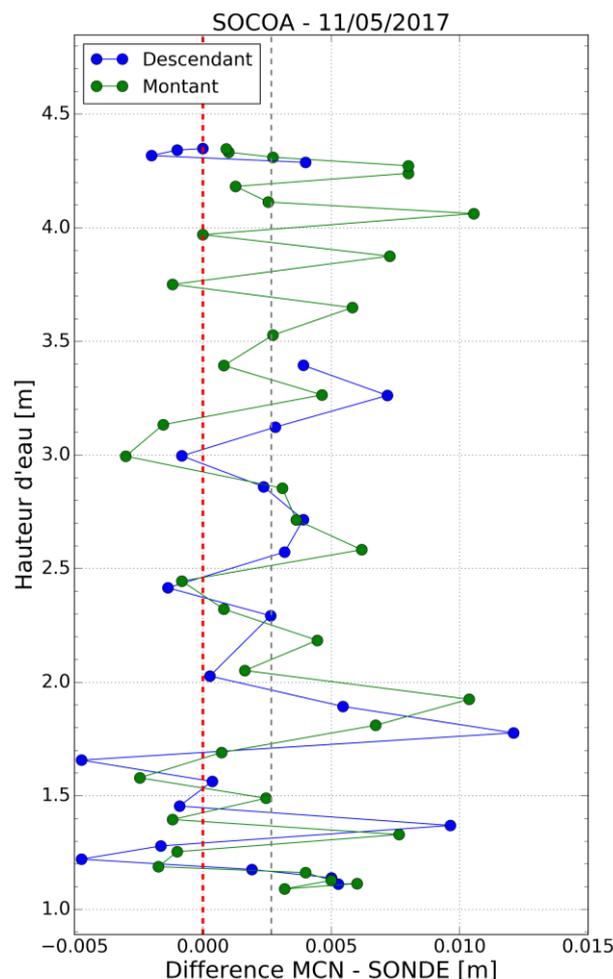


Fig.7 : Diagramme de Van de Castele du marégraphe MCN de Socoa le 11 mai 2017, avec la sonde lumineuse comme étalon.

La Figure 7 fournit le diagramme de Van de Castele obtenu pour le marégraphe MCN (Optiwave 7300C) le 11 mai 2017 avec la sonde lumineuse comme étalon. La plage de hauteurs d'eau explorée cette journée-là était de près de 3,30 mètres (coefficient de marée 83) avec 63 lectures à la sonde.

On calcule la moyenne de la série MCN-Sonde et on trouve 0.0027 m. On calcule aussi l'écart-type σ de cette série et on trouve 0.004 m.

Donc chaque valeur individuelle de la série est précise à $\pm 0,004$ m.

Et la valeur moyenne de la série est précise à $\pm \sigma/\sqrt{n}$, c'est à dire $0.004/\sqrt{63} \approx 0.0005$ m donc ± 0.0005 m. C'est ce que l'on appelle aussi l'incertitude sur la valeur moyenne.

Le biais de la référence instrumentale du marégraphe MCN est de : $+0,0027 \pm 0,0005$ m

Les hauteurs d'eau par rapport au ZH fournies par le MCN sont plus grandes d'environ trois millimètres par rapport à la réalité (sonde), par conséquent la référence instrumentale du MCN est au-dessous du ZH.

Plus intéressant, la forme du diagramme de Van de Castele indique un marégraphe très juste (exact) autour de cette valeur de décalage qui est indiquée en pointillés gris dans la Figure 7. Aucune pente (ou facteur d'échelle) n'est visible entre la pleine mer et la basse mer. Aucun cycle d'hystérésis n'est par ailleurs décelable entre la marée montante et la marée descendante ce qui indique que **le tube inox de tranquillisation du radar est neutre**.

Si l'on considère la sonde comme un étalon parfait et, par suite, les écarts en hauteur observés entre marégraphe et sonde liés aux seules erreurs du marégraphe, **on peut conclure à une mesure individuelle du marégraphe MCN précise à mieux que le centimètre (4 mm)**. L'hypothèse de l'étalon parfait étant optimiste, la précision des mesures individuelles du marégraphe MCN est donc certainement meilleure. Elle se situerait autour de 3 mm si l'on suppose les erreurs du marégraphe et de la sonde identiques.

Dans tous les cas, les erreurs sont supposées ici aléatoires et indépendantes. Cependant, on note des excursions à droite et à gauche du diagramme (Figure 7) aux mêmes niveaux de la marée montante et descendante dans le puits : à 4.1m et à 1.9 m au-dessus du ZH. Ces écarts sont proches du centimètre. **Leurs coïncidences en marée montante et descendante suggèrent un processus systématique.**

On peut spéculer sur l'origine de celui-ci dans la propagation de l'onde radar le long du tube en inox avec des possibles « accrochages » sur des irrégularités des parois. A noter que ces défauts systématiques se retrouvent aussi dans les quelques mesures à la sonde réalisées lors de la deuxième opération du 23 août 2017.

Autrement, lors d'un étalonnage le 2 juillet 2004 au marégraphe de La Pallice, des collègues avaient mesuré l'influence des brides de serrage inox du tube de tranquillisation PVC sur les données du marégraphe radar Optiflex. Cela se matérialisait par des oscillations latérales dans le diagramme de Van de Castele. Bien que le capteur à Socoa soit un optiwave mesurant dans un tube en inox, la position de deux brides de serrage du tube de tranquillisation du radar ont été mesurées le 23 août, respectivement à 3,04 m et 5,63 m au-dessus du ZH. **Ces cotes ne correspondent pas à celles des anomalies observées.** Une correction empirique par plage de mesure pourrait réduire ces erreurs. Mais, outre le petit décalage de près de 3 mm, les performances du marégraphe MCN de Socoa sont satisfaisantes, largement dans les spécifications du programme mondial GLOSS [COI 2006].

4.2.2. Effet du puits de tranquillisation : Echelle de marée DDE & Micro-nappe GPS

Des mesures à l'extérieur du puits sont nécessaires pour apprécier si le niveau d'eau à l'intérieur est sensiblement différent, en particulier s'il y a un retard dû à un envasement. La DDE prévoyait d'ailleurs de désenvaser le puits en juin, mais l'opération s'est finalement déroulée le 25 juillet 2017.

L'observatoire du niveau marin de Socoa ne dispose pas d'une échelle de marée classique à divisions décimétriques de couleurs alternées rouge et noir sur fond blanc, mais d'une échelle de port ou écluse à divisions centimétriques (Figure 8) installée par la DDE. Rappelons que cette échelle n'est pas celle qui était en place lors de l'étalonnage du 17 mai 2007 [Tiphaneau *et al.*, 2007]. **Cette nouvelle échelle a été installée le 21 juillet 2016 en remplacement de l'ancienne qui a été enlevée.** Cette nouvelle échelle était d'ailleurs inconnue de nos équipes avant la mission. Elle fait 5 mètres de long, à partir de la cote 1,0 m /ZH jusqu'à 6,0 m /ZH.

Nouvelle information : une échelle de marée très ancienne existe à l'intérieur du puits et a été remarquée le 23 août malgré les salissures qui la recouvre. **Il serait bon de prévoir un nivellement de cette échelle.**

Une Micro-nappe GPS (Annexe 5) était prévue en revanche pour comparer les mesures du MCN avec l'extérieur. L'expérience acquise par nos équipes avec les bouées GPS permet de les envisager comme de sérieux étalons (justes et précis) de marégraphes [André *et al.*, 2013] avec l'avantage pratique d'acquérir aisément un grand nombre de mesures sur un ou plusieurs cycles de marée. Ceci est valable à condition de bien connaître précisément l'offset entre le point de mesures GNSS (ARP de l'antenne) et la surface de la mer ce qui n'est pas évident.

Comme c'est souvent le cas, l'échelle DDE de Socoa est plaquée contre la paroi d'un quai, qui présente un fruit (angle avec la verticale). Le schéma de la Figure 8 (droite) illustre la méthode employée pour calculer le fruit de l'échelle. Plusieurs mesures des côtés du triangle rectangle dessiné avec un niveau sur une règle de maçon prolongeant l'échelle ont permis d'estimer ce fruit en appliquant le théorème de Pythagore avec pour résultat : $\alpha = 7,0 \pm 0,2^\circ$.

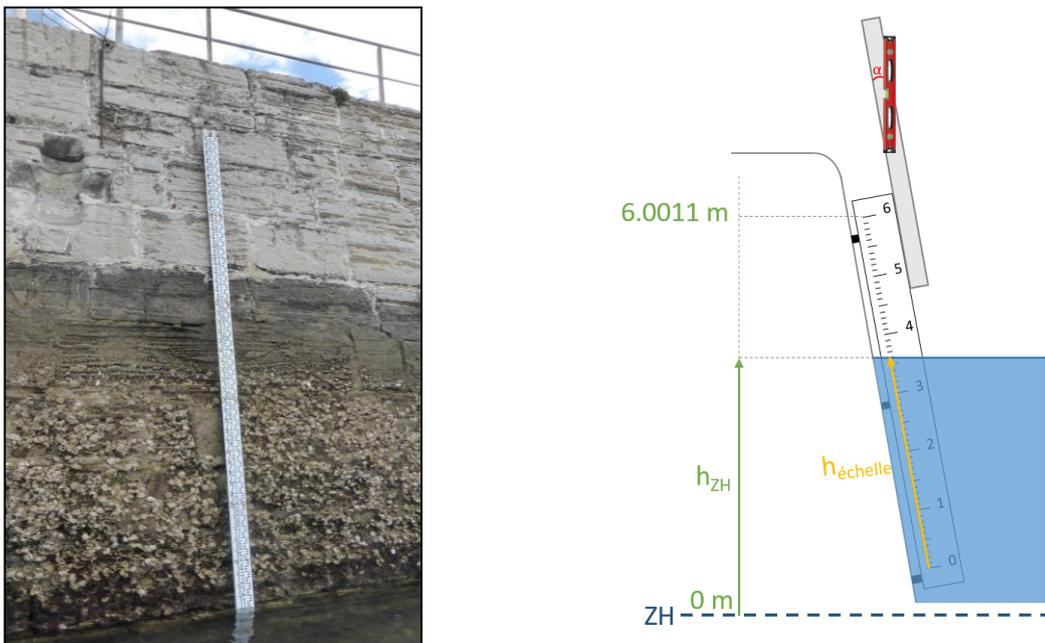


Fig.8 : Image de l'échelle DDE à Socoa et schéma illustrant la méthode pour calculer son fruit son fruit α .

Remarque : En réalité (matériellement) l'échelle est graduée de 1,00 m à 6,00 m.

Le nivellement effectué montre que le haut de l'échelle de marée de la DDE (cote 6 m de l'échelle) est bien calé par rapport au zéro hydrographique à 1,1 mm près. D'après l'Annexe 1 la cote du sommet de l'échelle par rapport au ZH est de 6.0011 m. D'après la Figure 8, une lecture brute à l'échelle de marée $h_{\text{échelle}}$ corrigée du fruit du quai et exprimée par rapport au ZH, notée h_{ZH} , s'écrit en mètres : $h_{\text{ZH}} = 6.0011 - (6 - h_{\text{échelle}}) \cdot \cos(\alpha)$.

Le diagramme de Van de Castele du marégraphe MCN obtenu avec l'échelle DDE corrigée du fruit comme étalon est incomplet (Figure 9, gauche). Seule la branche montante fut observée, car cet instrument n'était pas connu par nos équipes et les mesures n'étaient donc pas prévues. Le diagramme suggère néanmoins l'amorce d'un cycle d'hystérésis important d'au moins six centimètres.

La comparaison du MCN avec la Micro-nappe GPS désignée par MICR confirme la présence d'un cycle d'hystérésis qui peut atteindre jusqu'à 12 cm (Figure 9, droite). Cette hystérésis révèle un retard entre l'extérieur et l'intérieur du puits, qui est estimé de manière empirique à 350 ± 5 s, soit *près de 6 min. de retard*. La méthode empirique consiste à décaler itérativement les mesures du marégraphe MCN, par exemple de 10s en 10s, jusqu'à trouver un minima dans les écarts-types des différences avec la Micro-nappe GPS. La Figure 10 illustre cette méthode sur l'étalonnage d'août.

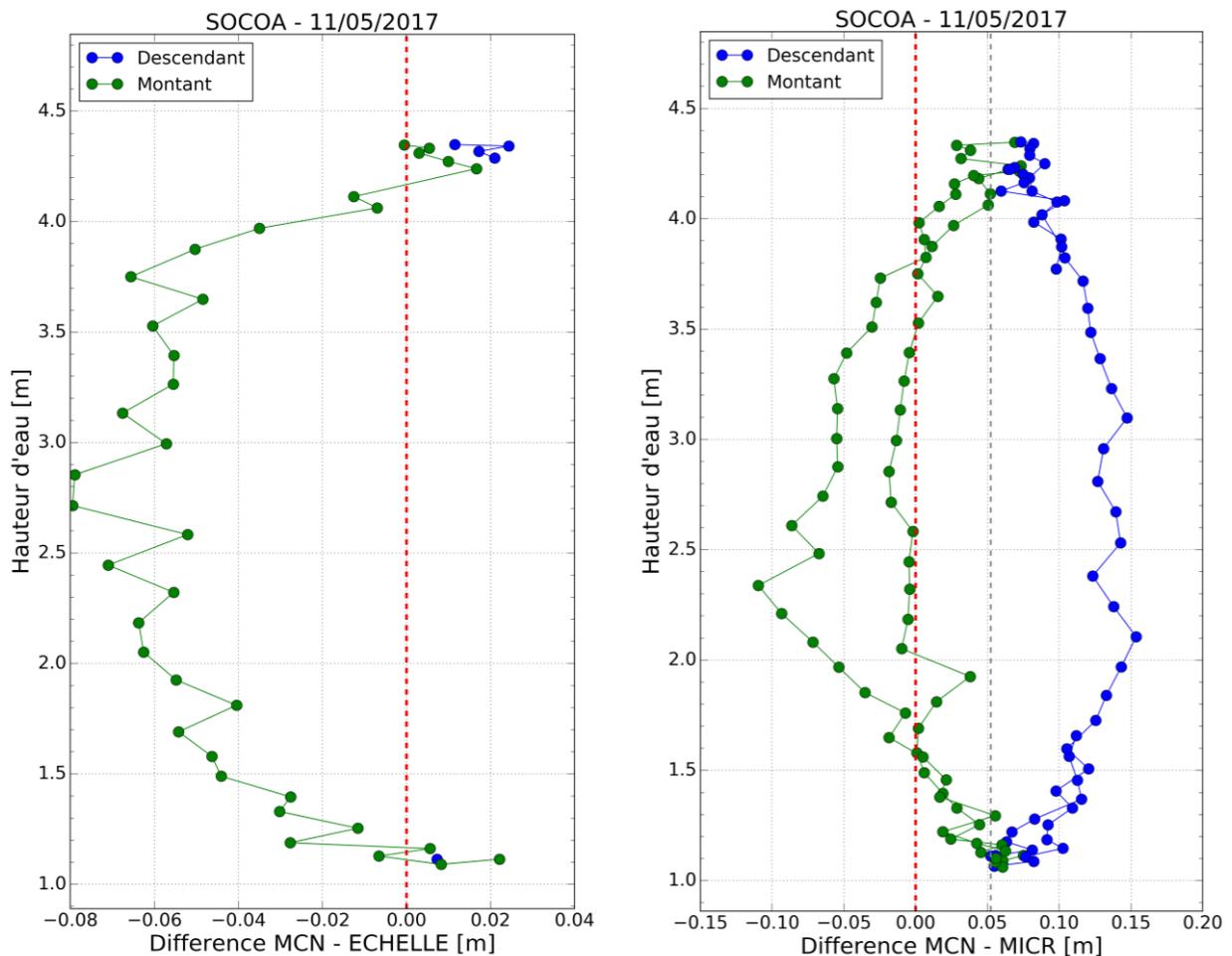


Fig.9 : Diagramme de Van de Castele du marégraphe MCN de Socoa le 11-12 mai 2017, avec comme étalons : à gauche l'échelle DDE corrigée de son fruit et à droite la Micro-Nappe GPS.

Une deuxième mission d'étalonnage, plus légère en termes de logistique et d'instruments, a en effet été organisée les 22 et 23 août 2017 après que la DDE ait fait désenvaser le puits le 25 juillet. De manière surprenante, cette nouvelle comparaison post-désenvasement entre le MCN et la Micro-nappe GPS montre que le défaut d'hystérésis persiste (Figure 10, gauche) dans les données du marégraphe MCN. Mais le retard est réduit à 275 ± 5 s. Le coefficient de marée de ce deuxième étalonnage était de 101, permettant d'explorer une plage de hauteurs plus grande, et des valeurs plus basses que lors de l'étalonnage de mai. C'est ainsi que le diagramme Van de Casteele (Figure 10) révèle un problème de puits particulièrement important. La Figure 11 montre **l'impact (distorsion) dans la forme de la courbe de marée dès que le niveau d'eau descend sous la hauteur de 1,1 m.**

L'opération de nettoyage du puits effectuée en juillet n'a donc pas apporté l'effet attendu. Le retard est passé de 6 min. à 5 min. environ. F. Jocou nous a informés que ce travail est effectué par leur équipe. Le puits est désenvasé par un agent qui remplit des seaux de vase au fond du puits et les évacue par le haut. L'annexe 4 est un schéma modifié du puits qui aide à comprendre son fonctionnement. Néanmoins des imprécisions subsistent et sont en train d'être levées à l'heure de la rédaction de ce rapport.

Pour conclure cette section, la Figure 12 illustre l'importance d'appliquer la correction du fruit de l'échelle. En effet, l'écart-type des différences avec la Micro-nappe GPS passe de 14,6 mm, lorsque la correction n'est pas appliquée, à 11,6 mm lorsqu'elle l'est. Par ailleurs, la valeur même de ce résultat mérite d'être remarquée (11,6 mm), car elle montre **qu'il est possible de réaliser des lectures à l'échelle avec une précision du centimètre**, lorsque les lectures sont faites avec soin par conditions de mer favorables.

Une fois corrigée, l'échelle qui est bien calée sur le ZH devient un bon étalon pour la Micro-Nappe avec une exactitude de $\pm 11,6$ mm. Elle nous permet de déceler un biais de -50 mm environ dans les données de la Micro-Nappe. D'après l'Annexe 5, cela signifie que l'offset ARP-Surface de l'eau de la Micro-nappe est de $224-50 = 174$ mm. **Il y a donc un problème sur la position de l'ARP de l'antenne Tallysman TWI3870 +GP NONE.**

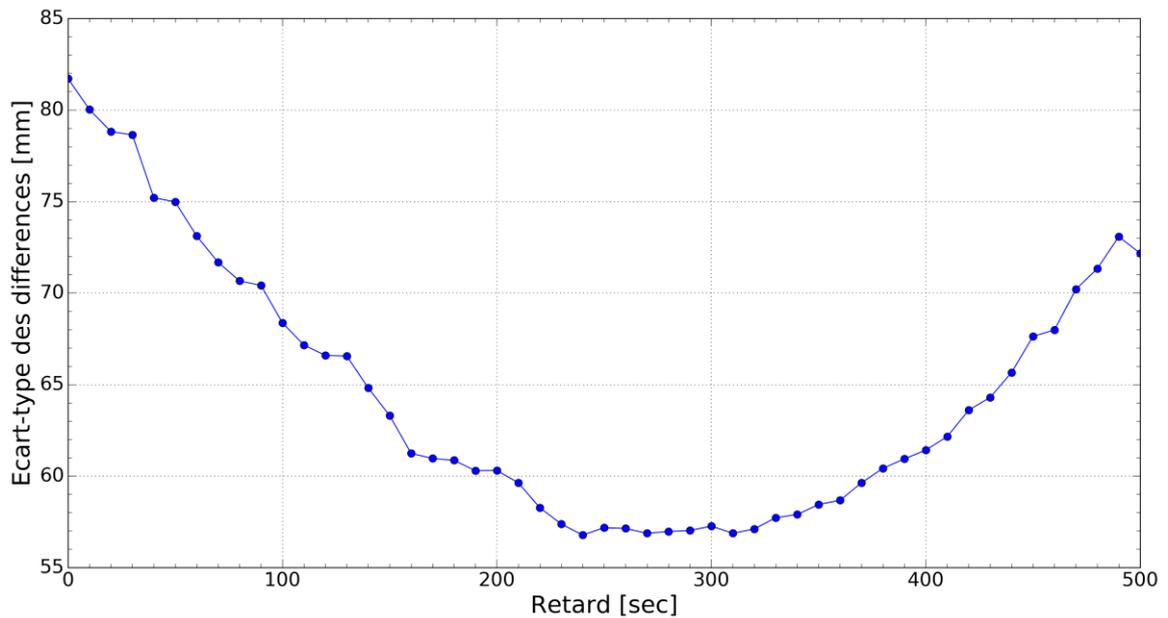
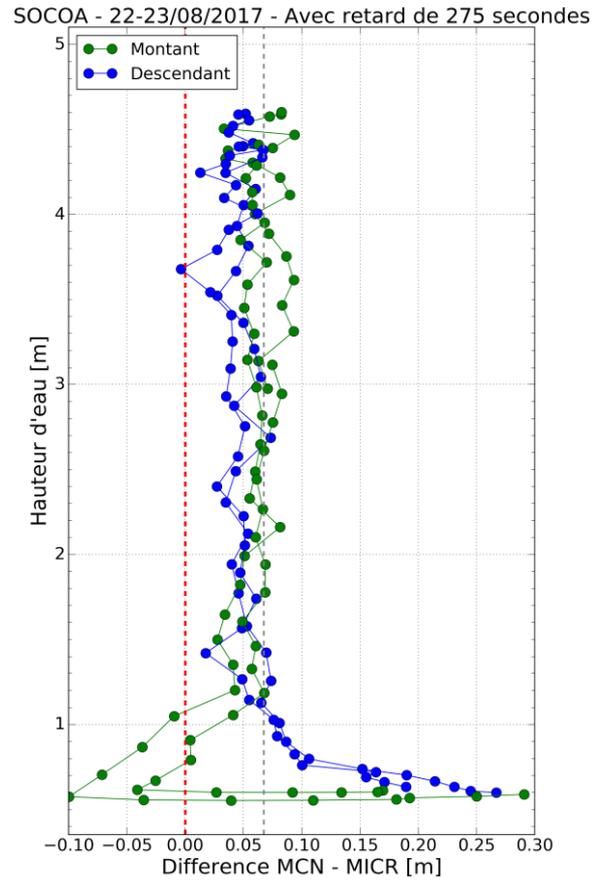
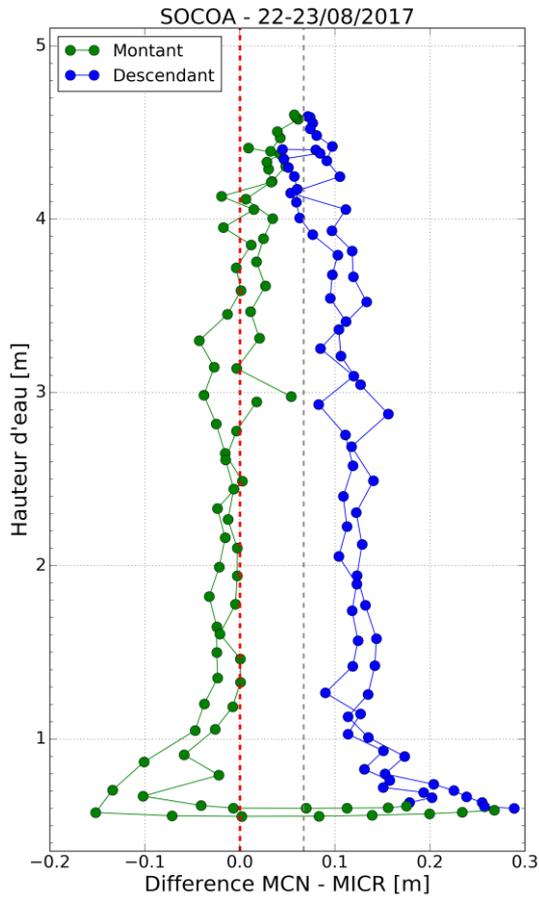


Fig.10 : Diagrammes de Van de Casteele du marégraphe MCN de Socoa le 22-23 août 2017, avec la Micro-nappe GPS comme étalon : à gauche sans correction de retard et à droite avec correction de 275s. En bas, sont tracés les écart-types des différences entre MCN et Micro-nappe GPS en fonction de la correction de retard appliquée.

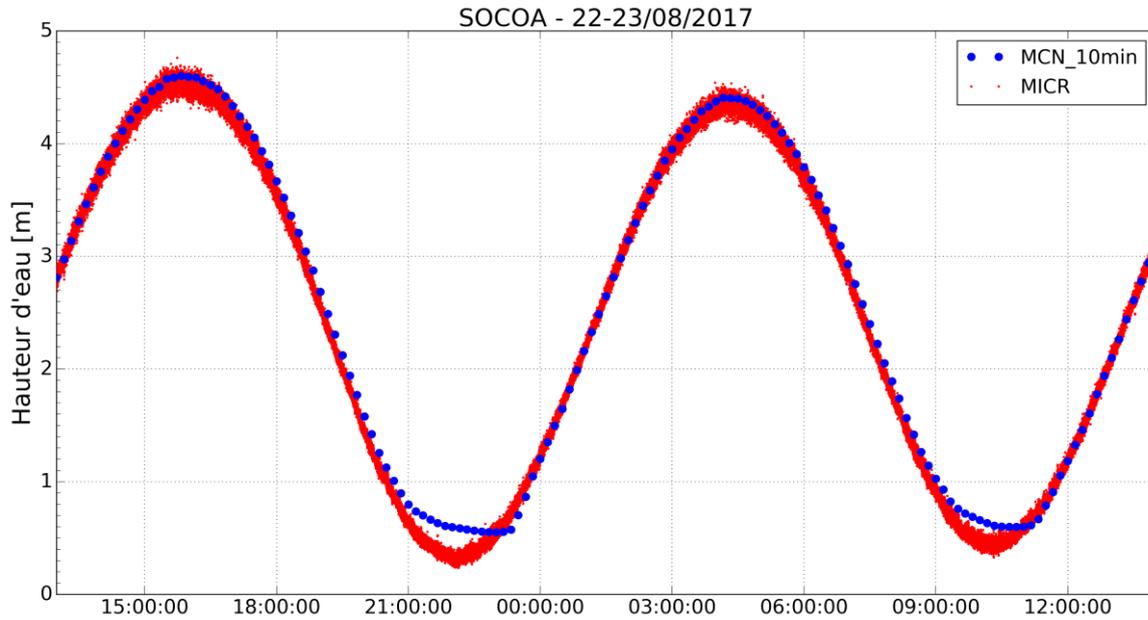


Fig.11 : Courbes de marée à Socoa, entre le 22 et 23 août 2017 à partir du marégraphe MCN (en bleu) à l'intérieur du puits et la Micro-Nappe GPS (en rouge) à l'extérieur.

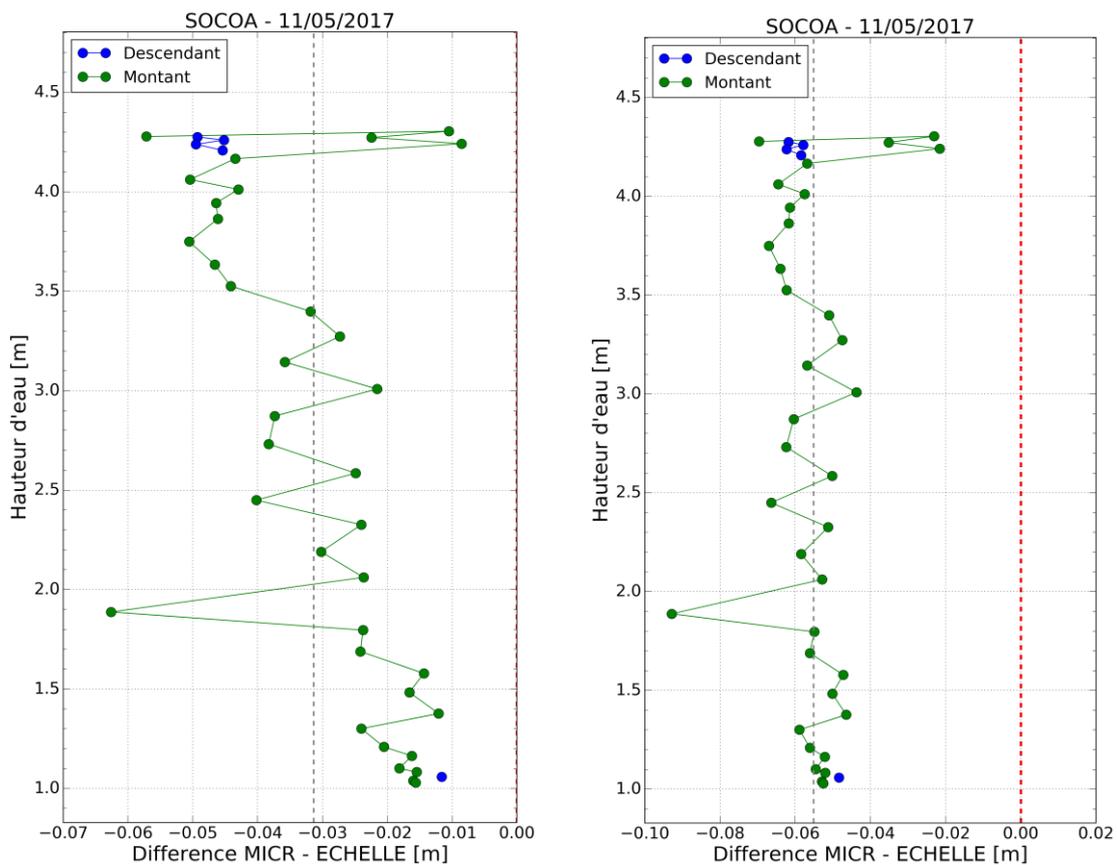


Fig.12 : Diagrammes de Van de Casteele entre l'échelle DDE et la Micro-nappe GPS à Socoa le 11 mai 2017, sans prise en compte du fruit de l'échelle (gauche) et avec correction (droite).

4.3. Expérience avec les marégraphes temporaires

Deux marégraphes radar étaient installés temporairement pendant l'étalonnage de mai : à l'intérieur du puits, un Vega PS61 (Figure 2, droite) et, à l'extérieur le long du quai proche de l'échelle DDE, un Vega PS62 intégré pour être autonome et transportable, désigné par EPONIM (Figure 13, gauche).

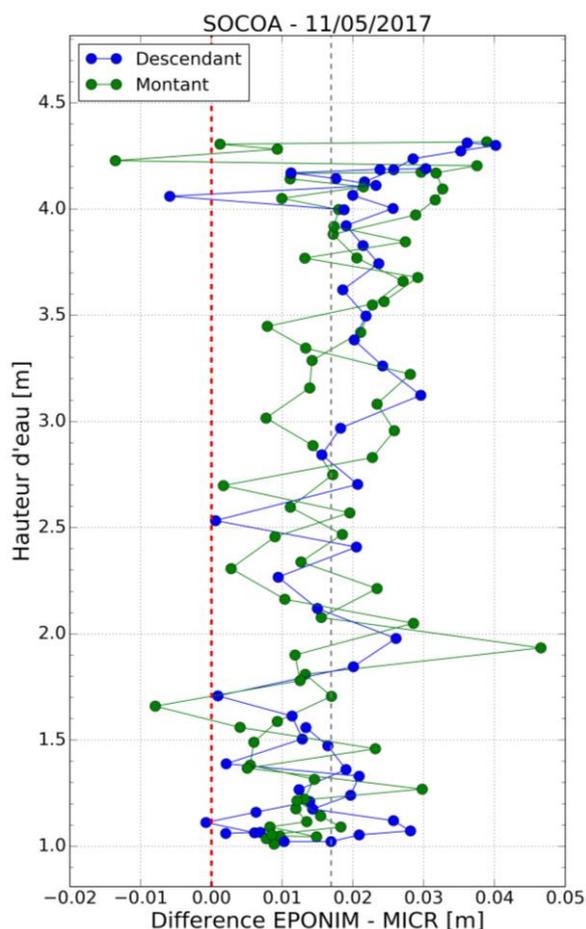
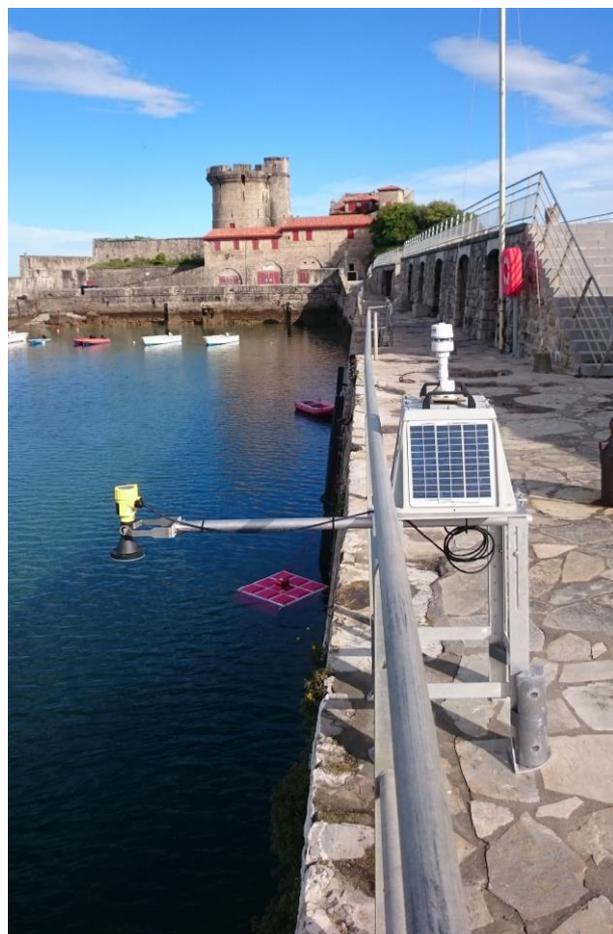


Fig.13 : A gauche, marégraphe radar « portable » dit EPONIM et Micro-nappe GPS flottant en contrebas à Socoa les 11-12 mai 2017. A droite, diagramme Van de Casteele du marégraphe EPONIM avec la Micro-nappe GPS dite MICR comme étalon.

Le diagramme de comparaison entre le marégraphe EPONIM et la Micro-nappe GPS (Figure 13, droite) montre deux instruments performants à une constante de calage près. L'écart-type de leurs différences est de 10 mm. Autrement dit, si l'un est considéré parfait, la mesure individuelle de l'autre à une précision du centimètre. Cette précision se réduit à 7 mm, si l'on suppose que chacun contribue de la même manière à l'écart-type des différences.

A noter cependant un léger défaut d'échelle (pente) dans le diagramme de Van de Casteele de la Figure 13. L'origine se trouve sans doute dans l'absence de dispositif pour buller avec soin le marégraphe EPONIM, qui devait donc être légèrement incliné par rapport à la verticale.

La Figure 14 montre les comparaisons de chaque marégraphe radar Vega avec le marégraphe MCN. Le diagramme de droite confirme le retard entre l'intérieur du puits (MCN) et l'extérieur (EPONIM) avec une estimation par la méthode empirique identique à celle avec de la Micro-nappe (350 ± 5 s).

Dans le puits, les marégraphes MCN et Vega PS61 sont censés mesurer le même niveau d'eau car nous avons démontré Figure 7 que le tube inox de tranquillisation du MCN est neutre. Leur comparaison (Figure 14, gauche) révèle un cycle d'hystérésis qui est donc probablement dû à une avance de temps dans l'horloge du Vega PS61. Notre estimation de cette avance est de 120 ± 10 s.

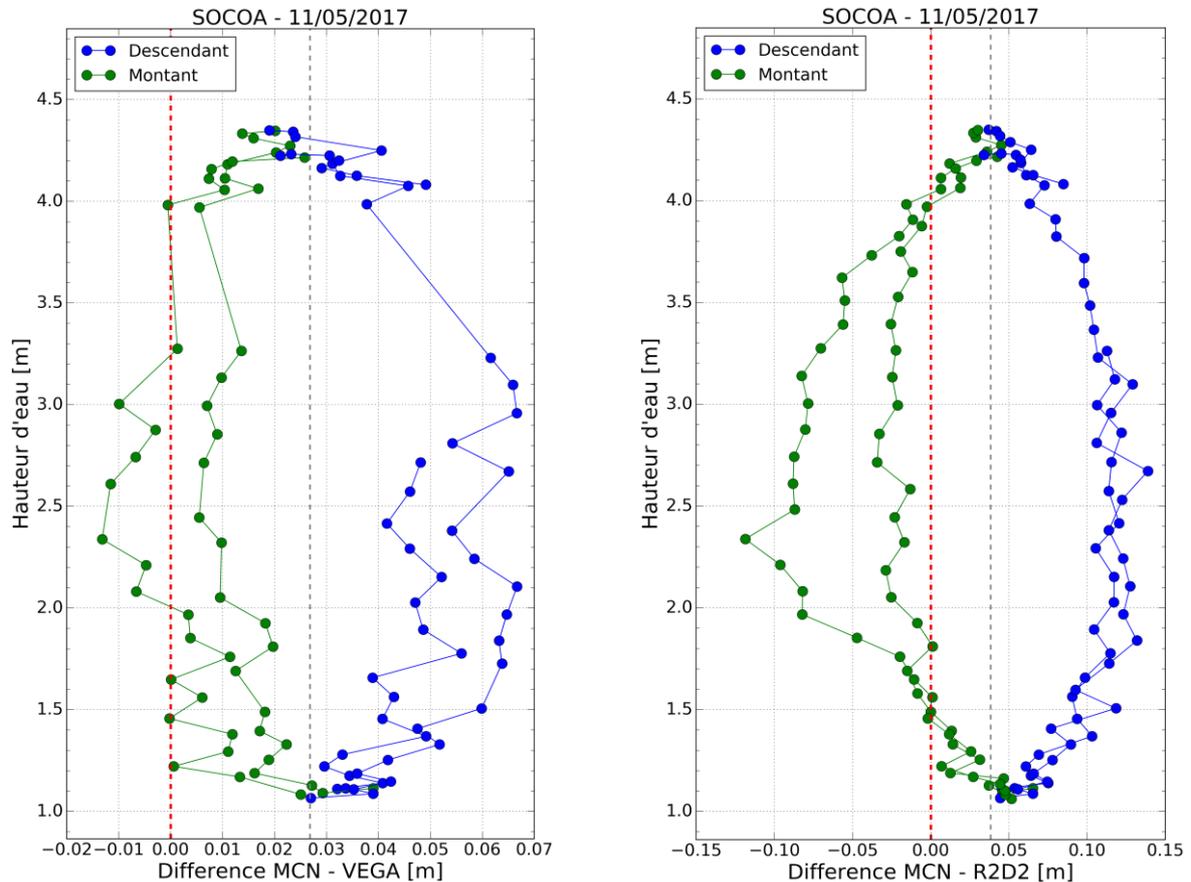


Fig.14 : Diagrammes de Van de Casteele du marégraphe MCN de Socoa le 11-12 mai, avec les marégraphes radar Vega PS61 (à gauche) et Vega PS62 ou EPONIM (à droite) comme étalons

5. Conclusions

Les deux missions effectuées au marégraphe de Socoa en mai et août 2017 ont permis de mettre en lumière plusieurs résultats intéressants.

Tout d'abord, les mesures de nivellement comparées avec les anciennes campagnes montrent un site stable à l'échelle de l'observatoire. Elles ont aussi permis de lever le doute sur les cotes des repères L et U issus de la FOM [Shom, 2015]. Cependant la vitesse verticale de la station GNSS SCOA, issue de plusieurs centres d'analyses des mesures GPS, indique une subsidence globale de la zone de l'ordre de 2 mm/an qui est à surveiller.

Concernant le radar du MCN, les diagrammes de Van de Casteele permettent de tirer plusieurs conclusions. À l'intérieur du puits, l'instrument donne une mesure exacte à ± 3 mm ce qui est dans les standards exigés. Par contre il surestime la hauteur d'eau de $2,7 \pm 0,5$ mm et présente aussi des erreurs systématiques qu'il serait intéressant d'investiguer. Côté facteurs d'échelle et retard d'horloge, les paramètres du MCN sont satisfaisants.

Les comparaisons entre le radar et des instruments situés hors du puits ont révélé plusieurs choses. Premièrement, le puits induit un retard de 6 min aux mesures du MCN. Ce retard a été réduit à 5 min après intervention ; donc, le désenvasement a été inefficace. De plus, à partir de la cote 1,1 m (ZH) et en dessous, une rétention d'eau dans le puits fausse les mesures du MCN. Lors d'excellentes conditions météorologiques telles que celles du 11 mai, nous avons confirmé qu'il est possible d'atteindre une précision centimétrique avec l'échelle de marée.

Pour finir, les analyses des données de radars autonomes Vega ont souligné l'importance du calage en temps de l'instrument avant déploiement. Nous avons décelé deux minutes d'avance sur l'heure UTC dans l'horloge du Vega PS61 du puits. Le marégraphe EPONIM quant à lui a prouvé ses capacités à mesurer la hauteur d'eau avec une précision de ± 7 mm. Mais il serait bon d'ajouter une nivelle sphérique pour aligner le télémètre avec la verticale et éviter le facteur d'échelle observé en Figure 13, droite.

Quant à la Micro-Nappe GPS, un biais important de -50 mm avec les lectures à l'échelle indique qu'il faudra examiner en détail la question de la position de l'ARP de l'antenne par rapport à la surface de l'eau. La Micro-nappe reste néanmoins un instrument pratique et facile à déployer pour identifier des défauts (déphasages) des puits de MCN.

Cette mission a été riche en résultats et ceci grâce à la collaboration des trois partenaires majeurs de SONEL que sont le Shom, l'IGN et le LIENSs. Chacun apporte des expertises pointues et complémentaires dans leurs domaines. Nous remercions chaleureusement les personnels du département 64 en charge du marégraphe pour leur assistance.

Tout ceci nous encourage à renouveler ce type d'interventions indispensables à la surveillance des données de niveaux de la mer dans de nouveaux observatoires en France métropolitaine ou dans les territoires d'Outre-Mer.

Références bibliographiques

- André G., B. Martin Miguez, V. Ballu, L. Testut, G. Wöppelmann (2012). Measuring sea level with GPS-equipped buoys: a multi-instruments experiment at Aix Island. *International Hydrographic Review*, 10, 27-38.
- Beilin J. (2006). Réseau GPS Permanent, station de Socoa (SCOA) – Sauvegarde régionale ; mise en référence RGF93 ; rattachement topométrique. *Compte Rendu IGN, CR/G 203*.
- COI (1985). Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer. Commission Océanographique Intergouvernementale, Manuels et guides No. 14, Vol. I, 83 pp.
- COI (2006). Manual on sea level measurement and interpretation. Commission Océanographique Intergouvernementale, Manuals and guides No. 14, Vol. IV: An update to 2006, 80 pp.
- Gouriou T. (2012). Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime. Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle, soutenue le 26 mars 2012.
- Lannuzel S. (2011). Réseau de marégraphes dans le Pacifique. *Annales Hydrographiques*, 777. Disponible en ligne : <http://diffusion.Shom.fr/ah-777.html>
- Martin Miguez B., R. Le Roy, G. Wöppelmann (2008). The use of radar tide gauges to measure variations in sea level along the French coast. *Journal of Coastal Research*, 24, 61-68.
- Pouvreau N. (2008). Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest. Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle, soutenue le 26 septembre 2008.
- Roesch G. (2009). Réseau GNSS permanent – Station de Socoa (SCOA) – Changement de matériel et rattachement topométrique. *Compte Rendu IGN, CR/G 253*.
- Tiphaneau P., J.-F. Breilh, Wöppelmann (2007). Contrôle des performances du marégraphe radar BM70A de Socoa (Saint Jean-de-Luz) – le 17 mai 2007. Rapport interne CLDG, No. 002/07.
- Shom (2015). Fiche d'Observatoire de Marée de Socoa. N° 2532. Shom, 26 Juin 2015.

Annexe 1 : Tableau des repères & Résultats du 11 mai 2017

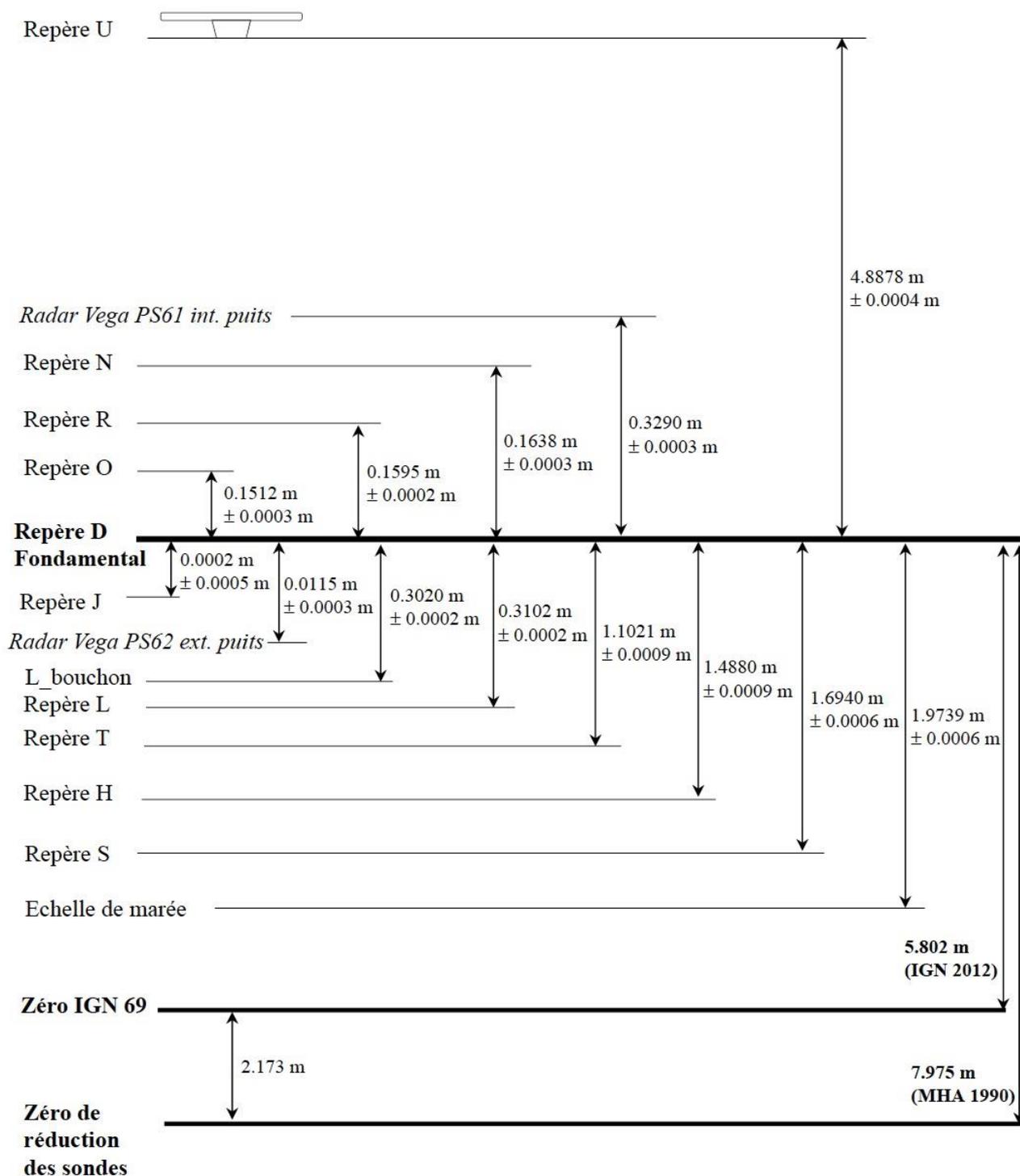
Désignation		Cote rapportée au ZH (en m)	Cote IGN69 (en m)	Cote GRS80 RGF93 (en m)
D	IGN O.A.K3L3-4-II Rivet scellé verticalement dans le socle du calvaire à proximité du marégraphe, au bout du quai. Repère fondamental.	7.9750	5.8020	
H	IGN O.A.K3L3-3-II Rivet scellé verticalement dans le quai Sud, sur le côté gauche en allant vers le musoir.	6.4870 ± 0.0009	4.3140	
J	IGN O.A.K3L3-4bis Repère scellé horizontalement dans le mur de l'école de voile UCPA.	7.9748 ± 0.0005	5.8018	
L	IGN O.A.K3L3-5-IV Repère "a" en inox du site RBF n° 6418902 sous un regard en fonte (EUROGAUGE) situé au bout du quai.	7.6648 ± 0.0002	5.4918	
L (capuchon)	Cf. Sommet du capuchon du repère L	7.6730 ± 0.0002	5.5000	
N	Point de lecture à la sonde lumineuse marqué sur une traverse en bois au- dessus du puits du marégraphe. Le repère est situé au centre de la traverse en bois, mais n'est pas clairement identifié. Repère de tirant d'air.	8.1388 ± 0.0003	5.9658	
O	IGN O.A.K3L3-5 Repère scellé horizontalement dans le mur pignon Sud-Est du bâtiment abritant la centrale d'acquisition du MCN.	8.1262 ± 0.0003	5.9532	
R	Bord du trou de la plaque MCN	8.1345 ± 0.0002	5.9615	
S	IGN O.A.K3L3-3b Repère scellé horizontalement dans le mur du porche ouest du fort de Socoa.	6.2810 ± 0.0006	4.1080	
T	IGN O.A.K3L3-3a Repère scellé horizontalement dans le mur de façade de l'agence technique du conseil général.	6.8729 ± 0.0009	4.6999	
U	IGN SCOA Station SCOA du RGP. Les coordonnées de la station sont celles de l'ARP de l'antenne (cf. Annexe 3).	12.8628 ± 0.0004	10.6898	59.458 (RGP)
Echelle de marée DDE	Sommet de l'échelle de marée DDE comportant un fruit de 7° (cf. Annexe 4)	6.0011 ± 0.0006	3.8281	
EPONIM	Capteur Vega PS62. Flèche rouge Fig.6.	7.9635 ± 0.0003	5.7905	
Vega PS61	Cf. Vega PS62 pour l'identification du point. Voir Fig. 2 : vue dans le puits.	8.3040 ± 0.0003	6.1310	

Notes :

- Les marges d'erreur sont données avec un niveau de confiance de 95% (2 sigmas). Elles proviennent de l'analyse des mesures de nivellement.
- La hauteur ellipsoïdale provient de l'analyse des mesures de l'antenne GPS par le RGP (Source consultée en mai 2017 : <http://rgp.ign.fr/STATIONS/#SCOA>). Elle est plus juste que la valeur passée du repère L, d'autant qu'une erreur s'est vraisemblablement glissée dans la détermination 2010 puisque le repère L est sous un capuchon qui n'aurait pas été dévissé pour y accéder, confondant le repère L avec le sommet du capuchon (cf. section 4.1).

Annexe 2 : Schéma de situation des repères & Zéros de référence

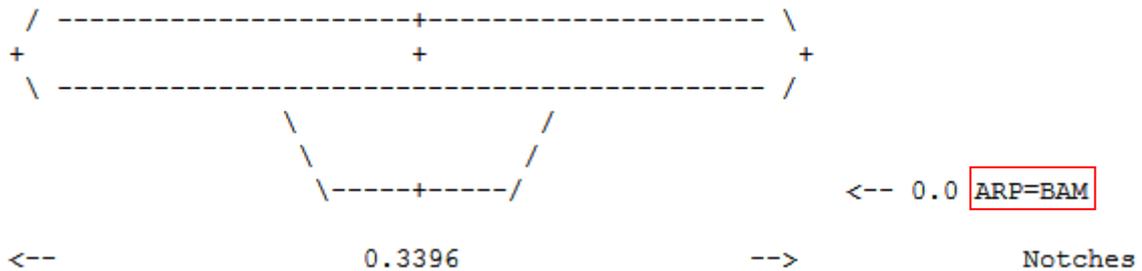
NB : Ces données ont été calculées à partir des dénivelées mesurées au niveau optique électronique en prenant comme repère fixé dans le calcul le repère fondamental D et sa cote par rapport à l'IGN 69 de 5.802m donnée par la fiche géodésique de l'IGN O.A.K3L3-5-IV.



Annexe 3 : Point de référence de l'antenne GPS de SCOA

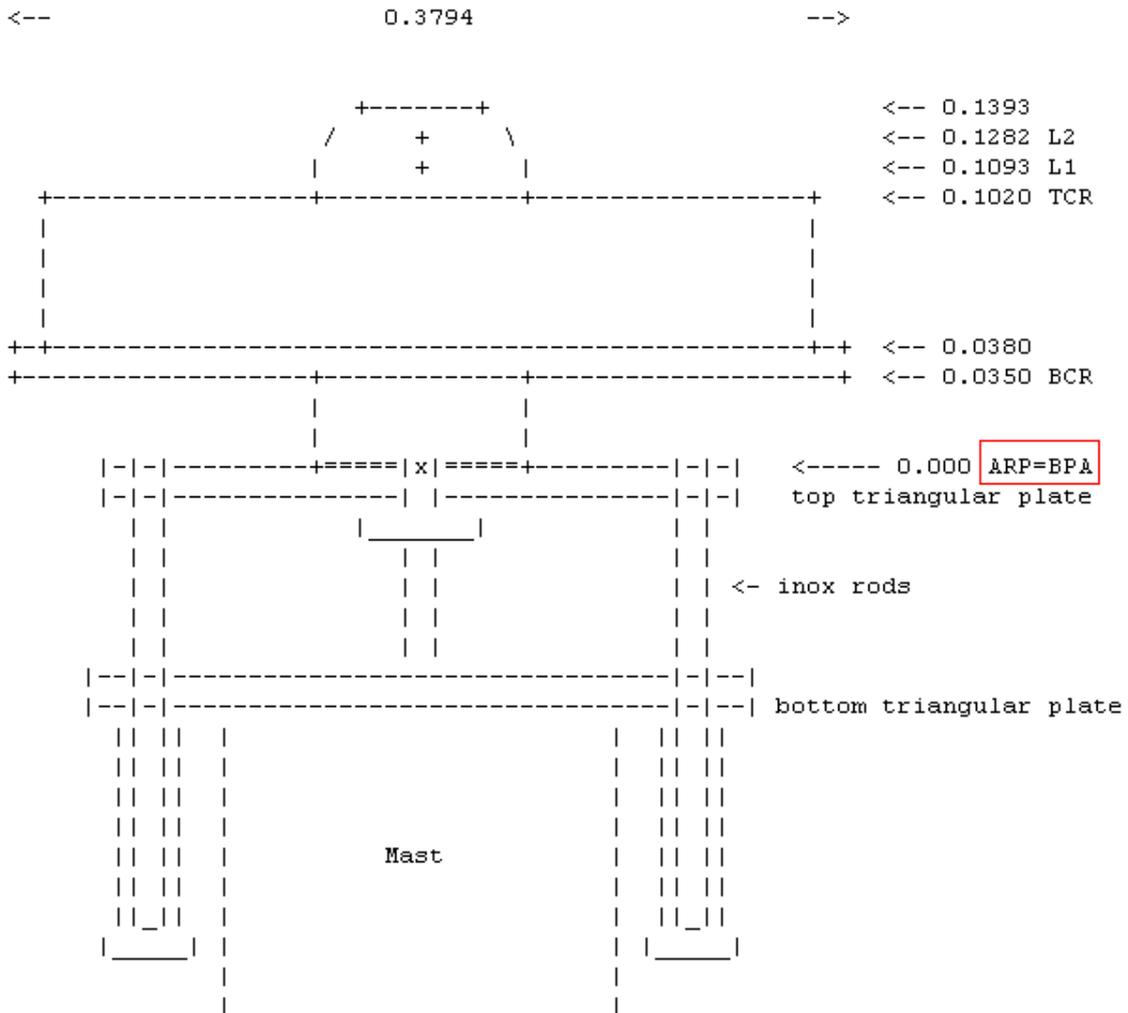
Schéma de l'antenne GNSS Actuelle extraite du 'sitelog' de type IGS : scoa_20170116.log

TRM55971.00



Ancienne antenne GNSS extraite du 'sitelog' : scoa_20070918.log

LEIAT504



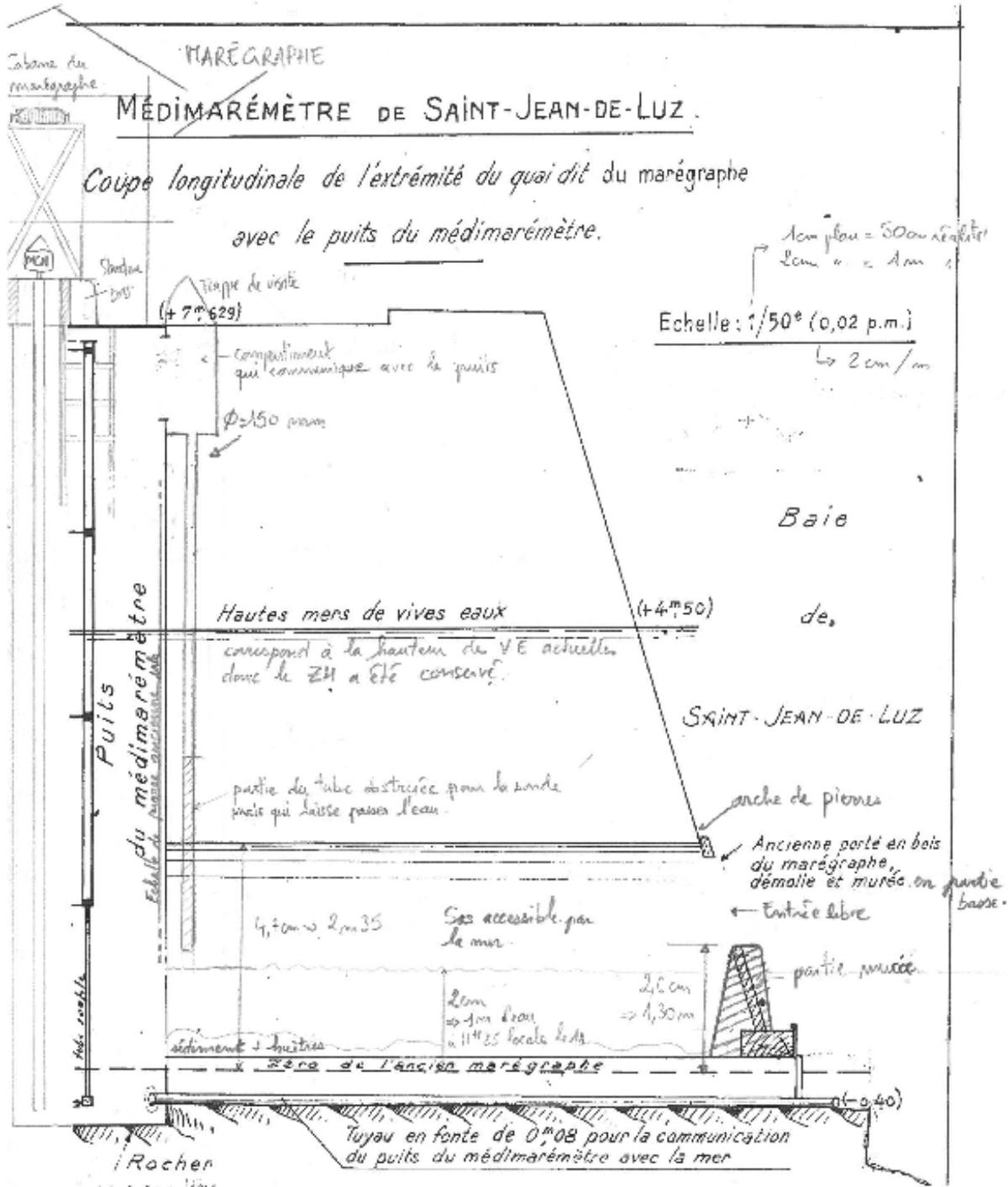
BPA: Bottom of Pre Amplifier
L1 : L1 Phase Center

BCR : Bottom of Choke ring
L2 : L2 Phase Center

Note : ARP = Antenna Reference Point, BAM = Bottom of Antenna Mount

Annexe 4 : Schéma du quai & Echelle de marée DDE

Document ancien représentant le puits du médimarémètre fourni par le Shom et modifié par le LIENSs d'après les observations faites au marégraphe durant la mission.



Dessin d'échelle. Révisé à jour 24/08/2017 C. POIRIER LIENSs

Annexe 5 : Description de la μ Nappe GPS & Analyse des mesures

La μ Nappe-GPS aussi appelée Micro-nappe ou Micro-Bouée a été développée par la DT INSU de Brest en 2016 en partenariat avec le LIENSs dans le but d'effectuer des étalonnages de marégraphes avec un système compact, léger et facilement transportable.

Elle est une évolution de la nappe CalNaGeo de la DT INSU qui est un genre de tapis flottant muni d'un système GNSS destiné à cartographier la surface de l'eau en mode tracté derrière un navire. La technologie du tapis flottant a été choisie afin de limiter les oscillations verticales de la bouée constatées sur les modèles précédents. Ceci doit permettre d'avoir une mesure de la SSH (*Sea Surface Height*) de meilleure qualité. Cette première version est encore un prototype en cours de validation.



Spécifications techniques :

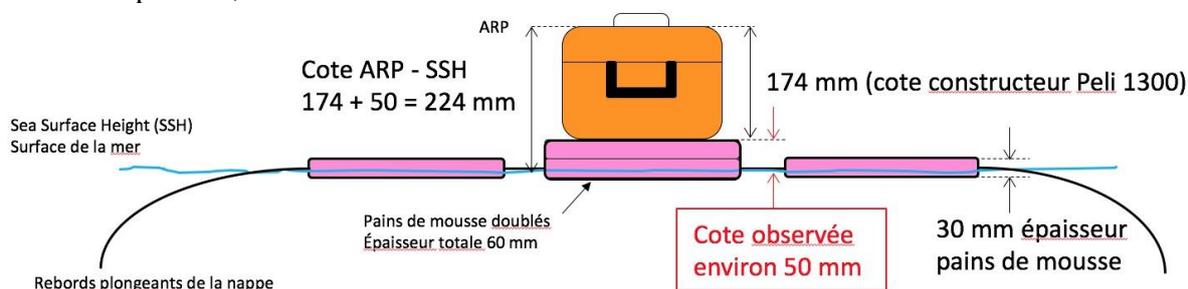
- Récepteur GNSS bi-fréquence : Septentrio AsteRx-m UAS. *Réf.* GRB00231000AC070 - SN15273009898 - 30008592
- Antenne GNSS calibrée avec plan de masse et sans radôme : Tallysman TW3870.
Code antenne : TWI3870+GP NONE
- Alimentation : 8 piles alcalines LR14 de 1.5V pour une autonomie de 50h à 20°C.
- 1 émetteur radio Xbee pour la transmission de la position toute les minutes.

Le tout est protégé dans une Pelicase 1300 étanche qui est fixée à la nappe par 2 sangles.

Dimensions :

Les dimensions hors-tout de la Micro-nappe sont de 1,44 m x 1,44 m pour le tapis flottant et 1,325 m x 0,5 m pour chacune des 4 bandes de tissus latérales (tissu plongeant cf. photo ci-dessus).

Au niveau épaisseur, voici les cotes mesurées in-situ :



N.B: Épaisseur du tissu 0.5mm non prise en compte

Déploiement :

La Micro-nappe a été déployée dans le prolongement de la digue du marégraphe, à une trentaine de mètres de celui-ci. Elle est amarrée à une bouée de mouillage munie d'une *flash light* reliée à environ 8m de bout flottant, un peu de chaîne et une ancre FOB de 5 kg environ (photos du mouillage ci-après).



Acquisition de données :

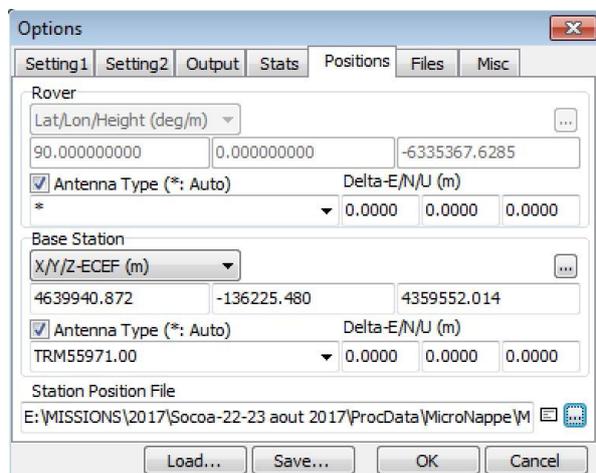
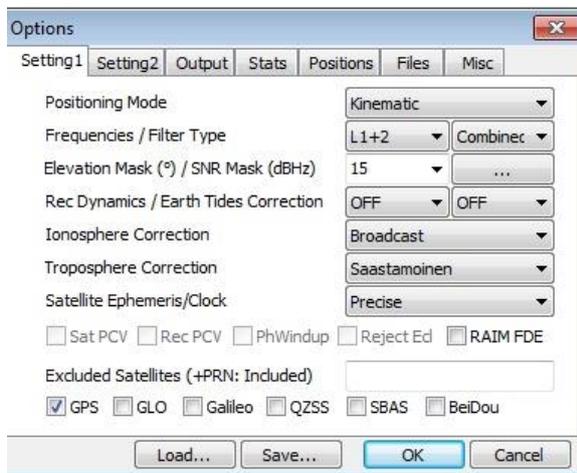
La Micro-nappe est configurée pour enregistrer des données GNSS à 1 seconde dans un fichier au format constructeur LOG.sbf.

Traitement des données :

- Le fichier LOG.sbf est d'abord converti en RINEX 2.11 grâce à l'utilitaire SBF Converter de la suite Rx Tools fournie par le fabricant Septentrio.
- On renseigne ensuite dans le RINEX d'observation de la Micro-nappe le modèle d'antenne utilisé : TWI3870+GP NONE

À terme, ceci sera directement configuré dans le récepteur AsterX.

- Pour le post-traitement, on s'est servi du logiciel libre RTKlib 2.4.2 rn en mode relatif par rapport à une autre station. La station permanente SCOA, située sur le marégraphe, est choisie comme station de base. Les éphémérides rapides de l'International GNSS Service (IGS, format .sp3, disponibles au bout d'un jour après l'acquisition) ont été utilisées pour fixer les orbites des satellites GNSS. La hauteur d'antenne de la bouée est volontairement mise à 0 m. Elle sera appliquée ultérieurement.
- Ci-dessous dans l'extrait des panneaux de configuration les options RTKlib choisies :



Dans l'onglet Base Station, la position XYZ renseignée est celle issue de la page RGP de la station [SCOA](#). Le type d'antenne TRM55971.00 est issu du [logfile](#) de la station SCOA. Le fichier ANTEX de calibrations d'antennes GNSS est issu de la [NOAA](#) et il est renseigné dans l'onglet files (fichier : ngs08.atx).

- Le fichier de sortie du traitement RTKlib est un fichier *.pos en latitude, longitude, hauteur ellipsoïdale dans le système géodésique WGS84.
- En Python, on applique ensuite à cette hauteur ellipsoïdale l'offset ARP-surface de l'eau de la Micro-Nappe évalué à 224 mm d'après les spécifications constructeur. Cela donne une SSH (Sea Surface Height).
- Enfin, il suffit de soustraire aux les données SSH la cote du ZH par rapport à l'ellipsoïde GRS80 ($59,458 - 12,8628 = 46,5952$ m) pour obtenir une hauteur d'eau par rapport au ZH.

Annexe 6 : Tableau des mesures d'étalonnage du 11 mai 2017

Le tableau suivant présente les valeurs telles qu'elles ont été saisies sur place pendant l'opération d'étalonnage :

- « Heure TU+0 » : valeur donnée par le garde temps ;
- « Sonde » : mesure au ruban de la sonde ;
- « MCN » : hauteur d'eau moyenne sur 10s de mesures du marégraphe Krohne Optiwave 7300C ;
- « Résultat sonde » : calcul de la différence de hauteur de l'index moins la mesure au ruban ;
- « Ecart MCN – sonde » : différence des hauteurs d'eau du MCN et issues de la sonde ;
- « Micro-nappe GPS » : résultats de l'analyse des mesures GPS de la Micro-nappe (détails en Annexe 5) ;
- « Ecart MCN – sonde » : différence des hauteurs d'eau du MCN et issues de la Micro-nappe GPS.

Heure TU	Sonde (m)	Echelle DDE (m)	MCN (m)	Résultat sonde (m)	Ecart (m) MCN – sonde	Micro-nappe GPS (m)	Ecart (m) MCN – μ GPS	EPONIM (m)	VEGA (m)
06:00	4.744		3.395	3.391	0.004				
06:10	4.880		3.262	3.255	0.008			3.149	
06:20	5.015		3.123	3.120	0.003			3.005	
06:30	5.138		2.996	2.997	0.000			2.890	
06:40	5.277		2.860	2.858	0.003			2.738	
06:50	5.423		2.716	2.712	0.004			2.600	2.668
07:00	5.565		2.573	2.570	0.004			2.459	2.527
07:10	5.718		2.416	2.417	-0.001			2.295	2.374
07:20	5.845		2.293	2.290	0.003			2.187	2.247
07:30	6.004		2.152	2.131	0.022			2.035	2.100
07:40	6.108		2.027	2.027	0.001			1.910	1.980
07:50	6.247		1.893	1.888	0.006			1.789	1.845
08:00	6.370		1.777	1.765	0.013			1.662	1.721
08:10	6.473		1.657	1.662	-0.004	1.545	0.112	1.559	1.618
08:20	6.572		1.563	1.563	0.001	1.456	0.107	1.473	1.520
08:30	6.679		1.455	1.456	0.000	1.342	0.113	1.361	1.414
08:40	6.775		1.370	1.360	0.010	1.254	0.116	1.266	1.320
08:50	6.854		1.279	1.281	-0.001	1.196	0.083	1.210	1.246
09:00	6.909		1.221	1.226	-0.004	1.154	0.067	1.160	1.192
09:10	6.961		1.176	1.174	0.002	1.113	0.063	1.112	1.142
09:20	7.001		1.139	1.134	0.006	1.058	0.081	1.064	1.098
09:30	7.029		1.111	1.106	0.006	1.059	0.052	1.066	1.079
09:40	7.027	1.070	1.114	1.108	0.007	1.058	0.056	1.060	1.080
09:50	7.027	1.055	1.114	1.108	0.007	1.039	0.075	1.049	1.075
10:00	7.048	1.045	1.090	1.087	0.004	1.029	0.061	1.044	1.061
10:10	7.012	1.098	1.128	1.123	0.006	1.083	0.045	1.091	1.101
10:20	6.977	1.120	1.162	1.158	0.005	1.102	0.060	1.115	1.172
10:30	6.945	1.180	1.188	1.190	-0.001	1.164	0.024	1.176	1.235
10:40	6.880	1.230	1.254	1.255	0.000	1.209	0.045	1.223	1.307
10:50	6.813	1.325	1.330	1.322	0.008	1.301	0.029	1.316	1.379
11:00	6.738	1.389	1.396	1.397	-0.001	1.377	0.019	1.382	1.471
11:10	6.648	1.500	1.489	1.487	0.003	1.483	0.006	1.489	1.678
11:20	6.553	1.593	1.580	1.582	-0.002	1.579	0.001	1.588	1.791
11:30	6.445	1.713	1.691	1.690	0.001	1.689	0.002	1.706	1.907
11:40	6.331	1.820	1.811	1.804	0.007	1.796	0.014	1.810	2.668
11:50	6.220	1.950	1.925	1.915	0.011	1.887	0.038	1.934	2.527

Suite des mesures ci-après...

Heure TU	Sonde (m)	Echelle DDE (m)	MCN (m)	Résultat sonde (m)	Ecart (m) MCN – sonde	Micro-nappe GPS (m)	Ecart (m) MCN – μ GPS	EPONIM (m)	VEGA (m)
12:00	6.085	2.085	2.052	2.050	0.002	2.061	-0.010	2.077	2.042
12:10	5.955	2.220	2.184	2.180	0.005	2.190	-0.005	2.213	
12:20	5.814	2.350	2.322	2.321	0.001	2.326	-0.004	2.339	2.312
12:30	5.689	2.490	2.445	2.446	0.000	2.450	-0.005	2.468	2.439
12:40	5.558	2.610	2.583	2.577	0.007	2.585	-0.002	2.596	
12:50	5.424	2.770	2.715	2.711	0.004	2.732	-0.017	2.749	2.708
13:00	5.284	2.910	2.854	2.851	0.004	2.873	-0.019	2.887	2.845
13:10	5.137	3.030	2.995	2.998	-0.002	3.008	-0.013	3.016	2.988
13:20	5.000	3.180	3.133	3.135	-0.001	3.144	-0.011	3.158	3.123
13:30	4.875	3.300	3.265	3.260	0.005	3.273	-0.008	3.287	
13:40	4.742	3.430	3.394	3.393	0.001	3.398	-0.004	3.419	
13:50	4.610	3.570	3.528	3.525	0.003	3.526	0.002	3.549	
14:00	4.492	3.680	3.649	3.643	0.006	3.633	0.015	3.660	
14:10	4.383	3.800	3.751	3.752	-0.001	3.749	0.001	3.770	
14:20	4.267	3.910	3.875	3.868	0.008	3.864	0.011	3.881	3.251
14:30	4.165	3.990	3.970	3.970	0.001	3.944	0.026	3.972	3.964
14:40	4.083	4.055	4.063	4.052	0.011	4.012	0.051	4.044	4.045
14:50	4.024	4.112	4.114	4.111	0.003	4.062	0.052	4.094	4.103
15:00	3.954		4.182	4.181	0.002	4.138	0.044	4.170	4.171
15:10	3.903	4.210	4.240	4.232	0.009	4.167	0.073	4.204	4.219
15:20	3.870	4.250	4.273	4.265	0.009	4.241	0.032	4.228	4.250
15:30	3.827	4.295	4.311	4.308	0.003	4.273	0.038	4.282	4.294
15:40	3.803	4.315	4.333	4.332	0.002	4.305	0.028	4.306	4.319
15:50	3.789	4.335	4.347	4.346	0.001	4.278	0.069	4.317	4.326
16:00	3.786	4.325	4.349	4.349	0.001	4.276	0.073	4.312	4.330
16:10	3.792	4.305	4.342	4.343	0.000	4.260	0.082	4.300	4.318
16:20	3.815	4.288	4.318	4.320	-0.002	4.238	0.080	4.274	4.294
16:30	3.851	4.254	4.288	4.284	0.005	4.209	0.079	4.237	