

Manuels et guides 14

Commission océanographique intergouvernementale

Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer Marégraphes radar

Volume **V**

Manuels et guides 14

Commission océanographique intergouvernementale

Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer Marégraphes radar

Volume **V**

UNESCO 2016

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part des secrétariats de l'UNESCO et de la COI aucune prise de position quant au statut juridique des pays ou territoire, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières.

Équipe de rédaction :

Directeur : Philip L. Woodworth (NOC, Royaume-Uni)

Thorkild Aarup (COI, UNESCO)

Gaël André, Vincent Donato et Séverine Enet (SHOM, France)

Richard Edwing et Robert Heitsenrether (NOAA, États-Unis)

Ruth Farre (SAHNO, Afrique du Sud)

Juan Fierro et Jorge Gaete (SHOA, Chili)

Peter Foden et Jeff Pugh (NOC, Royaume-Uni)

Begoña Pérez (Puertos del Estado, Espagne)

Lesley Rickards (BODC, Royaume-Uni)

Tilo Schöne (GFZ, Allemagne)

Contributeurs au Supplément – Expériences pratiques

Daryl Metters et John Ryan (Coastal Impacts Unit, Queensland, Australie)

Christa von Hillebrandt-Andrade (NOAA, États-Unis), Rolf Vieten, Carolina Hincapié-Cárdenas et Sébastien Deroussi (IPGP, France)

Juan Fierro et Jorge Gaete (SHOA, Chili)

Gaël André, Noé Poffa, Guillaume Voineson, Vincent Donato, Séverine Enet (SHOM, France) et Laurent Testut (LEGOS, France)

Stephan Mai et Ulrich Barjenbruch (BAFG, Allemagne)

Elke Kühmstedt et Gunter Liebsch (BKG, Allemagne)

Prakash Mehra, R.G. Prabhudesai, Antony Joseph, Vijay Kumar, Yogesh Agarvadekar, Ryan Luis, M. Soumya, Bharat Harmalkar et Devika Ghatge (NIO, Inde)

Hironori Hayashibara (JMA, Japon)

Ruth Farre (SAHNO, Afrique du Sud)

Begoña Pérez (Puertos del Estado, Espagne), Diana López et José María Cortés (SIDMAR, Espagne) et Bernat Puyol (IGN, Espagne)

Jeff Pugh, Peter Foden, Dave Jones, Philip Woodworth et Angela Hibbert (NOC, Royaume-Uni)

Travis Mason (Channel Coastal Observatory, Royaume-Uni) et Robin Newman (Fugro EMU Ltd., Royaume-Uni)

Richard Edwing et Robert Heitsenrether (NOAA, États-Unis)

Janice M. Fulford (USGS, États-Unis)

Des renseignements complémentaires ont été fournis par Les Bradley (NOC, Royaume-Uni), Pat Caldwell et Mark Merrifield (UHSLC, Hawaï, États-Unis), Médéric Gravelle et Guy Wöppelmann (Université de La Rochelle, France), Lonny Hansen, Vibeke Huess et Klavs Allerslev (Institut météorologique danois) et Belén Míguez Martín (EMODnet, Ostende, Belgique). Nous souhaitons également remercier Christoph Blasi (BAFG, Allemagne), John Boon (États-Unis), John Broadbent (Maritime Safety, Queensland, Australie), Peter Devine (Directeur technique, VEGA Controls Ltd., Royaume-Uni), Terry Edwards (Directeur technique, RS Aqua Ltd., Royaume-Uni) et Øistein Grønlie (conseiller technique principal, Miro, Norvège).

Graphiste : Ahmad Korhani, UNESCO. Maquette originale par Eric Loddé.

L'utilisation de ce document comme référence bibliographique doit se faire sur la forme suivante :

Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer, Volume V : Marégraphes radar.

Paris Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO 106 pp

(COI Manuels et Guides No 14, vol. V; JCOMM Rapport Technique No 89 (français traduit de l'anglais).

Ce manuel comprend un supplément intitulé *Practical Experiences* (Expériences pratiques) en anglais seulement.

Imprimé en 2016

Par l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture

7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP

© UNESCO 2016

Imprimé en France

(IOC/2016/MG/14Vol.5)

Avant-propos

La première édition du Manuel de la COI sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer date de 1985 et, suite à la parution de la deuxième édition, dix ans plus tard, elle a été rééditée sous le titre Manuel 14, « Volume I : Procédures de base ».¹ Vers le milieu des années 1980, la plupart des marégraphes se présentaient sous la forme de dispositifs classiques avec puits de tranquillisation et flotteurs, les courbes de marée étant tracées au stylet sur un enregistreur à diagramme. La première partie du Volume I présentait des généralités d'ordre scientifique sur le niveau de la mer, avant de passer aux aspects pratiques du choix d'un site approprié pour l'implantation d'un marégraphe. Y était ensuite abordée en détail la question de l'installation et de l'entretien des marégraphes à flotteur. Dans les sections suivantes, il était expliqué comment numériser les marégrammes papier et identifier les différents types d'erreurs, de façon à aboutir à une série temporelle du niveau de la mer pouvant être filtrée en vue de fournir les informations relatives à la marée et au niveau moyen nécessaires aux scientifiques et aux autres utilisateurs intéressés. Une dernière section était consacrée aux procédures d'échange des données. D'autres types de marégraphes (à bulles, en l'occurrence) étaient aussi brièvement évoqués, ainsi que les méthodes de stockage électronique des données du niveau marin, préférables aux supports papiers, pour la « surveillance à distance ».

Une dizaine d'années plus tard, en 1994, le second Volume du Manuel 14 a paru sous l'intitulé « Emerging Technologies » (technologies émergentes). Ce volume, toujours consacré à l'examen des marégraphes à flotteur et à pression, présentait une nouvelle méthode de mesure du niveau de la mer au moyen de la réflexion d'une impulsion acoustique émise par un transducteur placé au-dessus de la surface de l'eau. L'un des marégraphes acoustiques de ce type, basé sur le transducteur Aquatrak, est devenu en quelque sorte un modèle standard dans le cadre du programme GLOSS (Système mondial d'observation du niveau de la mer) de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) suite à son utilisation dans plusieurs sites aux États-Unis, en Australie et dans d'autres pays. Ce volume traitait également de la possibilité d'enregistrer les données de façon électronique et de les transmettre par lignes téléphoniques ou par satellite à un centre de

traitement et présentait un certain nombre de méthodes de traitement des données tout en précisant le rôle des différents Centres de données du niveau de la mer.

Le Volume III a été publié en 2002 sous l'intitulé « Reappraisals and Recommendations as of the Year 2000 » (Réévaluations et recommandation à compter de l'an 2000). Il y était à nouveau question des dispositifs à flotteur, à capteurs de pression ou à impulsion acoustique, mais aussi, pour la première fois, de l'utilisation de « marégraphes radar et autres nouvelles technologies », sur une demi-page. On y passait encore une fois en revue les méthodes de transmission et d'échange. Bien que les sujets traités dans les Volumes II et III soient similaires, leurs auteurs sont différents, ce qui justifie la lecture des deux volumes qui sont complémentaires.

Le Volume IV a paru en 2006 sous l'intitulé « An Update to 2006 » (Actualisation à 2006). Là encore, les connaissances scientifiques relatives au niveau de la mer et les technologies éprouvées en matière de marégraphes y étaient passées en revue, tout en réservant deux pages aux marégraphes radar. On y trouvait également une section consacrée aux avantages que présente l'utilisation de telle ou telle technologie relativement au site d'installation. Avec le tsunami de Sumatra survenu en décembre 2004, la communauté du niveau de la mer a pris conscience du fait que les sites marégraphiques devaient prévoir de mesurer non seulement le niveau marin pour les études classiques du suivi du niveau moyen et des marées, mais aussi de fournir des données en temps réel pour l'alerte aux ondes de tempête et aux tsunamis. Compte tenu de cette dimension « multi-risques », il était devenu préférable que les différents sites disposent de plus d'un type de capteurs (à pression et radar, par exemple). Le capteur principal (radar) enregistrerait ainsi en règle générale des valeurs moyennes toutes les trois minutes, ou à une fréquence plus élevée, tandis qu'un capteur de pression différentielle (dispositif mesurant la différence entre la pression de fond et la pression atmosphérique) enregistrerait des valeurs au moins toutes les minutes. Le marégraphe à pression jouerait donc le rôle de capteur primaire pour la détection du tsunami et permettrait de pallier les éventuelles lacunes des observations du radar. Toutes ces données seraient transmises sans délai. Les stations seraient quant à elles conçues pour résister au mieux aux dégâts occasionnés par les événements extrêmes. Ce volume présentait par ailleurs des sections consacrées à la télémesure des données en temps réel, au contrôle qualité des données et aux nouvelles

¹ Les différents volumes du Manuel sont disponibles à l'adresse suivante : http://www.psmsl.org/train_and_info/training/manuals/.

technologies, tout en énonçant de façon plus détaillée les spécifications du système GLOSS. Il comprenait aussi un appendice présentant les expériences d'opérateurs de marégraphes, certaines incluant des informations utiles sur l'utilisation des radars.

Dix ans plus tard, paraît le Volume V qui est spécifiquement consacré aux marégraphes radar. Les télémètres radar sont utilisés depuis de nombreuses années dans les secteurs de l'industrie (afin de mesurer les niveaux des liquides dans les cuves) et de l'hydrologie (afin de mesurer le niveau des cours d'eau, des plans d'eau et des réservoirs). Cette technologie a aussi été utilisée au cours de la décennie qui s'est écoulée depuis la parution du Volume IV pour mesurer le niveau de la mer dans de nombreux endroits. La télémétrie radar a d'ores et déjà remplacé les autres technologies dans de nombreux pays. Le faible coût de ces dispositifs (en règle générale) et leur relative facilité d'installation et d'entretien en ont fait la technologie de premier choix partout où l'on a procédé à l'installation de nouveaux sites ou au renouvellement des équipements anciens. Il est très simple de les associer à des enregistreurs numériques de données et à des systèmes de télémesure, de telle sorte que les données peuvent parvenir quasi instantanément aux centres dans le monde entier. Il subsiste néanmoins de nombreuses questions quant à leur adéquation pour surveiller le niveau de la mer dans le cadre des réseaux nationaux et internationaux tels que le GLOSS. À l'occasion de la treizième réunion du groupe d'experts du GLOSS qui s'est tenue à Liverpool en novembre 2013, il a été question d'une nouvelle édition du Manuel 14 principalement axée sur cette technologie et sur les problèmes liés à son utilisation.

En conséquence, la première partie de ce cinquième volume traite notamment de la façon dont les marégraphes radar peuvent être installés au-dessus de la surface de l'eau afin de mesurer le niveau de la mer. Il y est aussi question de l'étalonnage des marégraphes, soit en laboratoire avant d'être installés, soit sur le terrain à l'occasion des opérations régulières de maintenances. Ce volume traite des performances de la technologie radar en comparaison des autres technologies, et des biais possibles en présence de vagues, et indique par conséquent quelles sont les autres technologies à utiliser en parallèle dans ces circonstances.

La deuxième partie du présent Volume revient sur certaines questions précédemment abordées dans les volumes antérieurs du Manuel 14. Les aspects en question sont particulièrement importants en matière de mesures marégraphiques, et peuvent être répétés dans chaque volume, quoique de façon différente. Il était question dans le Volume I des procédures essentielles à

respecter pour assurer le maintien de la référence des mesures du niveau de la mer (c'est-à-dire la stabilité des mesures par rapport aux points de repère situés sur terre). Dans le Volume II, on décrivait la procédure de nivellement entre les différents repères d'une même zone, et on introduisait le recours aux récepteurs GPS (système de positionnement universel) dans le cadre de la surveillance des mouvements verticaux du sol. Le sujet du GPS appliqué à la marégraphie a été développé dans les Volumes III et IV. Les sections en question reposaient en partie sur les connaissances acquises en matière de système GPS dans le cadre des ateliers ayant débouché sur les deux « Rapports Carter » de 1989 et 1994, ainsi que sur un autre atelier important ayant eu lieu au Jet Propulsion Laboratory en 1998.² À cette époque, on avait commencé à exploiter la technologie GPS en matière de marégraphie en ayant recours à des récepteurs bifréquence (et non pas monofréquence) continus (et non pas intermittent ou lors de campagne), et des études plus poussées concernant leur utilisation avaient été entreprises dans le cadre du projet Tide Gauge (TIGA) du Service GNSS international (IGS). Le présent Volume V comporte une section analogue consacrée aux méthodes de levé et de suivi des repères marégraphiques, incluant l'utilisation du GNSS (système mondial de navigation par satellite), et actualisant les recommandations relatives à l'utilisation du GNSS pour la marégraphie.³

La deuxième partie du présent Volume contient également des sections actualisées sur la façon dont les opérateurs de marégraphes peuvent veiller à ce que les données qu'ils recueillent parviennent bien aux centres où elles seront exploitées au mieux à des fins pratiques et scientifiques. Il paraît par exemple à présent inconcevable que des marégraphes implantés dans le cadre du réseau GLOSS soient dépourvus de système de transmission en temps réel pour ce qui est des ondes de tempête et des tsunamis. En revanche, il convient que la qualité de ces données soient suffisante pour que les centres de données en temps différé puissent les exploiter et les convertir en niveau moyen exploitables dans le cadre d'études consacrées aux évolutions long-terme du niveau marin. Ces deux objectifs d'exploitation en temps réel ou différée des données ne sont pas nécessairement en concurrence, pour peu que l'on veuille à ce que les données recueillies soient bien interprétées, que les

2 Ces rapports sont disponibles (en anglais) à l'adresse suivante : http://www.psmsl.org/train_and_info/training/reading/.

3 Le GNSS englobe le GPS, le système de l'armée américaine en service depuis les années 1980, et aussi les systèmes russes (GLONASS), européen (Galileo), japonais (QZSS) et chinois (BeiDou). Il est probable que les autres systèmes GNSS gagnent autant d'importance que le système GPS dans le cadre du suivi des mouvements verticaux du sol à l'avenir. Concernant le statut propre à chaque système, voir <http://igs.org/mgex/status-GPS>.

métadonnées essentielles soient compilées et que la transmission aux centres nationaux et internationaux compétents se fasse sans délai.

Nous invitons les nouveaux lecteurs du Manuel 14 à consulter les Volumes I à IV avant d'entamer la lecture du présent Volume. Bien que les volumes précédents aient été publiés il y a longtemps et que la technologie a considérablement évolué depuis, les discussions passées apportent un caractère éducatif sur la façon dont les données de niveau de la mer ont été recueillies au fil du temps. Le plus souvent, le fait de passer d'un système de mesure à un autre n'est pas sans risque, du fait du recours à des procédés systématiques différents au sein d'une série temporelle homogène, ce qui justifie d'évaluer la façon dont les méthodes ont évolué. Comme il ne fait aucun doute que le même type d'erreurs liées au changement de technologies pourrait se produire à l'heure actuelle, alors que les systèmes radar remplacent les systèmes précédents, nous devons nous efforcer de tous les comprendre au mieux.

Ainsi, pour résumer le contenu du présent volume :

La première partie (Chapitres 1 à 5) est consacrée à l'utilisation de la technologie des marégraphes radar.

La deuxième partie (Chapitres 6 à 9) propose une actualisation de certaines questions abordées dans les précédents volumes du Manuel 14.

De façon plus détaillée :

Les Chapitres 1 et 2 fournissent des données générales sur l'utilité des marégraphes ainsi que sur la technologie des marégraphes radar.

Le Chapitre 3 examine les expériences acquises par les membres du groupe d'experts GLOSS au regard de l'utilisation de la technologie radar pour la mesure du niveau marin, et notamment la comparaison avec d'autres technologies. Les contributions individuelles sur lesquelles ce chapitre est basé sont disponibles dans le Supplément.

Le Chapitre 4 se présente comme un guide des bonnes pratiques concernant l'installation d'un marégraphe radar et son exploitation, les chapitres précédents ayant fait la démonstration (avec certaines réserves) de la viabilité du radar en matière de mesure du niveau de la mer.

Le Chapitre 5 expose les points clés en matière de recommandations pour les sites GLOSS équipés de marégraphes radar.

Les Chapitres 6 à 8 fournissent des informations actualisées sur d'importants aspects liés au contrôle des références et à la mesure des mouvements verticaux du sol, à l'acquisition des données et à la télémesure, au flux de données et à leur archivage. (Le contrôle qualité des données de niveau de la mer fera l'objet d'un autre manuel de la COI.)

Le Chapitre 9 constitue un guide des supports pédagogiques existants sur la question du niveau de la mer.

Table des matières

Avant-propos	3
Partie 1 : Les marégraphes radar.....	9
1. Introduction	10
1.1 Utilité des marégraphes.....	10
1.2 Marégraphes antérieurs.....	10
2. Les marégraphes radar	12
2.1 Différents types de marégraphes radar	12
2.2 Sources potentielles d'erreurs en matière de mesures radar.....	14
2.3 Marégraphes radar utilisés dans le cadre de GLOSS.....	17
2.4 Mesures des vagues aux sites GLOSS	18
2.5 Synthèse concernant les marégraphes radar utilisés dans le cadre de GLOSS.....	19
3. Résultats obtenus avec les marégraphes radar, notamment en comparaison avec d'autres technologies.....	20
4. Installation des marégraphes radar	25
4.1 Choix du site d'implantation	25
4.2 Sites appropriés pour l'implantation d'un marégraphe radar.....	29
4.3 Installation du marégraphe radar.....	29
4.4 Avant l'installation	36
4.5 Pendant l'installation.....	39
4.6 Après l'installation.....	40
4.7 Autres capteurs utiles	42
5. Récapitulatif des spécifications de GLOSS pour les sites équipés de marégraphes radar.....	44
Partie 2 : Sections mises à jour de précédents manuels.....	47
6. Niveau de référence et nivellement.....	49
6.1 Introduction	49
6.2 Repères locaux et nivellement	50
6.3 Suivi des références par CGNSS.....	53
6.4 Suivi des références par mesure de campagnes (EGNSS).....	56
6.5 Autres méthodes de mesure des mouvements verticaux du sol	56
6.6 Autres applications du GNSS à la mesure du niveau de la mer	57

7. Équipements nécessaires pour la télémétrie des données des marégraphes	59
7.1 Introduction	59
7.2 Choix d'un système de télémétrie	60
7.3 Systèmes de transmission des données	61
7.4 Télémétrie de diffusion (le GTS)	71
7.5 PCD et autres équipements de télémétrie	72
7.6 Spécifications pour la transmission des données GNSS	76
8. Données sur le niveau de la mer	77
8.1 Centres de données du niveau de la mer	77
8.2 Contrôle qualité des données	81
8.3 Obligations des fournisseurs de données	84
9. Support de formation et contacts	86
Références	89
Appendice 1 :	
Marégraphes radar des principaux fabricants à partir d'avril 2016	95
Appendice 2 :	
Liste des acronymes	98
Appendice 3 :	
Contenu du Bulletin du GTS et exemple de Message de PCD utilisant le code CREX	101
Supplément:	
Articles sur les expériences pratiques fournies par les opérateurs de marégraphes radar	



Les marégraphes radar

1. Introduction

1.1 Utilité des marégraphes

Il se passe rarement une année sans qu'une catastrophe liée au niveau de la mer ne fasse l'actualité. On compte parmi les dernières ondes de tempête les ouragans Katrina (2005) et Sandy (2012), le cyclone Nargis (2008) et le typhon Haiyan (2013), lesquels ont dévasté les zones côtières et fait de nombreuses victimes. On estime que le cyclone Nargis a fait à lui seul au moins 130 000 morts. Les tsunamis les plus récents ont été ceux de Sumatra, en 2004 (qui a fait plus de 230 000 morts) et du Tōhoku (ou de Sendai), en 2011. L'impact de ces deux tsunamis a été plus important à proximité de leur source, mais leurs vagues ont atteint de nombreuses zones du littoral mondial où elles ont provoqué des inondations et des dégâts supplémentaires.

Ce ne sont là que quelques exemples de phénomènes extrêmes majeurs que Pugh et Woodworth (2014) examinent en détail. Certains de ces phénomènes passent quasiment inaperçus, comme ce fut le cas de l'inondation en 2012 des côtes de l'archipel de Haida Gwaii provoquée par le plus important tsunami qui se soit produit sur la côte ouest du Canada au cours de ces 200 dernières années. La plupart des ondes de tempête modestes, comme les tsunamis de faible ampleur, sont considérées comme des phénomènes ordinaires dans de nombreuses régions du monde, où les populations côtières ont dû s'adapter aux fortes variations du niveau de la mer et où des systèmes d'alerte appropriés ont désormais été mis en place.

Cependant, on estime que le niveau moyen de la mer augmente de plus en plus vite et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a annoncé que l'on doit s'attendre à ce que les zones du littoral du monde entier subissent une hausse supplémentaire d'un demi-mètre à un mètre d'ici 2100 (Church et al., 2013). Pareille élévation entraînera des effets directs (comme la salinisation accrue des eaux souterraines des zones côtières) et ne peut qu'aggraver les conséquences des phénomènes extrêmes.

Il semble donc plus qu'évident qu'il est indispensable de disposer d'un réseau mondial de surveillance du niveau de la mer en zone côtière comme le programme GLOSS de la COI (COI, 2012). Ce n'est qu'à l'aide d'un tel réseau (de spécialistes du niveau de la mer, mais aussi d'infrastructures) qu'il sera possible de diffuser partout dans le monde les bonnes pratiques en matière de

surveillance du niveau de la mer, de façon à ce que les organismes des différents pays les appliquent dans le cadre de leurs propres réseaux. L'objectif est donc que les contributions nationales à ce programme international constituent une source quasi globale d'informations relatives au niveau de la mer pour les besoins de la recherche scientifique.

Les données relatives au niveau de la mer requises dans le cadre des systèmes d'alerte « multirisques » et les besoins de la recherche scientifique ne sont pas les seules justifications pour mesurer le niveau de la mer. Les raisons pratiques en faveur de la collecte de ces données sont nombreuses, notamment d'un point de vue local. En effet, certains ports ou villes côtières de grande envergure sont dépourvus de systèmes de suivi du niveau de la mer ou ne disposent pas des systèmes adéquats, alors que le coût d'investissement lié aux marégraphes et au matériel connexe est minime comparé au total de leurs dépenses annuelles. La marée (et le niveau de la mer en général) a toujours représenté un facteur clé dans le cadre des opérations portuaires, ce qui s'est encore accentué avec l'augmentation du tirant d'eau des navires. Toute ville côtière et tout pays doté d'un littoral doit disposer de statistiques sur la variabilité du niveau de la mer due aux marées ou indépendante de celles-ci lui permettant de mettre en place les moyens de protection adéquats. Lorsqu'un nouveau dispositif d'observation du niveau de la mer est envisagé dans ce type d'endroits, l'idéal serait que les autorités municipales ou portuaires travaillent en concertation avec des scientifiques de façon à équiper le site avec le matériel le mieux adapté pour fournir des données qui puissent servir à diverses fins.

1.2 Marégraphes antérieurs

Ce qui se rapproche le plus d'un marégraphe idéal est une échelle de marée grâce à laquelle il est possible, en eaux calmes, de relever le niveau de la mer de visu. Le niveau zéro de l'échelle de marée est ainsi déterminé par rapport à un repère terrestre situé à proximité de sorte que l'on puisse obtenir au bout d'un certain temps une série temporelle de niveaux de la mer « relatif » (relatif au repère situé à terre). Dans une variante historique de ce procédé, on utilise un puits de tranquillisation miniature dans lequel une tige verticale est fixée à un flotteur. La hauteur de l'extrémité de la tige est déterminée de visu à l'aide d'une échelle de marée. Ce procédé a été évoqué dans un article figurant dans la première édition

de la revue *Philosophical Transactions of the Royal Society* (Moray, 1665).⁴

Malheureusement, les dispositifs de ce type, aussi idéaux soient-ils, ne correspondent plus aux réalités actuelles des programmes tels que GLOSS. Il paraît peu vraisemblable que le personnel des organismes d'aujourd'hui soit disposé à rester assis auprès d'une échelle de marée pour réaliser des relevés visuels toutes les deux ou trois minutes, de jour comme de nuit, hiver comme été, année après année. Il est nécessaire d'avoir recours à des procédés plus automatiques. Il convient par ailleurs de souligner qu'il était déjà question à l'époque du « procédé Moray » de problèmes liés à l'installation du dispositif (comment fixer de façon optimale le puits au quai du port ? À quelle distance du fond de la mer doit se trouver l'orifice d'entrée d'eau conique ?), et de possibles biais dans les mesures (le niveau d'eau dans le puits était-il le même qu'au-dehors ?).

Les premiers marégraphes automatiques, ou « enregistreurs », sont apparus dans les années 1830 (Matthäus, 1972) et ont donné suite à l'invention de nombreux autres types de dispositifs. Tous ont cependant présenté des difficultés en matière d'installation et d'entretien. Les vastes puits de tranquillisation, très largement répandus, ne pouvaient par exemple être installés que par des grues et un grand nombre de personnes, ce qui impliquait de gros efforts d'organisation et des dépenses importantes. L'installation des marégraphes à pression nécessitait quant à elle de faire appel à des plongeurs.

En outre, les différents marégraphes présentaient tous certains types d'erreurs systématiques. Les puits de tranquillisation, par exemple, et tout particulièrement ceux situés dans des estuaires, illustrent bien ce type de problèmes. La différence entre la densité de l'eau au sein du puits et la densité de l'eau en dehors de celui-ci – différence qui varie à la fois en fonction des marées et des saisons (la densité de l'estuaire évoluant en cours d'année) – débouchait ainsi sur un décalage entre le niveau de la mer dans le puits et en dehors de celui-ci. Par ailleurs, les forts courants de marée à proximité de l'orifice d'entrée d'eau conique entraînaient, selon le principe de Bernoulli, un abaissement du niveau à l'intérieur du puits (effet

de « draw-down »). Les marégraphes acoustiques sont connus pour leurs risques d'erreurs systématiques dues à des gradients de température verticaux non compensés (et donc à une vitesse du son différente) tout au long de la sonde, pour ce qui est du modèle Aquatrak, ou, pire encore, à l'air libre s'agissant des modèles dépourvus de sondes. D'ailleurs, même si de nombreuses études ont été consacrées à la conception de la partie immergée de la sonde acoustique, dans l'objectif de limiter l'effet de « draw-down », il n'a jamais été possible de résoudre le problème complètement. Les erreurs produites par les marégraphes à pression sont dues aux variations (liées aux marées ou aux saisons) de la densité de l'eau requise pour convertir la pression en niveau de la mer. Presque tous les types de marégraphes souffrent lorsque les vagues sont élevées, principalement en raison des forts courants transitoires que les vagues produisent (et leurs conséquences sur l'effet de « draw-down »). Avec la plupart des types de marégraphes connus, les vagues élevées conduisent à des mesures du niveau de la mer inférieure à la réalité.

Il a déjà été question dans les précédents volumes de ce Manuel des avantages et des inconvénients liés à l'utilisation des marégraphes à pression ou à flotteur, ou de ceux liés à la télémétrie par mesure du temps de vol acoustique. Aucune mention n'a été faite en revanche du temps de vol optique, bien qu'il soit possible d'y avoir recours dans les cas où un puits de tranquillisation s'avère envisageable, avec les mêmes réserves, pour les puits que pour les marégraphes à flotteur.⁵ Le présent Volume aborde le sujet de la télémétrie par micro-ondes qui, comme nous le verrons, constitue une méthode supplémentaire non négligeable pour ce qui est des mesures du niveau de la mer.

4 À la même époque, le grand savant fantasque allemand Athanasius Kircher proposa lui aussi un procédé de marégraphe à flotteur analogue.

5 La seule publication consacrée aux marégraphes laser dont nous ayons connaissance est celle de Forbes et al. (2009) qui rend compte de l'utilisation du laser dans des puits chauffés situés dans l'Arctique canadien, quoiqu'il semble que des marégraphes laser aient aussi été utilisés dans des puits étroits en Corée du Sud. Le laser utilisé au Canada est doté d'une longueur d'onde de 620 à 690 nm (rouge) et les réflexions sont assurées par des panneaux en mousse flottant à environ 8 mm au-dessus de la surface de l'eau. Ailleurs, Washburn et al. (2011) ont eu recours au lidar (détection et télémétrie par la lumière) avec une longueur d'onde de 905 nm (infrarouge proche) pendant de nombreuses années à la plate-forme Harvest, au large des côtes de Californie, avec pour objectif principal de valider les données relatives au niveau de la mer issues d'un marégraphe à bulles de la NOAA. Les réflexions avaient lieu en pleine mer, et non dans un puits de tranquillisation. Les mesures lidar à haute résolution réalisées en pleine mer sont en général réservées à l'enregistrement des vagues (voir par exemple Irish et al., 2006).

2. Les marégraphes radar

2.1 Différents types de marégraphes radar

Comme chacun sait, la technologie radar (Radio Detection And Ranging) a été mise au point avant et pendant la Deuxième Guerre mondiale pour servir dans les domaines de la détection des avions, des navires et des sous-marins émergés. Cela étant, au cours des 25 dernières années, le radar a été utilisé dans de nombreux domaines civils, et notamment pour la détection des mouvements dans le cadre des contrôles routiers. La mise au point des marégraphes dont il est question dans le présent Manuel a été rendue possible par l'utilisation de semi-conducteurs à transistor en tant qu'amplificateurs hyperfréquence ainsi que par la nécessité de pouvoir évaluer le niveau des liquides dans les cuves. Par la suite, cette technologie a été appliquée au secteur hydrologique afin de mesurer le niveau des cours d'eau, des plans d'eau et des réservoirs (OMM, 2010).

Il existe à notre connaissance peu de publications fournissant une description détaillée des marégraphes radar. Les plus intéressantes sont celles de Devine (2000)

et Brumbi (2003), bien qu'elles aient été élaborées dans l'optique d'« applications de processus » (c'est-à-dire pour une utilisation dédiée aux cuves industrielles) et non dans la perspective de l'observation du niveau de la mer, et qu'elles aient été publiées par des fabricants (VEGA et Krohne respectivement). Devine (2000), en particulier, fournit un bon aperçu des concepts fondamentaux de la technologie et de son évolution. On peut aussi trouver des exposés plus succincts dans d'autres sources (Mai et Zimmermann, 2000 et Wikipédia, 2015a).

Il existe, pour résumer, deux principaux types de marégraphes radar : les radars à modulation de fréquence d'onde entretenue (FM-CW ou radar à onde continue) et les radars à impulsion. (Voir Brumbi (2003) pour les références aux autres techniques utilisées dans l'industrie, notamment les méthodes interférométrique et réflectométrique.)

(i) Radars à ondes continues et modulation de fréquence (FM-CW)

Dans les radars à ondes entretenues (ou radar à onde continue), un faisceau électromagnétique à fréquence continue non modulée est dirigé vers une cible, laquelle

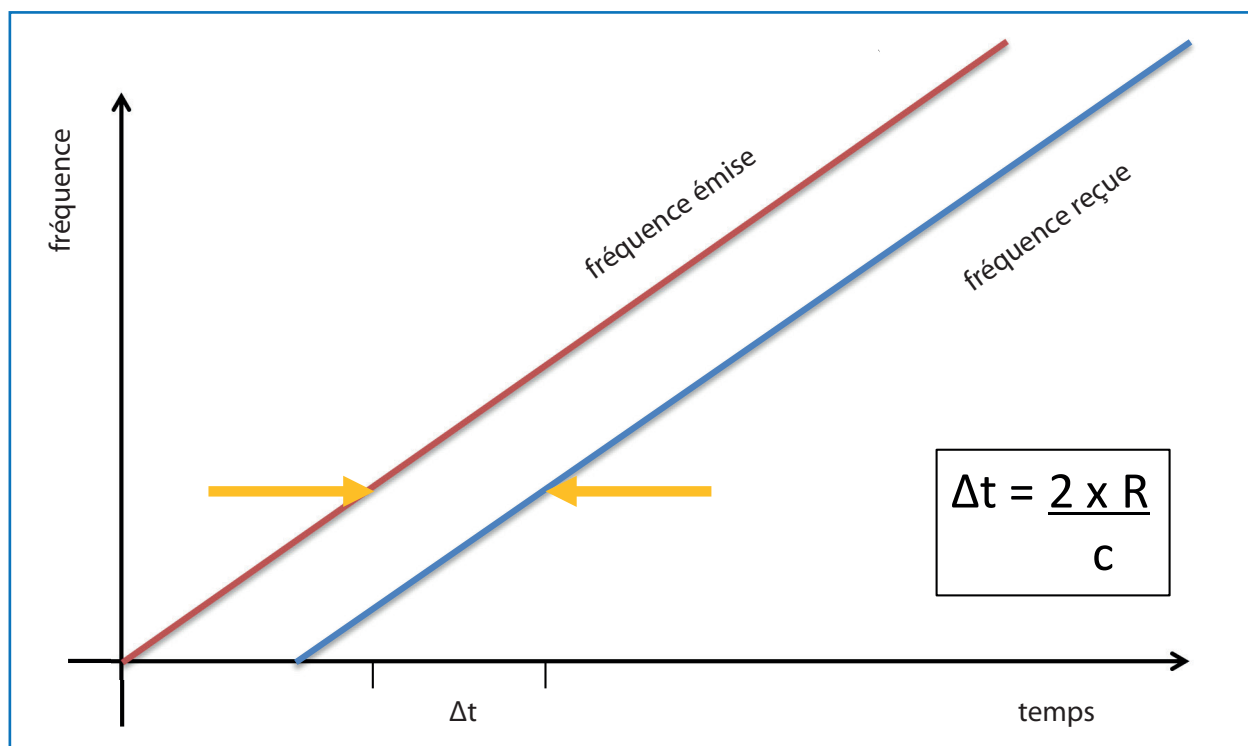


Figure 2.1 Principe de la mesure par onde continue à modulation de fréquence (FM-CW) avec la différence de temps Δt entre les mêmes fréquences transmises et reçues qui augmente proportionnellement à la distance par rapport à la cible R où c représente la vitesse de la lumière dans l'air.

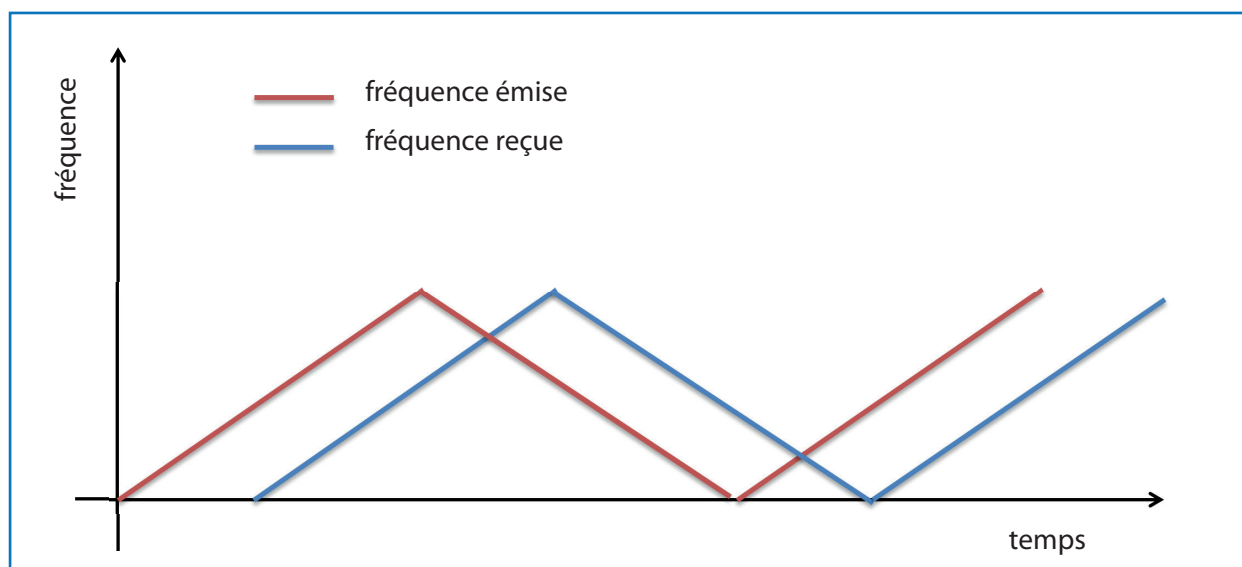


Figure 2.2 Modulation triangulaire des fréquences utilisée dans un marégraphe radar FM-CW.

réfléchit les échos vers l'émetteur. Si la cible est statique, la fréquence des échos en retour sera identique à la fréquence émise. En revanche, dans le cas d'une cible mobile, la fréquence du signal en retour dépend de sa vitesse aller-retour vers l'émetteur. C'est ce que l'on appelle l'effet Doppler. Dans ce cas, bien qu'il soit possible de déterminer aisément la vitesse de la cible à partir de la variation de fréquence, il n'est pas possible d'évaluer la distance séparant la cible de l'émetteur.

Devine (2000) explique pourquoi un radar à ondes continues monofréquence ne peut pas mesurer de distance par le fait qu'il n'existe pas de moment de référence à partir duquel évaluer le délai de l'écho en retour de la cible. Il est néanmoins possible de définir un moment de référence en modulant la fréquence de façon connue. (Mai et Zimmermann, 2000, désignent cette opération « mesure par comparaison de phase optique ».) La **Figure 2.1** en donne une illustration simplifiée en montrant que la fréquence du signal émis augmente de façon linéaire. Si l'on considère que R représente la distance par rapport à la cible, et c la vitesse de la lumière dans l'air, alors le temps d'aller-retour de l'écho radar est $\frac{2R}{c}$. La **Figure 2.1** montre clairement que dès lors que le taux de variation linéaire du signal émis est connu et qu'il est possible d'évaluer le décalage (Δt) entre les fréquences émises et transmises, alors la valeur de R est automatiquement obtenue à partir de Δt . Dans la pratique, le signal reçu réfléchi par la cible se mêle au signal transmis à ce moment-là, ce qui donne une fréquence de battement proportionnelle à R .

L'émission FM-CW doit alterner de façon cyclique entre deux fréquences (p.ex. 24 et 26 GHz), mais cette modulation cyclique peut aussi être de nature différente, à savoir sinusoïdale, triangulaire ou en dent-de-scie

(**Figure 2.2**). La modulation en dent-de-scie est celle qui est le plus souvent utilisée dans les études de processus (Devine, 2000). La modulation triangulaire, telle qu'utilisée avec les capteurs FM-CW dans la démonstration de l'Appendice 1, se caractérise par un balayage de fréquence augmentant de façon linéaire, suivi d'un balayage décroissant, ce qui permet de pondérer le décalage de fréquence par l'effet Doppler induit par la cible mobile.

(ii) Les radars à impulsions

Avec les radars à impulsion, on mesure le temps de vol aller et retour de courtes impulsions (en général évaluées en microsecondes, voire en nanosecondes) entre l'émetteur et la cible. La distance est obtenue après correction de la vitesse de la lumière et en divisant le résultat par deux. Les impulsions se présentent sous forme de petites salves d'ondes. Le nombre d'ondes et la longueur de l'impulsion dépendent de la durée de la pulsation et de la fréquence porteuse utilisée. Un assez long délai entre les pulsations est requis pour permettre la réception de l'écho en retour avant l'émission de l'impulsion suivante. Nous pouvons, en ce qui nous concerne, considérer que la cible est statique. Une variante du procédé consiste à prendre aussi en compte les variations de fréquence de l'impulsion en retour due à l'effet Doppler, ce qui permet d'estimer à la fois la distance et la vitesse de la cible. Ce procédé appelé « radar Doppler à impulsions » est celui qui est utilisé pour la localisation des aéronefs et les radars météorologiques.

Les impulsions de courte durée permettent d'obtenir une meilleure résolution de la cible et une plus grande précision. Toutefois, les impulsions courtes requièrent une puissance de crête plus élevée afin de garantir une portée suffisante. Si la puissance disponible est limitée,

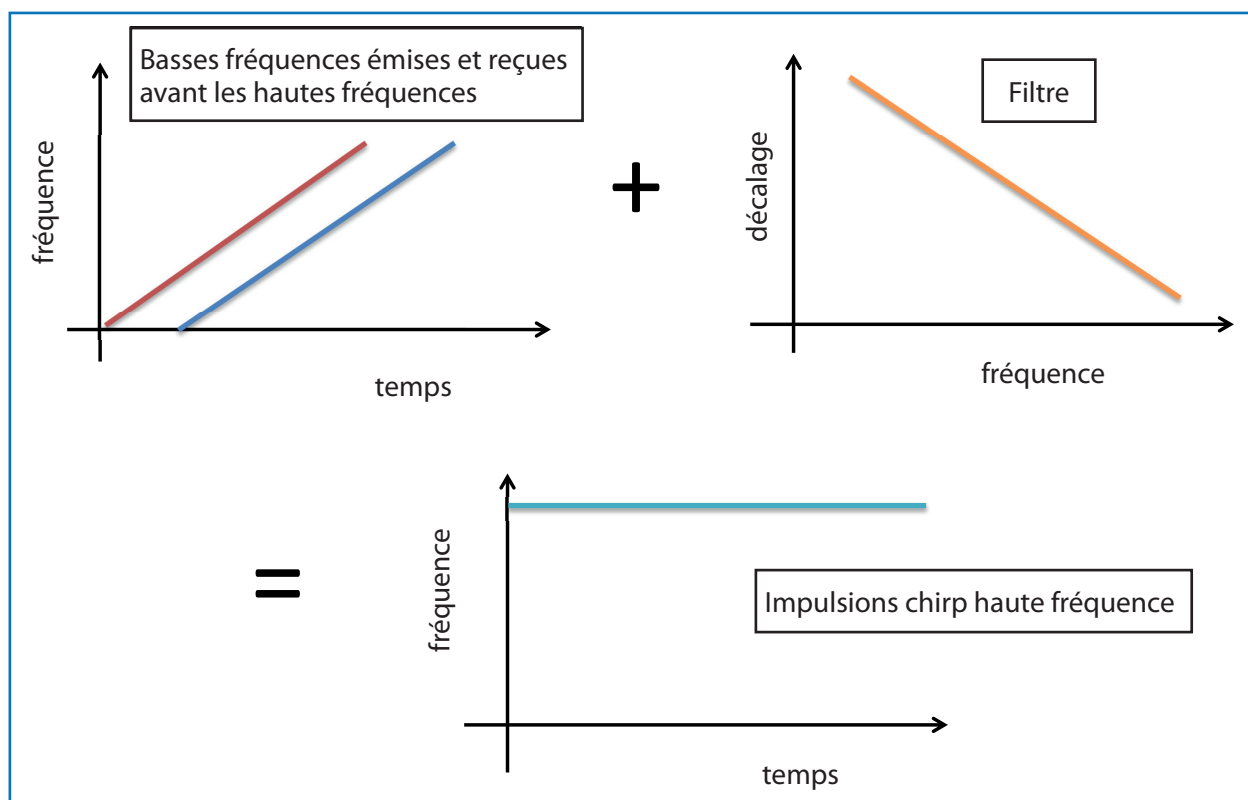


Figure 2.3 Description schématique de la compression des impulsions modulées (radar de type chirp). Les ondes de plus basse fréquence sont transmises à la cible qui les retourne ensuite, avant les ondes de haute fréquence. Un filtre est appliqué aux signaux reçus de sorte que les premières ondes de basse fréquence soient retardées relativement aux suivantes qui sont les ondes de fréquence plus élevée. Il en résulte une compression d'énergie en un paquet à haute fréquence d'« impulsions modulées » (chirp pulse).

une impulsion courte se traduira par une portée maximale réduite. Lorsque la puissance de crête est limitée, des impulsions plus longues assurent une énergie rayonnée plus importante et, par conséquent, une plus grande portée, mais cela, dans le cas des radars à impulsions classiques, au détriment de la résolution et de la précision. Le radar chirp (« pépiement », en anglais) est un procédé hybride entre le radar FM-CW et le radar à impulsion qui repose sur la compression de l'impulsion, de façon à combiner les avantages des radars à impulsions courtes en termes de précision et ceux en termes de puissance pour les impulsions de plus longue durée.

Dans ce type de radars, la fréquence d'impulsion émise est modulée de façon linéaire dans le temps (comme illustré à la [Figure 2.1](#) pour le procédé FM-CW), mais à amplitude constante. L'impulsion en retour passe par un filtre qui compresse l'écho en produisant un décalage qui est inversement proportionnel à la fréquence. Ainsi, l'énergie basse fréquence, plus rapide, est ralentie, et les hautes fréquences qui suivent la rattrapent, ce qui génère un écho plus net ainsi qu'une résolution temporelle améliorée ([Figure 2.3](#)). Devine (2000) donne des précisions sur les variantes des procédés FM-CW, à pulsations et chirp.

2.2 Sources potentielles d'erreurs en matière de mesures radar

Avant de nous attacher, dans le chapitre suivant, à comparer les mesures du niveau de la mer réalisées par radar avec celles réalisées à l'aide d'autres techniques, il convient ici d'évoquer les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur la précision de la technologie radar. La liste est succincte, et davantage encore que celle qui aurait pu être dressée au sujet des technologies plus anciennes en matière de marégraphie.

Variations de température

Un des avantages de la technologie radar comparé aux mesures de distance acoustiques tient au fait que la vitesse du son dépend de la température et qu'en conséquence, afin de parvenir au plus haut degré de précision, les marégraphes acoustiques doivent compenser les variations de la température de l'air entre le transducteur et la surface de la mer. Cela pose particulièrement problème en présence de gradients thermiques forts dans le tube acoustique. Ce type de problème ne se pose pas avec la technologie radar pour laquelle nous pouvons considérer que la vitesse de la lumière dans l'air est la même à toutes les températures et

à toutes les pressions. (La variation de la vitesse des ondes électromagnétiques dans les conditions de températures et de pressions plus radicales de certaines applications est indiquée par Devine, 2000).

Il convient aussi de se demander si les capteurs eux-mêmes ne sont pas sensibles aux variations de température. Il est tout bonnement stipulé dans les fiches techniques de nombreux fabricants que ce n'est pas le cas. Certains mentionnent des degrés de sensibilité minimales. Ainsi, le modèle Waterlog H-3611 est censé présenter une sensibilité de 0,2 mm/K, et de 5 mm maximum pour des températures entre - 40 °C et + 80 °C. Les modèles VEGAPULS-61 et -62 et le VEGAFLEX-81 présentent quant à eux une sensibilité de 0,3 mm/K en pareilles conditions. Heitsenrether (2010) a vérifié ces allégations en disposant les capteurs de quatre fabricants différents à 1,7 m de distance d'une cible dans une chambre atmosphérique. La température, en partant de - 20 °C, y était augmentée par paliers de 10 °C toutes les heures jusqu'à atteindre 50 °C. Les résultats ont montré que les capteurs Waterlog H-3611 et VEGAPULS-62 n'étaient pas affectés par les variations de température, tandis que les résultats relatifs aux deux autres capteurs n'ont pas été concluants.

Les variations liées à la température, à l'humidité et au vieillissement impactent probablement davantage les pièces électroniques connexes que le marégraphe en lui-même. À titre d'exemple, André et al. (Supplément) souligne qu'il importe d'avoir recours à un dispositif d'acquisition de données numériques plutôt qu'à une boucle de courant analogique sensible au milieu ambiant.

Interférences électromagnétiques

Un très grand nombre d'études ont été consacrées à la question de l'interférence électromagnétique des mesures radar (et notamment au brouillage des radars militaires), mais aucune ne s'est spécifiquement intéressée aux marégraphes radars. Il est probable que les dispositifs FM-CW soient davantage sujets aux interférences que les systèmes à impulsions (**Tableau 2.1**), mais il serait nécessaire de reproduire en détail l'environnement électromagnétique de toute implantation donnée pour pouvoir évaluer ces incidences.

Objets dans le faisceau

Des bateaux, des troncs d'arbres ou des détritiques à la dérive peuvent éventuellement passer sous le faisceau et fausser les mesures du niveau de la mer. On voit mal comment parer à cette éventualité, qui peut d'ailleurs se révéler difficile à déceler uniquement à l'aide des données du radar. La confrontation des données issues du radar avec les informations provenant d'un capteur de pression auxiliaire peut aider à détecter ce

type de phénomènes. Pour ce qui est des éléments qui apparaissent de façon plus permanente dans le faisceau radar, on trouvera à la Section 4.5 une description des programmes informatiques mis au point par les fabricants qui permettent au moyen d'un paramétrage de ne pas prendre en compte les réflexions indésirables sur une distance déterminée.

Autres éléments dans le faisceau

La technologie radar ne peut rendre compte du niveau exact de la surface de l'eau en présence de glace de mer en hiver. Il convient dans ce cas de compléter les données des marégraphes avec celles issues d'autres technologies telles que la mesure des pressions. Les endroits où il y a fréquemment de l'écume ne se prêtent pas vraiment aux marégraphes, car l'écume absorbe les impulsions émises. D'autres facteurs tels que les turbulences d'air, la poussière, le brouillard, la pluie et les embruns ne risquent pas de poser problème s'agissant des radars à basse fréquence (10 GHz ou 3 cm de longueur d'onde), mais peuvent en revanche devenir plus problématiques à des fréquences plus élevées. Par exemple, l'atténuation du signal radar causé par de fortes pluies augmente de la bande X, à la bande Ku puis à la bande K et affecte significativement les mesures du niveau de la mer en bande Ku par altimétrie satellitaire (voir notamment Quartly et al., 1996 ; Wikipédia, 2015b). Ce facteur n'aura cependant pas grande influence sur les courtes distances mesurées par les marégraphes radar.

Vagues

En principe, on voudrait pouvoir mesurer le niveau de la mer de façon suffisamment rapide (à 1 Hz, par exemple, ou plus vite encore), de façon à faire une moyenne (une minute, par exemple) qui permette d'éliminer la part de variabilité due aux vagues (celles-ci ayant une période de quelques secondes pour les vagues dues au vent à environ vingt secondes pour la houle). On a là un exemple de « filtrage temporel » des vagues – au lieu du « filtrage mécanique » que permet le puits de tranquillisation d'un marégraphe à flotteur – qui s'apparente à l'échantillonnage rapide des capteurs de pression. Un bon nombre de dispositifs radar de l'Appendice 1 fonctionnent de cette manière.

Toutefois, il est à craindre que l'incidence des vagues sur la mesure du niveau de la mer dépasse le simple bruit à haute fréquence qu'il est nécessaire d'éliminer et qu'elles conduisent aussi à fausser les mesures de façon systématique. Bon nombre de scientifiques impliqués dans l'observation du niveau de la mer ont régulièrement recours à des altimètres radar ou à des satellites dans le cadre de leurs activités. On sait que la précision des mesures du niveau de la mer par altimétrie

Tableau 2.1

Points positifs et négatifs des systèmes à impulsions et FMCW

Systèmes à impulsions

Points positifs

- Les systèmes à impulsions constituent une technologie qui existe depuis longtemps.
- Il est possible d'effectuer des mesures à longue portée avec des appareils à haute puissance.
- Ils peuvent être configurés pour faire facilement face à des réflecteurs indésirables à proximité.
- Ils consomment beaucoup d'énergie durant l'impulsion proprement dite mais, étant donné que le pourcentage de temps occupé par les transmissions est infime, la consommation d'énergie globale est inférieure à celle des appareils FMCW.

Points négatifs

- Des difficultés peuvent survenir à courte portée en raison du temps de déplacement du signal qui est court.

Points positifs

Points positifs

- Parce que les appareils FMCW émettent continuellement (généralement environ 50 % du temps contre 1 % pour les systèmes à impulsions), on enregistre peu de retard dans la mise à jour des mesures.
- Leur bande passante plus large les rend potentiellement plus exacts que les radars à impulsions et plus adaptés comme houlographe (bien qu'il n'y ait en principe aucune explication à ce que les radars à impulsions ne soient pas également en mesure d'échantillonner à une vitesse suffisamment rapide pour les vagues).

- Son rayonnement de crête est inférieur à celui des systèmes à impulsions (avec des implications pour la sécurité).
- Sa faible consommation d'énergie lors des pics est synonyme de faible consommation d'énergie dans les composants électroniques connexes.

Points négatifs

- D'autre part, les systèmes FMCW ont besoin d'un traitement FFT de haute qualité pour assurer un niveau d'exactitude élevé, ce qui implique la nécessité d'un matériel et de logiciels plus complexes et une consommation d'énergie globale plus élevée.
- La consommation d'énergie globale des appareils FMCW qui est plus élevée que celle des systèmes à impulsions signifie qu'ils peuvent être moins adaptés pour les sites isolés.
- En raison de leur puissance de sortie de crête généralement plus faible, ils ont une portée réduite par rapport aux systèmes à impulsions (bien que cela ne soit pas susceptible de constituer un facteur majeur pour les marégraphes radar).
- Parce qu'ils émettent en continu sur une bande de fréquences, les systèmes FMCW sont davantage sensibles à des interférences (par exemple, dans les ports avec du passage).
- Ils ont approximativement 30 % de composants de plus que les systèmes à impulsions, et les économies d'échelle ne sont pas aussi importantes pour les systèmes FMCW que pour les systèmes à impulsions. Par conséquent, ils ont tendance à être plus onéreux.

dépend largement de la précision de la correction des biais dus à l'état de la mer. Ces derniers comprennent : le « biais électromagnétique », qui est causé par une plus grande puissance surfacique rétrodiffusée par le creux de vagues par rapport à celle des crêtes de vagues ; et le

« biais d'asymétrie », qui découle de la différence entre les surfaces de dispersion moyennes et médianes (voir notamment Pugh et Woodworth, 2014, Chapitre 9).

Rien d'étonnant par conséquent à ce que les mesures du niveau de la mer réalisées à l'aide de marégraphes radar

soient aussi altérées par les vagues dans une certaine mesure. L'utilisation de ces capteurs s'est pour le moment limitée aux ports et autres sites côtiers abrités où le « fetch » est réduit et où les vagues sont peu élevées (hauteur significative des vagues inférieure en moyenne à 1 m). Un certain nombre d'expériences ont cependant été menées à des endroits où les vagues sont plus élevées. Par exemple, Boon et al. (2012) ont déterminé que les erreurs dans les mesures du niveau de la mer réalisées à un point exposé sur la côte est des États-Unis augmentaient de manière quadratique en fonction de la hauteur des vagues. Toutefois, Park et al. (2014) ont relevé un problème relatif aux effets des vagues sur les mesures radar dans les contextes de fortes vagues, à savoir que ces dernières ont aussi des effets sur le capteur de référence (acoustique ou à pression) dont les données sont comparées à celles du marégraphe radar. Il est probable qu'à l'avenir les marégraphes radar seront utilisés dans davantage de sites exposés aux fortes vagues, et notamment dans des îles éloignées, notamment parce que ces endroits sont parfois difficiles d'accès et parce que les marégraphes radar ne nécessitent pas beaucoup d'entretien. Il convient donc que le présent Manuel s'attache à développer une meilleure compréhension des effets des vagues sur les mesures des marégraphes radar.

2.3 Marégraphes radar utilisés dans le cadre de GLOSS

Pour qu'un marégraphe puisse être utilisé dans le cadre du programme GLOSS, il faut qu'il permette de mesurer le niveau instantané de la mer à 1 cm près au minimum en toutes circonstances (c'est-à-dire quels que soient le niveau de la marée et le temps qu'il fait, qu'il y ait des vagues et des courants ou non, etc. ; voir le Chapitre 5 et COI, 2012). L'un des points cruciaux de ce Manuel consiste à déterminer si les marégraphes radar sont en mesure de répondre à ce critère de façon tout aussi satisfaisante, voir plus encore, que d'autres technologies.

De fait, différents organismes ont recours aux marégraphes radar depuis plus de dix ans et certains d'entre eux se sont employés à comparer les différents modèles, voire à confronter cette technologie à d'autres (voir par exemple Woodworth et Smith, 2003 ; Martín Míguez et al 2008a, 2012 ; Pérez et al., 2014). Les publications de ces organismes sont mentionnées dans la partie Références (en italique pour celles qui n'ont pas fait l'objet d'une mention explicite dans le corps du présent Manuel). Toutefois, la seule étude comparative détaillée consacrée à des marégraphes radar qui ait été menée pour le moment, à notre connaissance, est celle qui s'est attachée à comparer sept dispositifs différents

(trois basés sur la technologie radar et quatre sur d'autres technologies) et qui s'est déroulée sur presque deux années à Vilagarcía de Arousa, dans le nord-ouest de l'Espagne (Martín Míguez et al., 2005). Cette dernière étude a conclu qu'il pouvait être considéré que, pour les besoins de GLOSS (une fois les données de chaque marégraphe ramenées à des valeurs horaires, ou même à des valeurs à 5 minutes dans la plupart des cas), les différentes techniques étaient toutes aussi appropriées les unes que les autres. S'agissant des séries temporelles de mesures du niveau de la mer enregistrées par deux marégraphes à la fois, ce sont les trois marégraphes radar qui ont fait preuve de la plus grande cohérence.

Le fait que les marégraphes radar soient une technologie relativement récente n'a pas empêché de nombreux organismes à investir dans d'importantes installations de systèmes radar au sein de leurs réseaux. Rien d'étonnant à cela puisque, du point de vue de la gestion, cette technologie présente un certain nombre d'avantages par rapport aux techniques précédentes, notamment au regard de la facilité d'installation et du fait qu'il s'agit en règle générale de dispositifs extrêmement fiables qui ne nécessitent d'entretien qu'après plusieurs années d'utilisation. La radiodétection est un procédé « sans contact » qui n'expose pas à la corrosion ou aux dégâts que pourraient subir des pièces immergées et qui ne nécessite pas d'avoir recours à des éléments mobiles, comme c'est le cas avec les marégraphes à flotteur. En outre, les marégraphes de ce type présentent un certain nombre d'avantages par rapport à d'autres techniques en ce qui concerne les mesures elles-mêmes. Ces appareils, par exemple, ne sont pas affectés par l'atmosphère entre le capteur et la mer, contrairement aux marégraphes acoustiques, et ne présentent pas non plus de dérive instrumentale, contrairement aux marégraphes à pression.⁶

Ainsi, de nombreux organismes se sont procurés des marégraphes radar « dans le commerce », les ont connecté directement à des enregistreurs de données et à des instruments de télémessure avant de commencer à recueillir des données. La liste de l'Appendice 1 recense les marégraphes gérés par les organismes portés à notre connaissance et fournit certains détails les concernant. On trouvera davantage de précisions concernant chaque appareil dans les spécifications techniques des fabricants, bien qu'il arrive que celles-ci ne soient pas

⁶ Les signaux hyperfréquence de faible puissance des marégraphes radar sont générés à l'aide d'oscillateurs à transistor à effet de champ à base d'arséniure de gallium (GaAs) et de procédés tels que le circuit intégré monolithique hyperfréquences, lesquels sont réputés pour ne pas entraîner de dérive, bien qu'aucune publication officielle ne semble l'avoir démontré (Peter Devine, communication privée).

aussi détaillées qu'il le faudrait. L'ensemble des dispositifs radar qui figurent dans l'inventaire des marégraphes des pays membres de l'Organisation hydrographique internationale publié en octobre 2015 sont repris dans l'appendice en question. (Celui-ci n'a pas pour autant vocation à être exhaustif, et les appareils qui y figurent ne sauraient être considérés comme étant promus par le GLOSS. De même, le fait qu'un marégraphe ne soit pas mentionné ne signifie pas qu'il ne convient pas dans le cadre de GLOSS. Le coût approximatif de chaque appareil n'est pas indiqué, puisque celui-ci varie d'un pays à un autre, et il convient donc de se rapprocher des fabricants pour obtenir des renseignements actualisés.)

Les fréquences utilisées se situent approximativement entre 6 et 26 GHz (longueur d'onde de 5 à 1 cm environ). La plupart sont des systèmes à impulsions munis d'antennes à cornet dont la largeur, pour une ouverture de faisceau donnée, est à peu près proportionnelle à 1 divisé par la fréquence. Ces systèmes utilisent donc tous l'extrémité supérieure de la gamme de fréquences. Citons en guise d'exemples de dispositifs dotés de différentes antennes assurant la focalisation du faisceau le Miros (à antenne patch plane), l'OTT RLS (à antennes plates distinctes pour l'émission et la réception), le VEGAPULS-61 (à antenne encapsulée) et le Rosemount Waveradar Rex (à antenne parabolique). Le Krohne BM-100 et le VEGAFLEX-81, au lieu d'émettre à partir d'une antenne en air libre, utilisent des tiges et des câbles en guise de guide d'ondes (Section 4.3).

Les fréquences supérieures correspondent à des longueurs d'onde inférieures. Les appareils 26 GHz offrent donc en principe une plus grande précision. Cela dit, les appareils à haute fréquence sont aussi plus bruyés et risquent davantage de générer des réflexions indésirables. Les marégraphes FM-CW utilisent en général les fréquences de l'extrémité inférieure de la gamme.⁷ Comme le montre l'Appendice 1, certains appareils sont des dérivés d'autres modèles et sont dotés des mêmes fréquences et de caractéristiques générales identiques. (Ces fréquences similaires sont dans certains

cas définies dans le cadre de normes et d'autorisations internationales, voir Brumbi et Van Zyl, 2009).

Les avantages et les inconvénients des dispositifs FM-CW et des dispositifs à impulsions sont présentés sous une forme synthétique dans le Tableau 2.1.⁸ Il semble en revanche qu'il n'y ait pas un seul facteur déterminant pour les départager en ce qui concerne l'observation du niveau de la mer. Comme on peut le voir à l'Appendice 1, les systèmes à impulsions ont en général des besoins moindres en puissance que les appareils FM-CW puisque leur puissance de crête n'est requise que sur une durée réduite. Cela en fait des systèmes particulièrement adaptés pour être utilisés dans des endroits isolés où l'on ne dispose que de l'électricité produite par des panneaux solaires. Ils sont aussi en général moins coûteux que les appareils de type FM-CW. Cela s'explique en partie par le fait que ces derniers sont plus complexes que les systèmes à impulsions (nécessitant par exemple un traitement élaboré du signal par transformation de Fourier rapide) et qu'ils ont donc de plus gros besoins en puissance, bien que ces besoins soient à présent bien moindres que ceux des appareils de type FM-CW il y a de cela une dizaine d'années. On pourrait avoir tendance à croire que les appareils de type FM-CW sont en général plus précis que les systèmes à impulsions du fait de leur émission en continu et de leur capacité à évaluer avec précision la différence entre les fréquences émises et reçues (cette différence se situant en général dans la gamme des KHz). Toutefois, ce n'est qu'en comparant les différents dispositifs radar avec les autres technologies que l'on peut juger de leur performance dans le cadre de GLOSS. Le présent Manuel a pour objectif de fournir une partie de ces informations.

2.4 Mesures des vagues aux sites GLOSS

La mesure des vagues n'a jamais fait partie des objectifs du GLOSS, lequel s'est consacré en priorité aux variations du niveau de la mer aux échelles de temps de la minute, de l'heure ou plus. De nombreuses stations marégraphiques GLOSS sont implantées dans des ports, où les vagues sont moins élevées qu'en pleine mer, et l'on peut donc mettre en question l'utilité de ces informations dans la pratique. Même dans les cas où les marégraphes sont implantés en dehors des ports, ils le sont inmanquablement en eau peu profonde, aux endroits où les vagues déferlent.

⁷ Le choix de la fréquence dépend largement des évolutions techniques, de la disponibilité des fréquences couramment utilisées dans les différents pays et des normes nationales et internationales. Il semble que la plupart des appareils FM-CW aient suivi la norme en bande X à environ 10 GHz initialement établie par SAAB. Les premiers radars à impulsion étaient aussi des appareils à fréquence relativement basse (souvent en bande C et aux alentours de 6 GHz), les modèles en bande K d'environ 26 GHz traduisant une évolution assez récente. À l'heure où nous rédigeons le présent Manuel, il semblerait qu'un capteur 80 GHz (le VEGAPULS-64) soit devenu disponible, lequel est censé être insensible à l'écume et à la vapeur d'eau, mais n'a pas encore, à notre connaissance, été soumis à des essais de mesure du niveau de la mer.

⁸ Ce tableau est basé sur les informations procurées par <http://siversima.com/>, <http://www.endress.com/> et Øistein Grønlie (communication privée).

L'extrémité des jetées étendues ou les structures situées au large comme les plateformes pétrolières constituent des endroits plus appropriés pour la mesure des vagues. À ce titre, Blasi et al. (2014) ont mené des expériences sur deux plateformes situées dans la baie d'Helgoland à l'aide de quatre capteurs à impulsions séparés d'environ 3,5 m avec un taux d'échantillonnage de 2 Hz. Il leur a ainsi été possible de mesurer la hauteur des vagues et de recueillir des informations sur l'orientation de celles-ci au moyen de l'analyse de l'intercovariance des mesures prises par chaque capteur radar.

Certains organismes, cependant, s'emploient à mesurer les vagues sur la côte en complément des mesures effectuées au large. Il a pour l'instant été possible d'y procéder dans des stations marégraphiques en ayant recours à des capteurs de pression (voir notamment Vassie et al., 2004). Par ailleurs, Park et al. (2014) ont évalué les spectres des vagues en examinant le bruit des données issues d'un marégraphe acoustique 1 Hz et d'un marégraphe radar à impulsions (ce dernier étant équipé du capteur du Waterlog H-3611) : les résultats obtenus au moyen des deux procédés ont été comparables, mais le radar a fait preuve d'une meilleure sensibilité aux vagues et donc d'une plus grande fidélité pour estimer la hauteur des vagues importantes.

La plupart des capteurs clairement commercialisés comme étant des appareils permettant à la fois de mesurer les vagues et les marées (par les marques Miros, Rosemount et Radac) sont des instruments de type FM-CW. Le réseau espagnol REDMAR utilise des marégraphes FM-CW Miros dans le cadre des mesures de vagues qu'il effectue dans les ports (ou à leur entrée) afin de valider leurs modèles de vagues et aussi dans le cadre des opérations portuaires. Ce type de mesures a donné des résultats assez concluants (Pérez Gómez, 2014 ; Pérez et al. Supplément). Ewans et al. (2014) proposent un examen des mesures de vagues à l'aide du radar – en ayant principalement recours à l'appareil Rosemount Waveradar Rex – comprenant des simulations théoriques et des comparaisons des données de bouée.

2.5 Synthèse concernant les marégraphes radar utilisés dans le cadre de GLOSS

En résumé, les marégraphes radar semblent être une solution technologique à bon marché pour l'équipement ou la modernisation des stations marégraphiques de GLOSS. Ces dispositifs présentent de nombreux avantages en matière d'installation et d'entretien. En outre, les sources d'erreurs potentielles dans les mesures

radar évoquées ci-dessus s'avèrent être relativement peu nombreuses par rapport à celles que l'on pourrait identifier pour d'autres technologies. En conséquence, le Plan de mise en œuvre du GLOSS (COI, 2012), les différents rapports consacrés au système (COI, 2006) et les ateliers organisés dans son cadre ont tous permis de conclure qu'il fallait que les nouvelles stations soient équipées d'un dispositif fiable tel qu'un marégraphe radar pour y jouer le rôle de capteur principal du niveau de la mer, et que ce dernier soit accompagné d'un marégraphe à pression en guise de capteur primaire pour les tsunamis.

Il convient cependant d'émettre certaines réserves au sujet des marégraphes radar. Leur utilisation est relativement récente et d'éventuels problèmes pourraient mettre encore quelques années avant de se manifester. Les préoccupations concernent plus particulièrement la question de l'étalonnage des appareils (leur réel niveau de référence) ainsi que celle de l'impact des vagues sur les mesures. Ces questions doivent être examinées de façon exhaustive en comparant les dispositifs à des périodes d'acquisition différentes et en ayant recours à des techniques multiples dans des environnements variés. On citera parmi les autres inconvénients leur exposition aux détériorations en cas de fortes tempêtes ou de tsunamis, et notamment le risque que le niveau de l'eau dépasse alors la hauteur à laquelle se situe le capteur radar, ou encore l'éventualité que des débris à la dérive ou des bateaux passent sous le faisceau et provoquent des erreurs dans les mesures.

Malgré cela, il semble que bon nombre d'organismes s'apprêtent à implanter des marégraphes radar, ce qui nous impose d'en savoir autant que possible à leur sujet. En revanche, cela ne signifie pas que les dispositifs radar doivent systématiquement remplacer les autres procédés, tout spécialement lorsque ces derniers donnent satisfaction depuis des années.

3. Résultats obtenus avec les marégraphes radar, notamment en comparaison avec d'autres technologies

Le présent chapitre propose un récapitulatif de ce que l'on sait au sujet de l'utilisation des marégraphes radar en se fondant sur les études qui ont été publiées ainsi que sur les expériences récentes en la matière, et notamment celles recensées dans le Supplément. L'ensemble de ces informations a servi à l'élaboration des recommandations relatives à l'acquisition et à l'installation de nouveaux marégraphes radar qui figurent au Chapitre 4.

Premières publications

L'efficacité des capteurs radar en matière de surveillance du niveau de la mer a été véritablement examinée pour la première fois au début des années 2000. À l'époque, ces dispositifs représentaient une nouveauté et les principales réticences concernaient leur capacité à mesurer les variations du niveau de la mer de façon aussi satisfaisante que les marégraphes existants. Par conséquent, Woodworth et Smith (2003), Shirman (2003), Eberlein et Liebsch (2003) et Martín Míguez et al. (2005) se sont essentiellement intéressés à l'écart-type des différences relevées entre les mesures du niveau de la mer obtenue avec la technologie radar et les autres (comme les marégraphes à flotteur ou à pression). La question du zéro effectif des marégraphes (c'est-à-dire l'écart entre le zéro réel et celui donné par le constructeur, dont il est question au Chapitre 4) a été très peu, voire pas du tout, examinée. En outre, même s'il a été reconnu qu'il était possible que les vagues entraînent des biais dans les mesures radar, ce problème n'a pas fait l'objet d'études poussées, les relevés étant d'ailleurs le plus souvent effectués dans des zones de faibles vagues. Ces premières comparaisons ont toutefois servi à faire la démonstration du potentiel des capteurs radar dans le cadre des mesures du niveau de la mer, tout en montrant qu'ils étaient susceptibles de satisfaire aux spécifications de GLOSS. Dans certains cas, les études comparatives se sont attachées à faire usage du radar pour déceler des problèmes liés à d'autres procédés qui avaient été sous-estimés par le passé.

Publications parues entre 2008 et 2012

C'est au cours de cette période que de plus en plus d'organismes se sont mis à utiliser des marégraphes radar dans le cadre du suivi à long terme du niveau de la mer. D'importants investissements en la matière ont notamment été réalisés en Espagne, en partie pour répondre aux nouvelles exigences en termes de surveillance établies pour les ports du pays suite au

tsunami de Sumatra en 2004, et en se fiant en grande partie aux conclusions découlant des comparaisons entre différents types de marégraphes réalisées par Martín Míguez et al. (2005).

En France, Martín Míguez et al. (2008a) ont constaté que les radars à antennes-cornet et les radars à ondes guidées fournissent des données conformes au centimètre près à celles issues de marégraphes à flotteur classiques, ce qui les a amenés à déterminer que le radar constituait un procédé approprié dans le cadre de GLOSS. Martín Míguez et al. (2012) ont aussi procédé à l'évaluation de la stabilité d'un marégraphe radar implanté dans un endroit isolé (les îles Kerguelen) en comparant ses données aux mesures réalisées à l'aide d'une échelle de marée ou d'appareils à pression, ce qui leur a permis de constater que le marégraphe radar présentait des erreurs de mesure de plusieurs millimètres, mais sans dérive significative. On a depuis assisté au déploiement massif de marégraphes radar au sein du réseau français de stations d'observation du niveau de la mer. En Inde, Mehra et al. (2009, 2012) se sont employés à comparer la technologie radar à d'autres technologies sur une période d'environ un an, ce qui a débouché sur un accord satisfaisant, bien que l'objectif principal ait été de vérifier les données des capteurs à pression, et non celles des appareils radar (voir aussi Mehra et al., Supplément).

La communauté hydrologique a aussi mené des études destinées à comparer les différents types de marégraphes radar entre eux, ou à confronter ces derniers aux autres procédés. À titre d'exemple, Fulford et al. (2007) se sont employés à comparer les données issues de différents dispositifs implantés sur un lac en Arizona (trois types de capteurs radar et un marégraphe à flotteur), ce qui les a amenés à conclure que les appareils offraient tous le même degré de précision, malgré les écarts systématiques que présentaient certains capteurs. Il ne semble guère selon eux que les dispositifs radar soient affectés par les vagues.

Les expériences menées au cours de la période concernée tendent en général à confirmer le fait que les marégraphes radar sont tout aussi aptes que les autres dispositifs à assurer un suivi du niveau de la mer, et ce dans la plupart des endroits. En revanche, les connaissances n'ont guère évolué en ce qui concerne les possibles erreurs systématiques dans les données radar, les environnements

particuliers qui seraient susceptibles de limiter la précision de ces capteurs (les vagues, par exemple) et, dans le pire des cas, les situations dans lesquelles les données ainsi recueillies ne seraient tout simplement pas recevables. Il semble que des marégraphes radar aient été implantés dans de nombreux sites sans que des tests comparatifs aient été réalisés et en partant du principe qu'ils allaient donner toute satisfaction.

Études comparatives de la NOAA

Durant la période considérée, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, E.-U.) a commencé à mener des études techniques en exploitant des marégraphes radar de différents fabricants ainsi que des données comparatives relatives aux marégraphes radar Aquatrak qui jusqu'alors avait constitué le procédé de référence au sein du réseau américain. On trouvera à la section Références du présent Manuel un certain nombre de rapports basés sur ces études et qui rendent compte des enseignements tirés au regard de l'utilisation de cette nouvelle technologie au fil des années. Cet ensemble complet d'études – qui contraste avec les recherches plus superficielles réalisées par les autres pays, quand il y en a eu – a joué un rôle majeur dans le cadre de l'élaboration du présent Manuel.

Le rapport d'Heitsenrether et Davis (2011) constitue l'une des contributions majeures de cette série d'études. Il consistait en un récapitulatif des motifs conduisant au choix d'un capteur en particulier (le Waterlog H-3611) sur les quatre examinés. On y soulignait qu'il importait de connaître l'offset (c'est-à-dire le décalage entre le zéro théorique et réel) du capteur pour chaque appareil, sujet dont il sera longuement question au Chapitre 4. L'accord entre les données radar et celles de l'appareil acoustique à intervalle de six minutes et entre les valeurs moyennes sur des périodes plus importantes se sont révélées être de l'ordre du centimètre au moins, et ce dans des sites côtiers semi-clos caractérisés par des vagues peu élevées. Le rapport concluait donc que les dispositifs radar n'étaient pas tout à fait adaptés à ce type d'endroits. Il laissait les études à venir trancher sur la question de la possible utilisation du radar dans les zones plus exposées où les vagues sont plus élevées et où il avait été difficile de dissocier l'incidence des vagues sur le radar des signaux dus aux fortes vagues dans les données de comparaison issues des marégraphes acoustiques (Park et al., 2014).

Le choix d'un capteur particulier a mené à la mise au point d'un collier de fixation et d'un support standard qu'il a été possible d'adapter et d'utiliser dans plusieurs centaines d'implantations sans nécessiter d'importantes modifications pour chaque site. Ces aspects sont aussi évoqués au Chapitre 4. Des études analogues ont aussi cherché à déterminer quel était le filtrage passe-bas

optimal pour les données à haute fréquence (1 Hz), présentant inévitablement du bruit en présence de vagues, en vue d'améliorer la précision des données relatives au niveau de la mer à intervalle de six minutes (Boon, 2014). Bien que cette série d'études ait conclu que les vagues donnent lieu à davantage d'incertitude dans le cadre des mesures du niveau de la mer, il n'a pas été clairement démontré qu'il existait un biais découlant de celles-ci.

Publications récentes

À présent, certains organismes disposent déjà depuis plusieurs années de données provenant de stations équipées à la fois de marégraphes radar et de dispositifs plus anciens. Par exemple, Pérez et al. (2014) (voir aussi Pérez Gómez (2014) et l'article de Pérez et al., Supplément) ont rendu compte des enseignements tirés en Espagne à l'occasion du remplacement progressif des marégraphes acoustiques par des capteurs radar dans 17 sites différents. Cette étude s'attachait à comparer les ensembles de données récents et plus anciens, en prenant en considération les erreurs d'échelle et les décalages temporels pour les deux ensembles (mais en réalité surtout pour les données les plus anciennes), et tout particulièrement de la qualité des informations à long terme des séries de données combinées lorsqu'une technologie cède la place à une autre. Un intérêt particulier y était porté à l'impact sur la qualité des données des problèmes de délaminage que présentaient les antennes des nouveaux radars.

Contributions mentionnées dans le Supplément

Les contributions compilées dans le Supplément traduisent bien l'importance que les différents organismes liés au GLOSS accordent à cette nouvelle technologie. Elles démontrent, tout comme les paragraphes précédents, que la technologie radar possède de nombreux avantages sur les autres procédés et qu'elle est en mesure de fournir des données de qualité suffisante dans le cadre du GLOSS. Cependant, il convient, conformément aux meilleures pratiques, d'attirer l'attention sur les conditions qui aboutissent à l'obtention de données de diverse qualité, ainsi que sur les problèmes spécifiques liés à l'utilisation du radar.

Il est possible que certains de ces problèmes soient spécifiques à un capteur en particulier et/ou aux conditions environnementales locales. Cela signifie qu'il peut s'avérer difficile de parvenir à des conclusions générales concernant la supériorité de certains capteurs par rapport à d'autres. Néanmoins, la communauté est suffisamment importante pour que plus d'un organisme ait eu l'occasion d'avoir recours à un même capteur et il faut espérer que le partage d'expériences permettra de résoudre un certain nombre de problèmes concrets.

Les principales conclusions des expériences rapportées dans le Supplément sont les suivantes :

- ✓ Afrique du Sud : le Bureau hydrographique de la marine (SANHO) rend compte de performances satisfaisantes pour les capteurs OTT Kalesto et RLS, sous réserve d'un étalonnage in situ du tirant d'air (c'est-à-dire de la portée).
- ✓ Allemagne : la Bundesanstalt für Gewässerkunde (BAFG) rend compte des études concernant les marégraphes radar utilisés aux fins d'observation du niveau et de l'état de la mer et pour les mesures de la couverture de glace menées depuis plus de dix ans en mer du Nord sur des sites témoins aussi équipés d'autres technologies à titre de comparaison. Ce rapport est spécialement consacré à la question de la précision des mesures du niveau de la mer. Les analyses révèlent que l'imprécision des mesures radar du niveau de la mer augmente de façon linéaire avec la hauteur des vagues et qu'elle ne dépend pas de la périodicité de celles-ci. De futurs travaux, analogues à ceux entrepris par Boon (2014) sont prévus concernant les techniques de filtrage avancées pour les mesures radar.
- ✓ Allemagne : le Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) fait état de résultats satisfaisants concernant l'utilisation des capteurs VEGAPULS-61/62 en guise de marégraphes pour les campagnes d'été en Antarctique. Le BKG signale toutefois que les données présentent plus de bruit en période de fortes vagues, même si celui-ci ne semble pas avoir d'incidences sur les valeurs moyennes et qu'il est possible de l'éliminer au moyen d'un filtrage temporel.
- ✓ Australie (Queensland) : le Coastal Impacts Unit a étudié les effets des biais dus aux vagues des données radar en bande S (VEGAPULS-61 ou 62), bien qu'il soit difficile de déterminer quel crédit accorder à ces données tant qu'elles n'ont pas été comparées à celles issues de capteurs qui ne soient pas des capteurs radar. Les pics observés dans les séries temporelles des radars en bande S sont considérablement réduits dans les séries correspondantes d'un capteur en bande C (VEGAPULS-66). La bande C est aussi très largement utilisée au Japon (Tokyo Keiki MRG-10) et à Oman (Sutron RLR-003).
- ✓ Caraïbes : La NOAA (États-Unis), l'université de Puerto Rico et l'Institut de Physique du Globe (France) indiquent que le radar est désormais utilisé dans près de la moitié des 68 stations jouant un rôle de surveillance des tsunamis dans les Caraïbes, et ce grâce aux efforts déployés par le « Sea Level Center » de l'université de Hawaii (UHSLC) et d'autres membres du réseau. Aucune différence substantielle n'a été observée entre différents types de radars (à ondes guidées ou à air libre) dans le cadre de la surveillance des tsunamis, et les marégraphes radar se sont révélés être robustes et peu coûteux. Toutefois, il a été à présent recueilli suffisamment de données pour justifier un examen bien plus approfondi de leurs performances et mener notamment des recherches portant sur leur caractère approprié pour la surveillance du niveau de la mer dans la région.
- ✓ Chili : le Service hydrographique et océanographique de la marine chilienne (SHOA) fait état de résultats tout à fait acceptables concernant les capteurs VEGAPULS-62 déployés dans les 40 stations de son réseau. Le Service souligne toutefois qu'il importe de disposer de capteurs de pression en guise de dispositifs auxiliaires et complémentaires. Les résultats des études comparatives menées par le SHOA entre les marégraphes radar et les marégraphes à pression varient en fonction de l'exposition aux vagues. Il en ressort que les capteurs radar se révèlent être fiables dans les zones abritées, alors qu'en présence de vagues, il convient de faire preuve de discernement en ce qui concerne les données recueillies si celles-ci sont destinées à être utilisées à des fins scientifiques, et ce malgré le fait que l'échantillonnage du capteur radar se fasse à 4 Hz.
- ✓ Espagne : Puertos del Estado signale que le Miros SM-94 opérant un contrôle à 2 Hz constitue un dispositif de mesure plus précis et plus stable que les marégraphes acoustiques et à pression utilisés précédemment. Les problèmes de délaminage qui s'étaient initialement manifestés avec plusieurs antennes ont été résolus. De nouveaux protocoles stricts en laboratoire et in situ ont été mis au point s'agissant de l'étalonnage périodique de la portée. Les vagues n'ont aucune incidence sur les niveaux marins horaires, les marées ou les moyennes mensuelles. En revanche, elles peuvent avoir un impact sur certaines mesures du niveau de la mer (à 1 minute ou à fréquence plus élevée), et par conséquent aussi sur les niveaux marins exceptionnels tels que ceux que l'on peut observer aux stations du réseau REDMAR où les vagues sont très élevées. Les incidences des vagues ne sont pas encore tout à fait connues. Tout d'abord, il n'est pas facile de faire la différence entre le bruit ou les biais instrumentaux et les autres incidences locales telles que les caractéristiques des vagues. En outre, dans le cadre des essais comparatifs, les effets des vagues sur les capteurs choisis dans les mêmes ports ne sont pas bien connus non plus – cette conclusion rejoignant celle établie par la NOAA.
- ✓ États-Unis : La NOAA rend compte de l'efficacité du Waterlog H-3611 dans des zones où les vagues sont

faibles à modérées, sous réserve de procéder à un étalonnage de la portée et à un contrôle du capteur rigoureux avant le déploiement et d'effectuer des mesures à haute fréquence (1 Hz). Dans les zones de vagues modérées à élevées, les effets des vagues sur les mesures du niveau de la mer se sont révélés moindres que ce qui a pu être constaté pour les marégraphes acoustiques à puits de tranquillisation, lesquels doivent être remplacés dans l'ensemble du réseau.

- ✓ États-Unis : les membres du Service géologique des États-Unis (USGS) étaient tout à fait satisfaits de la précision fournie par les technologies antérieures (à flotteur et à pression) en ce qui concerne les mesures du niveau des eaux intérieures. Cependant, les avantages que présente l'aspect sans contact des marégraphes radar ont été reconnus comme étant des atouts non négligeables en matière d'installation et d'entretien. Les premiers essais ont été réalisés à l'aide d'appareils FM-CW équipés d'une interface de données de type SDI-12 (comme le DAA H-360). Les mesures ont témoigné d'un biais dû à la température. Les comparaisons réalisées avec les mesures issues des marégraphes à flotteur ou à bulles ne se sont pas révélées concluantes du fait du lissage des données des marégraphes de référence par rapport à celles du radar. Il est cependant encourageant de noter que les données issues du radar correspondent davantage aux mesures des sondes à câble lesté qu'à celles des marégraphes à bulles. Les tests suivants, faisant intervenir des radars à impulsions équipées d'une interface SDI-12, ont démontré que ces appareils étaient plus précis et moins gourmands en énergie que les appareils FM-CW. Les mesures de portée n'ont pas révélé de biais éventuels pour le DAA H 3611, alors que le VEGAPULS-62 s'est montré davantage concerné par le problème. Aucun des deux appareils n'a semblé sensible aux vagues ou aux variations de température journalières. Toutefois, des tests en laboratoires ont démontré que les paramètres par défaut entraînaient une sous-évaluation du niveau de la mer dans certaines conditions de vagues. L'efficacité d'ensemble du H-3611 lui a valu d'être utilisé depuis lors dans l'ensemble de l'USGS. Les problèmes liés aux insectes et à la condensation concernant les antennes ont été en grande partie résolus. Par ailleurs, il a été constaté que les modèles dotés d'antennes intégrées (l'OTT RLS et le DAA H-361) permettaient d'éliminer la grande majorité des problèmes liés aux antennes. D'autres problèmes ont été constatés depuis, en particulier un biais du cycle diurne dans les mesures probablement dû aux variations de température, à de forts écarts dans les données sans doute provoquées par les vagues,

ainsi qu'aux effets imputables à la glace et aux autres objets susceptibles de passer dans le faisceau. L'USGS en conclut que le radar ne se prête probablement pas à tous les sites. Cependant, l'expérience montre que les capteurs radar peuvent être utilisés dans de nombreux sites et y fournir des mesures du niveau de la mer aussi précises, voire plus, que celles des anciennes techniques, avec en plus les avantages que présente la technologie sans contact.

- ✓ France : le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) dispose d'une solide expérience en matière de dispositifs radar à antenne-cornet en air libre ou à ondes guidées (tous de la marque Krohne) avec le plus souvent d'excellents résultats. La plupart des données des marégraphes sont soumises à un filtrage physique (au moyen de puits de tranquillisation) ou temporel. Certaines stations en air libre sont toutefois dépourvues de filtrage mécanique. Aucun biais significatif dû aux vagues n'a été signalé.
- ✓ Inde : le National Institute of Oceanography (NIO) dresse une liste des études déjà publiées concernant la comparaison des appareils radar (essentiellement le Kalesto d'OTT) avec d'autres types de marégraphes et indique comment l'Institut, suite au tsunami survenu en décembre 2004 dans l'océan Indien, a mis au point un réseau intégré d'observation côtière et de notification quasi instantanée permettant de fournir aux stations côtières et insulaires des informations météorologiques relatives au niveau, à l'état de la mer en général et à sa surface en particulier.
- ✓ Japon : l'Office météorologique japonais (JMA) a procédé à la comparaison d'un marégraphe radar Tokyo Keiki MRG-10 (5,8 GHz) et d'un marégraphe à flotteur installés tous deux dans le même puits de tranquillisation à Tokyo sur une durée de 21 mois, ce qui a conduit l'organisme à constater un accord à 5 mm près, ce qui est conforme à ses exigences. Par la suite, il a été fait usage de la même configuration dans 44 stations marégraphiques, en optimisant la polarisation et la programmation du faisceau radar de façon à ne pas prendre en compte les réflexions indésirables au sein du puits. Le succès indéniable remporté par ce dispositif radar en bande C à angle d'ouverture large (17 °) implanté dans un puits de tranquillisation constitue un aboutissement majeur en ce qui concerne l'adoption des procédés radar dans les stations existantes.
- ✓ Royaume-Uni : Le Channel Coastal Observatory dresse le bilan de l'utilisation depuis 2006 des marégraphes WaveRadar REX de Saab (désormais Rosemount) implantés dans cinq sites de la côte sud de l'Angleterre. Les appareils sont programmés pour enregistrer en

4 Hz, les valeurs étant par la suite moyennées sur 2 minutes toutes les 10 minutes. De plus, la moyenne d'un signal sous-échantillonné de 1 Hz est moyennée sur 5 secondes et transmise à la Sea Level Monitoring Facility (Centre de surveillance du niveau de la mer) de la COI. Les vagues sont aussi mesurées par dérivation spectrale basée sur des salves de 30 minutes à 4 Hz toutes les 30 minutes. Trois des sites sur les cinq sont exposés aux vagues et il est nécessaire de procéder (notamment) à un nettoyage des pics de mesures à l'aide du logiciel de traitement. On obtient avec une moyenne de 480 mesures des valeurs fiables pour les marées, mais pour ce qui est du traitement des vagues, il importe d'éliminer les valeurs aberrantes sans pour autant minimiser l'énergie des vagues. Il n'a pas été constaté de dérive instrumentale dans les séries temporelles à 10 minutes. Il ne semble pas non plus y avoir de biais systématiques positif ou négatif des niveaux d'eau dus aux vagues. L'Observatoire conclut que le WaveRadar REX est un dispositif solide et fiable qui ne nécessite pas d'entretien coûteux.

- ✓ Royaume-Uni : le Centre océanographique national (National Oceanography Centre, NOC) présente les procédures d'étalonnage de différents marégraphes radar, à la fois au laboratoire et une fois installés. La nécessité de procéder à l'étalonnage de la portée (de préférence avant l'installation) est soulignée au travers de cas pratiques se référant à différents sites de l'Atlantique sud. Des comparaisons ont été effectuées entre les données radar et celles issues des marégraphes à pression recueillies sur ces sites. Elles ont permis de détecter des biais dans les données issues du Waterlog H-3611 et du RLS d'OTT qui sont difficiles à interpréter. Cependant, dans des environnements plus calmes, comme Port Stanley, l'appareil de la marque Waterlog donne satisfaction, pour peu là encore que sa portée ait été étalonnée avant son installation.

Ces conclusions peuvent être synthétisées de la façon suivante :

- Il a été constaté que le radar constitue un moyen satisfaisant pour mesurer le niveau de la mer sous réserve de l'étalonnage de la portée, de l'échantillonnage à haute fréquence et du filtrage des données. Certains organismes bénéficient maintenant d'une solide expérience en matière d'utilisation de marégraphes radar au sein de larges réseaux et sur des périodes conséquentes, ce qui leur a permis de constater que ces dispositifs donnent de bons résultats.
- Les organismes dans leur ensemble estiment en effet que le bruit des données ne constitue pas un problème pour les mesures radar haute fréquence puisqu'il est possible de l'éliminer par filtrage. Il s'avère cependant crucial de procéder à un échantillonnage à une valeur aussi proche de 1 Hz que possible, ou plus rapide encore, et de configurer le capteur en mode « temps de réponse rapide » (une seconde, par exemple). Il est possible d'éliminer le bruit au moyen d'un « filtrage mécanique », prévu dans la conception même du marégraphe, ou d'un « filtrage temporel » a posteriori.
- Aucun critère, pas même celui de la précision, ne saurait conduire à privilégier les radars à impulsions au détriment des radars FM-CW ou inversement. Chaque dispositif présente en revanche des avantages et des inconvénients dont il importe de tenir compte dans chaque situation (Tableau 2.1).
- Les vagues constituent toujours un problème potentiel pour certains capteurs dans certains sites et il conviendrait de mieux cerner leur incidence. Il existe donc des situations dans lesquelles les marégraphes radar ne donnent pas satisfaction, ce qui est le plus souvent lié à l'effet des vagues. Dans ce type de contexte, il convient d'envisager d'avoir recours à d'autres types de marégraphes.
- Les travaux théoriques consacrés à l'effet des vagues sur les interactions de l'onde radar avec la surface de la mer et les variations de niveau qui en découlent sont rares.
- Le recours à des capteurs en bande C, plutôt qu'à des appareils en bande S, plus courants, en vue d'éviter les biais dus aux vagues, a donné des résultats encourageants en Australie et au Japon, ce qui mériterait de donner lieu à des recherches plus poussées.
- La plupart des organismes s'accordent sur le fait qu'il est souhaitable de disposer de capteurs de pression en complément des marégraphes radar.
- On ne trouve pas dans ces conclusions de recommandations concernant tel ou tel fabricant de marégraphe radar. Le prix rentrera naturellement en compte dans le choix d'un fabricant, mais ce qui compte encore davantage pour les programmes comme GLOSS est de savoir si les marégraphes choisis sont bien étalonnés et si l'incidence des vagues est bien prise en compte. Les organismes qui auraient du mal à choisir un fabricant sont invités à consulter l'une des organisations figurant dans le Supplément.
- Un certain nombre d'organismes souhaitent réaliser une autre série d'études comparatives détaillées sur les performances de différents marégraphes radar implantés sur le même site (ou éventuellement plusieurs sites différents présentant des régimes de vagues différents). GLOSS serait un programme tout à fait approprié pour organiser les études en question.

4. Installation des marégraphes radar

4.1 Choix du site d'implantation

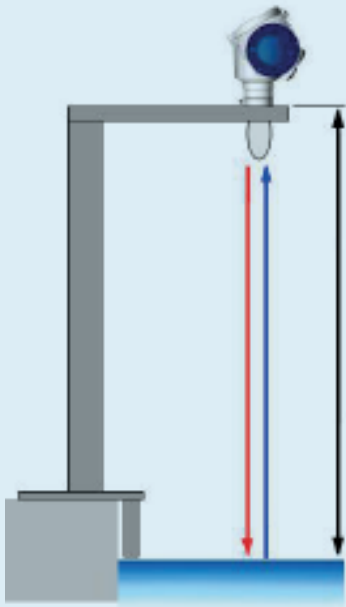
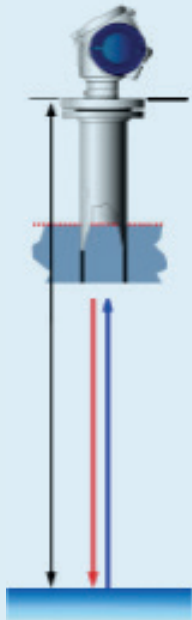
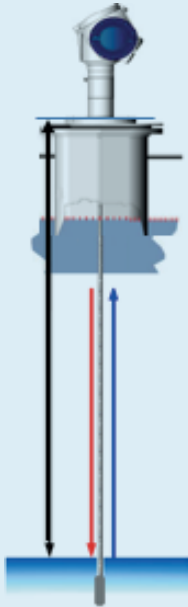
Les critères liés au choix d'un site pour l'implantation d'un marégraphe exposés ci-après sont valables pour tous les types de marégraphes, et pas uniquement pour les marégraphes radar. Dans certains cas, la nécessité d'implanter un marégraphe peut être liée à un besoin spécifique, ce qui détermine de fait son lieu d'implantation. Ainsi, un marégraphe destiné aux besoins de la navigation portuaire doit être installé dans le port concerné, et il convient de même d'implanter un marégraphe destiné à fournir des indications au sujet d'un phénomène local tel que l'érosion des côtes à proximité de l'endroit où se produit le phénomène en question. Cependant, dans d'autres cas, il se peut qu'il y ait plusieurs possibilités concernant le lieu d'implantation d'un marégraphe sur une partie du littoral qui doit faire l'objet d'évaluations multiples. À titre d'exemple, pour ce qui est du choix d'un site dans le cadre du réseau de base du GLOSS, on implantera le marégraphe non pas dans un estuaire mais dans un endroit le plus exposé au large possible. Quelle que soit l'application prévue, il conviendra de tenir compte de plusieurs critères parmi les suivants.

En règle générale :

- Pour donner satisfaction, le site retenu pour l'implantation d'un marégraphe doit se situer en eaux profondes et donner sur le large pour fournir des informations représentatives de cet environnement marin.
- Le site en question doit se trouver à proximité d'une zone soumise au cycle complet de la marée et qui ne se découvre pas complètement à marée basse.
- Par exemple, s'il convient d'avoir recours à un puits de tranquillisation, il est nécessaire de disposer d'au moins deux mètres de hauteur d'eau à la plus basse mer astronomique (PBMA). L'ouverture au fond du puits doit se situer à bonne distance du fond marin, à une profondeur suffisante pour permettre au flotteur de toujours opérer à environ un mètre sous le niveau de la PBMA. S'il est fait usage d'un marégraphe radar, il convient que la hauteur d'eau soit suffisante pour que les rochers n'affleurent pas sous le mouvement des vagues à marée basse.
- Il est nécessaire de disposer des moyens d'accès adéquats pour les opérations d'installation et d'entretien.
- Un cabanon adapté au marégraphe doit être prévu, ou à défaut un conteneur situé au plus près de l'appareil et permettant d'entreposer l'ensemble de l'équipement électronique de celui-ci. Ces cabanons, inaccessibles au public, doivent être protégés des actes de vandalisme et du vol.
- Il est aussi nécessaire de disposer d'une alimentation secteur soit de batteries, soit de panneaux solaires (ou les deux en ce qui concerne les stations de surveillance des tsunamis) et d'un accès au satellite ou au téléphone permettant une transmission des données quasi instantanée.
- Il est souhaitable que les alentours soient aussi stables que possible et l'implantation se fera dans l'idéal sur un rocher. La zone ne doit pas présenter de risques d'affaissement dus à des travaux souterrains ou au fait qu'il s'agit d'un terrain gagné sur la mer, être exposée à des glissements de terrains consécutifs à des précipitations prolongées (elle doit donc être convenablement drainée) ou encore aux risques d'érosion marine. La zone choisie doit donc être adaptée à l'établissement d'un réseau de contrôle géodésique. Les repères, et en particulier ceux des marégraphes et du GNSS doivent se trouver à l'abri des dommages accidentels.
- Il conviendrait aussi que la station soit équipée d'une échelle à marée permettant de prévenir les erreurs grossières liées au niveau de référence des données de hauteur de mer du marégraphe, même si celui-ci repose sur la technologie la plus récente.
- L'installation doit être en mesure de supporter les pires conditions environnementales (glace hivernale, tempêtes, etc.) envisageables. Cela peut influencer sur le choix la technologie à utiliser en matière de marégraphes. Il convient naturellement d'éviter les endroits exposés aux phénomènes environnementaux extrêmes de façon à permettre l'enregistrement de séries de niveau de la mer sur le long terme.
- S'il est prévu que soient installés des puits de tranquillisation ou des tubes de marégraphes acoustiques, alors ces derniers devront être suffisamment longs pour pouvoir mesurer les niveaux marins les plus élevés. Cela peut nécessiter une autorisation de la part des autorités portuaires si par exemple l'installation est située sur un quai très fréquenté.

Tableau 4.1

Points positifs et négatifs des différents supports de montage de marégraphes radar

Radar sans contact à l'air libre (à impulsions ou FMCW)	Radar sans contact dans un puits en acier inoxydable	Radar à ondes guidées dans un puits
		
Points positifs : - Installation facile, rapide et bon marché sur le bras de support au-dessus de l'eau - Ne nécessite pas de quai vertical - Peut être installé sous un pont pour la mesure du niveau de la mer et/ou du tirant d'air - Certains capteurs permettent de mesurer les vagues - Aucun contact avec la surface de la mer, ce qui suppose moins d'entretien	Points positifs - En raison du petit diamètre du nouveau tube, peut être installé à l'intérieur d'un puits existant pour remplacer un marégraphe à flotteur traditionnel. - Peut être installé le long du quai vertical - Le tube en acier inoxydable est utilisé aussi bien comme puits de tranquillisation que comme guide d'onde afin que l'atténuation de la puissance du signal soit limitée et que les mesures de portée soient extensibles à 15-20 m	Points positifs - Peut être installé à l'intérieur d'un puits existant pour remplacer un marégraphe à flotteur traditionnel. - Pas besoin de tubes supplémentaires lors de l'instrumentation d'un puits existant - Peut être installé le long d'un quai vertical à l'intérieur d'un tube PVC de 20 cm de diamètre qui est moins coûteux que les tubes en acier inoxydable

- Idéal pour de longues périodes d'observation (années) - Enregistre des oscillations à haute fréquence	- Les mesures du niveau sont moins bruitées en raison du filtrage mécanique du puits et de sa protection contre les embruns - Les mesures d'étalonnage à la sonde sont plus faciles et exactes en raison du calme qui prévaut à la surface de la mer - Aucun contact avec la surface de la mer, ce qui suppose moins d'entretien	- Les mesures du niveau de la mer sont moins bruitées en raison du filtrage mécanique par les puits et de sa protection contre les embruns - Les mesures d'étalonnage sont plus faciles et exactes en raison du calme qui prévaut à la surface de la mer - La mesure du niveau de la mer est moins sensible aux signaux provenant des multi-trajets ou de lobes secondaires - Un câble en acier inoxydable est utilisé comme guide d'onde afin que l'atténuation de la puissance du signal soit limitée et que les mesures de distance soient extensibles à 15-20 m.
Points négatifs : - Non approprié pour des marnages importants (> 10 m) parce que la largeur des faisceaux entraîne une variation de la surface illuminée ; et sur de grandes portées, l'atténuation du signal peut être grande - La détection des surfaces est sensible à l'environnement (lobe de détection latéral) et aux signaux à multi-trajets - La détection des surfaces peut être perturbée par les échos provenant des embruns - Les embarcations ou les objets flottants peuvent entrer dans le faisceau - Les contrôles d'étalonnage à la sonde ou à l'échelle de marée sont moins aisés et exacts à cause du vent et de l'agitation de la mer	Points négatifs : - Onéreux en raison des infrastructures nécessaires, notamment : • un tube en acier inoxydable de 8 cm de diamètre utilisé comme guide d'onde, • un tube en PVC supplémentaire de 8 cm de diamètre pour les mesures par immersion - Nécessite un puits ou un quai vertical existant - L'installation nécessite une grue pour fixer les tubes en cas de marée basse - Les fonds des tubes et des puits doivent être régulièrement nettoyés en cas d'ensablement - Les observations à haute fréquence, qui peuvent être utiles pour certaines applications scientifiques, sont filtrées	Points négatifs : - Il est également onéreux en raison des infrastructures nécessaires, notamment : • un tube en PVC de 30 cm de diamètre pour les mesures par radar et par sonde. - Nécessite un puits ou un quai vertical existant - L'installation nécessite une grue pour fixer les tubes en cas de marée basse - Les fonds des tubes et des puits doivent être régulièrement nettoyés en cas d'ensablement - Le câble en acier inoxydable doit être régulièrement inspecté et nettoyé en cas de concrétion. La concrétion ralentit la propagation des ondes et affecte par conséquent la mesure de plusieurs centimètres, l'incidence réelle étant difficilement détectable - Parfois le câble peut perdre son contrepoids, d'où la nécessité d'effectuer des contrôles réguliers

Les endroits à éviter sont les suivants :

- Les estuaires, où l'eau douce peut se mélanger à l'eau de mer dans des proportions variables au cours d'un cycle de marée et à différentes périodes au cours d'une année, ce qui entraîne des variations de la densité de l'eau. Cela peut avoir d'importantes conséquences sur les mesures réalisées à l'aide de marégraphes à flotteur dans des puits de tranquillisation en raison de la superposition de couches d'eau entrées dans le puits à différents moments, ce qui provoque une différence de densité au sein du puits et en dehors de celui-ci. La mesure de pression en sera aussi affectée, puisque la densité prise en compte dans la conversion de la pression pour l'estimation du niveau de la mer ne sera pas constante. Les courants fluviaux peuvent aussi entraîner une baisse du niveau dans le puits de tranquillisation et ou le tube des marégraphes acoustiques. Suite à des pluies très abondantes, les débris charriés par la rivière pourraient aussi détériorer le marégraphe.
- Les sites caractérisés par la présence de forts courants ou directement exposés aux vagues, ce qui peut avoir une influence à certains endroits sur le niveau de la mer.
- Les zones situées au voisinage d'exutoires, lesquels sont susceptibles de provoquer des remous, des courants, des phénomènes de dissolution et de déplacement des sédiments.
- Les zones portuaires présentant des risques d'oscillation à certains endroits ou dans lesquelles se produisent des clapots, par exemple au point de jonction des quais.
- Les endroits proches des zones de navigation. Dans ce type d'endroits, les navires risquent de provoquer des oscillations du niveau de la mer de courte durée mais importantes et très fréquentes, des collisions peuvent survenir et causer des dégâts, les remous produits par les hélices sont susceptibles d'entraîner des suspensions de vase (dont les incidences concernent tout particulièrement les puits de tranquillisation) et les relevés s'avèrent impossibles dès lors que des bateaux passent ou mouillent sous le marégraphe.
- Les sites dans lesquels des travaux de construction sont envisagés dans un avenir proche et qui sont susceptibles soit d'affecter le régime des marées (en raison de la construction de nouveaux quais ou de digues), soit de conduire au déplacement du marégraphe, ce qui implique une interruption des séries temporelles du niveau de la mer.
- Les endroits dans lesquels l'eau se trouve retenue (et donc coupée des eaux libres) à l'occasion des fortes marées basses. Sont aussi à éviter les endroits où l'on trouve des rochers affleurants qui risquent d'être apparents en période de fortes vagues. De même, les bancs de sable immergés situés entre le site et les eaux libres peuvent conduire à des relevés anormaux, les niveaux étant susceptibles de varier en fonction des déplacements des bancs de sable.

Autres facteurs à prendre en considération lorsque le déplacement d'un marégraphe est inévitable :

- Lorsque ce déplacement se fait sur une courte distance, pour des raisons d'aménagement portuaire, par exemple, alors le nivellement des repères entre les deux sites devrait permettre la poursuite de la série du niveau de la mer comme s'il s'agissait d'un seul et même enregistrement.
- En revanche, si le marégraphe est déplacé à une certaine distance sur la côte, il convient de tenir compte du risque de différence de niveau moyen de la mer (MSL) (par rapport au géoïde ou « surface de niveau ») entre les deux sites due à la dynamique des océans (les géodésiens désignent cette variation du MSL la « topographie dynamique moyenne »). Il peut y avoir une différence de plusieurs centimètres à la hausse ou à la baisse entre le MSL d'un site et les niveaux correspondants observés quelques kilomètres plus loin sur la côte, ou entre les niveaux constatés à l'intérieur d'un port et ceux constatés à l'extérieur. Ces différences impliquent qu'il n'est pas possible de combiner les deux séries chronologiques comme s'il s'agissait d'un seul et même relevé.
- Le déplacement d'un marégraphe sur une certaine distance le long d'un estuaire illustre bien cette situation. Une différence systématique sera ainsi constatée entre le MSL à long terme mesuré aux deux endroits différents en raison de la variation spatiale de la densité. Il n'est pas évident de quantifier cette différence (et donc de la compenser) en l'absence de mesures et de modélisations océanographiques détaillées. En outre, le cycle saisonnier du niveau de la mer est lui aussi soumis à des variations.
- Un autre exemple concerne le déplacement d'un marégraphe implanté à proximité d'un promontoire abrupt vers un autre endroit situé à proximité sur la côte ouverte. Étant donné que les promontoires sont des endroits caractérisés par de forts courants de marée, il est probable que le MSL observé (par rapport au géoïde) y soit inférieur à celui mesuré au deuxième site, ce qui entraînera une différence systématique entre les niveaux de la mer mesurés

aux deux endroits. Ces observations valent aussi pour les paires de marégraphes situés à l'intérieur et à l'extérieur d'un port à accès limité.

Pour récapituler, il convient donc en règle générale de faire un premier choix en toute connaissance du matériel marégraphique que l'on souhaite installer dans un site qui doit en toute vraisemblance être le site d'implantation définitif.

S'agissant de la question particulière du choix d'implantation des marégraphes destinés à la surveillance des tsunamis, il existe un rapport du Bureau australien de météorologie fournissant des précisions complémentaires. En dehors de la nécessité de situer ces appareils de façon à réduire au maximum le temps d'arrivée des signaux, la plupart des critères à prendre en compte sont en fait similaires à ceux qui s'appliquent aux marégraphes en général (Warne et Brewster, 2014).

4.2 Sites appropriés pour l'implantation d'un marégraphe radar

Les critères généraux à prendre en considération dans le cadre du choix d'un site approprié pour l'implantation d'un marégraphe radar sont les suivants :

- Consultez les divers critères généraux ci-dessus qui s'appliquent au choix d'un site pour l'implantation d'un marégraphe.
- Prenez autant de photographies du site que possible, depuis différents points de vue (deux séries – dans des directions opposées – au bord de l'eau, une autre face à la mer, et si possible une dernière prise de la mer en direction des terres). Il est toujours utile de disposer de bons clichés pour les rapports officiels et les manuels, c'est pourquoi ces photos doivent être les plus réussies possible. S'il s'agit d'un lieu où le marnage est plus important, consignez l'heure de chaque cliché, car le rendu sera probablement très différent à forte marée basse. Un enregistrement vidéo peut aussi s'avérer utile.
- Dessinez une carte en complément des photographies.
- Relevez toutes les informations relatives à l'endroit, comme les noms et les coordonnées des propriétaires de pontons.
- Gardez à l'esprit que l'objectif principal consiste à déterminer la meilleure façon d'installer le marégraphe sur les lieux, c'est pourquoi il convient de tenir compte

des avantages et des inconvénients que présentent les diverses possibilités d'installation (voir section suivante).

- S'il s'avère que la possibilité la plus vraisemblable consiste à installer le marégraphe en eau libre, il convient de veiller à ce que rien ne s'interpose entre le capteur et la surface de l'eau, de façon à minimiser au mieux les faux échos. Renseignez-vous sur la navigation et les autres activités qui ont lieu alentour. Évaluez les distances séparant les eaux libres du quai et relevez les obstacles éventuels. Procédez à l'estimation du probable portée maximale de la mesure radar ainsi qu'à celle de la zone de couverture maximale et déterminez par conséquent si le faisceau est susceptible de se réfléchir sur des cibles autres que la surface de la mer. Évaluez la longueur nécessaire du bras en porte-à-faux.

4.3 Installation du marégraphe radar

La présente section traite des différentes façons d'installer un marégraphe radar en vue d'obtenir les meilleures données.

Installation d'un marégraphe radar en eau libre

Les marégraphes sont bien souvent installés au-dessus de la surface de la mer, en eau libre, l'émission du faisceau radar ayant lieu en aller-retour entre le capteur et la surface sans passer par un guide d'ondes, même s'il existe d'autres possibilités d'installation, lesquelles sont décrites plus loin. Les facteurs à prendre en compte dans ce cas le plus courant sont les suivants :

- L'appareil doit être installé au-dessus de la surface de l'eau à un endroit qui ne se découvre jamais et où l'on ne trouve pas de rochers ou autres obstacles qui émergent à marée basse.
- On aura recours à un support (un bras en porte-à-faux, par exemple) suffisamment robuste pour résister aux vents violents et qui ne se dilate ou ne se contracte pas en fonction des températures, de façon à maintenir une hauteur constante entre le marégraphe et son repère.
- L'angle du faisceau doit être orienté de façon à être perpendiculaire à la surface de l'eau, dans la limite des spécifications du fabricant. Il ne doit pas y avoir de risques de réflexions indésirables causées par les parois du port ou d'autres structures de support. L'empreinte du faisceau aura pour rayon $R \tan(\alpha/2)$ où R représente la portée et α la largeur maximale

du faisceau. La **Figure 4.1** donne un exemple de marégraphe doté d'une largeur de faisceau maximale de 12° (demi-largeur de 0,1 radian) faisant état d'une « distance de sécurité » minimale.

- La hauteur du capteur par rapport à la surface de l'eau doit se situer dans la fourchette spécifiée par le fabricant et doit être suffisante pour empêcher l'eau d'atteindre la « zone aveugle » de l'antenne. (Cela peut se révéler problématique lorsque le marégraphe est destiné à la surveillance des fortes ondes de tempêtes ou des tsunamis, lesquels peuvent même recouvrir l'appareil.)
- L'implantation ne doit pas se faire à un endroit où des bateaux sont susceptibles de mouiller sous le faisceau, ou bien où la végétation et les déchets à la dérive pourraient s'accumuler (dans les angles des ports, par exemple), ce qui donnerait lieu à des indications erronées.
- Les marégraphes radar sont conçus pour que leurs signaux soient réfléchis par la surface de l'eau et non par la glace. Dans les régions polaires, il est probablement souhaitable d'avoir recours à d'autres types d'appareils, tels que les marégraphes radar à ondes guidées, installés dans un puits de tranquillisation

chauffé (voir ci-dessous et l'Appendice 1). Par ailleurs, il est possible d'avoir recours à un marégraphe radar durant la période estivale exempte de glace en complément d'un marégraphe à pression implanté de façon permanente (voir Liebsch et Kühmstedt, Supplément).

- De même, les endroits où il y a de l'écume sont déconseillés, car celle-ci absorbe les impulsions émises.

L'installation doit répondre aux critères de conception suivants :

- Le châssis-support doit être constitué d'un matériau qui ne rouille pas en milieu côtier (l'aluminium laqué ou la fibre de verre sont notamment recommandés) et il doit être conçu de façon à ce que, une fois l'appareil fixé à l'extrémité du bras, la hauteur de la marque repère du marégraphe (que l'on peut faire correspondre, au moyen de l'étalonnage, au niveau zéro du capteur, voir ci-dessous) sera déterminée en fonction d'un autre repère situé sur le bras, côté terre. Il conviendra d'avoir confirmé les relations de distance entre les repères du matériel (y compris sa structure) au laboratoire avant de procéder à l'installation. La hauteur du repère de référence par

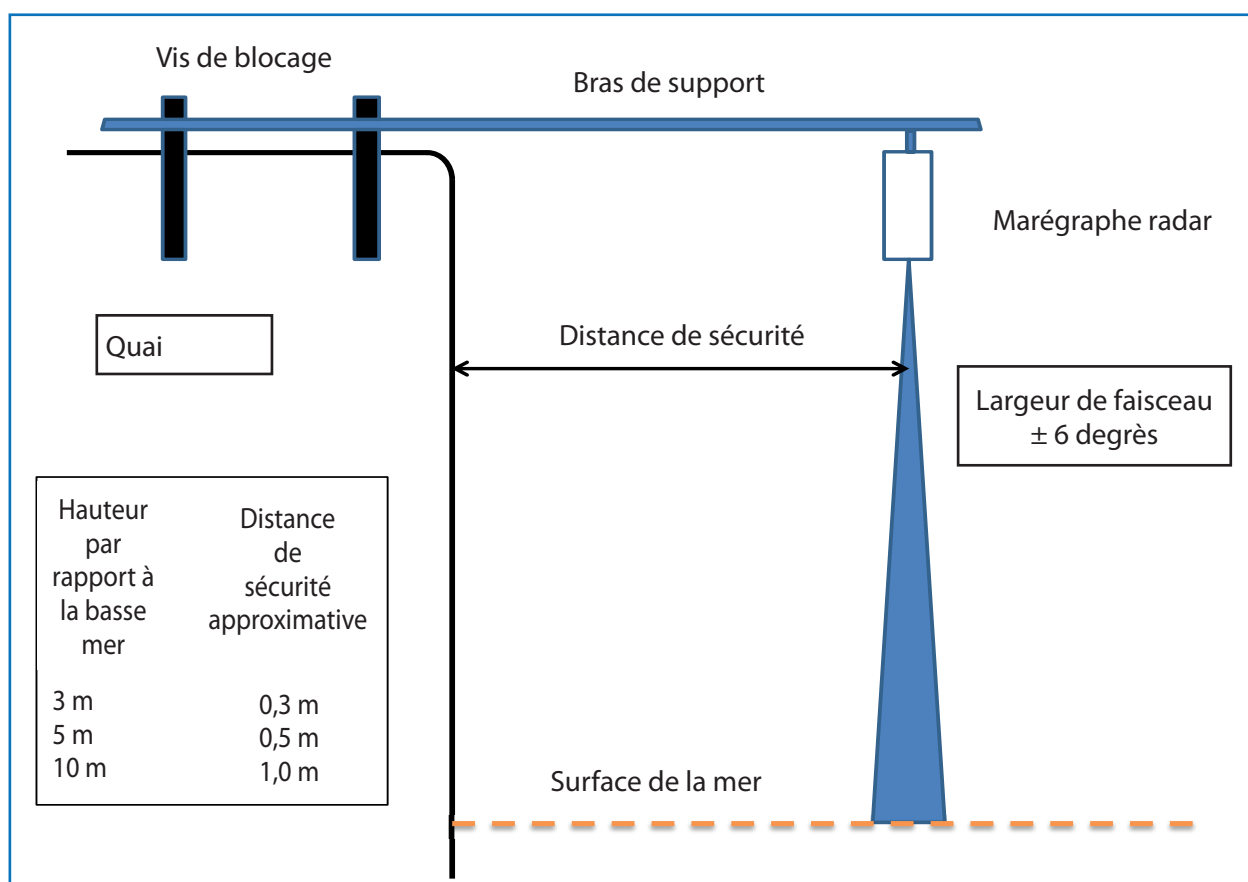


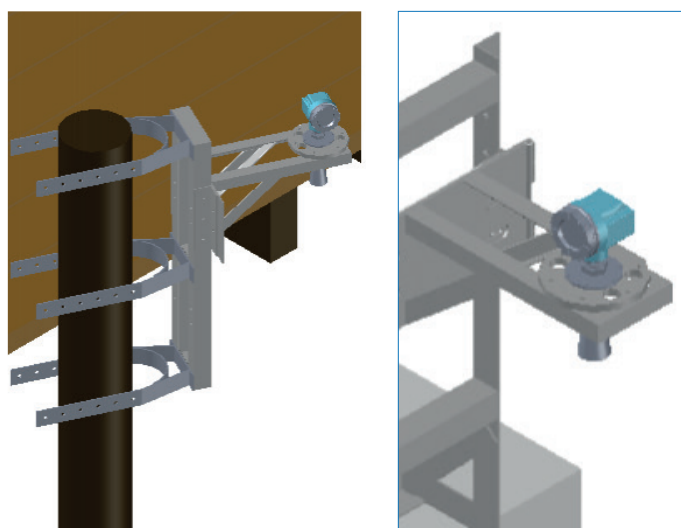
Figure 4.1 Schéma d'un marégraphe radar avec un faisceau de $\pm 6^\circ$ installé dans un port à l'aplomb d'un quai et indiquant la distance de sécurité approximative.



Figure 4.3 Un marégraphe OTT Kalesto à Alexandrie à l'extrémité d'un bras coulissant qui est fixé par des boulons. (Photo T. Aarup, COI).



Figure 4.4 Collet de montage utilisé par la NOAA pour les marégraphes radar à cornet tels que le Waterlog H-3611. Le collet qui est un disque en aluminium de 2,54 cm d'épaisseur avec des trous de fixation pour le capteur et son arrimage au support. Une mire de nivellement peut être placée sur la partie plate de la face avant du collet pour permettre une connexion géodésique aux repères voisins. (Photos NOAA).



Dispositif pour pieu avec rail coulissant et clameaux adaptés

Installation sur digue à l'aide d'un support MWWL

Figure 4.5 La plaque de montage plate en métal de la NOAA munie d'équerres sur chaque côté et qui permet une fixation pratique aux différents types de structures (par exemple, montage sur pilier et mur de soutènement dans ce cas).

est possible de se procurer les dessins techniques de la bague et la liste du matériel connexe (comme une couverture en PVC destinée à protéger le capteur) en écrivant à l'adresse suivante : robert.heitsenrether@noaa.gov. Par ailleurs, la plaque d'assemblage métallique est munie de supports triangulaires de chaque côté qui permettent de fixer le support et les capteurs à différentes structures prévues pour s'adapter à des pieux ou des digues, comme le montre la **Figure 4.5**.

- (v) Certains fabricants prévoient une installation du marégraphe à l'horizontale dans un conduit en saillie au-dessus de l'eau. Le marégraphe est situé à l'extrémité du conduit située côté terre et émet en direction d'un réflecteur à 45° situé à l'autre extrémité. Le faisceau radar est ainsi dirigé vers la mer puis renvoyé au capteur par le biais du réflecteur.

Installation d'un marégraphe radar dans un puits de tranquillisation

L'installation peut aussi consister à installer un marégraphe radar à antenne-cornet au-dessus d'un puits de tranquillisation, plutôt qu'en eau libre. Cette solution peut s'avérer particulièrement souhaitable dans le cas où un puits est en place depuis longtemps mais, sinon, les coûts et les difficultés liés à la construction d'un nouveau puits ne la justifient aucunement. Un puits de tranquillisation permet de s'assurer que la surface de la mer mesurée est aussi calme que possible

et que la réflexion est par conséquent optimale. Le plus important est que le diamètre du puits soit suffisamment important pour garantir que l'essentiel de l'énergie réfléchie provient bien de la surface de l'eau, à tous les stades de la marée (et particulièrement à marée basse), et non pas des parois métalliques. Les réflexions sont aussi sensibles aux pièces métalliques situées dans et hors du puits, lesquelles produisent de faux échos. Dans la pratique, l'utilisation d'un dispositif radar dans un puits classique donne davantage satisfaction lorsque le marnage est réduit et que le puits n'est pas trop profond. Il convient de nettoyer régulièrement le puits afin qu'il conserve toute sa justesse (ce qui n'est pas le cas avec les dispositifs installés en air libre qui nécessitent peu ou pas d'entretien). André et al. donnent une description des marégraphes radar à antenne-cornet implantés dans des puits de tranquillisation en France (Supplément). S'il existe de forts signaux multi-trajets dans un puits existant, il est sans doute préférable d'avoir plutôt recours à un tube en acier inoxydable ou à un capteur à ondes guidées, les deux étant décrits ci-après.

Une autre approche reposant sur la stabilisation de l'eau consiste à installer un marégraphe radar, dépourvu de son antenne à cornet, à l'extrémité d'un tube en acier inoxydable d'un diamètre d'environ 8 cm disposé à la verticale, doté d'un embout de forme conique permettant de filtrer le bruit – comme c'est le cas pour les puits classiques –, abritant un flotteur, et qui sert aussi de guide d'ondes au radar. Le guide d'ondes assure une meilleure propagation ainsi qu'un meilleur maintien de la puissance et permet de réduire les faux échos. André et al. (Supplément) donnent un exemple de mise en œuvre de ce procédé à Fos-sur-Mer, en France, dans le cadre duquel un second tube sert à l'étalonnage du radar au moyen de mesures à la sonde. La **Figure 4.6** représente une autre installation à Dragør, au Danemark, avec en l'occurrence un tube de 17 cm de diamètre. Le tube en question ne doit pas présenter de soudures afin de ne pas générer de réflexions indésirables et il faut qu'il soit aussi propre que possible en permanence. Il convient aussi de déterminer si la mer (et donc l'eau du tube) gèle en hiver, auquel cas un capteur à pression d'appoint sera nécessaire.

Installation d'un radar à ondes guidées

Un marégraphe radar à ondes guidées (**Figure 4.7a**) constitue une autre possibilité pour une installation en puits de tranquillisation. Le lobe principal du radar à impulsions émet au travers d'un câble spécial en acier inoxydable plongé dans l'eau et les ondes sont réfléchies dès lors que la permittivité diélectrique du milieu environnant change (c'est-à-dire à l'interface entre l'air et l'eau). L'essentiel de l'énergie radar se propage à



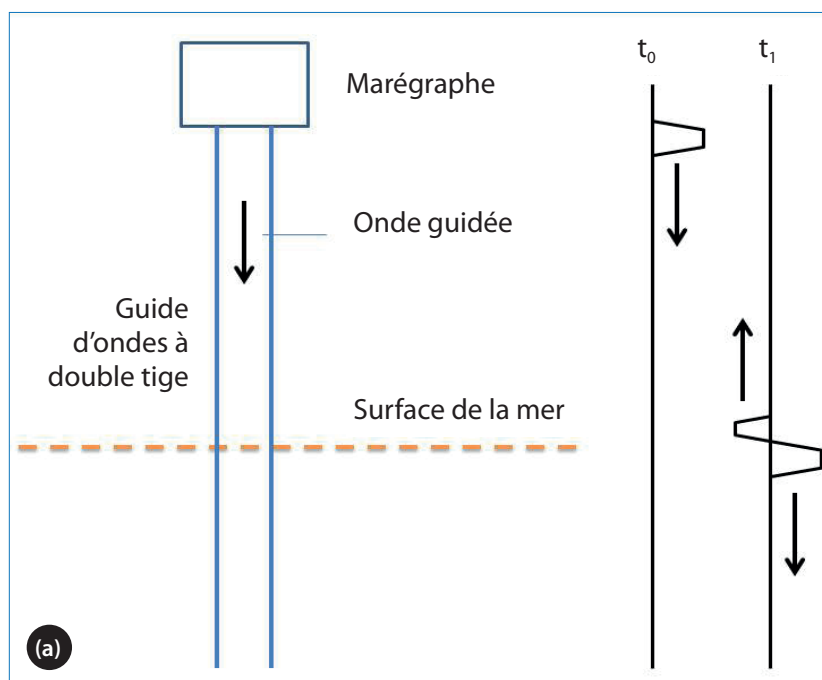
Figure 4.6 Une installation à Dragør, Danemark. À gauche on peut voir un marégraphe radar Endress+Hauser monté au sommet d'un tube en acier inoxydable (environ 17 cm de diamètre) qui sert de puits de tranquillisation et de guide d'ondes. Ce tube est muni à son extrémité d'un trou d'admission de 30 mm de diamètre. À l'intérieur du tube se trouve un filtre destiné à empêcher les intrusions biologiques. Le sommet du tube comporte 4 trous munis de filtres destinés à empêcher la condensation sur l'antenne du radar. À droite on peut voir un tube en acier inoxydable contenant les câbles du capteur de pression. (Photo de l'Institut Danois de Météorologie).

proximité du guide d'ondes (en général 80 % dans un rayon de 20 cm, selon Riley et Jethra, 2012), et donc l'énergie réfléchie vers l'émetteur est plus importante que celle d'un radar à propagation dans l'air libre. Le puits a dans ce cas pour double fonction de stabiliser l'eau et de protéger le câble.

Ce procédé, aussi appelé réflectométrie à dimension temporelle (TDR), a été initialement mis au point pour mesurer les niveaux dans les cuves industrielles. C'est en France qu'il a été le plus utilisé pour mesurer le niveau de la mer à l'aide du capteur Krohne BM100. Martín Míguez et al. (2008a) rendent compte de l'exploitation d'un tel dispositif dans un large puits de tranquillisation (1 m²) implanté à Brest où de nombreuses différences de l'ordre du millimètre ont été observées entre le niveau de l'eau dans le puits tel que mesuré par le radar et par une sonde manuelle sur plusieurs cycles de marée (procédé connu sous le nom de test de Van de Castele, voir le Volume I du présent Manuel), tandis que l'accord est révélé être

de l'ordre du centimètre dans un puits de taille semblable situé à Roscoff. Il a été estimé que les différences plus importantes à cet endroit étaient dues au fait que les mesures à la sonde manuelle avaient été moins précises.

Le capteur ancienne génération BM100 a aujourd'hui largement cédé la place à l'Optiflex 1300C, dont les caractéristiques radar et la précision sont meilleures, tout en nécessitant moins d'énergie. Le SHOM les exploite dans des puits de tranquillisation de diamètres supérieurs à 300 mm et dont le type va de la vieille construction en pierre aux tubes de polyéthylène (Figure 4.7b, voir aussi refmar.shom.fr et André et al., Supplément). Il est possible d'opter pour des systèmes de guides d'onde à simple ou double câble. Les tiges trop longues peuvent s'avérer encombrantes dans les puits de tranquillisation, c'est pourquoi un câble guide d'ondes muni d'un contrepoids à son extrémité pour le maintenir droit et vertical est préférable.



(b) Un capteur radar à ondes guidées installé dans un puits existant à Sète en France. (Photo SHOM).

(c) Le câble guide d'onde en acier inoxydable (4 mm de diamètre) utilisé pour les stations françaises radars à ondes guidées muni d'une masse cylindrique (20 x 100 mm) pour maintenir le câble en position verticale. Sur plusieurs sites, il peut s'avérer nécessaire de procéder à un nettoyage occasionnel du câble et du poids afin d'enlever l'encrassement biologique (biofouling).



Figure 4.7

(a) Schéma d'un radar à ondes guidées, ou réflectométrie en domaine temporel, dans un puits avec une partie de l'énergie transmise réfléchi à la surface de la mer. (Adapté de Brumbi et Van Zyl, 2009). Un guide d'onde à double tige est présenté dans cet exemple. Le temps de déplacement total de l'onde guidée sera de $2(t_1 - t_0)$ et la hauteur du marégraphe radar au-dessus de la surface de la mer sera de $c(t_1 - t_0)$ où c est la vitesse de la lumière.

D'autres fabricants proposent des marégraphes radar à ondes guidées de ce type (le VEGAFLEX-81 ou le Levelflex d'Endress+Hauser, par exemple). La documentation fournie avec le VEGAFLEX 81 précise que l'appareil doit

être installé dans un tube en plastique (et non pas en métal) muni d'un lest d'équilibrage afin que le câble se maintienne à la verticale.

4.4 Avant l'installation

Détermination de l'offset (ou biais) du capteur

L'un des enjeux les plus importants s'agissant des marégraphes, et pas seulement des marégraphes radar, consiste à connaître la référence de la mesure du niveau qu'il fournit. Pour ce qui est d'un marégraphe opérant à la verticale et vers le bas, il convient de connaître le point qui pour cet appareil correspond à une mesure nulle de tirant d'air, que nous appellerons le point de mesure nulle (PZR pour « Point of Zero Range », ou encore zéro instrumental) ainsi que la relation entre ce dernier et un marqueur de référence définie sur le capteur (RSM pour « Reference Survey Mark »). La différence de hauteur entre le point de mesure nulle (PRZ) et le marqueur RSM correspond à ce que l'on appelle l'offset du capteur.

Offset du capteur (SO) = marqueur RSM - point de mesure nulle (PZR)

L'offset du capteur (SO) aura une valeur positive dès lors que RSM est au-dessus du point de mesure nulle.

Le niveau de la mer enregistré par un marégraphe radar sera calculé par la station marégraphique à partir du tirant d'air en tenant compte d'un offset de la station (LO) (10 mètres, par exemple) de façon que :

Le niveau de la mer = offset de la station (LO) - tirant d'air

La référence de la station et donc des observations (LO) sera à la distance LO sous le marqueur de référence (RSM) seulement si PZR and RSM coïncide (**Figure 4.8**).

La plupart des marégraphes radar sont livrés sans que soit déterminé l'offset du capteur (SO) et il est important de ne pas tenir pour acquis que le point de mesure nulle (PRZ) est obligatoirement situé à l'extrémité d'une antenne-cornet ou sur la tranche d'une antenne plane. D'autres marégraphes indiquent selon leur fabricant un point de mesure nulle sur leur boîtier, mais il convient de ne pas s'y fier. Le capteur OTT RLS présenterait ainsi un décalage de -7 à 6 mm environ à partir de sa plaque de masse en téflon (Illigner et al., 2016). Cependant, on ne peut présumer que les mêmes valeurs s'appliquent aux capteurs analogues du même fabricant : par exemple, Heitsenrether et al. (2012) ont établi que les valeurs concernant différents capteurs du même type, le Waterlog H-3611, variaient d'environ plus ou moins 1,5 cm.

Il est tenu compte de ce problème dans les fiches d'information de nombreux marégraphes vendus à la communauté hydrologique, de sorte que l'utilisateur y est invité à déterminer la valeur de l'offset du capteur en comparant les mesures du niveau de l'eau réalisées au

radar avec celles relevées sur une échelle de crue dans une rivière voisine (dont le point zéro peut être connu en vertu d'un niveau de référence local). Il s'agit au travers de cette procédure de « préparer le terrain » (OMM, 2010). Cette méthode s'avère recevable dans le cadre d'applications hydrologiques puisque les vagues sont en général moins importantes dans les cours d'eau, les plans d'eau et les réservoirs, ce qui permet le plus souvent d'obtenir au moyen de cette mise en place visuelle un degré de précision de l'ordre d'un centimètre au moins, ce qui est conforme à l'objectif visé.

Il devrait en principe être possible d'évaluer de façon analogue l'offset du capteur d'un marégraphe radar après qu'il ait été installé, à savoir en comparant les niveaux mesurés à l'aide du radar avec ceux observés sur une échelle de marée. Cependant, ce procédé risque de donner des résultats moins précis en mer que dans une rivière – surtout en présence de fortes vagues –, et aussi moins précis que ce que permettent les procédés décrits ci-dessous. Néanmoins, cette approche basée sur le bon sens peut être utile pour procéder à la vérification du niveau de référence du marégraphe lors des opérations d'entretien, point auquel nous reviendrons plus après.

L'offset d'un capteur donné peut être déterminé au laboratoire, avant l'installation, en procédant à une série de mesures de distance vers des cibles, la distance réelle étant vérifiée à l'aide d'un mètre ruban. Il convient alors dans un premier temps de déterminer où se trouve la marque repère sur le boîtier à partir de laquelle les mesures au mètre ruban seront effectuées. La plupart des appareils sont dépourvus de marque clairement identifiée, mais il est facile d'y pallier puisqu'il suffit de la graver ou de la peindre soi-même sur le boîtier. Il importe toutefois de bien choisir son emplacement, de façon à ce que, lors de l'installation du marégraphe sur son support, la marque en question soit bien accessible pour comparaison avec les autres marques situées sur le support, et donc aux points de repères locaux, au moyen du processus de nivellement (Chapitre 6).

Les plaques de métal plates et les bassines d'eau constituent des cibles appropriées dont la taille doit être au moins deux fois supérieure à celle qui pourrait être estimée compte tenu de la distance et de la largeur du faisceau. La **Figure 4.9** donne un exemple de cible adaptée à une mesure à courte distance. Pour les distances plus importantes, il est possible d'installer l'appareil sur un support de laboratoire, de façon à ce qu'il réfléchisse les cibles métalliques ou liquides disposées au sol, la hauteur de l'appareil vis-à-vis de la cible pouvant varier entre un et plusieurs mètres, la distance réelle étant systématiquement vérifiée au mètre ruban. S'il s'avère nécessaire de travailler sur des distances

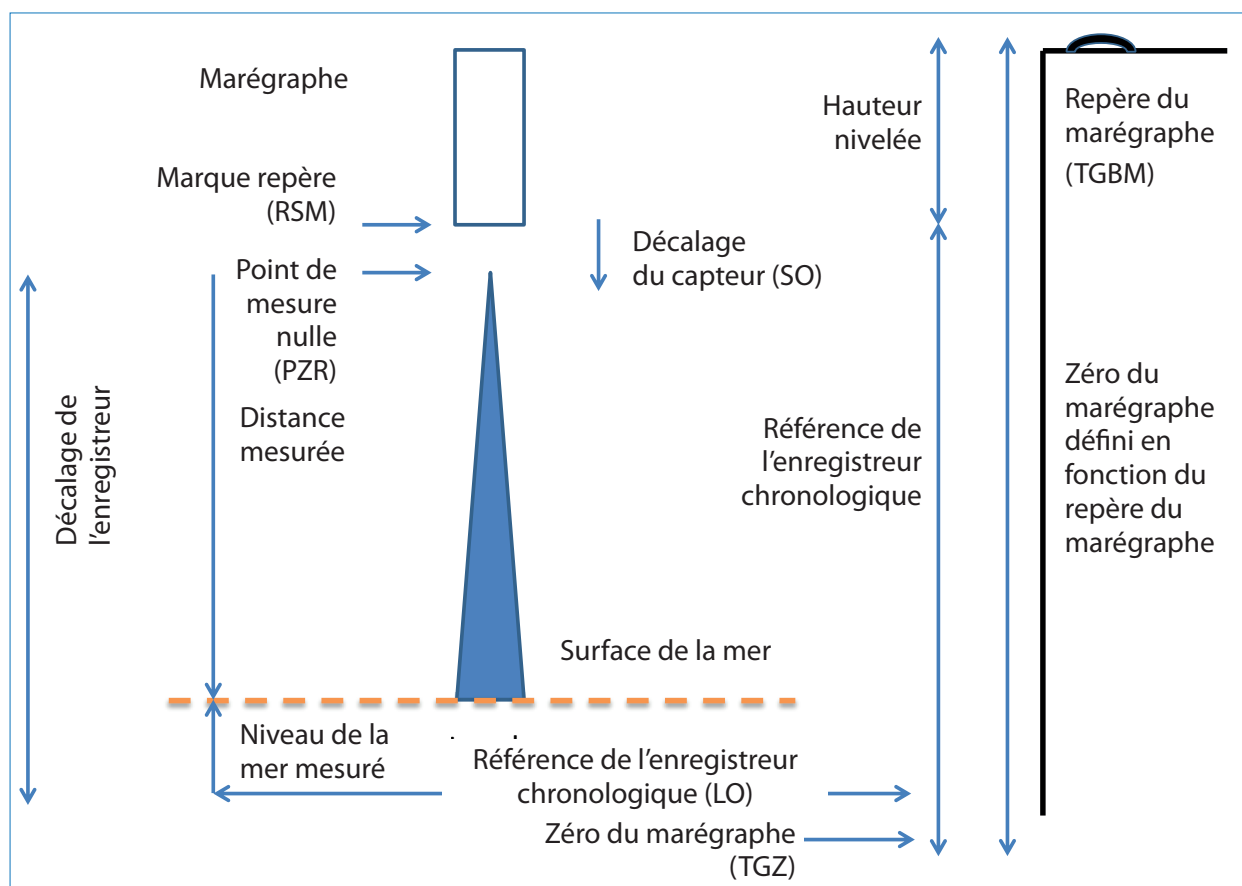


Figure 4.8 Schéma d'un marégraphe radar, le marqueur de référence du capteur sur son boîtier (RSM), son point de mesure nulle (PZR), le niveau de référence de la station (LO), le zéro du marégraphe (TGZ), et le repère principal du marégraphe (TGBM). Tous ces niveaux doivent être connus les uns par rapport aux autres.

plus importantes, on installera le marégraphe de façon à ce qu'il émette à l'horizontale, à travers le laboratoire, en direction d'une plaque métallique plus éloignée (et de plus grande dimension).

Toutes les distances évaluées feront l'objet de comparaisons entre les mesures radar et les mesures au mètre ruban. Si l'offset du capteur varie en fonction de la distance, l'erreur d'étalonnage peut être due à des boucles de courant de 4 à 20 mA avec certains capteurs dépourvus d'affichage numérique. Des anomalies peuvent se produire à faible distance en raison des « zones aveugles » des appareils. Certaines erreurs peuvent aussi être dues aux réflexions du faisceau sur les murs ou le matériel du laboratoire. Il convient donc de vérifier les éventuels résultats invraisemblables en déplaçant l'appareil et sa cible afin de veiller à obtenir de bonnes réflexions. On trouve des exemples d'un tel recours à des cibles pour déterminer le décalage du capteur chez Heitsenrether et Davis (2011) ainsi que chez Pugh et al. (Supplément).

Il est ainsi possible de déterminer l'offset du capteur et de confirmer la précision des mesures de distance (en

dehors de l'offset du capteur), et ce pour des mesures plus ou moins importantes. Il est important de consigner rigoureusement l'ensemble des informations pour chaque capteur, notamment le numéro de modèle et le numéro de série de l'appareil, la date et le nom du responsable des tests. On notera également, si possible, les informations relatives à l'environnement (la température, en particulier). En plus de ces tests basiques portant sur l'offset du capteur et la linéarité des distances, la NOAA procède à des tests de temps de réponse au moyen desquels la réponse du radar vis-à-vis d'une cible en mouvement rapide est comparée à des mesures laser, ce qui permet de déterminer les similarités pour chaque capteur. Ces tests servent principalement à veiller à ce que soient correctement paramétrés en mode « temps de réponse rapide » (à savoir une seconde, environ), comme il en est question à la section suivante.

Les informations relatives à l'offset du capteur doivent être incluses dans les métadonnées, accompagnant chaque donnée en temps réel transmise, pour être traitées en différé par les centres de données (Chapitre 8).

Autres éléments à prendre en compte avant l'installation

Certains marégraphes radar peuvent être utilisés sous différents modes, ce qui offre diverses possibilités en matière de taux d'échantillonnage ou d'amortissement (qui a trait à la sensibilité et au bruit). Ces différents modes doivent normalement faire l'objet d'une description dans la documentation des fabricants, mais les informations fournies ne sont pas toujours suffisantes. Il convient par conséquent que les possibilités de chaque mode soient examinées de manière aussi approfondie que possible en échangeant avec d'autres utilisateurs expérimentés et avec les fabricants. Il arrive en effet que le mode par défaut ne soit pas celui qui convienne le mieux aux mesures du niveau de la mer. En définitive, le seul moyen de s'assurer d'avoir choisi un mode satisfaisant et que les données transmises sont correctes consiste à comparer les données radar avec les informations issues d'autres technologies.

Pour ce qui est de l'échantillonnage, le marégraphe radar à impulsions Waterlog H-3611 peut par exemple être utilisé en mode normal (ou standard), mais aussi en modes rapides, ce qui permet d'obtenir des mesures individuelles, en général à 1 Hz, que l'on peut par la suite filtrer au cours du traitement différé des données afin d'éliminer l'impact des vagues (Boon, 2013 ; 2014). Si le mode rapide permet des mesures plus fréquentes, c'est parce qu'il ne procède pas au même degré de filtrage interne que le mode normal. En revanche, ce mode peut ne pas convenir, car il est trop rapide pour certains enregistreurs de données. Il existe aussi un mode « spécifique NOAA » qui permet de réaliser 181 mesures espacées d'une seconde toutes les 6 minutes et d'obtenir

10 moyennes et écarts-types toutes les heures, comme c'était déjà le cas avec les marégraphes acoustiques qu'utilisait l'organisme auparavant.

Les marégraphes VEGAPULS justifient parfaitement l'amortissement du signal de sortie puisque ces appareils sont connus pour mettre plusieurs dizaines de secondes pour s'adapter à des variations soudaines (Heitsenrether et Davis, 2011). Il a été démontré que l'amortissement permet de limiter les hautes fréquences induites par les vagues dans certains sites (voir l'article de Pugh et al., Supplément).

Choix de l'échantillonnage radar

Pour que les marégraphes radar soient en mesure de fournir de façon fiable des valeurs moyennes du niveau de la mer toutes les minutes (ou toutes les trois minutes, ou autre), tel que cela est désormais requis dans le cadre de GLOSS et de la surveillance des tsunamis (Chapitre 5), il est évident qu'il leur faut échantillonner à un taux bien plus élevé, de façon à pouvoir moyenner les variations de niveau dues aux vagues. En l'occurrence, l'échantillonnage à 1 Hz que permettent certains capteurs présentés à l'Appendice 1 est tout à fait satisfaisant (voir notamment Pérez et al., 2014).

Toutefois, certains organismes nationaux n'ont jamais exigé de mesures à des fréquences aussi élevées puisque ces derniers continuent de concentrer leurs efforts sur les variations du niveau de la mer dues aux marées, aux surcotes et sur le niveau moyen de la mer, et non pas sur les tsunamis et autres phénomènes rapides. Pour les besoins de ces derniers, des moyennes toutes les 6 à 15 minutes



Figure 4.9 Un exemple de cible de laboratoire utilisée pour déterminer l'offset du capteur (SO) à une distance d'environ un mètre. La bride circulaire du capteur est alignée sur la surface extérieure du montant, et la distance par rapport à la surface intérieure de l'autre extrémité du montant est mesurée avec précision à l'aide d'un ruban. La distance enregistrée par le radar est ensuite comparée à la valeur mesurée à l'aide du ruban ; ainsi la portée indiquée par le ruban moins celle indiquée par le radar donne le l'offset du capteur. (Photo de R. Heitsenrether, NOAA).

environ suffisent. (En fait, les premiers plans de mise en œuvre de GLOSS prévoyaient des valeurs horaires, pas davantage.) Cela explique en partie pourquoi certains organismes ont recours à un échantillonnage toutes les minutes environ et établissent par la suite une moyenne sur 15 minutes (voir notamment Pugh et al., Supplément). D'autres organismes ont adopté des stratégies différentes (le SHOM, par exemple, établit une moyenne avec 15 secondes consécutives et calcule ensuite la moyenne sur une minute), en tenant compte dans le « filtrage temporel » du fait qu'un « filtrage mécanique » soit aussi appliqué ou non.

Nous pensons que l'ensemble des organismes devraient à présent adopter la même stratégie en matière d'échantillonnage, dans la mesure du possible et compte tenu des différents équipements radar utilisés. En outre, nous estimons qu'il est préférable d'effectuer les relevés à une fréquence de 1 Hz ou supérieure (on utilise par exemple des fréquences de 2 Hz en Espagne et de 4 Hz au Chili) et d'en faire la moyenne pour obtenir des valeurs par minute. De plus, il importe que le capteur soit paramétré en mode réponse rapide pour tirer profit du taux d'échantillonnage élevé. Dans bien des cas, les capteurs radars et/ou leurs enregistreurs de données ne seront pas en mesure de fonctionner à des fréquences aussi élevées. (Par exemple, les capteurs OTT Kalesto, qui ne sont plus produits mais que l'on utilise encore dans de nombreux pays, fournissent des valeurs toutes les minutes en effectuant 40 relevés en l'espace de 17 secondes. Ces derniers ont été remplacés par les appareils OTT RLS qui permettent un échantillonnage à 16 Hz moyenné sur 20 secondes.) Néanmoins, en pareils cas, nous préconisons

que ces appareils soient paramétrés pour échantillonner aussi vite qu'ils le peuvent (toutes les trois secondes, par exemple), de façon à ce que des valeurs par minute puissent être obtenues à partir d'autant d'échantillons que possible. Il va de soi que la possibilité de réaliser des mesures très rapides doit tenir compte des capteurs et des enregistreurs de données à disposition et doit faire l'objet d'essais en laboratoire avant l'installation du matériel. Dans les endroits où les vagues génèrent d'importants biais dans les mesures radar, le fait de procéder à des relevés plus fréquemment ne permettra pas automatiquement de résoudre les problèmes et seules des comparaisons détaillées avec les données obtenues à l'aide d'autres procédés saura montrer si les données radar conviennent à des fins scientifiques.

4.5 Pendant l'installation

Logiciel d'installation radar

De nombreux fabricants fournissent du matériel de communication ainsi que le logiciel PACT (Process Automation Configuration Tool) permettant de configurer l'appareil et d'afficher les courbes de réponse de l'écho issu d'un capteur. Ces courbes affichent la quantité d'énergie reçue en retour par le marégraphe et permettent ainsi d'évaluer la distance. Si des réflexions indésirables, provenant par exemple du support de l'appareil, sont plus fortes que celles issues de la surface de la mer, alors des mesures erronées pourraient être enregistrées. Le logiciel permet de régler les paramètres de façon à ignorer les réflexions importantes dans la limite d'une certaine portée. Toutefois, si le logiciel témoigne

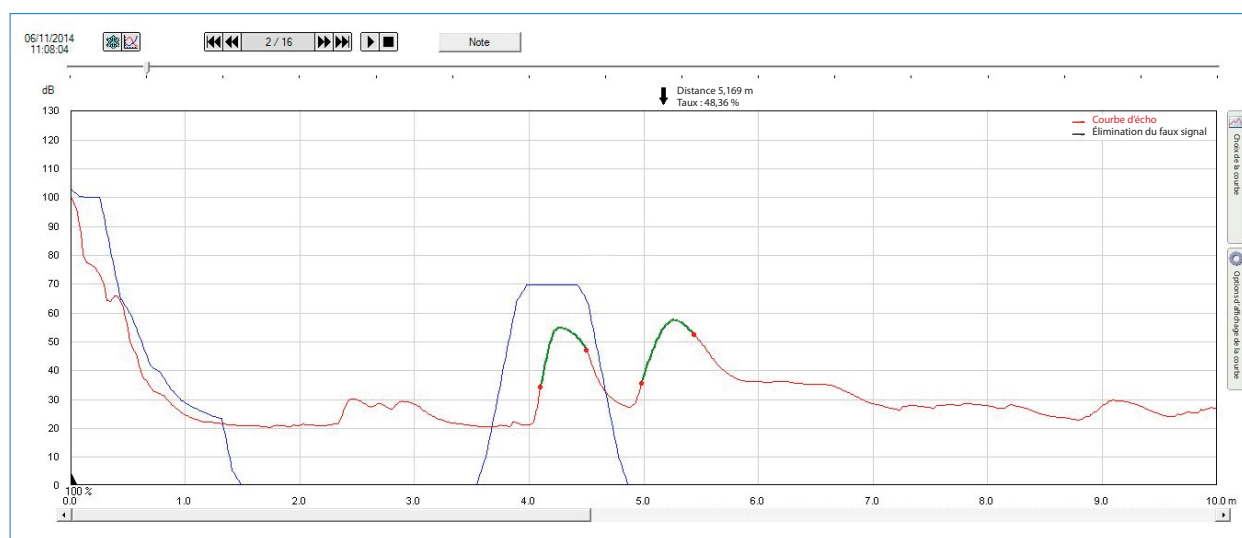


Figure 4.10 Un exemple de courbe de réponse de l'écho, en rouge, issue d'une installation VEGAPULS-61 à Bournemouth sur la côte sud de l'Angleterre. Le tracé indique l'énergie reçue au niveau du capteur en fonction de la distance (ou du temps) en dessous. Dans ce cas, le principal pic d'énergie, en vert, provient de la surface de la mer qui est 5,169 m en dessous du marégraphe. Toutefois, il y a un second pic, aussi en vert, qui provient d'une passerelle située à environ 1 m au-dessus du niveau de l'eau. Le marégraphe peut être programmé pour rejeter normalement les échos de ces sections de la courbe de réponse dans les limites des lignes bleues, à moins que le pic d'énergie ne migre dans la zone bleue.

d'un nombre important de réflexions indésirables, il est sans doute préférable de déplacer le marégraphe. La **Figure 4.10** donne un exemple de courbe de réponse émise par un capteur VEGA implanté sur la côte sud de l'Angleterre. Le guide de la NOAA (2013a) fournit des exemples concernant les capteurs Waterlog.

Détermination du niveau de référence

Il est crucial dans le cadre d'une installation de déterminer et de documenter les relations entre les différents niveaux concernés. L'offset du capteur peut être soit déterminé par rapport à des mesures en laboratoires réalisées au préalable, tel que décrit ci-dessus, soit vérifié une fois l'appareil implanté (ce qui s'avère moins précis) en mettant en œuvre les méthodes exposées ci-dessous.

La principale mesure requise en matière de nivellement est la hauteur du marqueur de référence du capteur (RSM) relative à celle d'un repère terrestre proche du marégraphe (ou à un ensemble de repères locaux, voir Chapitre 6). Cette mesure permet d'exprimer les hauteurs de mer en fonction des références usuelles en marégraphie (ex : zéro hydrographique). À la **Figure 4.8**, nous avons désigné ce niveau de référence comme étant le zéro du marégraphe (TGZ), mais nous aurions tout aussi bien pu l'appeler zéro hydrographique ou référence de la station. Quoi qu'il en soit, le zéro du marégraphe, ou tout autre point de référence, sera déterminé en fonction du repère du marégraphe. (Il arrive que ces points de références soient redéfinis, auquel cas il est impératif de consigner toutes les modifications apportées.)

La hauteur du marqueur RSM située au-dessus du zéro du marégraphe (TGZ) peut être déterminée par nivellement. En prenant en compte l'offset du capteur (SO) il devient possible de déterminer le niveau de la mer par rapport au zéro du marégraphe (TGZ) de la manière suivante :

Niveau de la mer au-dessus du zéro du marégraphe (TGZ)
= RSM - SO - tirant d'air

Test de Van de Castele

André et al. (Supplément) soulignent qu'il est utile de procéder au test de Van de Castele afin de déceler les éventuelles erreurs liées à la datation et aux erreurs d'échelle du radar au moyen d'un autre marégraphe (ou même d'une échelle de marée) en guise de référence. Il est facilement possible de réaliser régulièrement ce test rudimentaire à l'occasion des visites d'entretien. Il est nécessaire pour le mener à bien de disposer de mesures sur des cycles de marée complets (Martin Miguez et al., 2008b). Cependant, faute de temps, des mesures réalisées à marée haute ou à marée basse (tout particulièrement en marées de vive-eau) auront à peu près la même valeur. Cette vérification peut se révéler très utile dans les

cas où il est fait usage de boucles de courant de 4-20 mA, et non pas de sorties numériques, et où l'échelle définie n'est pas la bonne. Les tests de Van de Castele ont été très utiles pour montrer que les mesures acoustiques réalisées dans des puits de tranquillisation pouvaient varier en fonction de la température, ce qui n'est pas le cas avec les marégraphes radar.

4.6 Après l'installation

Vérification de l'offset du capteur

Une fois le marégraphe radar installé, l'offset du capteur (SO) peut être confirmé (ou déterminé, si pour une raison quelconque l'appareil n'a pas été étalonné au préalable au laboratoire) de plusieurs façons. Quelle que soit la méthode choisie, un avantage certain découle du fait que les marégraphes radar, contrairement à certains autres procédés marégraphiques, ne présentent pas ou peu de dérive instrumentale sur le long terme et ne nécessitent donc pas de réétalonnages fréquents.⁹

La première méthode consiste à effectuer une série de mesures à l'aide d'une échelle de marée, afin de « préparer le terrain » comme évoqué plus haut, le niveau zéro de l'échelle étant déterminé par rapport à la référence du marégraphe (TGBM) (comme le montre par exemple la **Figure 4.11a** ; la photographie de la **Figure 4.11b**, prise au même endroit, illustre quant à elle le problème posé par les bateaux passant sous le faisceau, comme évoqué précédemment). On trouvera des recommandations sur la façon de procéder efficacement à des mesures à l'aide d'une échelle de marée dans le Volume I du présent Manuel. Il est difficile de savoir combien de relevés seront nécessaires, mais des conditions calmes permettront d'obtenir davantage de précision dans les observations et la détermination de l'offset du capteur. Il est possible que des relevés réalisés sur quelques jours seulement soient suffisants. Il convient d'effectuer ces derniers tout au long du cycle de marée, mais en ce qui concerne les endroits où l'on observe des marées de forte amplitude, la priorité doit être accordée aux relevés réalisés à l'étalement, lorsque le niveau de la marée évolue lentement. La régression

⁹ Dans la pratique, néanmoins, les marégraphes radar présentent sûrement une dérive sur le long terme et doivent aussi être affectés par la température, quelle que soit la qualité de leur conception. Les capteurs sont tous dotés de références fréquentielles et temporelles intégrées, généralement sous la forme d'oscillateurs à quartz à régulation de température, qui finissent par se détériorer sur le long terme. De plus, les propriétés électriques des composants mécaniques comme l'antenne et les câbles de raccordement, notamment les lignes de transmission des circuits imprimés, varient aussi dans une certaine mesure en fonction de la température (Øistein Grønlie, communication privée). Les dérives de ce genre seront toutefois probablement bien moins importantes que celles qui affectent les autres types de marégraphes.



Figure 4.11

(a) L'échelle de marée du marégraphe de l'île d'Aix sur la côte française en dessous d'un capteur radar Khrono présenté dans l'encadré. (Photos Université de La Rochelle).

(b) La même scène pendant la saison estivale touristique avec une embarcation sous le radar.

linéaire entre les niveaux radar et ceux de l'échelle de marée devrait produire une courbe à 45° (excepté si les données radar présentent une erreur d'échelle) – écart censé correspondre à la différence entre le niveau de référence de l'enregistreur du marégraphe radar et le niveau zéro de l'échelle de marée, ainsi qu'à l'écart-type estimé du décalage. Si celui-ci est de l'ordre du centimètre, alors il convient sans doute de réitérer la procédure dans des conditions plus propices. Illigner et al. (2016) rendent compte d'un certain nombre d'expériences menées dans des stations d'Indonésie concernant des mesures à l'échelle de marée et par plongeur en guise de contrôle permanent des offset radar.

La deuxième méthode repose sur un concept similaire à celui de l'essai en laboratoire décrit plus haut faisant

intervenir des plaques métalliques. Dans ce cas, la cible (que certains organismes appellent un étrier) est suspendue sous le marégraphe de façon à ce que la plaque se trouve à une certaine distance de la marque repère située sur le boîtier de l'appareil (déterminée à la conception du support et confirmée par des mesures au mètre ruban au laboratoire avant l'implantation). Les réflexions de la plaque métallique sont ainsi très précises et permettent d'obtenir un ensemble de données satisfaisant en l'espace d'une heure. En conséquence, le recours ponctuel à l'étrier (lors des visites d'entretien annuelles, par exemple) ne perturbe pas outre mesure le fonctionnement ordinaire de l'appareil. La **Figure 4.12** montre des exemples d'étriers à Luderitz, en Namibie et à Simon's Town, en Afrique du Sud. Un autre exemple situé à Holyhead, au nord du pays de Galles, est proposé par Pugh et al. (Supplément). Les articles de Farre et du SANHO (Supplément) donnent davantage de précisions quant à l'utilisation des étriers et l'étalonnage des marégraphes.

Une troisième méthode basée sur un « marégraphe dribbleur » est décrite par Pugh et al. (Supplément). La méthode en question s'est révélée être très précise pour déterminer le niveau de référence d'un marégraphe radar (ou de n'importe quel autre type de marégraphe). L'article explique comment il est possible à l'aide d'un



Figure 4.12 Exemples de l'utilisation de la cible « en étrier » à Luderitz en Namibie et Simon's Town en Afrique du Sud. (Photos Ruth Farre, Service hydrographique de la marine sud-africaine).

tube en plastique provisoire (semblable à un puits de tranquillisation, mais bouché en bas et muni d'un trou situé environ à hauteur du niveau moyen de la mer) et d'un capteur de pression, de déterminer avec précision le niveau de référence (le zéro instrumental) du marégraphe principal. L'avantage de cette méthode par rapport au système de l'étrier est qu'elle n'entraîne pas d'interruption des mesures.

Elle peut se décliner en plusieurs variantes, chacune s'inspirant du procédé du « marégraphe B » dédié aux marégraphes à pression (Woodworth et al., 1996). Supposons par exemple qu'un deuxième marégraphe radar temporaire soit utilisé pour émettre vers une cible constituée d'une plaque métallique, elle aussi installée à environ à la hauteur du niveau moyen de la mer). La courbe de marée tronquée du second radar permettrait alors de déterminer le zéro instrumental du marégraphe principal.

Enfin, on peut aussi envisager de retirer ponctuellement un marégraphe de son site d'implantation afin de

procéder à son réétalonnage en laboratoire, tout en le remplaçant par un autre appareil étalonné.

4.7 Autres capteurs utiles

L'expérience acquise jusqu'à présent avec les marégraphes radar prouve qu'ils fonctionnent parfaitement bien à certains endroits, tandis qu'à d'autres, ils sont clairement affectés par les vagues, à des degrés divers (Chapitre 3). Pour pouvoir se fier au radar en tant que capteur principal, il est nécessaire de mettre au point une méthode permettant d'évaluer la précision des mesures en fonction du temps et donc du climat de vagues. Pour pouvoir bien saisir la façon dont la précision du radar peut varier, il suffit de comparer les données issues du radar avec celles provenant d'un capteur à pression sur une longue période (voir notamment l'article de Pugh et al. dans le Supplément). Il est même envisageable, au moyen d'une installation ultérieure faisant intervenir les deux types de marégraphes à la fois, de cumuler les deux séries de données marégraphiques afin d'obtenir un ensemble optimal. (Ce traitement optimal a été appliqué aux données du réseau espagnol REDMAR lorsque les anciens marégraphes acoustiques et à pression ont été remplacés par des marégraphes radar Miros, Pérez et al., 2014).

Une suggestion en faveur de l'installation de marégraphes à pression peut surprendre dans le cadre d'un manuel consacré aux marégraphes radar, d'autant que les marégraphes à pression ne présentent aucun des avantages des dispositifs radar : leur installation nécessite l'intervention d'un plongeur, ou la mise à disposition d'un cadre auquel sera fixé le capteur afin de pouvoir le plonger dans l'eau et le visser d'en haut ; ils présentent des dérives instrumentales ; et il a été constaté que certains appareils de ce type se corrodent rapidement dans certains endroits, ce qui implique des remplacements fréquents.

En revanche, les capteurs de pression sont assez peu onéreux et peuvent fournir des données complémentaires à celles issues des appareils radar : ils sont capables d'échantillonner à des fréquences élevées, ce qui permet de tenir compte des vagues, et ils sont en mesure de fournir des données sans interruption au cours de phénomènes extrêmes susceptibles de conduire à l'immersion des marégraphes radar.

Dans le cadre du présent Manuel, qui part du principe que le marégraphe radar est l'instrument principal du site, il convient de considérer le marégraphe à pression comme un capteur à disposition dont les mérites sont complémentaires à la stabilité et à la probable longue durée de vie opérationnelle du marégraphe radar. Il y a quelques années, ces mêmes considérations ont conduit à la décision d'installer des marégraphes radar et des marégraphes à pression dans un certain nombre de sites en Afrique et dans l'océan Indien où l'on a acquis une solide expérience au regard de l'utilisation des deux procédés. Certains marégraphes à pression ont souffert de la corrosion en raison du matériau choisi pour leur boîtier, tandis que d'autres n'ont rencontré aucun problème particulier. Citons à titre d'exemple les excellents résultats obtenus par ce type d'installation mixte à Karachi depuis de longues années. Ailleurs, Fierro et Gaete (Supplément) sont intervenus de cette façon dans de nombreux sites au Chili, en préconisant un cycle de remplacement de 18 mois pour les capteurs de pression avec un entretien tous les six mois. Les capteurs de pression demeurent quoi qu'il en soit essentiels dans certains sites, où ils ne constituent pas seulement une option : la **Figure 4.6** montre ainsi (en été) un endroit où il est nécessaire de disposer d'un marégraphe à pression en hiver au cas où la mer gèle.

L'idée d'équiper les sites du GLOSS avec les deux types d'appareils, et d'avoir la possibilité d'enregistrer les tsunamis, a été adoptée dès le Volume IV du présent Manuel (p. 52 et 75 de COI, 2006). Il est indiqué dans le volume en question qu'il convient de disposer d'un capteur principal (radar, en l'occurrence) permettant d'enregistrer des valeurs moyennes toutes les 3 minutes (ou à une

fréquence plus élevée), tandis qu'un capteur à pression différentiel (qui mesure la différence entre la pression de l'eau et la pression atmosphérique) se charge d'enregistrer des valeurs toutes les minutes, ou plus fréquemment. Le marégraphe à pression joue ainsi le rôle de détecteur de tsunami primaire et fournit les données permettant de pallier les éventuelles lacunes du radar. L'ensemble des données est transmis sans délai.

Il est aussi possible d'envisager d'autres procédés que le marégraphe radar, comme un capteur acoustique à échantillonnage rapide en air libre. Cela pourrait permettre de compléter les données provenant du radar et fournir des renseignements concernant l'incidence des vagues. Cependant, un tel système présenterait lui aussi des inconvénients, certains étant les mêmes que ceux du système radar (la submersion en cas de phénomène extrême, par exemple). Le choix d'un capteur additionnel relève probablement des spécificités de chaque site. Néanmoins, il semble bien qu'un système à pression fiable constitue la meilleure solution pratique dans la plupart des cas. Quoi qu'il en soit, l'appareil radar ne saurait constituer une installation isolée dont les données seraient transmises au GLOSS sans s'être assuré au moyen de comparaisons avec d'autres procédés de la qualité des résultats obtenus, les comparaisons en question étant effectuées sur une période aussi longue que possible et donnant lieu à des conclusions dûment établies.

Enfin, s'agissant du recours à des capteurs de pression en complément d'un marégraphe radar, il peut être utile de signaler les autres configurations qui ont été suggérées, bien que nous ne puissions savoir si toutes ont été éprouvées. Il est par exemple possible d'avoir recours à un capteur de pression classique en tant qu'élément principal de la station, et à un marégraphe radar réfléchissant sur une cible située à mi-marée environ (système par conséquent comparable à un marégraphe à pression de mi-marée, tel que décrit dans les précédents volumes). Cela permettrait d'éviter les problèmes apparemment rencontrés par certains marégraphes radar avec les vagues, tout en profitant des avantages que présente le marégraphe à pression en matière d'échantillonnage rapide.

Comme précisé dans les volumes précédents du présent Manuel, nous recommandons d'accompagner toute mesure du niveau de la mer d'observations concernant la pression atmosphérique, les vents et les autres paramètres environnementaux présentant un intérêt direct dans le cadre de l'analyse des données marégraphiques (voir aussi le Chapitre 5). Plusieurs organismes tel que le SHOM équipent à présent leurs stations de webcams afin de pouvoir surveiller les conditions environnementales.

5. Récapitulatif des spécifications de GLOSS pour les sites équipés de marégraphes radar

Le Plan de mise en œuvre 2012 du GLOSS (COI, 2012) appelait l'ensemble des stations du réseau GLOSS à procéder à deux améliorations essentielles : 1) que chaque station soit en mesure de transmettre des données en temps réel à la Sea Level Station Monitoring Facility, et 2) que des mesures GNSS en continu soient effectuées au plus près des marégraphes. Les obligations des participants au programme GLOSS y étaient par ailleurs rappelées. Il convient donc de consulter le présent récapitulatif des exigences du GLOSS relatives aux marégraphes, et aux marégraphes radar en particulier, en parallèle des sections idoines du Plan de mise en œuvre (COI, 2012). Ce récapitulatif constitue donc une actualisation de l'Appendice 1 des Volumes III et IV du présent Manuel.

Exigences générales de GLOSS

- Le principal critère pour un marégraphe du réseau GLOSS a toujours été sa capacité à mesurer le niveau instantané de la mer avec un niveau de précision au moins centimétrique en toutes circonstances, c'est-à-dire quels que soient le niveau de la marée et le temps qu'il fait, qu'il y ait des vagues et des courants ou non, etc. Cela implique de porter une attention toute particulière à l'entretien de l'appareil et au contrôle de la qualité des données.
- Les marégraphes GLOSS doivent effectuer des mesures du niveau de la mer sur des périodes suffisamment importantes pour prévenir tout risque d'artéfact de repliement dû aux vagues (aliasing) ; des moyennes de 3, 5, 6, 10 ou 15 minutes ont en général été utilisées jusqu'à présent. Cependant, les marégraphes radar doivent être en mesure de fournir des données moyennées sur une minute, ou à une fréquence plus élevée si possible, surtout si le marégraphe est destiné à être utilisé dans le cadre des alertes aux tsunamis.
- La précision de la datation des données doit correspondre au degré de précision des niveaux, ce qui implique une précision de datation de l'ordre d'une minute au plus. Les enregistreurs de données les plus récents devraient toutefois permettre d'assigner des valeurs temporelles avec une précision de l'ordre de quelques secondes grâce à la technologie GNSS.
- Les mesures sont effectuées par rapport à un repère matériel du marégraphe local fixe et permanent

(TGBM). Celui-ci est relié à un certain nombre de repères secondaires afin d'éviter qu'il soit déplacé ou détruit. Il convient d'établir à intervalles réguliers (une fois par an, par exemple) les dénivelés entre le repère du marégraphe (TGBM), les repères secondaires et le zéro instrumental du marégraphe avec une précision de quelques millimètres. Voir le Chapitre 6.

- Tous les sites GLOSS doivent être équipés de récepteurs GNSS (GPS, le plus souvent) continus implantés aussi près du marégraphe que possible. Ces derniers servent à étudier les mouvements terrestres verticaux et à étalonner les altimètres satellites. Les relations de nivellement au niveau local entre le repère GNSS et le repère du marégraphe doivent aussi être établies à des intervalles réguliers et transmises au GLOSS au même titre que les autres données. Voir le Chapitre 6.

Exigences relatives aux marégraphes

- Le site doit disposer d'un marégraphe principal (un marégraphe radar ou toute autre technologie) effectuant des relevés toutes les 6 ou 15 minutes, par exemple, comme indiqué plus haut.
- Il doit aussi disposer d'un capteur de pression supplémentaire échantillonnant en général à une minute ou à fréquence plus élevée (toutes les 15 secondes, par exemple, ou mêmes toutes les secondes si des informations relatives aux vagues sont nécessaires) jouant le rôle de source principale d'information en cas de tsunami et permettant de combler les éventuelles lacunes du marégraphe principal.
- Lors du remplacement d'un dispositif, il convient de tenir compte du fait que les différents types de marégraphes peuvent présenter différentes erreurs systématiques. Ces erreurs n'ont pas forcément d'importance dans le cadre des séries temporelles si celles-ci reposent toujours sur le même procédé. En revanche, les changements de technologie peuvent conduire à des biais entre les anciennes et les nouvelles séries de données. Les marégraphes récents (radar ou non) sont par définition moins bien connus que les précédents, ce qui justifie qu'ils soient utilisés pendant un certain temps en parallèle des dispositifs plus anciens, jusqu'à ce que l'expérience acquise soit suffisante. Voir le Chapitre 3.

Exigences relatives aux marégraphes radar

- Il importe d'avoir conscience qu'en dépit des nombreux avantages que présentent les marégraphes radar sur les autres technologies, ces appareils ne sont pas pour autant les plus indiqués dans tous les cas de figure. Il faut donc parfois se résoudre à ne pas avoir recours à la technologie radar à des endroits où elle ne donnerait pas satisfaction.
- Avant de transmettre des données à GLOSS, il faut qu'une bonne expérience ait été acquise pour chaque site et que les marégraphes radar aient été confrontés à d'autres technologies, parfois antérieures, de façon à évaluer les incidences des vagues et d'autres éléments sur les mesures radar.
- Il convient de déterminer l'offset du capteur radar avant l'implantation puis périodiquement en cours d'exploitation.
- L'exigence relative à collecter des données toutes les minutes (ou toutes les trois minutes, etc.) implique de régler le marégraphe radar à une fréquence de 1 Hz ou plus si possible, à partir de laquelle il est possible d'obtenir des moyennes toutes les minutes. La façon de procéder à cet échantillonnage et à ces moyennes dépend du matériel utilisé (Section 4.4). Le capteur sera réglé sur le mode « temps de réponse rapide » de façon à tirer parti d'un rythme d'échantillonnage soutenu.
- Il sera nécessaire, dans les sites d'implantation où l'on a recours à un puits de tranquillisation pour effectuer un filtrage mécanique de procéder régulièrement à des opérations de nettoyage.
- Comme expliqué précédemment, dans les cas où des marégraphes radar viennent remplacer des dispositifs plus anciens, il convient d'observer une période de transition d'au moins un an de façon à déceler d'éventuels effets saisonniers, tout en documentant dûment les variations du niveau de la mer constatées entre les méthodes utilisées à différents intervalles (toutes les heures, tous les jours, tous les mois).

Exigences relatives aux sites d'implantation

- Lorsqu'un nouveau site d'implantation est envisagé, il convient de tenir compte des exigences générales évoquées au Chapitre 4, et notamment de celles qui s'appliquent aux sites accueillant les marégraphes radar.
- Le site concerné doit disposer d'une alimentation secteur ou de batteries, soit de panneaux solaires, ainsi que de sources d'alimentation de secours, tout particulièrement lorsque l'appareil est destiné à la surveillance des tsunamis et des ondes de tempête.

- Les mesures du niveau de la mer doivent s'accompagner d'observations concernant la pression atmosphérique et, si possible, les vents et les autres paramètres environnementaux présentant un intérêt direct dans le cadre de l'analyse des données marégraphiques. Dans le cas où il s'avère impossible d'installer une station météorologique sur place (ce qui peut être le cas dans un port très fréquenté, par exemple), il convient de s'arranger pour obtenir les informations voulues auprès de la station la plus proche.

Exigences en matière de télémesure et d'enregistrement des données

- Il convient en règle générale de transmettre les données radar par le biais de deux moyens de télémesure différents afin de prévenir toute perte en cas de défaillance de l'un d'entre eux. Il peut être considéré qu'en la matière, les recommandations du rapport de la COI (COI, 2011) s'appliquent, non seulement pour les tsunamis, auxquels le rapport est principalement consacré, mais pour les risques côtiers en général, et aussi pour l'acquisition de données dans le cadre des observations du niveau moyen de la mer. Selon le rapport, « des canaux de transmission de données redondants (Internet ou autre – à savoir via le BGAN d'Inmarsat ou un service équivalent –, mais aussi par liaison par modem commuté) doivent être adoptés lorsque cela s'avère possible. « La transmission redondante peut être connectée directement à la plateforme de collecte des données ou à l'enregistreur de données relié au capteur principal d'observation du niveau de l'eau, ou bien il peut s'agir d'une unité de transmission distincte connectée au capteur secondaire. La synchronisation de la plateforme de collecte des données doit être contrôlée en permanence par GPS ou Internet (d'autant plus important pour les transmissions par satellite). »
- On trouvera au Chapitre 7 du présent Manuel et auprès des organismes liés au programme GLOSS des renseignements concernant les avantages et les inconvénients des différents systèmes de télémesure, surtout ceux permettant un accès rapide aux données. Le SHOA (Chili), par exemple, a acquis une grande expérience en matière de recours aux capteurs radar dans le cadre de la surveillance des tsunamis puisque le pays a été frappé par trois phénomènes de ce type au cours des cinq dernières années. Le SHOA a constaté que les données en temps quasi réel du niveau de la mer reçues par la Sea Level Monitoring Facility de la COI par le biais du Système mondial de télécommunications (SMT) accusaient un retard substantiel, de plusieurs minutes, par rapport aux données recueillies par ses

propres stations d'acquisition, ce qui peut représenter un grave problème en cas de situation d'urgence.

- L'une des deux méthodes de télémesure devrait permettre de mettre les données à disposition de tous les utilisateurs intéressés sur le SMT, comme le recommande aussi la COI (COI, 2011), et en accord avec la politique d'échange de données océanographiques de la COI portant sur l'accès libre et aisé aux données dans le cadre de la Déclaration de Maurice de 2005. Pour chaque capteur, des observations peuvent être facilement transmises par le biais du SMT et en temps réel à l'aide des formats CREX de l'OMM (Chapitre 7) et, en cas de difficultés, les utilisateurs du SMT peuvent obtenir de l'aide auprès de l'OMM.
- Les opérateurs doivent veiller à ce que les données radar soient transmises en temps réel, quelle que soit la méthode choisie (satellite, Internet ou autre), au Sea Level Monitoring Station Facility de la COI hébergé par le VLIZ (Institut flamand de la mer) (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>), ce qui permet un suivi efficace des mesures du niveau de la mer du monde entier.
- Au cas où les données en temps réel présenteraient des lacunes ou des erreurs de télémesure, il est souhaitable que les données soient aussi stockées sur des enregistreurs de données localement et qu'elles soient régulièrement transmises aux centres de traitement des données en temps différé du GLOSS.

Exigences opérationnelles

- Il est possible avec les données temps-réel de vérifier la qualité des données en permanence. Le Sea Level Station Monitoring Facility de la COI permet par exemple de visualiser des séries constamment mises à jour. Les contrôles effectués régulièrement (parfois tous les jours) permettent de repérer les dysfonctionnements au plus vite, ce qui participe à l'amélioration des séries de données sur le long terme.
- Les données issues de marégraphes implantés dans des régions polaires ou isolées pour d'autres raisons sont forcément inspectées moins fréquemment, à moins qu'il ne soit possible de mettre en place une transmission des données par satellite. De même, les données des quelques marégraphes qui n'enregistrent que sur marégrammes mettront un certain temps à parvenir aux centres pour y être évaluées, ce qui fait de l'actualisation de ces appareils une priorité.

Partie 2

Sections mises à jour de précédents manuels

6. Niveau de référence et nivellement

6.1 Introduction

Ce chapitre porte sur le niveau de référence des marégraphes. Le niveau de référence est essentiel pour tous les marégraphes, s'il faut en obtenir des données valables à long terme sur le niveau de la mer, à des fins de recherche scientifique, et pouvant être intégrées dans des banques de données telles que le PSMSL (Chapitre 8). Les seuls instruments de mesure pour lesquels le niveau de référence n'est pas exigé sont ceux installés uniquement afin d'identifier les variations rapides du niveau de la mer dues à des tsunamis, des météo-tsunamis ou éventuellement des marées de tempête. Toutefois, dans la pratique, plusieurs instruments de mesure des tsunamis sont installés dans le but de fournir des données pour des applications « à risques multiples », qui comprennent la variation du niveau moyen de la mer. Par conséquent, ils nécessitent également un niveau de référence.

La Section 6.2 présente les recommandations relatives au niveau de référence local au moyen d'un nivellement à partir du marégraphe jusqu'à une série de repères matériels terrestres située à proximité. Elle est semblable aux sections des précédents volumes du présent Manuel. Nous résumons à nouveau ces exigences parce

qu'elles sont d'une importance fondamentale pour le fonctionnement de tout marégraphe. Des aspects spécifiques relatifs au niveau de référence local des marégraphes radar sont abordés à la Section 6.2.

Les marégraphes mesurent le niveau relatif de la mer, l'adjectif relatif étant utilisé car les instruments fournissent une hauteur relative à un repère implanté à terre. Les techniques géologiques et archéologiques de mesure du niveau de la mer permettent également d'obtenir des renseignements relatifs sur le niveau de la mer. Par conséquent, tout enregistrement du niveau de la mer à long terme intégrera une contribution des mouvements verticaux du sol qui peuvent être aussi ou plus importants que ceux des variations du niveau de la mer dus aux variations des courants océaniques ou aux changements climatiques. Les mouvements terrestres verticaux (VLM pour Vertical Land Motion) résultent d'un ensemble de processus naturels et anthropogéniques de la Terre solide, au rang desquels : l'ajustement glacio-isostatique (GIA), la tectonique (séismes), le compactage du sol ou le pompage de l'eau souterraine (voir Pugh et Woodworth (2004) pour une présentation de ces thématiques). Il est essentiel de surveiller les mouvements verticaux du sol au niveau des marégraphes, quels que soient

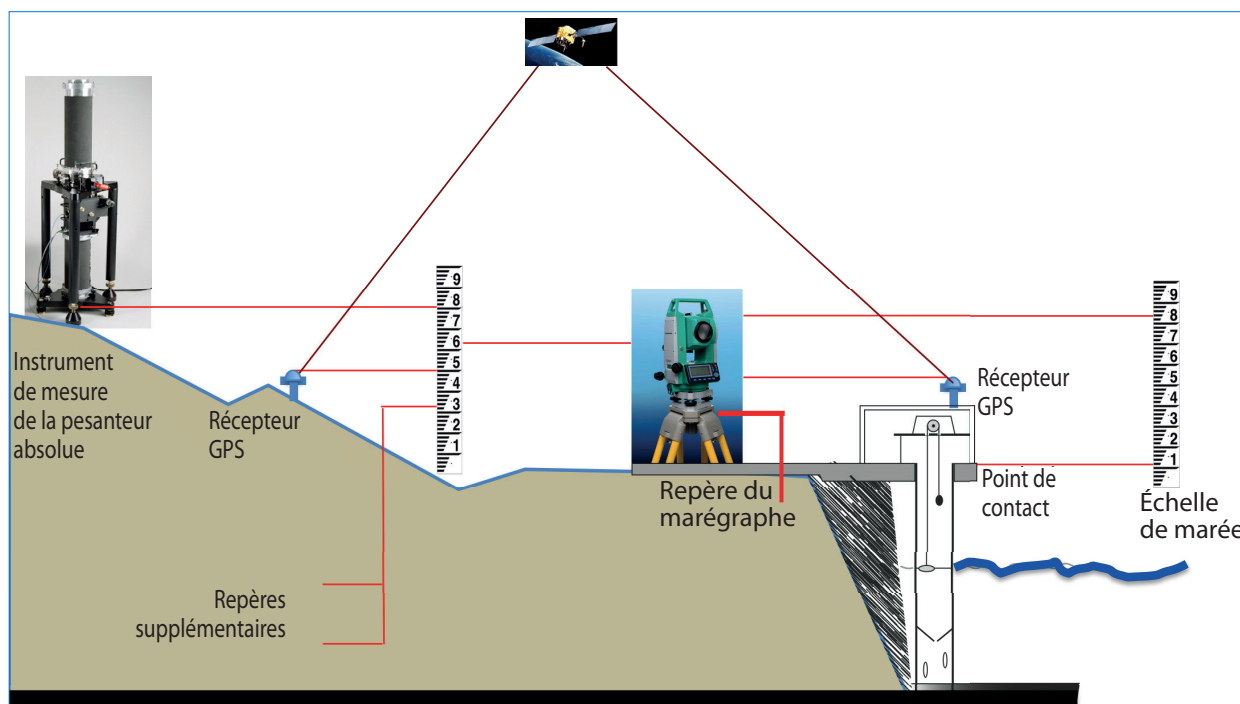


Figure 6.1 Une description schématique d'une station marégraphique co-localisée avec un récepteur GNSS pour la détermination de la hauteur ellipsoïdale du niveau de la mer et pour la surveillance des mouvements verticaux du sol. Cette figure montre également le suivi des mouvements verticaux à l'aide d'un gravimètre absolu.

les processus géologiques qui s'observent sur leurs sites d'implantation, afin de comprendre l'importance relative de ces mouvements dans les enregistrements du marégraphe.

La principale méthode de surveillance des mouvements du sol implique le déploiement de récepteurs du système mondial de navigation par satellite continu (CGNSS) près des marégraphes. Ce thème est examiné à la Section 6.3 et présenté sous la forme de schéma à la **Figure 6.1**. Les mesures du CGNSS sont utiles à l'analyse scientifique des données du marégraphe, et à l'étalonnage des informations fournies par les altimètres satellitaires (Mitchum, 2000 ; Leuliette et al., 2004). Au cours des trois décennies passées, l'altimétrie satellitaire est devenue la principale technique de surveillance des changements globaux du niveau de la mer (Chapitre 9 de Pugh et Woodworth, 2014). Une mesure d'altimètre est géocentrique, le niveau de la mer étant mesuré par rapport au centre de la Terre, ou par rapport à un ellipsoïde standard ayant pour référence le centre de la Terre. Les données du CGNSS peuvent être utilisées pour convertir la mesure relative du marégraphe en une mesure géocentrique afin que les deux types de données puissent être combinés dans une même référence.¹⁰ Le plan de mise en œuvre du réseau GLOSS exige l'équipement pour chaque marégraphe d'un récepteur du CGNSS à proximité (COI, 2012).

Toutefois, certaines exigences du GNSS concernent également les marégraphes qui ne font pas partie du GLOSS ou qui n'ont pas un CGNSS. Pour divers thèmes de recherche scientifique, il est fortement souhaitable de connaître les hauteurs ellipsoïdales (les hauteurs par rapport à l'ellipsoïde standard) de leurs principaux repères et, partant, des données du marégraphe. Ces exigences sont présentées à la Section 6.4.

La Section 6.5 présente les autres méthodes de mesure des mouvements terrestres verticaux. Étant donné qu'elles ont été examinées plus amplement ailleurs (par exemple, Pugh et Woodworth, 2014), nous allons tout simplement les résumer ici. La Section 6.6 porte sur les techniques liées au GNSS qui sont en cours d'élaboration et qui pourraient à l'avenir être utiles aux études sur le niveau de la mer.

¹⁰ Le système de référence qui est presque toujours utilisé est le Repère de référence terrestre international (ITRF) qui est défini par quatre techniques géodésiques : GNSS, DORIS, télémétrie laser sur satellites et interférométrie à très longue base. De nouvelles versions de l'ITRF sont publiées régulièrement à quelques années d'intervalle. Par exemple, la version de 2008 est décrite en détail par Altamimi et al. (2011). Au moment de la rédaction, la version la plus récente était celle de 2014 (http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/).

6.2 Repères locaux et nivellement

Les repères (BM pour Benchmarks) sont des points de référence clairement identifiés qui définissent le niveau du sol près d'un marégraphe. Les repères peuvent être définis sur toute surface stable, telle qu'un quai ou un mur du port, ou un grand bâtiment. Un repère se trouvant sur une surface verticale peut prendre la forme d'une rainure horizontale, ou d'un repère scellé à la surface avec une partie horizontale sur laquelle le personnel chargé de l'exploration peut poser un instrument (une mire). Toutefois, la plupart des repères à travers le monde sont des boulons en laiton plats, en forme de dôme ou à tête ronde qui sont fixés avec du béton ou collés dans la roche solide horizontale (**Figure 6.2**). GLOSS nécessite la présence d'au moins cinq repères dans un rayon de quelques centaines de mètres, ou au plus à 1 km du marégraphe. Les repères doivent être clairement identifiés dans les métadonnées de la station par un nom ou un numéro, avec une description de la marque, des photos, les références au réseau géodésique national, et une carte locale. Ces hauteurs relatives doivent généralement être mesurées chaque année à l'aide d'un nivellement de haute précision et documentées dans les métadonnées de la station.

La fréquence exacte du nivellement dépendra de la géologie locale. Sur un sol stable, il peut être adéquat de procéder à un nivellement à quelques années d'intervalle. Par contre, sur un sol instable, le nivellement devrait être plus fréquent. Des nivellements supplémentaires peuvent effectuer selon les exigences du pays. Tout repère présenté comme instable sur une longue période doit être identifié et remplacé par d'autres. Si aucun changement n'est observé pendant de longues périodes, il est raisonnable de présumer que la partie de la terre située autour du marégraphe est « stable ». La zone locale peut subir, bien entendu, des mouvements verticaux à plus grande échelle spatiale. Cela peut être déterminé par un nivellement étendu, des campagnes GNSS ou par des techniques relativement nouvelles telles que InSAR (voir ci-dessous). Les hauteurs du repère peuvent être exprimées en fonction du réseau de nivellement d'un pays, et faire l'objet d'un contrôle périodique par rapport à ce réseau, mais cela n'est pas indispensable pour la plupart des applications liées à GLOSS (autres que le World Height System Unification présenté ci-dessous).

Les sections suivantes définissent les principaux repères et marques de référence qui doivent être régulièrement nivelés, puis un bref guide des procédures de nivellement. Pour des références sur les systèmes de référence nationaux, le zéro des cartes marines et leurs



Figure 6.2

- (a) Un repère en laiton en forme de dôme du National Ocean Survey des États-Unis (prédécesseur du Service océanique national) avec un diamètre d'environ 8,89 cm, faisant parti des nombreux (et parfois décorés) repères utilisées par les organismes géodésiques des États-Unis (de Leigh, 2009).
- (b) Un plus petit repère en laiton en forme de dôme utilisé par le Centre océanographique national du Royaume-Uni (NOC), dont plusieurs sont présentés en.
- (c) installés dans un rocher près d'un marégraphe aux Îles Falkland. (Photos NOAA et NOC).

relations avec les repères décrits ici, le lecteur est renvoyé au Volume IV et aux ouvrages portant sur le niveau de la mer tels que Pugh et Woodworth (2014).

par un nivellement de haute précision, car cela permet de définir la hauteur du nouveau repère du marégraphe par rapport à l'ancien.

6.2.1 Repère du marégraphe (TGBM)

Le repère du marégraphe est le principal repère choisi parmi au moins quatre points, en raison de sa stabilité et sa longévité, ou encore parce qu'il est proche du marégraphe. Le repère du marégraphe (TGBM) sert de référence pour exprimer les valeurs du niveau de la mer acquises par le marégraphe. Il peut parfois s'avérer nécessaire de redéfinir le repère du marégraphe, si l'original est détruit par les activités de développement local. C'est pour cette raison qu'il est avantageux d'avoir plusieurs repères locaux, régulièrement interconnectés

6.2.2 Repère de la station GNSS (GNSSBM)

Le repère de la station GNSS (GNSSBM) est le repère généralement situé le long du monument ou se situe l'antenne GNSS. Dans certains cas, le point de référence de l'antenne (ARP) du GNSS peut fonctionner comme le GNSSBM (bien que l'ARP ne soit pas toujours accessible directement par nivellement). Sur certains sites, le GNSSBM peut être situé à plusieurs centaines de mètres du repère du marégraphe et du marégraphe lui-même. Sa hauteur doit également être mesurée régulièrement par rapport aux autres repères à travers un nivellement

de haute précision. Lorsque la distance de séparation est importante, la différence de hauteur pourrait être mesurée par des mesures GNSS différentielles. Dans ces cas, il est important de savoir si le nivellement ou le GNSS a été utilisé pour la connexion, voir ci-dessous.

6.2.3 Point de contact (CP) du marégraphe

Le point de contact d'un marégraphe est un type de repère, ou une marque verticale associée au marégraphe lui-même. Dans le cas de marégraphes radar, il se confond au point de référence présenté au Chapitre 4 (RSM) et indiqué dans les **Figures 4.4** et **4.8**. Après nivellement entre le repère du marégraphe (TGBM) et ce point de contact (CP), les données du marégraphe peuvent être exprimées par rapport à la référence du marégraphe (TGBM) (en tenant compte de l'offset du capteur pour un marégraphe radar suivant la présentation faite au Chapitre 4). Ce qu'il faut retenir c'est que le point de contact accompagne le marégraphe ; s'il s'agit d'un type de marégraphe différent sur le site, il aura un point de repère différent qui nécessitera un nouveau nivellement au repère du marégraphe. Voir les précédents volumes du présent Manuel pour la présentation des points de contact dans différents types de marégraphes.

6.2.4 Zéro du marégraphe (TGZ)

Le zéro du marégraphe est le niveau auquel le marégraphe enregistrerait zéro comme niveau de la mer (après la prise en compte de l'offset du capteur pour le radar) et qui peut être exprimé relativement au repère du marégraphe (TGBM). Dans la pratique, il est peu probable que le niveau de la mer baisse en dessous du zéro du marégraphe si le marégraphe a été correctement installé.

6.2.5 Niveau de référence local révisé (RLR)

La référence RLR pour un site est un niveau de référence défini comme un offset arbitraire par rapport au repère du marégraphe (TGBM), de sorte que le niveau de la mer RLR aient des valeurs numériques avoisinant 7 000 mm. Le concept de niveau de référence local révisé (RLR) a été inventé par le PSMSL afin de pouvoir construire les longues séries temporelles de variations du niveau de la mer, même si certaines parties de ces séries ont été acquises avec différents marégraphes et sont relatives à différents repères (mais reliés entre eux). La valeur approximative de 7 000 mm a été choisie afin que les



Figure 6.3

(a) Un exemple type de nivellement sur le site d'un marégraphe, dans ce cas à St. Jean de Luz en France qui utilisait auparavant un marégraphe à flotteur conventionnel et aujourd'hui un Krohne Optiwave 7300C (Photo SHOM),

ordinateurs de l'époque (fin des années 1960) n'aient pas à enregistrer des nombres négatifs. Le niveau de référence local révisé est défini séparément pour chaque site de marégraphe et il ne peut pas être lié à un autre sans une connaissance des dénivelés entre les repères de chaque site. Lorsque les données du niveau de la mer sont envoyées au PSMSL ou vers un autre centre du niveau de la mer, il est essentiel que l'intégralité des informations sur les relations géodésiques entre le repère du marégraphe et d'autres repères et les différents niveaux de référence nationaux accompagnent les données.

6.2.6 Procédures de nivellement

Le personnel qualifié doit effectuer le nivellement avec un niveau numérique de bonne qualité et une mire à code-barres. Si les repères sont très éloignés, il sera nécessaire d'établir des points d'arrêt clairement identifiés à des intervalles de 50 m sur surface plane. Ces points peuvent être matérialisés en peignant un petit cercle autour du point et, sur des surfaces plus douces, en vissant une broche à tête ronde. Sur des surfaces dures, un crapaud de nivellement peut être utilisée comme point d'arrêt. L'instrument de nivellement peut ensuite être positionné entre un repère et le premier point d'arrêt et les relevés



Figure 6.3

(b) Utilisation d'un bateau pour le nivellement du point de référence radar à Sur (Sultanat d'Oman).
(Photo T. Schöne, GFZ).

effectués par le personnel à ces deux points. Les mesures sont ensuite prises entre les points dans l'ensemble du réseau, les relevés étant effectués dans un sens dans l'ensemble du réseau puis repris dans le sens inverse. Les instruments de nivellement munis de dispositifs d'enregistrement chronologique automatique des données peuvent supprimer l'essentiel de l'arithmétique fastidieuse associée à l'utilisation d'un niveau simple, bien que l'utilisation d'un tel niveau simple soit très instructive. La [Figure 6.3a](#) présente une scène type de nivellement d'un marégraphe.

Comme c'est le cas avec plusieurs autres aspects des opérations concernant les marégraphes, le principe est que « c'est en forgeant qu'on devient forgeron ». Les pages Internet consacrées à la formation au PSMSL (Chapitre 9) fournissent un guide pratique au nivellement, destiné aux personnes qui connaissent peu la technique, préparé par le Prof. Charles Merry de l'Université de Cape Town. Le but doit être de niveler le réseau local à une précision de l'ordre du mm. Les mesures doivent être soigneusement documentées et conservées dans les métadonnées de la station. Les renseignements sur le nivellement doivent également être mis à la disposition de SONEL (voir section 8.1.7).

Le point de contact d'un marégraphe à flotteur et à puits peut poser des difficultés lors du nivellement

étant donné qu'il pourrait être confiné plutôt qu'à l'air libre comme c'est le cas avec les repères classiques. Cela revient à dire que le nivellement doit parfois s'effectuer par petites étapes afin de négocier des portes d'accès, etc. Les marégraphes radar auront également un point de repère (ou point de référence) qui pourrait également être difficile d'accès, en raison du fait que le radar se trouve sur l'eau. Toutefois, une bonne conception de l'installation du marégraphe peut aider à résoudre ce problème (section 4.3). La fourniture d'un collet d'installation, tel que celui utilisé par la NOAA en apporte une solution parfaite. De la même manière, en cas d'utilisation de bras en porte-à-faux, il vaut mieux que le bras soit conçu de telle sorte que, lorsque le marégraphe est installé à son extrémité, il soit connu que la hauteur du point de contact (point de référence) doit être relative à un autre point situé à l'extrémité du bras qui tend vers la terre. Si le bras est susceptible de se déformer au cours de son cycle de vie, alors il est essentiel que la relation entre le point de contact supposé et le point qui tend vers la terre soit contrôlée régulièrement.

L'une des techniques de nivellement au point de contact par conditions calmes dans les ports où il existe un soutien local, consiste en l'utilisation d'un bateau ou d'une plateforme flottante, bien que cela nécessite plus d'effort physique que dans le cadre du nivellement normal ([Figure 6.3b](#)). Le nivellement s'effectue avec un niveau standard, le sommet de la mire étant tenu au point de repère. (Par ailleurs, la mire pourrait être inversée, en tenant cette fois sa valeur zéro au point de contact ; lorsqu'une mire à code-barres est utilisée, un niveau numérique peut être défini afin de reconnaître qu'elle est inversée.) Les relevés prendront plus de temps que dans le cas du nivellement normal et seront moins exacts. Néanmoins, les relevés peuvent être repris plusieurs fois et vérifiés pour en assurer la cohérence au niveau du millimètre.

6.3 Suivi des références par CGNSS

Le CGNSS est une technique mature de suivi des hauteurs ellipsoïdales des repères, par exemple le GNSSBM près d'un marégraphe présenté ci-dessus (Teferle et al., 2009 ; Santamaría-Gómez et al., 2012 ; Wöppelmann et Marcos, 2016). Dans le domaine des marégraphes, cette technique est souvent désignée CGNSS@TG (précédemment CGPS@TG). Cette technique permet de définir le niveau moyen de la mer dans un système de référence global géocentrique, comme pour les données altimétriques satellitaires, et par la suite permettre de comprendre séparément les contributions aux variations

du niveau de la mer en termes de variations absolues de niveau de la mer et de mouvement verticaux du sol.

Le développement du GNSS pour cette application remonte aux trois dernières décennies.¹¹ Au cours des premières années, les mesures près des marégraphes étaient effectuées par séries de quelques jours suivies de longues périodes (appelées GNSS, EGNSS « d'époque » ou « épisodique »), souvent à l'aide de récepteurs mono-fréquence. Par la suite, la technique a été perfectionnée pour devenir le CGNSS@TG utilisant des récepteurs bi-fréquence, une étape essentielle étant donné qu'une série temporelle continue GNSS est supérieure à un EGNSS dans la mesure où elle permet d'apprécier pleinement les spectres des signaux.

Un aspect essentiel de ce travail est l'existence du Service GNSS international (IGS) qui coordonne la collecte et le traitement des données à partir d'un réseau mondial de stations de suivi GNSS. Cet ensemble de données permet

une plus grande précision dans le calcul des orbites des satellites de la constellation GNSS par rapport à ceux qui sont couramment disponibles et, partant, de déterminer avec une plus grande précision les coordonnées des repères du GNSS. Pour les études sur le niveau de la mer, les données du GNSS obtenues de récepteurs du réseau IGS et de marégraphes sont à nouveau traitées par le groupe de travail IGS TIGA (voir ci-dessous) pour fournir des séries temporelles de mouvements verticaux du sol pour nos besoins. Les résultats sont répartis à travers le Système d'observation du niveau des eaux littorales (SONEL) qui est le centre officiel d'archivage et d'analyse des données pour le système GLOSS (voir Chapitre 8, également COI, 2012).

Comme indiqué ci-dessus, tous les marégraphes GLOSS doivent être équipés de récepteurs CGNSS (COI, 2012). Toutefois, à mesure que le prix des récepteurs baisse, il devient plus pratique d'équiper davantage de marégraphes. Pour les études du niveau de la mer, il



Figure 6.4 Un marégraphe acoustique à Burnie au nord de la Tasmanie en Australie, et à droite, un pilier spécial surmonté d'une antenne GNSS. Photo de Geoscience Australia. Tiré de Pugh et Woodworth (2014).

¹¹ Voir les références sur le lien http://www.psmsl.org/train_and_info/geo_signals/gps.php.

est recommandé que l'équipement CGNSS soit installé directement sur le marégraphe afin qu'il puisse surveiller directement tout mouvement du marégraphe. Si l'antenne est adjacente au repère du marégraphe, alors le repère du GNSS et le repère du marégraphe vont coïncider, ce qui élimine le besoin de nivellement entre les deux (bien qu'il soit nécessaire de mesurer la différence de hauteur entre l'ARP et le repère du marégraphe). Le repère du marégraphe est le point fondamental géométriquement défini par les mesures du GNSS et auquel toutes les mesures du niveau de la mer sont liées. Dans la pratique, les sites des marégraphes dans des ports à forte activité ne sont pas toujours indiqués pour les mesures du GNSS. Cela peut être dû au manque de visibilité du ciel, à la présence de multi-trajets ou en raison d'interférences radio, auquel cas il faut choisir un site qui ne présente pas ces problèmes, mais qui est le plus près possible du marégraphe. Sur certains sites, un second récepteur CGNSS peut être installé à quelques kilomètres de la côte, permettant ainsi une comparaison entre les mouvements terrestres verticaux sur les terres intérieures et au port. Sur certains sites, si le récepteur CGNSS fonctionne à un taux d'échantillonnage élevé et est relié à la télémétrie à large bande passante, la série des mouvements verticaux de la croûte terrestre peut fournir des renseignements sismiques aux centres d'alerte régionaux pour leur permettre de déterminer les magnitudes des séismes et de calculer les alertes tsunamis quasiment en temps réel.

Installation

Une antenne GNSS doit être installée le plus près possible du marégraphe, ou même être fixée sur l'équipement lui-même si cela est possible (**Figure 6.4**). Les antennes sont parfois installées sur des piliers géodésiques à proximité du GNSSBM, de sorte que le nivellement conventionnel puisse être utilisé pour assurer une liaison géodésique régulière au repère du marégraphe. Sur d'autres sites, les antennes sont installées sur les toits des immeubles à proximité des marégraphes, ce qui est moins approprié. L'antenne est reliée par un câble au récepteur, qui peut fonctionner sur le secteur ou à d'autres sources d'énergie électrique. Des conseils sur le fonctionnement des équipements GNSS au niveau des marégraphes sont disponibles, y compris l'installation des antennes (type de pilier) et les méthodes de transmission des données du récepteur à un centre pour analyse (Bevis et al., 2002 ; COI, 2006).¹²

¹² Voir également <https://igsceb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.html> pour des directives sur l'aménagement des sites sur les 'sites TIGA' et NOAA (2015) pour des conseils aux groupes des États-Unis. Des conseils individualisés peuvent également être obtenus auprès de SONEL ou des membres du groupe de travail TIGA.

Importance des connexions

Si une station CGNSS est installée à une certaine distance du marégraphe, et si des connexions géodésiques ne sont pas établies entre les deux équipements, leurs séries distinctes pourront toujours être utilisées de manière utile dans le cadre des études portant par exemple sur les variations du niveau de la mer et les mouvements terrestres verticaux dans la zone, ou l'étalonnage de l'altimétrie satellitaire, si l'on suppose que les taux de variation des mouvements verticaux du sol sur les deux sites sont les mêmes. Pour ces études, c'est le taux de mouvement vertical du sol qui constitue la variable importante, plutôt que la différence de hauteur ellipsoïdale moyenne entre le repère GNSS et le repère du marégraphe.

Toutefois, les liaisons ou connexions géodésiques sont importantes pour deux raisons. Tout d'abord, les taux de mouvements verticaux ne sont pas les mêmes sur les deux sites et toute différence doit être connue et surveillée. Ensuite, la différence de hauteur ellipsoïdale entre le repère GNSS et le repère du marégraphe doit être connue pour les études géodésiques telles que le système mondial d'unification des mesures altimétriques (World Height System Unification, WHSU) présenté ci-dessous. Il est essentiel de déterminer si la connexion géodésique est établie en utilisant le nivellement ou par une mesure GNSS différentielle.

Le projet TIGA de l'IGS

En 2001, le service GNSS international a établi le projet pilote TIGA (initiales de « tide gauge », marégraphe en anglais), qui s'est donné pour mission de traiter et d'analyser les données issues des stations CGNSS co-localisées aux marégraphes à travers le monde dans un cadre de référence mondial cohérent (voir <http://adsc.gfz-potsdam.de/tiga/> pour plus de détails). Le principal objectif était d'en savoir plus sur les problèmes pratiques liés à l'utilisation du CGNSS dans l'environnement côtier. Depuis 2010, TIGA est passé de projet pilote à un groupe de travail en reconnaissance de son importance à long terme. Les centres d'analyse de TIGA procèdent au retraitement des données GNSS à partir d'archives avec les logiciels et méthodes les plus récents afin de fournir des coordonnées géocentriques homogènes et cohérentes et des séries chronologiques des mouvements verticaux. TIGA travaille spécifiquement en étroite collaboration avec SONEL pour archiver les données CGNSS et fournir les produits d'analyse. Le site web de SONEL est lié à celui de PSMSL afin de permettre une analyse combinée des renseignements sur les variations du niveau de la mer et les mouvements du sol.

6.4 Suivi des références par mesure de campagnes (EGNSS)

L'une des applications essentielles du GNSS, même pour les marégraphes qui ne sont pas équipés de CGNSS, est la mesure de la hauteur et de la position du repère du marégraphe lors d'une ou plusieurs campagnes EGNSS. Cette information est nécessaire en premier lieu pour déterminer exactement où se situent le repère du marégraphe et le marégraphe lui-même, et les coordonnées ainsi produites peuvent être combinées avec les cartes dans les métadonnées de la station (Chapitre 8). Il peut s'avérer surprenant pour certains lecteurs que même à ce jour nous n'ayons pas de détails précis sur les emplacements de certains marégraphes pour lesquels il existe un ensemble de données historiques.

L'autre importance de cette information réside dans le fait qu'elle permet d'utiliser les données sur le niveau moyen de la mer issues de ces stations, ainsi que l'information issue des marégraphes équipés de CGNSS, dans le cadre d'études géodésiques telles que le WHSU qui portent sur la faisabilité de l'adoption de nouveaux modèles du géoïde comme niveau de référence mondial (Woodworth et al., 2012). Pour ces études, nous avons besoin de données sur le niveau moyen de la mer exprimé sous forme de hauteurs ellipsoïdales, ainsi que relativement au repère du marégraphe, qui implique une campagne EGNSS sur un repère GNSS et une connexion géodésique entre le repère GNSS et celui du marégraphe. Il ressort que la méthode utilisée pour la connexion détermine si la valeur essentielle dans le WHSU est la hauteur ellipsoïdale du géoïde au niveau du repère GNSS ou du repère du marégraphe. Par conséquent, si une bonne distance sépare les deux points, et si les deux valeurs du géoïde sont significativement différentes, alors il est essentiel de savoir quelle méthode a été utilisée pour établir la connexion.

Les données obtenues lors des campagnes EGNSS de courte durée peuvent être traitées de deux manières. La première consiste à envoyer les données GNSS à SONEL, qui traitera les données à l'aide des méthodes modernes et retournera les coordonnées horizontales et verticales au fournisseur de données. La deuxième consiste au traitement des données par le fournisseur, à l'aide d'outils en ligne, tels que le Positionnement ponctuel précis du Système canadien de référence spatiale issu de Ressources naturelles Canada (RNCAN, 2015). Ces outils sont disponibles gratuitement et peuvent fournir à toute agence un positionnement GNSS haute performance dans le cadre d'une stratégie de traitement de pointe. Par conséquent, si l'agence le préfère, les données peuvent être traitées localement, et les coordonnées transmises

à SONEL, au lieu de transmettre les données. En général, les données issues d'une campagne EGNSS de plusieurs jours peuvent être traitées en moins d'un jour, la précision des hauteurs ellipsoïdales qui en résulte étant meilleure que 5 cm, ce qui est approprié pour le WHSU et des études similaires en cours. Nous avons établi à l'aide de tests que les hauteurs calculées à l'aide de ces outils en ligne diffèrent de seulement 2 à 3 cm de celles obtenues à l'aide des dernières solutions de SONEL (Santamaría-Gómez et al., 2012).

6.5 Autres méthodes de mesure des mouvements verticaux du sol

Il existe d'autres méthodes de mesure des mouvements verticaux du sol qui sont décrites dans les manuels tels que Pugh et Woodworth (2014). Les deux premières mentionnées ci-dessous ont été décrites dans le Volume IV tandis que la troisième a été développée au cours de la dernière décennie.

Détermination d'orbite et radio positionnement intégrés par satellite (DORIS)

DORIS a été conçu par l'Agence spatiale française (CNES) pour permettre de déterminer avec précision l'orbite des satellites, y compris ceux équipés d'altimètres radar. Il hérite des systèmes Doppler antérieurs utilisés pour le suivi des satellites. Ce système consiste en un réseau de balises au sol avec une couverture quasi-mondiale, chaque balise bi-fréquence émettant des signaux à des fréquences connues (2036.25 et 401.25 MHz) vers une antenne, un récepteur radio et un oscillateur ultra-stable à bord du satellite. En raison de l'effet Doppler, les signaux reçus connaissent un décalage en fréquence, et l'analyse de ces décalages permet de déterminer avec précision l'orbite du satellite. Les produits de l'analyse sont les coordonnées moyennes de chaque balise et une série chronologique du mouvement à trois dimensions de chaque balise qui peut être étudiée en même temps que la série temporelle fournie par le GNSS. Les données de DORIS ont été appliquées aux études du niveau de la mer (par exemple, Ray et al., 2010), certes, mais le fait qu'il existe de nouvelles balises près des marégraphes, et qu'il y ait des limites dans le nombre de balises dans le réseau mondial signifient que DORIS n'a jamais été aussi approprié que le GNSS pour la détermination des mouvements terrestres verticaux près des marégraphes.

Gravimétrie absolue

Un gravimètre absolu mesure l'accélération d'un coin-cube réflecteur en chute libre dans un vide à l'aide d'un

interféromètre laser stabilisé à l'iode avec une précision qui est généralement de 1-2 μgal (ou 1-2 $\times 10^{-9}$ de la pesanteur g). Cela correspond à une exactitude sur la hauteur de 5 à 10 mm calculée sur la base d'une formule qui est fonction de la densité du manteau supérieur. Des campagnes de plusieurs jours sont souvent menées sur un site près de chaque marégraphe. Il n'est généralement pas conseillé d'installer l'instrument sur la côte proprement dite en raison de la survenue de micro séismes (un bruit de fond de petits signaux sismiques causé par des vagues et la houle dans l'océan voisin). Il est préférable d'opter pour les bâtiments anciens (églises, écoles, etc.) qui ont des sous-sols secs et qui ont une faible probabilité d'être substantiellement modifiés à l'avenir. L'installation est un paramètre important, l'instrument concerné devant être installé sur une assise solide pour laquelle le mouvement vertical du sol est représentatif de la zone environnante.

Un aspect important de la gravimétrie absolue réside dans le fait qu'elle est une technologie totalement différente par rapport aux techniques géodésiques spatiales, et qu'elle ne présente pas les incertitudes liées à la construction de l'ITRF. Toutefois, plusieurs facteurs limitent l'utilisation de la pesanteur absolue par rapport au GNSS. L'un de ces facteurs est le coût des gravimètres. Un autre est le fait que les données ne peuvent être obtenues que pour les campagnes de courte durée, et non continuellement, en raison de la durée de vie limitée du laser et d'autres composants. La troisième est que la pesanteur mesurée ne peut pas être entièrement due aux mouvements terrestres verticaux mais aux changements dans les eaux souterraines ou les immeubles environnants, etc. Par conséquent, bien que la gravimétrie absolue ait été appliquée à des études sur le niveau de la mer (par exemple, Teferle et al., 2009 ; Mazzotti et al., 2011), elle n'est pas aussi adaptée aux applications mondiales que le GNSS.

De nouveaux gravimètres sont actuellement en cours de développement qui se servent de la chute libre des atomes refroidis au laser, plutôt que de réflecteurs prismatiques, et qui peuvent fonctionner sur un site presque continuellement (voir <http://muquans.com>). Toutefois, ce sont également des instruments onéreux qui seront utiles à la recherche, mais qui ne seront pas sollicités pour être déployés en grand nombre dans le réseau mondial.

Interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR)

En début de ce chapitre, nous avons insisté sur l'importance d'un réseau de repères locaux constitué de cinq repères ou plus, y compris le repère GNSS et

le repère du marégraphe, qui pourrait être utilisé pour vérifier la stabilité de la zone environnante à travers des campagnes de nivellement répétées. Plusieurs marégraphes sont installés dans des zones côtières où le taux de mouvements terrestres verticaux pourrait varier considérablement sur une courte distance. Certains sont installés sur des ports construits sur des terres récupérées ou à proximité des villes ou a lieu le pompage d'eaux souterraines. Par conséquent, la surveillance d'un nombre réduit de repères ne peut pas donner une bonne vue d'ensemble de la variabilité spatiale des mouvements verticaux du sol dans la zone. En particulier, si l'équipement CGNSS se trouve à une certaine distance du marégraphe, alors il pourrait, en théorie, afficher un taux de mouvements verticaux différent de celui du marégraphe lui-même. L'une des méthodes de surveillance possible est l'utilisation de l'InSAR depuis l'espace (Hannsen, 2001). Les satellites permettant cette technique sont ERS-1 et -2, TerraSAR-X, ALOS PALSAR et aujourd'hui Sentinel-1.

La technologie InSAR utilise les différences de phase entre des images SAR répétées d'une zone et reconstruit les déplacements à la surface de la Terre tels que mesurés le long de la ligne de visée du radar (qui est de $\sim 23^\circ$ par rapport à la verticale pour les satellites ERS-1 et -2). À titre d'illustration, la **Figure 6.5** présente les résultats du bassin de Los Angeles démontrant une variabilité spatiale considérable (+3,4 à -4,3 mm/an entre 1992 et 2000), due en grande partie à l'exploitation de l'eau des nappes phréatiques et du pétrole (Brooks et al., 2007). En conséquence, il est presque certain que la tendance du niveau de la mer à long terme estimée à partir du marégraphe de Los Angeles (0,8 mm/an) a été affectée par ces mouvements terrestres locaux.

6.6 Autres applications du GNSS à la mesure du niveau de la mer

Nous pouvons mentionner plusieurs applications du GNSS à la mesure du niveau de la mer qui pourraient même devenir plus importantes à l'avenir :

- Le GNSS installé sur des bouées pour l'étalonnage de l'altimétrie satellitaire et pour la détermination du niveau de référence des marégraphes (voir la Section 8 du Volume IV ; Testut et al., 2010 ; Chapitre 2 de Pugh et Woodworth, 2014).
- La réflectométrie GNSS utilisant les réflexions des signaux GNSS sur la surface de la mer vers les récepteurs des satellites en orbite basse. Cette

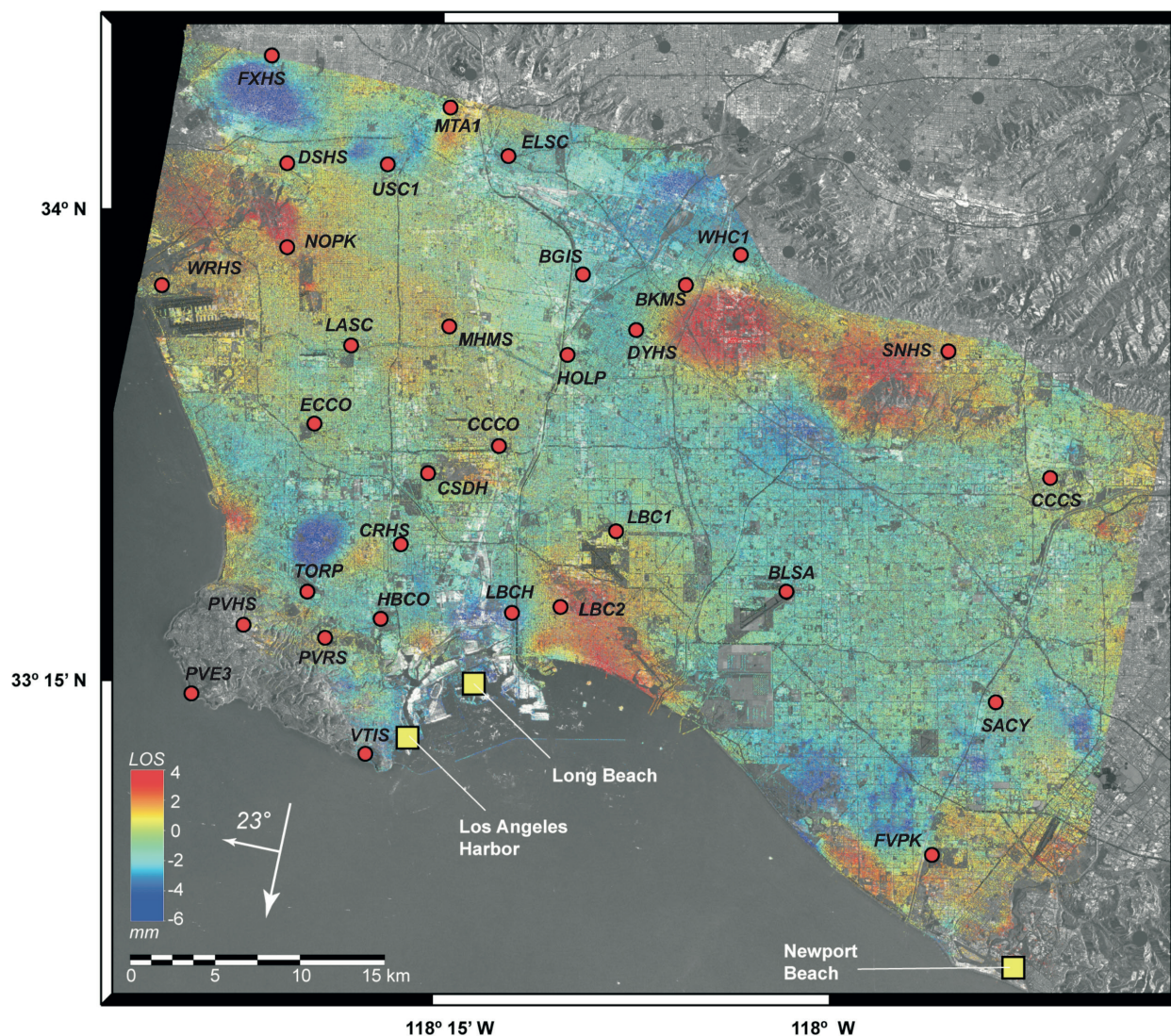


Figure 6.5 Vitesse dans la ligne de visée qui, dans le présent texte, peut être considéré comme le taux de mouvements terrestres verticaux, pour la période 1992–2000 à l’aide des passes descendantes ERS-1 à travers le bassin de Los Angeles. Les stations GNSS continues utilisées dans l’analyse (cercles rouges) et les marégraphes (carrés jaunes) sont présentées. La flèche de légende indique l’azimut et l’inclinaison de la ligne de visée ERS (23°). Tiré de Brooks et al. (2007).

- La réflectométrie GNSS utilisant des signaux multi-trajets présent dans les mesures GNSS et qui sont conventionnellement considérés comme un bruit. Ces signaux peuvent être exploités afin qu’un récepteur GNSS conventionnel puisse être utilisé comme marégraphe ainsi que pour suivre les mouvements verticaux du sol (par exemple, Larson et al., 2013 ; Santamaría-Gómez et al., 2015 ; Santamaría-Gómez et Watson, 2016).
- La sismologie GNSS dans laquelle les mesures à haute fréquence des positions des stations sont employées comme sismomètres pour une détermination rapide des paramètres des séismes (par exemple, Blewitt et al., 2006).
- Les techniques géodésiques qui résultent de la stabilité à long terme tant recherchée de l’ITRF avec l’exactitude requise pour les applications telles que la surveillance du niveau de la mer (voir les exemples dans Wöppelmann et Marcos, 2016).

7. Équipements nécessaires pour la télémétrie des données des marégraphes

7.1 Introduction

L'accès rapide à des données de niveau de la mer peut être une considération aussi importante que la précision des mesures, et l'importance relative étant liée directement aux applications prévues. Les informations obtenues d'un marégraphe peuvent être nécessaires en temps réel, en temps quasi-réel ou en mode différé, en fonction de l'application. Par exemple, un système d'alerte aux ondes de tempête ou tsunami peut nécessiter une transmission des données aux autorités compétentes dans un délai très court. D'autre part, à des fins de recherche scientifique, il est parfois nécessaire de récupérer les données seulement annuellement, auquel cas elles peuvent être conservées localement et récupérées au cours d'une visite sur place, soit en téléchargeant les données sur un ordinateur soit en extrayant et en remplaçant une carte mémoire. (De toutes les façons, il est utile d'adopter cette procédure locale lors des visites sur le terrain comme mesure de sauvegarde, même si un lien de communication en temps réel est fonctionnel, afin d'éviter la perte de données précieuses.)

Les méthodes de communication sont largement tributaires des distances sur lesquelles les données doivent être transmises. Pour des liaisons courtes (par exemple, les opérations au port), une liaison radio est souvent appropriée. Pour les liaisons nationales, l'exploitation automatique interurbaine sur des lignes téléphoniques dédiées du réseau téléphonique public commuté (RTPC) en constitue une méthode efficace. Lorsque les lignes fixes ne sont pas pratiques, la croissance dans l'utilisation de téléphones mobiles à travers la technologie GSM et les protocoles du Service général de radiocommunication par paquets (GPRS) a développé le potentiel des communications longue distance. Les systèmes de téléphonie fixe et mobile donnent accès à Internet à travers un fournisseur d'accès Internet.

Pour les zones reculées, on peut utiliser les liaisons satellitaires mobiles. Il existe aujourd'hui plus de 30 systèmes satellitaires fonctionnels dédiés à la transmission des données, dont certains à l'échelle mondiale. Les systèmes de service mobile par satellite (MSS) peuvent être classés en fonction de l'altitude de l'orbite:

GEO – orbite terrestre géostationnaire, altitude approximative : 35 000 km

MEO – orbite moyenne, altitude approximative : 20 000 km

LEO – orbite basse, altitude approximative : <2 000 km

Les LEO peuvent encore être subdivisées en deux catégories, à savoir les grands systèmes en orbite « big LEO » et les petits systèmes en orbite basse « Little LEO ». Les systèmes « Big LEO » offrent les services de voix, de fax, de téléx, de radiomessagerie et de transmission de données, alors que les « Little LEO » offrent uniquement les services de transmission de données, soit par affichage en temps réel direct (« bent pipe ») soit par enregistrement et retransmission. Étant donné que l'empreinte du satellite est plus faible pour une orbite plus basse, les systèmes LEO et MEO nécessitent de plus grandes constellations que les satellites GEO afin de parvenir à une couverture mondiale et d'éviter les retards dans la transmission des données. Les communications à travers les systèmes satellitaires LEO et MEO nécessitent toutefois peu d'énergie en raison de la courte distance qui sépare le transmetteur et le satellite.

Certains satellites utilisent des antennes à gain élevé pour générer des faisceaux étroits et ainsi réduire la nécessité pour l'appareil mobile au sol d'être muni d'une antenne complexe et/ou d'une puissance de sortie élevée. De nos jours, les MSS sont totalement flexibles, supportant les services IP les plus récents, ainsi que les méthodes traditionnelles de transmission de la voix et des données. Certains systèmes offrent des fonctionnalités considérablement améliorées par rapport à d'autres systèmes de télémétrie. Les avantages potentiels comprennent entre autres la communication à double sens, des observations plus fréquentes, et des débits et volumes de données plus importants.

Quelle que soit la méthode par satellite utilisée, les données du niveau de la mer seront envoyées à travers une sorte de plateforme de collecte de données (DCP en anglais) à l'opérateur du satellite. Elles seront par la suite, comme on le verra ci-dessous, retransmises au propriétaire des données via un réseau de communication approprié. Ultérieurement, le propriétaire des données aura besoin d'outils de stockage et de visualisation des données pour entreprendre une surveillance complète des mesures.

L'une des méthodes les plus largement utilisées pour la rediffusion des données aux utilisateurs à travers le monde est le Système mondial de télécommunications

(SMT ou GTS en anglais) (<http://www.wmo.int/pages/prog/www/TEM/GTS/>). Le SMT a en effet été développé initialement par l'Organisation météorologique mondiale et était destiné principalement au partage des données météorologiques entre les services météorologiques mondiaux. Les données peuvent être transmises au SMT par tout satellite ou à travers toute autre méthode de communication, et les données qui en résultent mises à la disposition des antennes nationales du service de météorologie de chaque pays. L'utilisation du GTS pour la diffusion des données de niveau de la mer a été adoptée par plusieurs opérateurs après le tsunami de l'océan Indien en décembre 2004, lorsque les centres d'alerte aux tsunamis et d'autres organismes du réseau d'observation du niveau de la mer se sont rendus compte que le système était hautement fiable.

Des progrès supplémentaires ont été réalisés lorsque la COI a établi le Sea Level Station Monitoring Facility (SLSMF) à l'Institut flamand de la mer (VLIZ) (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>) (Section 8.1.1). Cette infrastructure assure une surveillance en temps réel de chaque station de mesure du niveau de la mer qui fait partie des programmes de la COI, tels que le Réseau de base « core network » de GLOSS ou les systèmes VLIZ d'alerte aux tsunamis dans l'océan Indien (IOTWMS), dans l'Atlantique du Nord-Est et la Méditerranée (NEAMTWS), dans le Pacifique (PTWS) et dans les Caraïbes (CARIBE-EWS). L'objectif principal de ce service est de permettre au titulaire de la station de procéder à une évaluation rapide de la disponibilité et de la qualité des données. Les applications telles que la surveillance et l'alerte aux tsunamis ne font pas partie de la responsabilité de la SLSMF, et nécessitent un traitement de données et des prises de décisions supplémentaires de la part des centres nationaux d'alerte aux tsunamis.

Dans les sections suivantes, nous décrivons les principes généraux en ce qui concerne le choix d'un système de télémétrie (Section 7.2), les systèmes spécifiques utilisés le plus souvent pour la télémétrie des données relatives au niveau de la mer (Section 7.3) y compris les systèmes satellitaires et terrestres (Sections 7.3.1 et 7.3.2). La Section 7.4 fournit des informations d'ordre général sur le GTS, tandis que la Section 7.5 porte sur le matériel de télémétrie utilisé dans plusieurs stations d'observation du niveau de la mer. La Section 7.6 porte sur les besoins élevés en bande passante pour l'utilisation du GNSS co-localisé aux stations marégraphiques.

7.2 Choix d'un système de télémétrie

Le choix d'un système de communication pour la transmission de données sur le niveau de la mer en temps réel et en temps quasi-réel sera le fruit d'un compromis entre différents facteurs qui doivent être pris en compte en fonction de l'application prévue des données. Les principaux facteurs sont les suivants :

○ Délai de transmission et débit des données

L'utilisation scientifique des données sur le niveau de la mer ne nécessite généralement pas une transmission en temps réel, certes, mais pour la planification et l'intervention d'urgence, cette fonctionnalité est obligatoire. Le volume de données à transmettre (la taille des paquets de données) constitue également un facteur à prendre en compte et leur taille sera fonction de la visée des données. Les applications scientifiques peuvent (ou pas) nécessiter de grands paquets de données, mais dans les situations d'urgence, on fait généralement appel à des paquets de données plus petits. Dans les cas où de grands paquets de données sont nécessaires, un débit de données plus important sera également nécessaire. Certains systèmes permettent différents modes de transmission, de sorte qu'en cas d'urgence les modalités de transmission puissent être mises à niveau pour fournir des débits de données plus élevés.

○ Fiabilité ou redondance du système

Un autre aspect à prendre en considération c'est la fiabilité de la réception des données, qui sera aussi directement liée aux applications des données. Pour les applications scientifiques, la fiabilité de la transmission des données peut être complétée par un stockage sur site (c'est-à-dire, un enregistreur de données local), mais dans les situations d'urgence, le facteur qui compte le plus est la fiabilité de la transmission des données. Une évaluation de la fiabilité du système doit également tenir compte de la possibilité de diverses influences externes, étant donné que les situations d'urgence peuvent modifier les conditions normales de fonctionnement. Les questions de fiabilité comprennent :

(i) Conditions météorologiques extrêmes ou autres situations d'urgence

Avant d'adopter un système de communication pour l'installation d'un marégraphe, il faut tenir compte de sa fiabilité dans des conditions environnementales difficiles. Par exemple, pour l'alerte aux tsunamis, une station peut être positionnée dans une région soumise à une activité

tectonique afin d'assurer une alerte précoce fiable. En cas de séisme, les premiers réseaux de communication à être coupés sont généralement les réseaux RTPC et les liaisons téléphoniques mobiles, ainsi que le courant électrique. Dans ces circonstances, il est fortement recommandé d'utiliser les liaisons satellitaires comme système de télémétrie principal.

(ii) Redondance et disponibilité de l'électricité

Habituellement, un système photovoltaïque, alimenté par les panneaux solaires pendant la journée et les batteries dans la nuit fournira l'essentiel des besoins énergétiques pour la télémétrie. Une alimentation secteur supplémentaire peut contribuer à la fiabilité du système, mais les applications d'urgence ne doivent pas en dépendre.

L'alimentation secteur fournie par un câble peut être interrompue en cas de survenue d'événements exceptionnels. Sur les sites où cela est possible, il est essentiel d'installer en plus un onduleur. Cet équipement prend généralement la forme d'un système de batterie de secours ayant une capacité de réserve adéquate de plusieurs heures. Les éoliennes doivent être envisagées uniquement comme source d'alimentation secondaire. Toutefois, sur des sites isolés et bénéficiant de vents considérables, une station d'observation du niveau de la mer pourrait bénéficier d'une éolienne pour tous ses besoins en énergie.

Les besoins en énergie de certains types d'équipements de télémétrie doivent bénéficier d'une attention particulière. Par exemple, les transmetteurs du réseau satellitaire mondial à large bande (BGAN) en direction des satellites INMARSAT épuiseront les batteries en quelques jours si celles-ci ne sont pas supplémentées par le courant secteur. En choisissant des intervalles de transmission plus longs, on peut réduire leurs besoins en énergie mais, comme indiqué ci-dessus, l'application des données du niveau de la mer permettra de déterminer s'il s'agit d'un choix approprié.

L'emplacement du site déterminera non seulement la disponibilité des infrastructures de télécommunication et ses besoins en énergie, mais aussi la disponibilité de l'énergie pour la station d'observation du niveau de la mer elle-même. Les besoins en énergie des capteurs seront sujets à d'importantes variations. Par conséquent, le choix des capteurs peut aider à réduire les besoins en énergie.

En résumé, si les applications d'un utilisateur nécessitent une transmission à haute fréquence ou une transmission en temps réel, avec un débit de données élevé et fiable, les besoins en énergie du matériel de télémétrie devront

être satisfaits par une combinaison d'une ou plusieurs sources d'alimentation. Près des zones peuplées, il est certain que l'alimentation secteur sera disponible, mais dans les situations d'urgence, la station devra continuer de fonctionner pendant les coupures d'énergie. Sur des sites isolés et pour les situations d'urgence, les besoins en énergie peuvent être satisfaits par une combinaison de systèmes photovoltaïques (panneaux solaires/réseaux de batteries) et d'éoliennes.

Une fois que tous ces aspects ont été pris en compte (applications, fréquence de transmission et redondance du système), une évaluation des financements disponibles permettra de déterminer si la station est réalisable. Les systèmes satellitaires publics peuvent être disponibles gratuitement tant que l'utilisateur soumet une demande d'assignation de fréquence et obtient l'approbation du propriétaire du système (voir ci-dessous). Toutefois, dans les situations où les fonds ne constituent pas un problème, des systèmes de transmission privés permettront une plus grande flexibilité dans les besoins de l'utilisateur. Si les fonds le permettent, des communications bidirectionnelles (deux sens) avec une station d'observation du niveau de la mer peuvent être établies dans la mesure où elles peuvent servir pour mettre à jour les logiciels ou les valeurs d'étalonnage de la station, pour interroger le système en cas de panne, pour changer la fréquence d'échantillonnage, et pour effectuer une maintenance de la station qui autrement, attendraient une visite sur le terrain. Une telle anticipation permet au système d'être entièrement flexible et d'en améliorer la fiabilité globale.

En conclusion, pour les données enregistrées près des zones peuplées il existe un large éventail d'options de télémétrie : des lignes de téléphone terrestres, la radio, le GPRS, les réseaux satellitaires publics ou privés. Dans cette situation, les facteurs tels que les délais de transmission, le débit des données, la fiabilité et le coût du système devront être analysés afin de décider de la méthode de télémétrie qui sera optimale. Sur des sites plus éloignés par contre, la disponibilité des systèmes satellitaires et les contraintes liées à leurs besoins en énergie seront relativement plus importantes.

7.3 Systèmes de transmission des données

Une fois que les facteurs précédemment décrits ont été pris en compte, l'utilisateur peut prendre la décision de choisir un système de transmission. Comme on l'a mentionné, dans la plupart des cas, un système de télémétrie unique peut être adopté, mais dans d'autres, notamment en cas d'intervention d'urgence, une solution

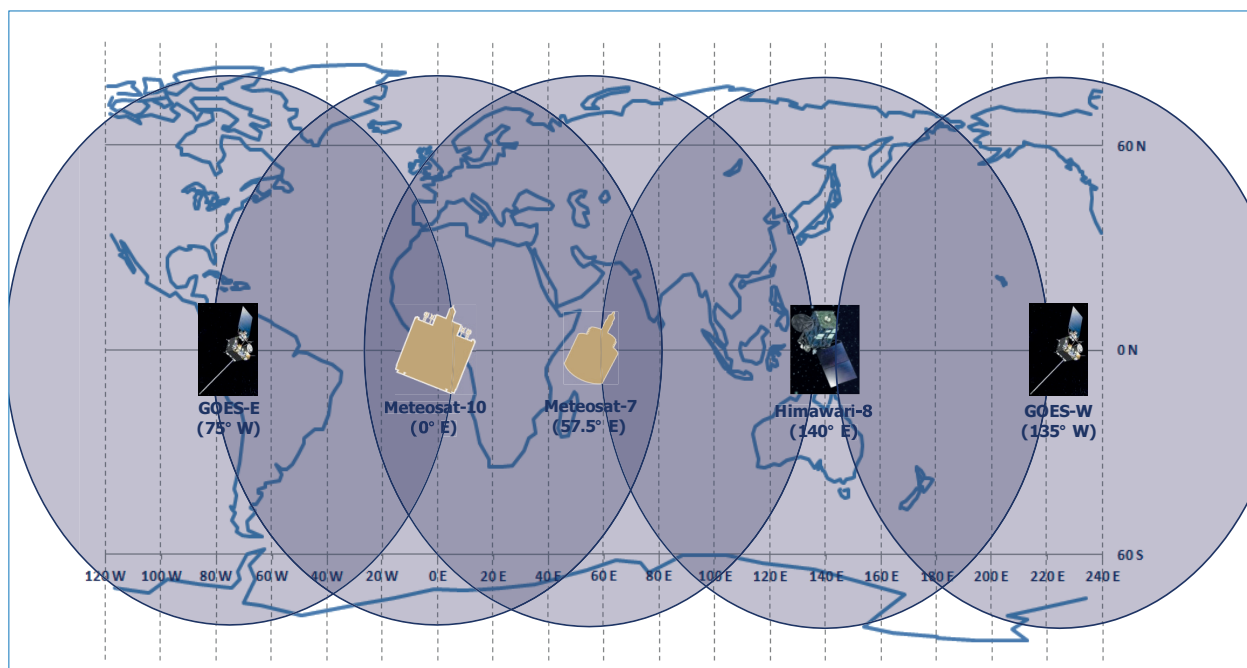


Figure 7.1 Couverture des deux satellites NOAA GOES au-dessus du Pacifique et de l'Atlantique, les deux satellites EUMETSAT METEOSAT au-dessus des océans Atlantique et Indien, et JMA Himawari-8 au-dessus du Pacifique. En ce qui concerne METEOSAT, cette figure présente la situation à partir de 2016 avec METEOSAT-7 à 57.5 °E. Il devrait être remplacé par METEOSAT-8 en 2017. (Figure de Sean Burns, EUMETSAT).

de rechange sera souhaitable. Le choix d'un double système sera déterminé non seulement par les objectifs de l'utilisateur, mais également par la capacité du matériel du marégraphe à prendre en charge des transmissions simultanées. Différents modes de transmission pourraient être envisagés, le système principal fonctionnant dans les conditions normales, et un deuxième étant destiné aux situations d'urgence, avec un délai transmission et/ou un débit de données différent. Cette section fournit plus de détails sur ces différents choix.

7.3.1 Systèmes satellitaires

À des fins scientifiques ou d'intervention d'urgence, les systèmes de télémétrie satellitaire sont les systèmes les plus appropriés pour l'envoi de données d'une station d'observation du niveau de la mer à un centre de traitement de données. Dans certains cas, l'utilisateur peut disposer de sa propre antenne de réception et sa station terrienne de lecture directe (STLD), tandis que dans d'autres cas, la transmission des données sera assurée par le système satellitaire.

Transmission différée

Les satellites fonctionnant en orbite basse peuvent assurer des transmissions différées du marégraphe à l'utilisateur à chaque fois que le satellite survole une station de réception. Ils assurent uniquement des transmissions moins fréquentes que d'autres systèmes satellitaires décrits ci-dessous, et les données sont reçues

avec un certain retard par l'utilisateur. Toutefois, les principales applications sont la recherche scientifique et la surveillance, pour lesquelles ces contraintes sont acceptables.

Le système ARGOS (<http://www.argos-system.org>) fonctionne à travers le monde en utilisant les satellites en orbite polaire avec une période orbitale d'environ 100 minutes. Une plate-forme de terminaux d'émission (PTT), ayant une bande passante de 256 octets par survol du satellite, est installée sur le marégraphe et, en fonction de l'emplacement, le retard dans la réception des données par l'utilisateur peut être de plusieurs heures. Les données sont mises à la disposition des utilisations à travers les centres de traitement mondiaux ARGOS à Toulouse en France et à Largo en Floride. Le nombre de survols du satellite accessibles par jour est fonction de la latitude, et varie de 7 environ à l'équateur à 28 aux pôles. Au rang des utilisateurs d'ARGOS pour l'acquisition de données issues de marégraphes figure le Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale (GRGS), un consortium de 12 groupes de recherche français qui pourra conseiller les utilisateurs potentiels.

Transmission en temps réel

Lorsque l'application de l'utilisateur nécessite une transmission en temps réel ou en temps quasi-réel, les systèmes satellitaires à orbite géostationnaire constituent le meilleur choix, étant donné que les satellites sont positionnés en permanence au-dessus des mêmes parties de la surface de la Terre. L'ensemble des satellites

géostationnaires fournit une couverture longitudinale qui se chevauche, mais la couverture latitudinale est limitée à environ 75 ° N/S en raison de l'orbite équatoriale. Il est affecté à chaque PCD installée sur un marégraphe un temps de transmission fixe au cours duquel un volume de données particulier peut être transmis au satellite. L'utilisateur doit s'assurer que la configuration de la PCD permet d'envoyer entièrement le message sans dépasser l'intervalle de temps alloué.

○ GOES

(<http://www.goes.noaa.gov>)

Le système GOES (Satellite géostationnaire opérationnel d'étude de l'environnement) est disponible pour les gouvernements et utilisateurs scientifiques, et un formulaire de demande doit être envoyé à NOAA (propriétaire du système) pour obtenir un créneau de transmission. En fonction de l'objectif de l'utilisateur, NOAA va attribuer des créneaux de transmission avec des intervalles de transmission spécifiques et des canaux et fenêtres de transmission horodatés. Deux satellites, GOES-W (GOES-15) à 135 ° ouest et GOES-E (GOES-13) à 75 ° ouest assurent une large couverture des océans Pacifique et Atlantique (**Figure 7.1**).

Pour les applications d'urgence, des créneaux de transmission haute fréquence toutes les 5 minutes peuvent être attribués. Dans les situations ordinaires, des intervalles de 10 à 15 minutes peuvent être disponibles. Les utilisateurs de ces systèmes comprennent entre autres le Centre océanographique national (NOC) au Royaume-Uni, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et le Centre du niveau de la mer de l'Université d'Hawaii (UHSLC) aux États-Unis, et certains centres nationaux d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique tels que le SHOA au Chili. Une fois que le formulaire de demande a été soumis, il sera attribué à l'utilisateur un créneau de transmission avec les paramètres suivants :

- Identifiant de la PCD : Code hexadécimal à 8 chiffres
- Numéro de canal : les nombres impairs sont attribués pour GOES-est et les nombres pairs pour GOES-ouest
- Heure de démarrage : Heure à laquelle la plateforme de collecte de données est supposée émettre ; la NOAA exige que la transmission soit définie à l'heure de démarrage de l'intervalle horaire et non au milieu, afin d'éviter tout chevauchement avec le créneau horaire d'un autre utilisateur.
- Intervalle horaire : Créneau horaire disponible pour la transmission

Les données envoyées sur ce réseau peuvent être directement reçues par les propriétaires de la station

d'observation du niveau de la mer s'ils ont leur propre STLD. Dans d'autres cas, les données seront reçues par la STLD de la NOAA et envoyées au propriétaire à travers n'importe quel système de transmission de données, généralement le GTS.

Le débit en bauds du transmetteur GOES était généralement de 100, 300 ou 1200, mais depuis mai 2013, de nouveaux créneaux de 100 bauds ont été attribués et les utilisateurs doivent à présent avoir migré vers des systèmes à débit binaire élevé (HDR). Tous les transmetteurs HDR doivent à présent utiliser le GPS pour supprimer la dérive d'horloge et transmettre uniquement à un débit de 300 ou 1200 bauds. L'efficacité améliorée des HDR permettra à plusieurs PCD de fonctionner sur chaque canal. À la fin, les canaux HDR auront une plus grande capacité de transmission de données.

○ METEOSAT

(<http://www.eumetsat.int>)

EUMETSAT exploite plusieurs satellites à des fins météorologiques et scientifiques, au rang desquels les satellites géostationnaires METEOSAT sont les plus pertinents pour les besoins de ce chapitre (Burns, 2009). Une série de satellites sont en exploitation, un ensemble étant situé sur le méridien de Greenwich et assurant ainsi une couverture de l'Atlantique pour l'Europe, l'Afrique, les Caraïbes, etc., et un autre à 57,5 ° est pour la couverture de l'océan Indien. Ils sont en mesure de fournir aux stations d'observation du niveau de la mer une capacité de transmission de données à haute fréquence avec des transmetteurs situés dans de nombreux pays qui envoient des données au Centre de contrôle des missions (MCC) en Allemagne, lequel transmet ensuite les données à d'autres utilisateurs à travers EUMETCast, la diffusion directe (pour le satellite à 0 degré), Internet et le GTS. Parmi les utilisateurs intensifs de ce réseau au sein de la communauté d'observation du niveau de la mer, le SHOM (France) a une grande expérience des stations d'observation du niveau de la mer situées en France, dans l'océan Indien et dans les Caraïbes.

METEOSAT peut prendre en charge deux types de PCD. Une PCD standard transmet à 100 bauds qui peut transmettre 649 octets de données sur la plateforme en 60 secondes (y compris une porteuse non modulée de 5 secondes, le préambule, le code de synchronisation et l'adresse) avec une précision en temps meilleure que +/- 15 secondes. Une PCD à débit élevé transmet à 1200 bauds et peut transmettre 653 octets de données en 10 secondes. La précision en temps est améliorée à +/- 0,5 secondes. La durée de transmission minimum pour la PCD à débit élevé consiste en des créneaux de 15 secondes et, en raison de contraintes techniques,

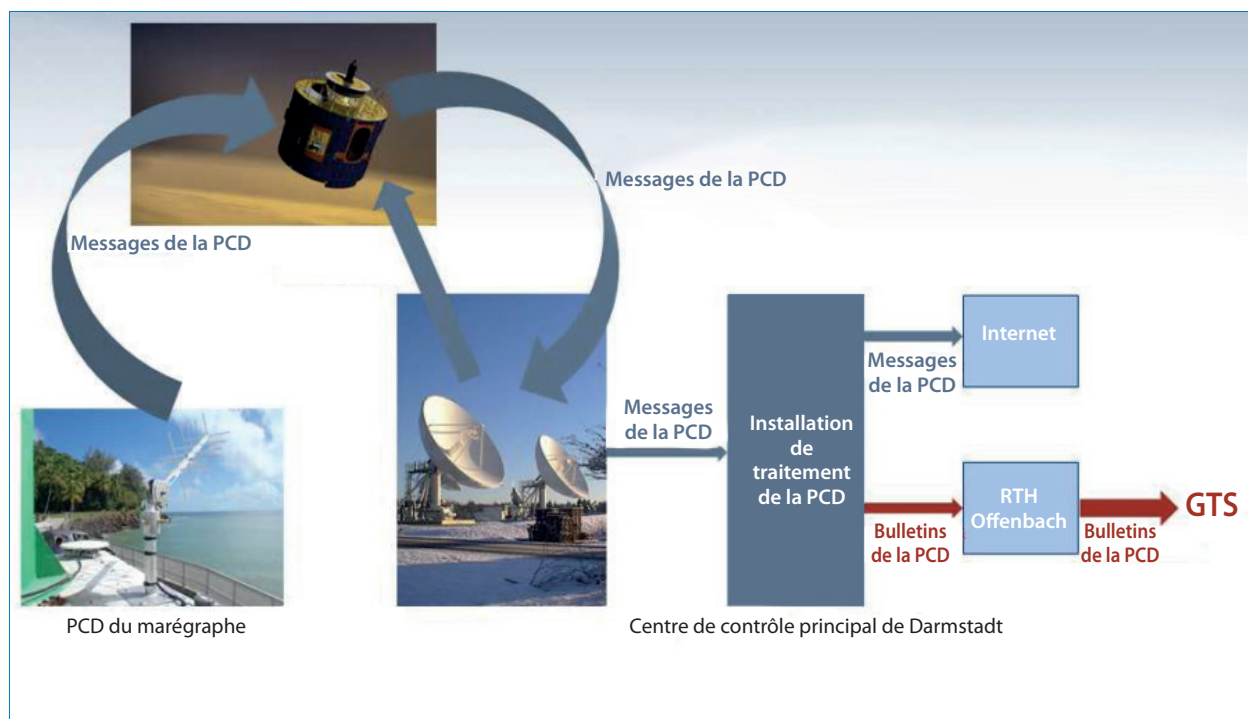


Figure 7.2 Schéma du flux de données METEOSAT jusqu'à l'arrivée sur le GTS. (Figure d'EUMETSAT).

un créneau de transmission maximum de 60 secondes. Les PCD à débit élevé sont à présent opérationnels ; il existe actuellement un transmetteur PCD à débit élevé certifié provenant d'un fabricant et les autres devraient être certifiés dans un proche avenir. Les caractéristiques techniques des deux types de PCD se trouvent dans EUMETSAT (2013). Dans les deux cas, l'architecture du réseau peut générer un retard allant jusqu'à 10 minutes entre la transmission des données de la PCD et leur livraison via le GTS (Figure 7.2). Ce retard de 10 minutes est le maximum dans le système, mais dans la pratique, il est bien plus court. Tout retard enregistré sur le réseau GTS échappe toutefois au contrôle d'EUMETSAT.

L'introduction de la PCD à débit élevé (HRDCP) permet d'obtenir des débits de transmission plus rapides et des intervalles de transmission plus courts, assurant ainsi plus de flexibilité et de fiabilité pour les utilisateurs du système de collecte de données EUMETSAT. Une HRPCD utilise une technique de correction d'erreur sans voie de retour pour assurer une plus haute immunité au bruit et une communication des données plus robuste, ce qui accroît l'efficacité globale du système de collecte de données et de ses applications. La taille maximale des messages a augmenté, prenant en charge la transmission de messages allant jusqu'à 7343 octets (dans un créneau horaire standard de 60 secondes). En raison de la grande taille des blocs de codes d'une HRPCD, à laquelle s'ajoute la possibilité d'une compression des messages, deux messages de PCD « standard » ou plus peuvent être

envoyés par transmission (par exemple, l'actuel et le précédent), ce qui réduit considérablement la nécessité d'une retransmission explicite pour des raisons de fiabilité. La HRPCD prend également en charge les données binaires, ce qui constitue une amélioration de la PCD standard.

Les utilisateurs potentiels du système devront se conformer à la politique d'EUMETSAT en matière de données (<http://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/LegalInformation/BasicDocuments/index.html>). Les utilisateurs peuvent solliciter une attribution de canal pour METEOSAT de la même manière que le système GOES, en choisissant entre trois types de transmissions : à intervalles réguliers ; en mode d'alerte basé sur une valeur prédéfinie pour un paramètre qui ne doit pas être dépassé ; ou une combinaison des deux types.

L'intervalle standard de transmission des données pour la HRPCD est horaire, mais des propositions d'applications nécessitant des intervalles de transmission plus courts, lorsque cela est fondé, seront examinées au cas par cas. Par exemple, la France et Oman utilisent actuellement des transmissions de 6 minutes pour les applications de marégraphes. Avec cette fréquence élevée de transmission des données, le système de collecte de données de METEOSAT constitue une solution de rechange pour les systèmes tels que BGAN ou IRIDIUM, bien que l'on ne puisse pas avoir une transmission bidirectionnelle des données.

À l'acceptation de l'application par EUMETSAT, les utilisateurs reçoivent les paramètres suivants qui doivent être programmés dans leurs transmetteurs :

- Adresse de PCD : 8 caractères hexadécimaux pour l'identification de la PCD
- Nom de la PCD : Choisi par l'utilisateur, généralement le nom de l'emplacement de la PCD
- Fréquence du canal : Une PCD sera attribuée sur l'un des canaux opérationnels dans la gamme de fréquences de METEOSAT énoncée dans EUMETSAT (2013).
- Numéro de canal : Numéro correspondant à la fréquence attribuée. La numérotation EUMETSAT ayant changé récemment, il convient de faire attention lors de la programmation d'un transmetteur radio qui utilise généralement l'ancien format de numérotation. Les fabricants de la PCD sont pleinement conscients du changement de la numérotation des canaux.
- Créneaux horaires d'attribution de la PCD : Heure à laquelle la PCD va assurer la transmission (toutes les PCD sont munies d'une horloge interne précise à laquelle s'ajoute une synchronisation par GPS).

○ MTSAT

(<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/>)

Le système de satellite météorologique (MTSAT) offre des services météorologiques et de transmission de données similaires à ceux de GOES et METEOSAT, mais se trouve au-dessus du Pacifique, s'associant ainsi à ces derniers pour assurer une couverture globale (hormis les régions polaires). L'office météorologique Japonais (JMA) exploite des satellites météorologiques géostationnaires depuis 1978, fournissant des données qui aident à prévenir et à atténuer les catastrophes de nature météorologiques sur la base de la surveillance des typhons et d'autres conditions météorologiques dans la région Asie-Océanie.

Jusqu'à une date récente, le satellite opérationnel était MTSAT-2 à 145 ° E. Toutefois, JMA a lancé Himawari-8, son satellite météorologique géostationnaire de prochaine génération, en octobre 2014 qui est entré en fonction en juillet 2015 et remplacé MTSAT-2 (**Figure 7.1**). Himawari-9 sera lancé en 2016 en tant que satellite d'appoint et successeur du précédent. Les deux satellites seront localisés à environ 140 ° E, et observeront les régions d'Asie de l'Est et de l'ouest du Pacifique pendant une période de 15 ans. La page Internet des satellites Himawari-8/9 de JMA est la suivante : <http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/himawari89/index.html>. Au sein de la communauté d'observation du niveau de la mer,

l'UHSLC et SHOM ont de l'expérience dans l'exploitation des PCD dans le Pacifique à l'aide de MTSAT et GOES ou l'un des deux.

○ INMARSAT BGAN

(<http://www.inmarsat.com>)

Le système INMARSAT L-Band BGAN (Broadband Global Area Network) fournit un équivalent satellitaire des modems par fil à large bande. Il présente l'essentiel des avantages et des inconvénients des modems à large bande conventionnels, mais est capable de fonctionner dans des zones reculées et est optimisé pour un fonctionnement à faible puissance. Le principal avantage du BGAN sur les modems par fil à large bande c'est son indépendance vis-à-vis du réseau téléphonique local, et sa capacité à continuer de fonctionner même dans des conditions extrêmes.

Contrairement aux trois précédents systèmes satellitaires qui sont exploités par le gouvernement ou des organismes publics, INMARSAT est exploité par une entreprise privée qui assure une large couverture, sauf pour des latitudes supérieures à 75 °, avec l'utilisation de trois satellites en orbite géostationnaire (**Figure 7.3**).

Le mode de fonctionnement normal d'INMARSAT implique la transmission de données d'un site à une station terrestre éloignée, qui envoie ensuite les données à l'utilisateur final. Ce schéma simple nécessite une liaison finale avec l'utilisateur qui peut s'appuyer sur le GTS ou Internet comme l'indique la **Figure 7.4a**. Pour la plupart des usages scientifiques, ce réseau est assez adapté. Toutefois, pour des besoins d'urgence, lorsque la composante terrestre de la **Figure 7.4a** viendrait à être interrompue, la disponibilité des données pourrait être compromise.

Habituellement, une session de communications via un terminal BGAN standard se lance manuellement à partir du site éloigné. Les nouveaux terminaux BGAN M2M (machine à machine) permettent le maintien continu de communications bidirectionnelles des données, ce qui assure un contrôle et une surveillance continus de la station éloignée. Des données peuvent être envoyées soit en utilisant l'IP standard de BGAN à un taux atteignant 448 Kbit/s avec une faible latence de 800 millisecondes, assurant une réception en temps réel de données critiques. INMARSAT offre plusieurs possibilités, mais toutes se fondent sur les communications par fil pour livrer les données à l'utilisateur final.

Par exemple, le SHOA exploite actuellement huit stations d'observation du niveau de la mer qui utilisent le BGAN comme télémétrie principale ou secondaire. Dans ces cas, l'antenne de réception n'est pas basée à la station de

Carte de couverture du BGAN

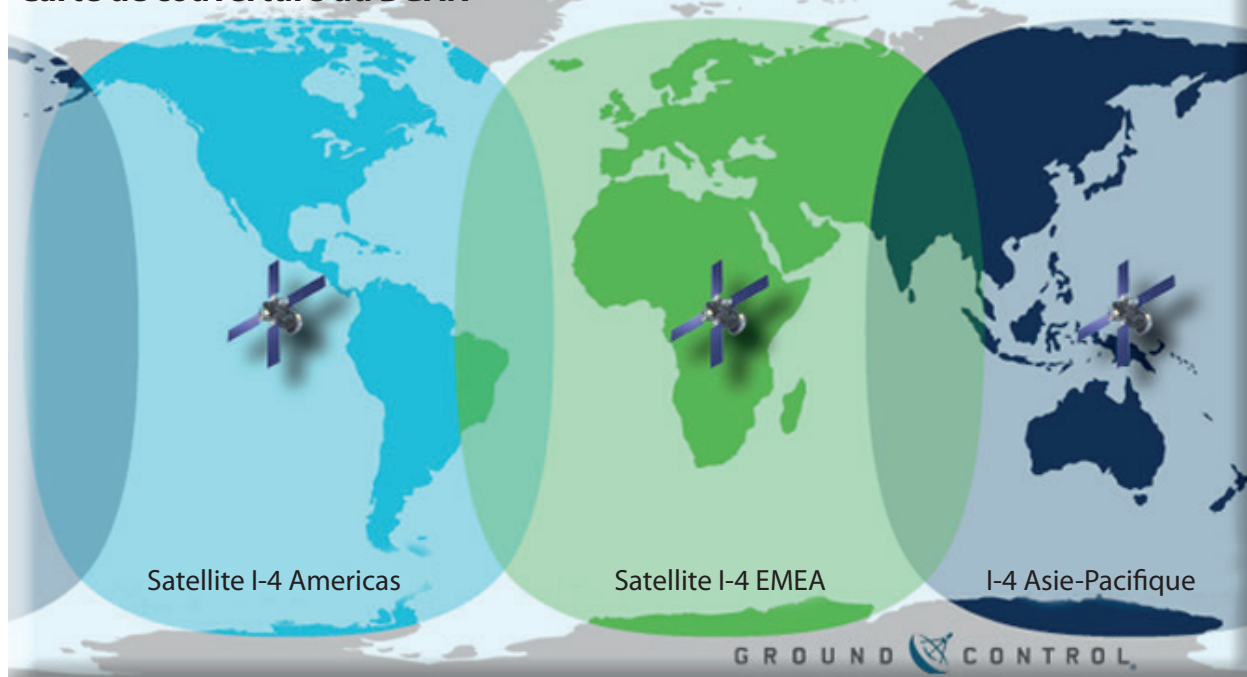


Figure 7.3 Schéma de la couverture du BGAN d'INMARSAT.

réception INMARSAT mais au siège du SHOA. Ce mode de fonctionnement, présenté à la **Figure 7.4b**, assure que le niveau de la mer ne dépende jamais uniquement de systèmes assurant des liaisons de communication par fil, ce qui améliore la fiabilité du système dans les situations d'urgence. Les liaisons à double transmission impliquent un doublement des coûts de transmission. Toutefois, le principe essentiel selon lequel chacun devrait disposer de sa propre station terrestre vise à assurer que l'utilisateur reçoive les données le plus directement possible, en écartant toute éventualité de liaison intermédiaire.

○ IRIDIUM

(<http://www.iridium.com>)

Il s'agit d'un type de système similaire à celui d'INMARSAT, mais qui prétend assurer une « couverture totale (y compris les océans, les voies aériennes et les régions polaires) ». Il comprend une flotte de 66 satellites LEO fonctionnant au sein d'un réseau entièrement maillé. Il dessert un large éventail de secteurs commerciaux, gouvernementaux et sociaux, conçoit et commercialise ses propres équipements à travers un réseau mondial de plus de 100 partenaires. IRIDIUM offre spécifiquement des services de transmission de données au moyen d'ordinateurs portables et de téléphones mobiles à travers le monde, y compris dans des zones très reculées. Les services de données à travers les transmetteurs IRIDIUM sont également largement utilisés. La transmission des données à travers IRIDIUM utilise généralement le protocole point à point (PPP) ou les protocoles RUDICS

(Raster-based Unrestricted Digital Internetworking Connectivity Solutions).

La NOAA utilise IRIDIUM pour un petit nombre de stations éloignées, principalement celles où les transmissions GOES sont soit impossibles soit peu fiables, mais le plus souvent pour avoir une capacité de communication bidirectionnelle pour effectuer le diagnostic des problèmes, évitant ainsi un voyage d'entretien onéreux et réduisant les temps d'arrêt. Toutefois, contrairement à GOES, IRIDIUM a un coût, raison pour laquelle il n'est utilisé que dans certaines situations. Entre autres utilisateurs, UHSLC utilise IRIDIUM pour la transmission de données GNSS co-localisés aux marégraphes, mais pas au marégraphe lui-même. GFZ a utilisé IRIDIUM pour les données des marégraphes en Indonésie. Des informations circulent selon lesquelles les signaux d'IRIDIUM et GNSS peuvent interférer dans certaines circonstances, et cette possibilité doit être vérifiée pour chaque installation.

○ VSAT

Le VSAT (microstation terrestre) est une station satellitaire terrestre bidirectionnelle équipée d'une antenne parabolique inférieure à 3 m (1,6 m étant la dimension type pour les opérations de marégraphes) qui assure une communication bidirectionnelle directe à haut débit entre une station de surveillance et le centre de données (voir https://en.wikipedia.org/wiki/Very-small-aperture_terminal). Le microterminal VSAT a connu une application limitée dans le réseau mondial d'observation

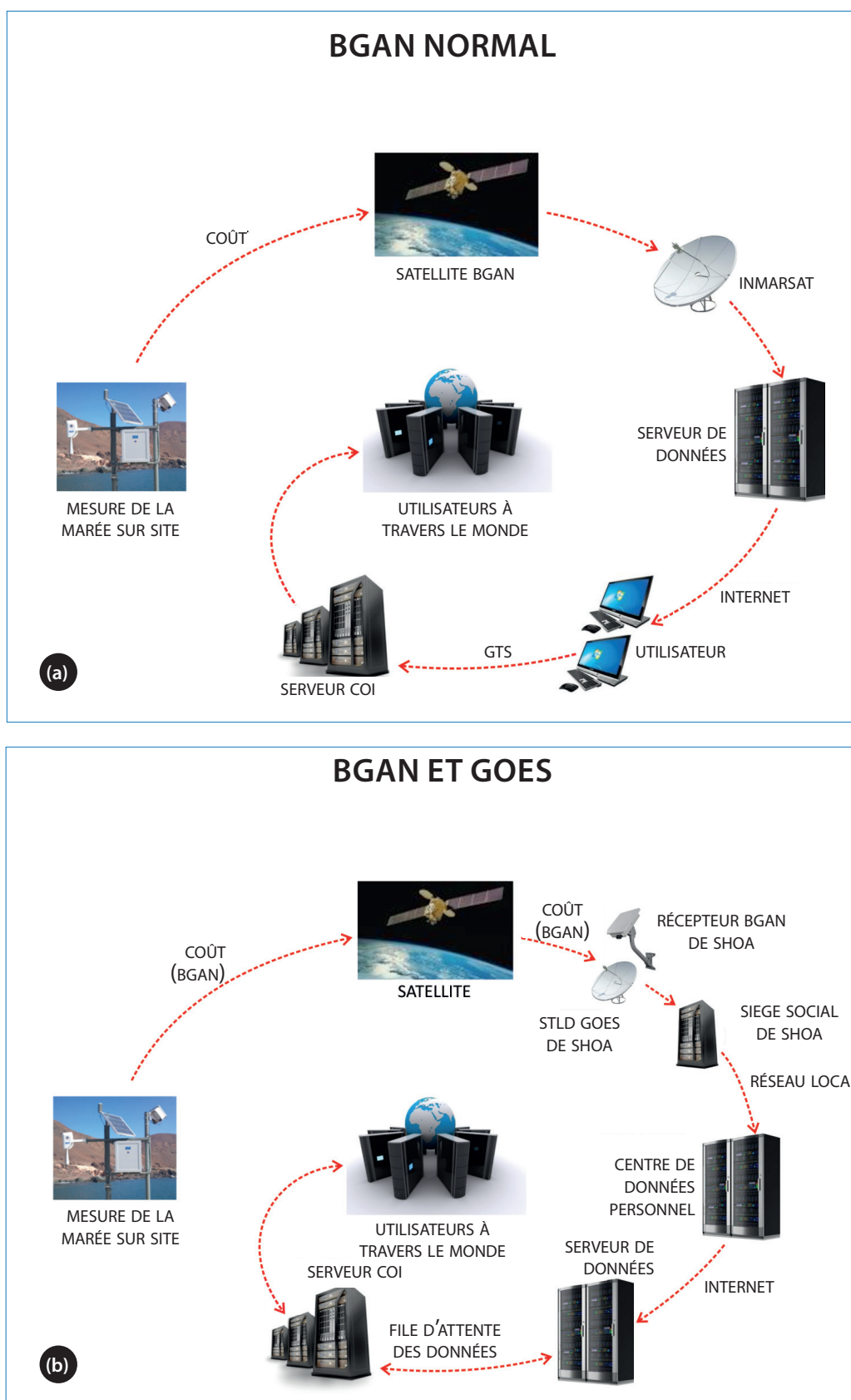


Figure 7.4

- (a) Cheminement des données sur le niveau de la mer au moyen du BGAN depuis les marégraphes jusqu'aux centres de données.
- (b) Réception directe des données du BGAN d'INMARSAT mise en œuvre au SHOA parallèlement à la réception GOES (la réception GPRS suit un cheminement similaire). COST indique qu'il peut y avoir des coûts de transmission. similar path). COST indicates that a transmission cost may be involved.



Figure 7.5 Une antenne VSAT à côté d'un marégraphe en Indonésie. Cette station est également équipée d'un marégraphe radar OTT Kalesto et d'un récepteur GPS. (Photo Tilo Schöne, GFZ).

du niveau de la mer. Les installations ont été effectuées dans deux stations en Indonésie (en coopération avec GFZ, Potsdam), principalement pour la diffusion en flux des données du GPS, plutôt que du marégraphe (**Figure 7.5**). Toutefois, les installations du microterminal VSAT ont depuis lors été remplacées par le BGAN. Survey of India a installé une station centrale avec des capacités de microterminal VSAT à Dehradun afin de recevoir des données de GPS et de marégraphes en temps réel à partir des sites de localisation de leurs marégraphes.

○ ORBCOMM

(<http://www.orbcomm.com>)

La Section 5.3 du Volume IV contenait un examen des systèmes de transmission des données par satellite qui pourraient être utilisés pour les données du niveau de la mer à partir de 2006. À notre connaissance, le seul système en plus de ceux mentionnés ci-dessus, qui a été utilisé pour la transmission des données sur le niveau de la mer depuis cette date est ORBCOMM, utilisé pendant quelques années par le NOC au Royaume-Uni. ORBCOMM comprend un segment spatial de satellites LEO et d'un segment terrestre appelés stations terriennes passerelles ou centres de contrôle passerelles. Les communications NRT étaient possibles à partir de certaines zones. Toutefois, dans d'autres zones telles que l'Afrique et l'océan Indien, il y avait eu un retard de plusieurs heures pendant que les données étaient relayées vers un fournisseur d'accès Internet, nécessitant d'autres méthodes (par exemple, METEOSAT). Nous ne connaissons pas de mesures du

niveau de la mer qui sont actuellement transmises via ORBCOMM, bien que ce soit toujours une possibilité.

○ INMARSAT Global Xpress

(<http://www.inmarsat.com/service/global-xpress>)

INMARSAT Global Xpress (GX) est un nouveau réseau satellitaire à large bande haut débit qui fonctionne de la même manière que le BGAN mais en bande Ka, ce qui rend possible l'utilisation de terminaux d'utilisateurs plus compacts. Il offrira des vitesses de téléchargement aval/amont allant jusqu'à 50 Mbit/sec et 5 Mbit/sec respectivement. La constellation GX est constituée de trois satellites de communications mobiles haute débit en bande Ka ayant chacun une durée de vie de 15 ans. Trois satellites assurent la couverture requise pour les services Global GX : I-5 F1 pour l'Europe, le Moyen-Orient, l'Afrique et l'Asie ; I-5 F2 pour les Amériques et la région de l'océan Atlantique ; I-5 F3 pour la région de l'océan Pacifique. Ce nouveau service peut offrir de futures opportunités pour l'interaction en temps réel avec des marégraphes installés sur des sites éloignés. En outre, il doit permettre la récupération d'une ensemble plus large de données GNSS et de données longues stockées en mémoire. Le **Tableau 7.1** récapitule les informations de chaque système satellitaire. Pour de plus amples informations sur les méthodes de communication satellitaire dans la science marine, il existe plusieurs rapports qui ont été rédigés pour les groupes de travail de la COI et de la JCOMM qui passent en revue et comparent les différents systèmes disponibles (par exemple, Prior-Jones, 2011 ;

Tableau 7.1

Systèmes de transmission de données par satellite mentionnés à la Section 7.3.1. Pour des informations sur les systèmes utilisés pour d'autres données maritimes (par exemple, Inmarsat C et D+, Globalstar etc.) voir Meldrum (2013). Les systèmes sont listés en suivant approximativement l'ordre d'augmentation de la bande passante. La latence définit le délai probable pour atteindre un centre de données. Directionnel indique que les données sont transmises du marégraphe au centre de données uniquement, sans possibilité d'interaction entre le marégraphe et l'utilisateur. Bidirectionnel indique que l'utilisateur peut également communiquer avec l'enregistreur de données du marégraphe. Les coûts sont donnés à titre indicatif uniquement et sont libellés en dollars US. L'accès final indique le mécanisme par lequel les données sont mises à la disposition de l'utilisateur. Le GPRS figure au bas du tableau pour comparaison avec les systèmes satellitaires.

Système	Application de base	Type d'orbite	Bande passante	Latence	D/BD*	Coûts des équipements	Coûts des données récurrents	Accès final
ARGOS	Messagerie	LEO	< 5 ko/jour	Plusieurs heures	1	1500 par balise	Coût d'abonnement de 200 par an + coût de transmission de 1000 par an	Accès de l'utilisateur au serveur ARGOS.
GOES, METEOSAT, MTSAT	Messagerie	GEO	< 5 ko/jour	Plusieurs minutes	1	3700 pour l'antenne de PCD, les supports de montage, etc.	Gratuit pour les programmes de l'OMM	GTS
ORBCOMM	Messagerie	LEO	< 50 ko/jour	Plusieurs heures	2	200-300 pour les modems	60 par mois	Serveur de messagerie électronique
IRIDIUM	Voix, mais seuls les données par modems sont adaptés aux données de niveau de la mer	Mini LE ⁰¹	1 Mo/h	Proche de zéro	2	2000 pour le modem et l'antenne	22 par mois + 1,2 par minute pour le mode données uniquement	Modem d'utilisateur
INMARSAT BGAN	Large bande	GEO	492 kbit/s	Proche de zéro	2	1000 pour l'antenne	En fonction du contrat	Internet
VSAT	Large bande	GEO	4 kbit/s à 16 Mbit/s	Proche de zéro	2	3000 pour le routeur, l'antenne et les câbles	Débits variables en fonction du volume de données.	Internet
INMARSAT Global Xpress	Large bande	GEO	50 Mbit/s en téléchargement vers l'aval et 5 Mbit/s en téléchargement vers l'amont	Proche de zéro	2	À annoncer	À annoncer	Internet
GPRS	Messagerie	-	56-114 kbit/s	Secondes	2	350 pour le combiné et le modem	Comparable au tarif des mobiles dans chaque pays	Internet

13 Les systèmes LEO peuvent être divisés en Mini LEO et Super LEO. Les systèmes Mini LEO utilisent de petits satellites assurant des services de données mobiles et de messagerie. Ils sont utilisés pour le rassemblement des données, le facsimile électronique, la radiomessagerie bidirectionnelle et la messagerie électronique. Les systèmes Super LEO ont recours à de plus grands satellites qui fournissent certains de ces services en plus de la voix en temps réel.

* Directionnel ou bidirectionnel



Figure 7.6 Une antenne de transmission radio locale compacte à Antofagasta au Chili. (Photo SHOA).

Meldrum, 2013). Ces rapports inédits peuvent être obtenus auprès de la COI.

7.3.2 Systèmes terrestres

L'avantage des systèmes terrestres est qu'ils sont en mesure de fournir un délai de transmission qui répond aux besoins de l'utilisateur. Les coûts des transmissions sont généralement fixes et moins élevés que ceux des réseaux satellitaires. Les composants requis pour mettre en œuvre cette technologie sont moins sophistiqués et à portée de main auprès de fournisseurs d'accès locaux.

Néanmoins, tous ces systèmes dépendent fortement des infrastructures terrestres pour la transmission à l'utilisateur, laquelle transmission peut être interrompue en situation d'urgence. Par conséquent, ce type de télémétrie n'est pas approprié en tant que système de télémétrie principal pour les organismes d'intervention en cas de catastrophe.

Radio et Wi-Fi

La radio à portée de visibilité directe offre une approche économique à la télémétrie des données sur le niveau de la mer entre deux points en visibilité directe, mais n'est pas adaptée pour les sites qui sont plus éloignés, en raison des besoins en énergie. Ces systèmes fonctionnent sur les bandes non commerciales, les bandes de service et d'aviation dans le spectre du HF/VHF/UHF, généralement de 27 MHz à 915 MHz. D'autres

systèmes disponibles tels que WiFi, Bluetooth et ZigBee permettent aux appareils électroniques de se connecter au réseau local, fonctionnant dans les bandes de 2,4 GHz et 5 GHz, bien que leur compatibilité ne soit garantie qu'avec des enregistreurs de données plus sophistiqués. Si l'utilisateur final se trouve près du marégraphe, ces techniques peuvent être utiles. Toutefois, si l'utilisateur se trouve très loin, alors on aura besoin d'une sorte de télémétrie supplémentaire, ce qui remet en question l'avantage initial lié à l'utilisation de la radio à portée de visibilité directe ou du WiFi. Dans les zones peuplées, l'utilisation de cette technologie doit faire face à des contraintes supplémentaires dues aux obstructions de la portée de visibilité directe et à un spectre de fréquences radios surchargé qui peut causer des interférences dans la transmission. La **Figure 7.6** présente une antenne radio compacte à Antofagasta au Chili.

Internet

Les services à large bande ont connu une expansion considérable à travers le monde, même sur des îles reculées à l'instar de celles du réseau de l'Atlantique Sud du NOC. Les liaisons louées, offrant un accès Internet continu, haut débit, sont disponibles sur toutes ces îles à l'exception de Tristan da Cunha. Le NOC a élaboré des instruments qui peuvent s'appuyer sur un éventail de capteurs, y compris les capteurs radar et les capteurs à pression. Les données sont collectées par un petit processeur encastré Linux et renvoyées à la base par courrier électronique ou par un protocole SCP (secure

copy protocol). Des sites d'essai prenant en charge la liaison large bande et utilisant un capteur radar connecté à un système Linux encastré ont été employés sur plusieurs sites (Holgate et al., 2008).

Les 39 marégraphes du réseau REDMAR de l'Autorité portuaire espagnole utilisent un système semblable, avec des données à la minute disponibles chaque minute sous la forme de courrier électronique. Ce réseau est basé sur les capteurs radar et les données sont affichées sur la page Internet de l'Autorité (<http://www.puertos.es/en-us/oceanografia/Pages/portus.aspx>), la SLSMF de la COI et d'autres portails de données européens.

Les avantages de la technologie Internet large bande sont :

- La liaison bidirectionnelle continue permettant un échantillonnage haute fréquence des données et une récupération des données en temps quasi-réel. Il est dès lors possible de diagnostiquer les marégraphes à distance et aussi de les reprogrammer.
- Les dérives d'horloges et les erreurs de configuration sont éliminées grâce à un temps exact disponible à partir des serveurs du protocole NTP (network time protocol) sur Internet.
- Les coûts de livraison des données sont connus à l'avance parce que les souscriptions sont payées par mois ou par an.
- La collecte de données en temps réel permet une identification et une résolution plus rapides des dysfonctionnements.
- Les systèmes large bande fixes peuvent également permettre un accès au système d'appoint par modem.

Les inconvénients de la technologie Internet large bande sont les suivants :

- Une interface du réseau local est nécessaire, et il est souvent difficile d'ajouter cette interface aux systèmes de marégraphes actuels. Une ligne terrestre est nécessaire pour les systèmes large bande non satellitaires.
- Dans les enregistreurs de données moins sophistiqués, une interface du réseau local n'est généralement pas disponible, ce qui rend l'interconnexion plus difficile.
- Les besoins en énergie des modems large bande sont assez élevés (~1 ampère) et cela engendre des problèmes pour les systèmes alimentés uniquement à l'énergie solaire.

GPRS

L'une des options de télémétrie les plus couramment utilisées dans les zones peuplées est fournie par des modems GPRS à faible puissance qui utilisent une partie de la bande occupée par les téléphones pour se connecter à Internet. Les données peuvent être envoyées à un IP ou domaine spécifique et les coûts de transmission sont généralement fixés et ne dépendent pas du volume de données envoyé. Cette option de télémétrie s'appuie sur l'Internet par fil pour que l'utilisateur final reçoive les données, à moins que le réseau GPRS ne prenne en charge un IP statique afin de permettre à un modem GPRS de servir d'antenne de réception.

À titre d'exemple, le SHOA exploite actuellement 37 stations d'observation du niveau de la mer qui utilisent le GPRS comme la méthode secondaire de télémétrie, et pendant les séismes qui ont provoqué une interruption des communications cellulaires, cette technologie a fait ses preuves. Plusieurs autres stations sont exploitées par GPRS dans d'autres pays, par exemple en Indonésie pour l'alerte aux tsunamis. Une fois que les données ont été livrées par Internet par les entreprises de téléphonie, les données peuvent être partagées avec le reste de la communauté à travers les centres de données qui sont situés dans des pays étrangers, permettant ainsi une poursuite des opérations au cas où un centre de données local subirait des dégâts. Cette redondance des données suit un cheminement semblable à celui des données BGAN et GOES comme l'indique la **Figure 7.4b**. Le réseau REDMAR en Espagne est à présent passé à l'utilisation du GPRS pour l'essentiel de ses stations.

7.4 Télémétrie de diffusion (le GTS)

Il convient d'établir la distinction entre la télémétrie de transmission du marégraphe à l'utilisateur, pour laquelle plusieurs méthodes ont été décrites ci-dessus, et la télémétrie de diffusion utilisée pour le partage de ces données avec le reste de la communauté. Le Système mondial de télécommunications (GTS) constitue la méthode la plus usuelle de ce partage de données. Il se définit comme suit : les installations et mécanismes du système mondial de télécommunications coordonnés pour la collecte, l'échange et le partage rapides des observations et des informations traitées dans le cadre de la Veille météorologique mondiale. Il peut être considéré comme un « Internet spécialisé destiné aux applications météorologiques » et relève de la responsabilité de l'OMM (<http://public.wmo.int/en/programmes/global-telecommunication-system>).

À titre d'illustration, considérons un marégraphe équipé d'une PCD qui transmet à un satellite METEOSAT. Les messages PCD sont retransmis à partir du satellite, reçus à une station terrestre et ensuite envoyés directement au Centre de contrôle des missions de l'Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques (EUMETSAT) à Darmstadt en Allemagne. Au Centre de contrôle des missions, les messages sont traités et distribués aux utilisateurs, et sont également envoyés à l'interface Centre régional de télécommunications du GTS à Offenbach en Allemagne. Les données sont par la suite diffusées sur le GTS sous la forme de bulletins pouvant être reçus par toute organisation enregistrée à l'exemple des centres d'alerte aux tsunamis.

Des systèmes de collecte de données semblables à celui d'EUMETSAT sont exploités par la NOAA, la JMA, l'Administration météorologique chinoise, l'Agence indienne de recherche spatiale (ISRO) et le Service fédéral d'hydrométéorologie et de surveillance de l'environnement (Russie). De la même manière que les transmissions effectuées à travers METEOSAT, que nous avons décrit ci-dessus, les utilisateurs du système GOES qui n'exploitent pas leur propre DRGS peuvent se reposer sur le GTS pour recevoir leurs données de la NOAA. Dans ce cas, la station de commande et d'acquisition de données Wallops (WCDAS) acquiert, entretient, et distribue un flux continu de données satellitaires météorologiques à travers plusieurs réseaux de communication. Le WCDAS insère directement les données dans le GTS pour distribution aux utilisateurs à travers le monde.

Il est important de relever que les données du marégraphe n'ont pas besoin d'être transmises à travers un satellite pour être mises à la disposition du GTS. Les données envoyées par n'importe quelle méthode (par exemple, la téléphonie standard) à un service météorologique national, qui va transmettre les données au GTS. La SLSMF de la COI regroupe actuellement les données de plus de 850 stations d'observation du niveau de la mer à travers le monde, dont la plupart utilisent le GTS comme réseau principal pour la diffusion des données. En effet, un grand nombre de ces stations (notamment au Japon, en Australie et sur les sites français de l'Antarctique) utilisent un service météorologique plutôt qu'une plateforme de collecte de données satellitaire. Si une forme de télémétrie non standard issue d'un marégraphe est utilisée, alors des dispositions de transmission spéciales avec les organismes météorologiques nationaux seront nécessaires.

Pour permettre l'acheminement des données de la PCD à travers le GTS, les messages de la PCD doivent être conformes aux formats, structures et procédures tels

que définis par l'OMM. Un bulletin du GTS contient un ensemble d'informations suivant la description faite à l'Appendice 3 qui est extraite de Poffa (2014).

Le code à caractères pour la représentation et l'échange des données météorologiques (CREX) est un code déterminé par des tables approuvées par l'OMM pour la représentation et l'échange des données d'observation. Un code déterminé par des tables signifie que la forme et le contenu des données contenues dans le message sont décrits dans le message lui-même. Une description formelle du code et une énumération exhaustive des tables associées sont disponibles dans les documents accessibles à partir du site web de l'OMM. Les lecteurs peuvent également se reporter au BOM (2006) et au NOAA (2013b) qui présentent avec exactitude les descripteurs du CREX pour les données des marégraphes et fournissent des exemples. Un exemple de message du CREX généré par une PCD est contenu dans l'Appendice 3.

7.5 PCD et autres équipements de télémétrie

Plateformes de collecte de données

La transmission de données à travers la plupart des systèmes satellitaires décrits ci-dessus nécessite une plateforme de collecte de données (PCD). La PCD consiste en un transmetteur radio et une antenne adaptée ; il est associé à un enregistreur de données de marégraphes et aux capteurs environnementaux, y compris les marégraphes, à travers des connecteurs série qui utilisent des formats de données binaires, ASCII ou pseudo-binaires. Un récepteur GPS assurera la précision de l'horloge à un enregistreur de données et à la PCD, mais le système devrait permettre une exploitation pendant au moins un mois sans une synchronisation temporelle au GPS. Le transmetteur de la PCD sera un instrument robuste avec une sortie RF pour l'antenne de transmission (**Figure 7.7**).

Une PCD sera parfois nécessaire pour les opérations autonomes sur les sites éloignés qui ne sont pas connectés au secteur. Ces sites qui assurent des alertes au tsunami peuvent utiliser des capteurs tels que les marégraphes qui transmettent les données à haute fréquence. Dans ces cas, comme expliqué ci-dessus, il sera nécessaire d'utiliser une PCD à faible consommation d'énergie.

Une station marégraphique peut être considérée comme une interface associant un ou plusieurs capteurs de niveau de la mer, capteurs auxiliaires, enregistreur de données et appareils de télémétrie tels qu'une PCD. Elle nécessitera une alimentation fiable pouvant prendre en charge tous

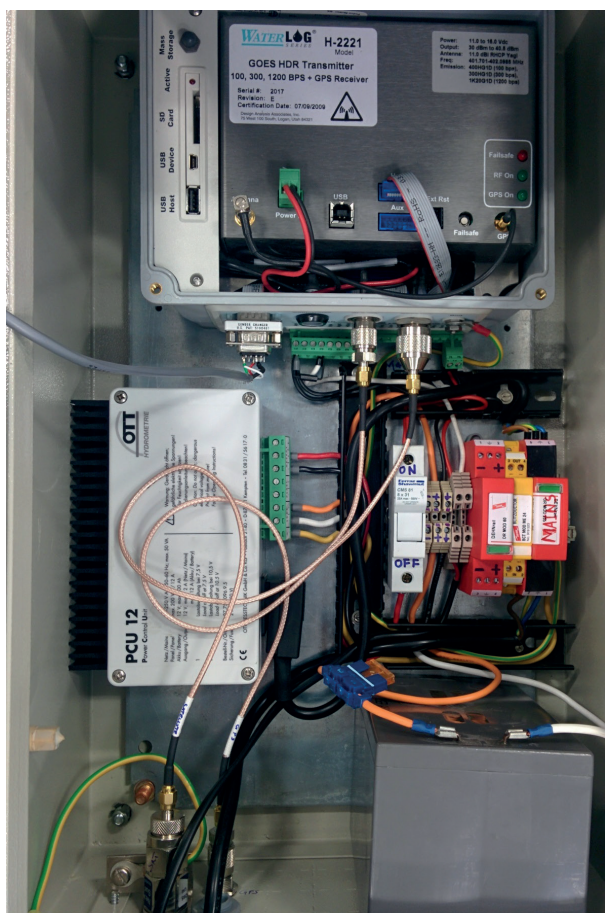


Figure 7.7 L'intérieur d'une armoire électronique de marégraphe. Un transmetteur HDR Waterlog GOES HDR est présenté au sommet de l'armoire tandis que la partie inférieure contient une alimentation et une batterie d'appoint. L'enregistreur de données se trouve derrière le système HDR. (Photo NOC.)

les composants. Il existe également d'autres appareils de télémétrie qui s'ajoutent à la PCD, y compris les antennes UHF/VHF ou un modem GSM/GPRS. En outre, il peut y avoir des équipements GNSS. En fonction du fabricant choisi pour chacun de ces multiples composants, il peut être (ou non) plus pratique de les assembler tous.

L'enregistreur de données et la PCD doivent être sélectionnés pour être directement associés l'un à l'autre et aux différents capteurs à l'aide de câbles et connecteurs appropriés qui permettent une intégration rapide et sans défaillance. Généralement, les fabricants fournissent des logiciels pour gérer le système et établir la configuration dans laquelle s'effectuent les mesures des capteurs, le traitement statistique, l'enregistrement des données et les transmissions de données. Certains enregistreurs de données ne peuvent être associés qu'à des PCD spécifiques, tandis que d'autres supportent plusieurs enregistreurs de données et options de télémétrie. Il s'agit d'un aspect important lorsqu'il est nécessaire d'inclure plusieurs systèmes de télémétrie pour renforcer la résilience de la station dans les situations d'urgence. Par conséquent, l'enregistreur de données et la PCD



Figure 7.8 Une Antenne Yagi GOES. Le petit hémisphère au sommet du poteau de support est une antenne GPS destinée à la datation des mesures. (Photo NOC.)

devraient idéalement fournir des interfaces avec presque tous les types de télémétries et capteurs. Les meilleurs enregistreurs de données disposent de suffisamment de ports pour assurer des liaisons RS-232, RS-485 et SDI-12. En outre, les liaisons peuvent être établies avec un réseau local à l'aide de d'Ethernet tandis que d'autres options de télémétrie comprennent des appareils sans fil, à connexion filaire et satellitaire.

En fonction des caractéristiques du site, l'essentiel des composants de la station, y compris la PCD, peuvent être montés sur des supports installés à l'extérieur, les principaux composants électroniques étant installés dans des espaces clos qui répondent à certaines normes de protection contre les facteurs météorologiques et d'autres risques environnementaux. Toutefois, il est plus courant de trouver des stations d'observation du niveau de la mer dans lesquelles les éléments du système d'alimentation, l'enregistreur de données et d'autres composants électroniques sont montés à l'intérieur d'un cabanon, laissant à l'extérieur les antennes, les panneaux solaires et les capteurs hydrologiques et météorologiques.

Toute personne souhaitant utiliser l'un des systèmes satellitaires pour relayer les messages PCD doit être équipée d'un transmetteur radio de PCD certifié. Certains fabricants fournissent le transmetteur satellitaire pour des systèmes satellitaires uniques. Toutefois, les enregistreurs de données et les transmetteurs satellitaires qui permettent à l'utilisateur d'employer plusieurs systèmes (GOES, METEOSAT, INSAT, SCD ou ARGOS) sont disponibles. Les transmetteurs à débit élevé assurent non seulement une transmission plus rapide des données, mais permettent à plus d'utilisateurs de pouvoir transmettre des données via le même satellite.

Les antennes PCD peuvent être soit directionnelles soit omnidirectionnelles. L'une des stations d'observation du niveau de la mer les plus couramment utilisées est l'antenne directionnelle Yagi ayant un gain de 11,0 dB (Figure 7.8). Ce type d'antenne doit être aligné à l'azimut approprié et suivant l'inclinaison indiquée afin de pointer vers le satellite dédié. Normalement, les fabricants fournissent l'antenne avec un pylône de montage à boulons en U, et un câble pour relier l'antenne au transmetteur. En fonction du modèle et du débit en

bauds utilisé, la puissance de sortie durant la transmission va varier entre 5 et 12 W.

Terminaux BGAN

Le système satellitaire BGAN d'INMARSAT permet des transmissions de données issues de marégraphes à travers le monde. Le système est entièrement fonctionnel et offre plusieurs services. L'un de ces services est la transmission des données, et pour une plateforme de terrain fixe, il est nécessaire d'utiliser le terminal/l'antenne appropriée. À cet effet, il existe divers terminaux satellitaires petits et légers, offrant des performances adaptées à différents besoins opérationnels.

La plupart d'entre eux comprennent une unité composée d'un émetteur-récepteur et d'une antenne intégrale dans un design compact. Le terminal est facile à utiliser, et nécessite une interface Ethernet alors que les boutons de commande du terminal et du LCD permettent à l'utilisateur de contrôler son fonctionnement. En ce qui concerne d'autres systèmes liés à des satellites à orbite géostationnaire, il est nécessaire de pointer l'antenne vers le satellite INMARSAT approprié.



Figure 7.9
(a) Un terminal BGAN Thrane & Thrane Explorer 300 BGAN. (Photo NOC.)

L'utilisateur accède au système à travers une carte SIM activée compatible avec la 3G qui est insérée dans le terminal. Il est nécessaire de signer un contrat avec un fournisseur de solutions gérées par le BGAN, qui non seulement fournit le service, mais aussi prend en charge et optimise l'interface avec la station terrestre.

Certaines antennes, telles que le Thrane & Thrane Explorer 300 (**Figure 7.9a, b**), permettent à l'utilisateur d'envoyer des données à une vitesse atteignant 384 kbit/s et de recevoir les données à une vitesse atteignant 240 kbit/s sur un canal partagé à l'aide d'un IP standard. La perte occasionnelle de la liaison avec le satellite peut être gérée par une intervention manuelle ou à travers un redémarrage régulier (quotidien, par exemple) du système.

Le terminal Hughes 9502 M2M est une autre solution par modules qui permet d'ajouter une fonctionnalité de communication IP en temps réel à une station éloignée. Elle inclut tout le matériel nécessaire pour démarrer. Comme c'est le cas avec les autres terminaux, il faut adjoindre une source d'alimentation et un enregistreur de données ou un périphérique Ethernet. Les équipements nécessaires comprennent une antenne directionnelle, un

câble pour antenne, un support de montage, et tous les câbles nécessaires pour relier le terminal à l'enregistreur de données et à l'alimentation.

Les principaux avantages liés à l'utilisation de Hughes 9502 sont une antenne à gain élevé, la réduction de la probabilité d'une interruption de la liaison avec le satellite, une communication bidirectionnelle permettant des diagnostics à distance et la réinitialisation par l'utilisateur. En utilisant ce terminal, aucune intervention manuelle n'est nécessaire pour récupérer une liaison perdue avec le satellite, grâce à un dispositif de surveillance IP intégré qui assure la permanence de la liaison au réseau et intègre un module complémentaire d'activation automatique ou contextuelle, qui restaure automatiquement l'alimentation et la liaison après l'interruption de l'alimentation ou de la liaison IP ou des deux.

Les données transmises à travers le système satellitaire INMARSAT sont généralement reçues dans une station passerelle terrestre et gérées par le fournisseur de services pour une transmission ultérieure aux utilisateurs par Internet. Toutefois, il est aussi possible de recevoir les données collectées sur le terrain directement dans les



Figure 7.9
(b) Un terminal BGAN similaire à Taltal au Chili. L'antenne (également un T&T Explorer 300) se trouve dans la boîte au coin supérieur droit de la photo. (Photo SHOA).



Figure 7.10 Un modem GPRS typique utilisé au Chili.

installations de l'utilisateur. Pour ce faire, il est nécessaire d'installer un émetteur-récepteur avec antenne BGAN local connecté à l'ordinateur de l'utilisateur final (**Figure 7.4b**). Cette dernière option assure une communication efficace avec la station d'observation du niveau de la mer, étant donné que le dispositif n'est pas tributaire de la réception des données dans une station terrestre BGAN/INMARSAT et d'un transfert ultérieur des données à l'utilisateur final par Internet, qui est la procédure normale de circulation des données adoptée par les utilisateurs de ce réseau. Toutefois, cette approche multiplie par deux les coûts de transmission étant donné que l'utilisateur doit payer pour l'envoi des données au satellite ainsi que pour l'envoi des données du satellite à l'antenne de réception finale.

Modems cellulaires

Plusieurs enregistreurs de données prennent en charge les modems GSM/GPRS pour fournir une télémétrie sans fil sur un réseau mobile GSM/GPRS, et plusieurs enregistreurs de données disposent d'un modem GSM/GPRS/3G/4G intégré. Généralement, ils peuvent être directement associés au système du marégraphe, s'ils sont fabriqués avec des interfaces industrielles standard et des lecteurs de carte SIM intégrés. Il est préférable de choisir un terminal GSM doté de la fonction GPRS (Service général de radiocommunication par paquets), afin que lorsqu'il est utilisé avec le modem approprié les données puissent être envoyées par Internet à travers une connexion TCP/IP sans fil. Il est recommandé de choisir un modem dont le modèle a été entièrement approuvé par les principaux opérateurs afin de pouvoir être utilisé partout. L'équipement du marégraphe aura besoin d'un bloc terminal pour assurer des connexions entre le modem et une source d'alimentation et l'antenne. À titre d'illustration, la **Figure 7.10** présente un modem GPRS typique.

7.6 Spécifications pour la transmission des données GNSS

L'utilisation de GNSS connecté aux marégraphes comme décrit au Chapitre 6 nécessite une bande passante plus élevée pour la transmission des données que pour les données du marégraphe lui-même. L'essentiel des services GNSS, tels que l'IGS ou l'IGS TIGA ou encore les agences nationales de cartographie traitent des données GNSS échantillonnées à 30 secondes. Pour les installations isolées ayant une communication à faible débit, les débits d'échantillonnage de 120 secondes peuvent être utilisés pour obtenir les estimations de position journalière bien que ceux-ci ne soient pas optimaux. Des installations GNSS plus récentes avec des taux d'échantillonnage de 1 Hz ou plus permettent un plus large éventail d'applications, telles que la réflectométrie GNSS ou la sismologie GNSS (Section 6.6).

Pour une application standard et un échantillonnage de 30 secondes, avec une réduction des paramètres inutiles, le volume de données à transmettre est d'environ 18 Mbit/mois, ce nombre pouvant être ajusté à d'autres débits d'échantillonnage (par exemple, 120 secondes) au besoin (cet énoncé est correct au moins pour l'utilisation des seules données du GPS ; des taux proportionnellement supérieurs peuvent être nécessaires si on a recours à plus d'une constellation GNSS). Dans ce cas, un téléchargement quotidien ou plus fréquent des données GNSS, de préférence en fichiers RINEX, est nécessaire pour les besoins de la plupart des applications. Pour l'échantillonnage de 1 Hz, les volumes de données deviennent de plusieurs dizaines de Mbit/jour.

Dans les zones peuplées, une connexion du récepteur GNSS à Internet est la méthode de transmission des données la plus appropriée. Parfois, des radiocommunications de courte portée ou une connexion WiFi peuvent servir de passerelle entre le marégraphe et le point d'accès Internet le plus proche. Dans les sites ne disposant pas d'une infrastructure locale, le GPRS est généralement utilisé pour télécharger des données et gérer le récepteur GNSS. Toutefois, les systèmes de communication par satellite peuvent également être utilisés, et les sites éloignés peuvent utiliser le BGAN, le VSAT ou IRIDIUM en ce qui concerne les données des marégraphes (bien qu'IRIDIUM ne prenne pas en charge des débits de données élevés).

8. Données sur le niveau de la mer

8.1 Centres de données du niveau de la mer

Il existe plusieurs centres internationaux de données sur le niveau de la mer. Ils jouent différents rôles dans la fourniture du jeu de données global sur le niveau de la mer (Tableau 8.1). Toutefois, chaque centre collabore étroitement avec d'autres centres, maximisant ainsi la quantité et la qualité des données qui peuvent être mises à la disposition des scientifiques et d'autres personnes intéressées par le niveau de la mer. Le plan de mise en œuvre 2012 du GLOSS (COI, 2012) explique comment les centres coopèrent dans l'élaboration d'un service web efficace et centralisé dans le cadre de GLOSS pour les données et métadonnées sur le niveau de la mer.

Toutefois, il serait erroné de dire que seul le programme GLOSS intéresse ces centres. L'essentiel d'entre eux reçoivent, assurent le contrôle de qualité, conservent et redistribuent les données provenant des marégraphes,

qu'ils fassent partie du programme GLOSS ou non. Dans le contexte du présent Manuel, nous encourageons tous les opérateurs ayant de bons marégraphes radars à mettre leurs données à la disposition de chaque centre de données.

On peut dire que les marégraphes fournissent trois types de données, qui correspondent chacun à l'un des centres décrits ci-dessous :

- Données en temps réel ou en temps quasi-réel. Ces données sont nécessaires à des fins opérationnelles telles que les opérations portuaires, les alertes aux inondations dues aux ondes de tempêtes, ou l'identification des tsunamis. Un contrôle de qualité rigoureux n'est pas nécessaire, ou a peu de chances d'être réalisé. Ces données sont souvent surveillées par un personnel expérimenté qui est en mesure de déterminer si les anomalies qui y sont constatées sont réelles ou dues à un dysfonctionnement des instruments.

Tableau 8.1

Centres de données sur le niveau de la mer

	Lieu	Rôle	Disponibilité des données	
Dispositif de surveillance	SLSMF COI	Visualisation et téléchargements de données brutes NRT	4 à 6 semaines	www.ioc-sealevelmonitoring.org
Mode rapide	UHSLC	Contrôle qualité préliminaire des données par leurs auteurs		uhslc.soest.hawaii.edu
Mode différé	BODC	Données haute fréquence finales provenant des auteurs	Annuelle	www.bodc.ac.uk
Données horaires	JASL/ UHSLC	Données horaires finales avec corrections	Annuelle	uhslc.soest.hawaii.edu
Moyennes mensuelles	PSMSL	Moyennes mensuelles finales provenant des auteurs	Annuelle	www.psmsl.org
Données GNSS	SONEL	Archive des données GNSS co-localisées aux marégraphes	Quotidienne	www.sonel.org

Les sites Internet ci-dessus contiennent des informations sur la couverture mondiale des stations. Le site du PSMSL contient également une liste de certaines sources nationales et régionales de données en temps réel et en temps différé de niveau de la mer..

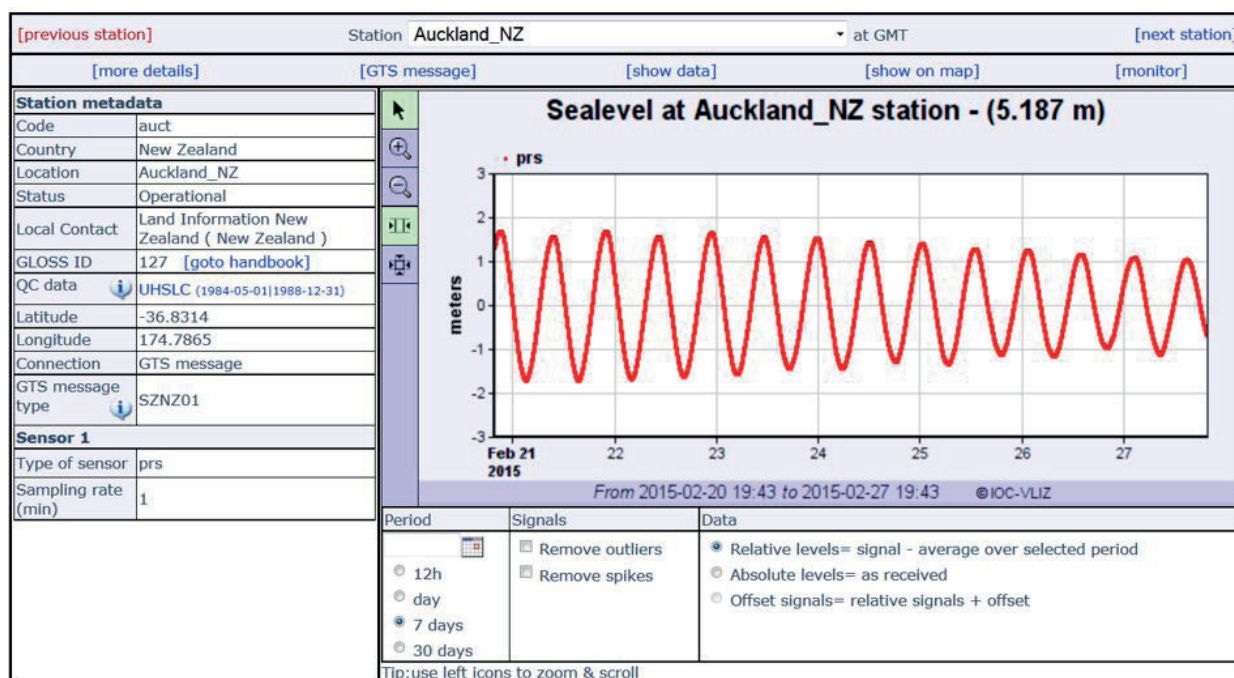


Figure 8.1 Un exemple de statut opérationnel pour un des marégraphes du Sea Level Station Monitoring Facility (SLSMF) de la COI.

- Données mise à disposition rapidement. Ces données sont nécessaires dans les semaines qui suivent et peuvent être soumises à un contrôle qualité. Des données rapides sont nécessaires pour les applications telles que la validation des données des altimètres satellitaires.
- Données en temps différé. Ces données sont inspectées rigoureusement et marquées par des « flags » pour indiquées à l'utilisateur si elles sont bonnes, suspectes ou mauvaises. La principale application des données en temps différé est la recherche scientifique.

8.1.1 Dispositif de surveillance du niveau de la mer de la COI (pour les données en temps réel et en temps quasi-réel)

L'institut flamand de la mer (VLIZ) en Belgique héberge le site web du dispositif de surveillance du niveau de la mer (Sea Level Station Monitoring Facility, SLSMF, <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>) pour le compte de la COI, qui est destinée à la visualisation en temps réel du niveau marin en provenance des stations marégraphiques et à travers le Système mondial

de télécommunications (GTS) ou d'autres voies de communication. Les opérateurs peuvent facilement évaluer le statut opérationnel de leurs stations par une inspection rapide du flux de données brutes (Figure 8.1). En outre, le statut opérationnel de toutes les stations est contrôlé chaque semaine par le SLSMF, et en cas de défaillance, de celles-ci, les opérateurs des stations sont contactés. Tous les opérateurs de marégraphes, associés à GLOSS ou à d'autres programmes de la COI, sont encouragés à envoyer leurs données au SLSMF, même s'ils ont leur propre système surveillance en temps réel (voir également la Section 8.2.1).

Le SLSMF offre également un service Internet pour l'accès direct aux données. Toutefois, ces données brutes ne sont soumises à aucun contrôle qualité et ne doivent en temps normal pas être utilisées à des fins scientifiques. L'objectif étant que le SLSMF travaille avec le centre de données haute fréquence de GLOSS pour s'assurer que ces données à haute fréquence soient incluses in fine dans une base de données après un contrôle de qualité.

Le SLSMF a également mis au point un système de catalogue qui relie les métadonnées des différents centres d'archivage, ce qui constitue un pas important vers la mise en place du service centralisé évoqué ci-dessus. Les systèmes de métadonnées PTWC, UHSLC et PSMSL/GLOSS Handbook sont déjà reliés, et celui de TIGA rejoindra bientôt le réseau (voir ci-dessous pour quelques-unes des activités effectuées).

8.1.2 Centre de mise à disposition rapide de GLOSS (Fast Delivery Center)

Le Centre de données rapide de GLOSS est exploité par le Centre du niveau de la mer de l'Université de Hawaï (UHSLC ; <http://uhslc.soest.hawaii.edu/>) et assure la collecte et la distribution des versions finales des jeux de données du niveau de la mer qui ont préalablement été soumises à un contrôle qualité par leurs auteurs. La livraison rapide (Fast Delivery) implique la mise à disposition des données reçues dans un délai de 4 à 6 semaines. L'UHSLC offre des services de contrôle de qualité rapides aux États membres qui n'ont pas cette capacité. Voir d'autres observations sur les données « rapides » à la Section 8.2.1.

8.1.3 Centre de données en temps différé GLOSS (pour données en temps différé)

Le Centre de données temps différé de GLOSS est opéré par le Centre de données océanographiques de Grande-Bretagne (BODC ; <http://www.bodc.ac.uk>) en collaboration avec le PSMSL. Il assure la collecte, le contrôle qualité et la distribution des versions « finales » des jeux de données sur le niveau de la mer, ainsi que de toutes les métadonnées connexes en provenant des sites GLOSS uniquement. Il est structuré pour fournir des valeurs horaires (ou subhoraires), accompagnées de variables auxiliaires (par exemple, la pression atmosphérique) lorsqu'elles sont disponibles.

Il est important que le GLOSS archive les données subhoraires, plutôt que les valeurs horaires obtenues, lorsque les premières comprennent des mesures brutes. Les données subhoraires pourraient également s'avérer importantes pour l'analyse scientifique des processus tels que les tsunamis, les météo-tsunamis et les seiches, qu'il n'est pas possible d'étudier avec les données horaires. Les fournisseurs de données au PSMSL doivent envoyer leurs données dans l'année suivant l'année d'acquisition accompagnées d'un ensemble complet de métadonnées (y compris les informations sur les repères).

En collaboration avec la COI, le BODC, avec le concours du PSMSL, joue un rôle de coordination essentiel pour GLOSS, notamment la production du Manuel des stations GLOSS contenant les descriptions de chaque station marégraphique du réseau GLOSS (GLOSS Handbook). Ce Manuel est disponible sur le site web de GLOSS (<http://www.gloss-sealevel.org>) qui est maintenu par le Centre

de données océanographiques de Grande-Bretagne (BODC) et informe sur le programme GLOSS.

8.1.4 Le Joint Archive for Sea Level (pour données en temps différé)

Le Joint Archive for Sea Level (JASL) est le fruit d'une collaboration entre l'UHSLC et le Centre national de données océanographiques (NODC) des États-Unis. Le JASL collecte globalement des jeux de données horaires provenant de marégraphes GLOSS ou non et qui ont subi un contrôle qualité final par les auteurs des données. Le JASL fait une vérification indépendante des données, principalement pour identifier les valeurs aberrantes existantes, les problèmes de décalage en temps ou de modifications de la référence de la série. Tout problème de qualité avec les données est porté à l'attention des auteurs des données pour vérification. Ensuite, Le JASL assemble les données de chaque station en une série horaire unique, ou en des sous-séries si des modifications du niveau de référence sont survenues. L'ensemble de données du JASL représente par conséquent un « produit », étant donné que les données problématiques ne sont pas simplement marquées (flagged) et abandonnées, comme le fait le BODC pour les données temps différé, mais sont en réalité remplacées par les meilleures valeurs évaluées par le JASL. Tous ces changements sont documentés dans les métadonnées.

8.1.5 Centre de données à haute fréquence GLOSS

Le Plan de mise en œuvre du GLOSS (2012) a proposé l'établissement d'un centre de données à haute fréquence GLOSS entretenant des rapports étroits avec les autres centres de données GLOSS. Le centre GLOSS-HF importera tous les ensembles de données à haute fréquence qui ont été soumis à un contrôle qualité par l'auteur. Ce centre s'intéressera au premier chef aux stations GLOSS, certes, mais il sera encouragé à inclure tous les jeux de données de haute qualité qui peuvent être utiles à la recherche, notamment à l'analyse des tsunamis et des ondes de tempêtes.

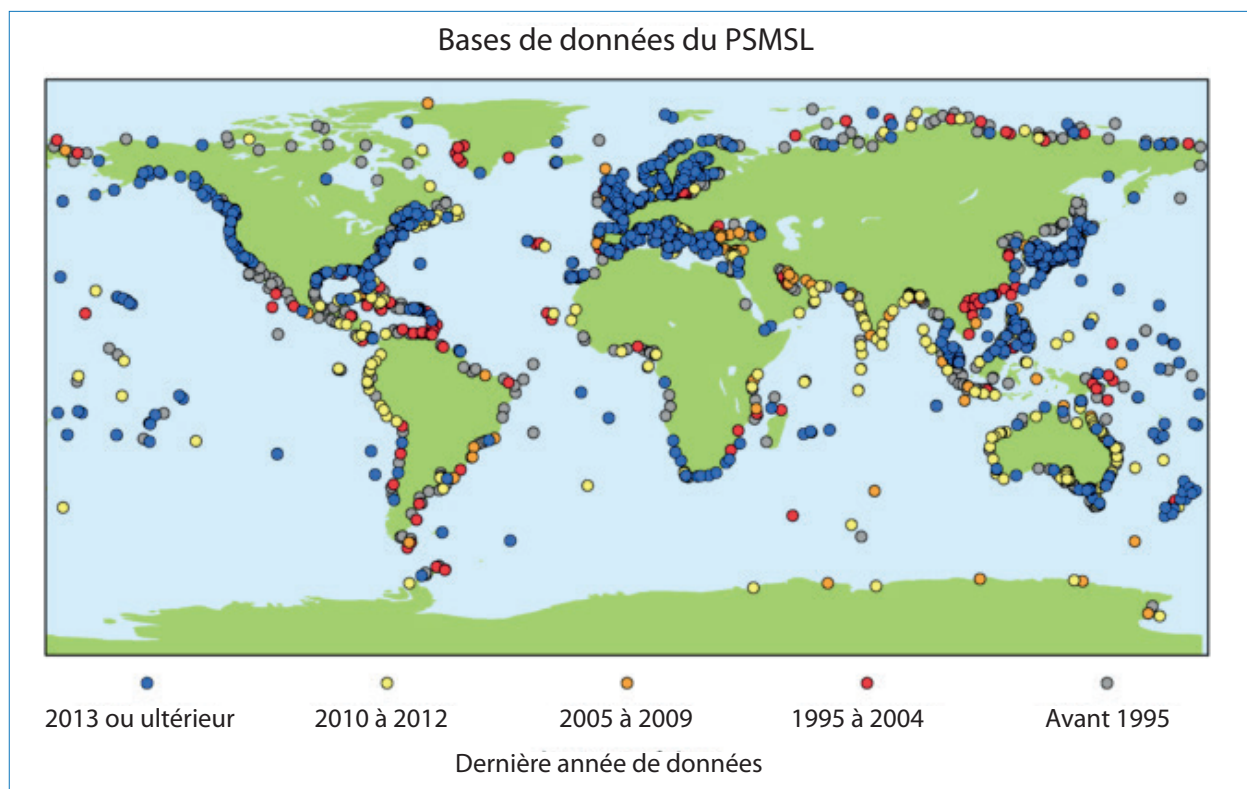


Figure 8.2 Statut des bases de données du PSMSL (daté de 2015). Les points colorés indiquent la dernière année de réception des données.

8.1.6 Service permanent du niveau moyen des mers (PSMSL)

Depuis 1933, le Service permanent du niveau moyen des mers (PSMSL, <http://www.psmsl.org>, Holgate et al., 2013) s'occupe de la collecte, la publication, l'analyse et l'interprétation des données sur le niveau de la mer à partir du réseau mondial des marégraphes. Il est basé au Centre océanographique national (NOC) à Liverpool et fonctionne sous les auspices du Conseil international pour la science (ICSU) et est un membre du Système mondial de données (WDS) de l'ICSU. Au moment de la rédaction, la base de données du PSMSL contenait 66 000 années-stations de moyennes mensuelles et annuelles du niveau de la mer issues d'environ 2250 stations marégraphiques à travers le monde et provenant de plus de 200 autorités nationales (**Figure 8.2**). Environ 1500 années-stations de données en moyenne sont enregistrées dans la base de données chaque année. Beaucoup d'enregistrements du niveau marin sont liés aux mouvements verticaux du sol obtenus par GNSS via le service SONEL.

L'ensemble de données du PSMSL est la principale source d'information sur les variations du niveau de la mer (et son augmentation) et est utilisé par de nombreux scientifiques travaillant sur le niveau marin

et qui contribuent à l'évaluation des recherches telles que celles du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le PSMSL a toujours joué un rôle primordial dans l'organisation de cours de formation sur le niveau de la mer et la fourniture du matériel de formation.

8.1.7 Centre de données GNSS aux marégraphes (pour les données GNSS)

Le Groupe de travail TIGA de l'IGS comprend des centres d'analyse ainsi qu'un « data assembly center » dédié aux sites co-localisés à un marégraphe (Schöne et al., 2009). Ce centre est appelé SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales, <http://www.sonel.org>) et est financé par l'Université de La Rochelle et le centre national de recherche scientifique/l'Institut national des sciences de l'Univers (CNRS/INSU) français. Le SONEL fournit des informations sur le statut des stations GNSS co-localisées aux marégraphes à travers son portail web. Il collecte, archive et distribue les données et métadonnées issues des observations GNSS qui sont accessibles à travers une interface Internet ainsi qu'un serveur FTP anonyme.

TIGA et SONEL travaillent avec le PSMSL et d'autres centres de données pour définir et fournir des produits

utiles orientés vers l'utilisation des stations GNSS co-localisées aux marégraphes, et pour déterminer les standards et formats les plus appropriés pour une distribution à la communauté du niveau de la mer. Une tâche importante est de conserver les documents des opérations de nivellement liant l'antenne GNSS aux repères du marégraphe. Tous les opérateurs de marégraphes, qu'ils soient associés à GLOSS ou non, sont encouragés à inclure leurs données et métadonnées dans le centre de données SONEL.

8.2 Contrôle qualité des données

Quel que soit le flux de données envisagé, les données du marégraphe auront généralement été échantillonnées à intervalles réguliers. Par exemple, les marégrammes papier des marégraphes à flotteur traditionnels étaient numérisés à des intervalles horaires (ou parfois à des intervalles de 30 minutes, rarement à des intervalles plus courts). Un marégraphe moderne fournit des données avec en général une ou plusieurs minutes d'échantillonnage. Parfois, l'échelle de temps des données en temps différé nécessitera une correction en raison d'une dérive d'horloge de l'instrument, mais l'échantillonnage restera régulier. Occasionnellement, un enregistrement contiendra des écarts en raison d'un dysfonctionnement du marégraphe ou d'erreurs de transmission ou de données aberrantes, ou des modifications du niveau de référence provoquées par une modification du zéro effectif du marégraphe.

8.2.1 Contrôle qualité en temps réel

Ces dernières années, l'accent a été mis sur la nécessité d'obtenir des données en temps réel ou en temps quasi-réel d'autant de marégraphes que possible. Plusieurs raisons expliquent ce choix. Tout d'abord, si l'on dispose de données en temps réel, alors tout problème survenant au niveau des marégraphes peut être identifié plus tôt et résolu à temps. Ensuite, les données sont disponibles pour plusieurs autres applications dans le domaine de « l'océanographie opérationnelle ». Par exemple, les données peuvent être utilisées dans les services d'alerte aux inondations dues aux ondes de tempêtes (Pugh et Woodworth, 2014), ou peuvent être associées à des modèles opérationnels de circulation océaniques. Les données en temps réel ou en temps quasi-réel sur le niveau de la mer peuvent être utiles à la navigation côtière si les niveaux sont communiqués aux navires avec les autres informations météorologiques au moyen d'aides à la navigation du système d'identification automatique (AIS

AtoN). Comme l'ont démontré les principaux tsunamis qui se sont produits ces dernières années, les données du niveau de la mer peuvent constituer d'importantes sources d'information au sein de systèmes d'alerte aux tsunamis (Pérez et al., 2013).

Ces développements ont entraîné l'établissement du SLSMF de la COI décrit ci-dessus. Cette installation n'assure pas un contrôle de qualité des données qu'elle reçoit et n'utilise les données dans aucune de ses applications ; elle assure juste un service de surveillance. Toutefois, il existe de nombreuses agences nationales qui ont des systèmes opérationnels nécessitant un accès aux données en temps réel et en temps quasi-réel. Dans ces cas, le système opérationnel doit être suffisamment robuste pour ne pas être perturbé en cas d'enregistrement de données erronées (par exemple, des données aberrantes). L'un des moyens d'éviter d'obtenir ces données de mauvaise qualité est d'assurer une surveillance humaine permanente de la chaîne de données (comme c'est le cas dans le UK Storm Tide Forecasting Service pour l'alerte aux inondations). Toutefois, les procédures et logiciels de contrôle qualité en temps réel (RTQC) ont été mis au point par différents groupes (par exemple, Pouliquen et al., 2011). L'Autorité portuaire espagnole (Puertos del Estado) a mis au point un logiciel de contrôle qualité automatique pour la détection des crêtes, des écarts, etc. en utilisant des données à la minute, avant que les données ne soient mises à la disposition du public et intégrées dans un système de prévision des ondes de tempêtes (Pérez et al., 2013). Le logiciel assure la détection des tsunamis et des seiches et la transmission des alertes aux organismes responsables, y compris le système d'alerte aux tsunamis.

Le système intégré d'observation des océans (IOOS) de la NOAA a également mis au point des critères de contrôle qualité en temps réel pour les niveaux des mers ou des lacs. Il propose une série de 11 tests que les opérateurs peuvent intégrer dans leurs procédures de contrôle qualité en temps réel. Ces tests sont regroupés en différentes catégories : nécessaires, recommandés et fortement recommandés. L'IOOS (2014) décrit les algorithmes pour chaque test, et présente de façon succincte les questions de niveaux de référence et de nivellement, les indicateurs de niveau d'eau et leurs applications ainsi que le traitement de leurs données.

Les données de niveau de la mer obtenues en temps réel, qui ne nécessitent que des contrôles qualité sommaires pour être utilisables dans certaines applications sur de courtes périodes (des semaines, par exemple) sont appelées données rapides, le contrôle qualité complet du traitement en mode différé n'étant généralement pas possible pour ces périodes. Parfois, certaines données

peuvent restées « rapide » pendant un laps de temps jusqu'à ce que soit fait le contrôle qualité en temps différé, ou que certaines questions sur les données ou métadonnées (par exemple, concernant les niveaux de référence ou les informations sur la datation des données) puissent être résolues. Comme mentionné ci-dessus, l'UHSLC dispose d'un Centre de données rapides à partir duquel des données migrent par la suite vers le Research Quality Data Set (RQDS)/JASL de l'UHSLC.

8.2.2 Contrôle qualité en temps-différé

Les données des marégraphes, collectées en temps réel ou à des intervalles plus longs (mois ou années) à partir des mémoires des stations, sont généralement transférées aux centres de collecte de données pour un contrôle qualité en temps différé (DMQC) et pour archivage. (Une liste des centres nationaux est disponible à travers le lien http://www.psmsl.org/links/sea_level_contacts/). À ce stade, les données sont ajustées en fonction des biais de référence des capteurs en utilisant les métadonnées présentées au Chapitre 4. Ensuite, elles seront envoyées aux centres internationaux décrits dans la section précédente, et ces derniers procéderont à un contrôle de qualité distinct.

Les principes généraux du contrôle qualité en temps différé effectué par les divers centres ont été décrits dans les précédents volumes du présent Manuel, dans des rapports et ouvrages (par exemple, Parker, 2007 ; Pugh et Woodworth, 2014 ; Woodworth et al., 2015) et de façon plus complète dans un manuel inédit de la COI portant sur le contrôle qualité des observations du niveau de la mer (COI, 2014). Deux évolutions peuvent être évoquées ici, la première étant spécifique aux marégraphes radars dans le présent Manuel et la seconde spécifique au contrôle qualité des données marégraphiques en général.

8.2.2.1 Utilisation des données à la minute dans le contrôle qualité

Les marégraphes radar peuvent mesurer le niveau de la mer chaque minute, ou à une fréquence plus élevée au besoin, ce qui les rend adaptés pour la mesure des tsunamis, des météo-tsunamis, des seiches et d'autres phénomènes océaniques qui ont des échelles de temps inférieure à l'heure. Ces données haute fréquence ne sont généralement pas incluses dans le contrôle qualité effectué par la plupart des centres de données du réseau GLOSS. Ces centres se focalisent sur les marées, les ondes

de tempêtes et les variations du niveau moyen de la mer, qui peuvent être étudiées de façon adéquate avec un échantillonnage horaire (ou plus idéalement avec des valeurs de 6, 10 ou 15 minutes).

Dans son document de 2014, la COI présente les étapes du contrôle qualité devant être observées pour assurer la qualité des données. Les principales étapes sont entre autres une analyse de la marée qui permet une séparation des composants liés aux marées et ceux qui ne sont pas liés aux marées (et fournit une estimation des constituants de la marée), une inspection des composants qui ne sont pas liés aux marées (ou résidus des marées) étant particulièrement utile à l'identification des problèmes de données tels que les données aberrantes et les modifications du niveau de référence de la station. La composante de marée de l'enregistrement ne sera pas plus facilement séparable avec un échantillonnage à la minute qu'avec qu'un échantillonnage à 15 minutes d'intervalle ou horaire, par exemple.

Nous formulons les recommandations suivantes aux centres de données ou autres analystes devant effectuer un contrôle qualité sur des données enregistrées à une minute d'intervalle :

- (1) Assurer que les données originales obtenues à une minute d'intervalle sont copiées en toute sécurité dans une archive afin de pouvoir les consulter au besoin. Par exemple, elles peuvent être nécessaires pour des études futures sur un ou plusieurs processus à haute fréquence. Elles peuvent également être utiles à nouveau si les méthodes de contrôle qualité changent.
- (2) Les données radar enregistrées à une minute d'intervalle peuvent être bruitées, notamment pendant des périodes de marées hautes. Par conséquent, la série doit être inspectée (par la visualisation des données ou par l'utilisation d'un logiciel approprié) afin de rejeter les valeurs aberrantes. Par exemple, cela pourrait prendre la forme de rejet des mesures prises à une minute d'intervalle qui ont des valeurs aberrantes supérieur à 3-sigma. Toutefois la méthode spécifique utilisée pour le rejet des données bruitées (ou si cette méthode est nécessaire) peut être fonction du lieu, et doit être guidée par l'expérience acquise dans l'utilisation des données issues des radars à l'instar de celles décrites dans le présent Manuel.
- (3) Si un contrôle qualité est normalement effectué sur des valeurs horaires, alors un filtre passe-bas peut être conçu pour filtrer de façon optimale les valeurs d'une minute en valeurs horaires. Ces filtres sont décrits dans COI (2014).

- (4) Si le contrôle qualité est effectué normalement par un centre de collecte sur des valeurs échantillonnées à 6 ou 15 minutes par exemple (un échantillonnage plus élevé qu'horaire est généralement nécessaire pour décrire l'évolution des ondes de tempêtes), alors nous suggérons que les mesures soient moyennées à une minute. Le centre disposera alors déjà de filtres pour une conversion ultérieure de cette moyenne en des valeurs horaires, journalières, etc. (Il convient de noter que les différents centres utilisent différents filtres pour la conversion des valeurs horaires en moyennes journalières ; ce sujet a été examiné dans le Volume III et dans le document COI, 2014).

Il peut parfois s'avérer nécessaire d'effectuer un contrôle qualité spécial sur un enregistrement bref d'une minute datant de plusieurs jours ou semaines, contenant des signaux intéressants sur des tsunamis ou ondes de tempêtes. Dans ce cas, nous suggérons qu'un contrôle qualité soit d'abord effectué sur un enregistrement plus long d'un an par exemple, incluant la courte période d'intérêt, au cours de laquelle la procédure ci-dessus a été suivie et à partir de laquelle des constantes de la marée ont été obtenues. Les constantes de la marée peuvent ensuite être utilisées dans un programme de prédiction des marées pour fournir la composante de marée suivant un échantillonnage d'une minute à partir des mesures et, partant, assurer une identification claire des événements survenant sur de courtes périodes. Dans le cas contraire, nous ne voyons pas, dans le cadre du GLOSS la nécessité ou la possibilité d'effectuer un contrôle qualité complet de toutes les données enregistrées à une minute d'intervalle.

8.2.2.2 Utilisation des données altimétriques satellitaires pour le contrôle de la stabilité du niveau de référence des marégraphes

Un pas supplémentaire a été franchi ces dernières années dans le contrôle qualité des marégraphes grâce à la disponibilité des données obtenues par altimétrie satellitaire. Il peut exister de réelles différences entre la variabilité du niveau de la mer enregistrée par un marégraphe à la côte et celle enregistrée à plusieurs dizaines de kilomètres au large par un satellite altimétrique, en raison des phénomènes océaniques qui se produisent entre les deux points. En outre, il existe des différences entre les deux types de niveau de la mer (un relatif et

l'autre géocentrique) avec des données altimétriques normalement corrigées de l'effet du baromètre inverse pour les périodes supérieures à 20 jours et avec une correction dynamique appliquée pour les périodes plus courtes. Néanmoins, l'expérience dans l'utilisation des données altimétriques par de nombreux scientifiques au cours des deux dernières décennies a montré que, pour la plupart des sites océaniques ouverts (par exemple, les îles et le littoral ouvert), il existe généralement une forte corrélation dans la variabilité des deux types de niveaux de la mer (par exemple, Vinogradov et Ponte, 2011). Cette corrélation permet l'utilisation des données sur le niveau de la mer pour vérifier la stabilité des données altimétriques (Leuliette et al., 2004) et, inversement, elle permet d'identifier les erreurs flagrantes dans le niveau de référence du marégraphe.

Le Joint Archive for Sea Level (JASL) à l'Université d'Hawaïi compare régulièrement les données quotidiennes des marégraphes aux données sur le niveau de la mer fournies par les satellites altimétriques (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/data-access.html>). La comparaison visuelle des séries peut servir à évaluer la stabilité du niveau de référence du marégraphe. À titre d'exemple, le tracé des données d'un marégraphe à Kaohsiung à Taiwan et les données altimétriques correspondantes indiquaient un saut dans la différence des séries en 2009 (**Figure 8.3a**). Une série corrigée a été fournie par les auteurs des données du Central Weather Bureau (bureau central de météorologie) (**Figure 8.3b**). Des comparaisons de routine similaires des moyennes mensuelles effectuées par d'autres groupes sur la base des données obtenues des altimètres et des marégraphes ont permis d'identifier l'occurrence des problèmes d'antenne dans les nouveaux marégraphes radar (Pérez et al., 2014).

8.2.3 Analyse des marées et modules de contrôle qualité

Les organismes nationaux de gestion des marégraphes qui ne disposent pas de leur propre logiciel de contrôle qualité, ou les analystes qui souhaitent entreprendre leur propre contrôle qualité, peuvent utiliser l'un des modules mentionnés ci-dessous. (D'autres modules sont disponibles, mais ces deux-là sont ceux pour lesquels nous avons le plus d'expérience.)

- (1) Le module UHSLC pour le traitement et le contrôle qualité des données horaires sur le niveau de la mer a été assemblé et documenté par le JASL et fait l'objet d'une large utilisation par plusieurs groupes. Il vient d'être mis à jour et prend désormais en charge

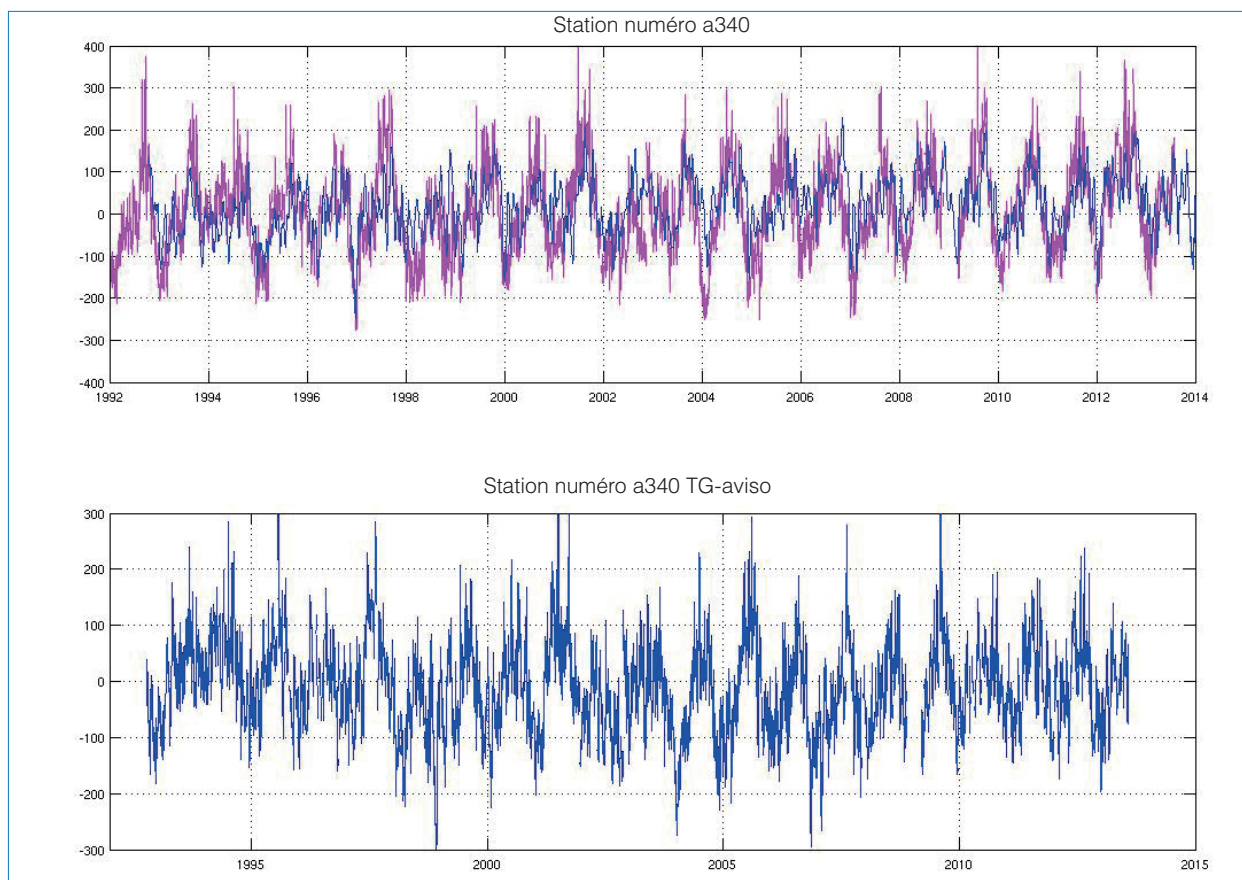


Figure 8.3

(a) Le panneau supérieur présente les données journalières du marégraphe Kaoshiung (rose) et données à 10 jours d'altimétrie satellitaire provenant d'AVISO (bleu). La moyenne a été enlevée pour les deux séries. Le panneau inférieur présente la différence entre les deux.

les systèmes d'exploitation Windows 64 bits et Linux. Son but est la production de jeux de données de haute qualité et valides au plan scientifique, sur le niveau de la mer. Le logiciel intègre le « Tidal Package », module d'analyse et de prédiction des marées de l'Institut des sciences océanographiques du Canada. Pour de plus amples informations, écrivez à caldwell@hawaii.edu ou suivez le lien <http://ilikai.soest.hawaii.edu/UHSLC/jasl/jaslsoft.html>.

- (1) Le Tidal Analysis Software Kit (TASK) du NOC était jusqu'ici disponible uniquement sous DOS. L'équipe de production des données maritimes a entièrement réécrit le logiciel afin de créer une édition TASK-Windows, une suite de programmes qui allie une analyse harmonique précise avec des applications Windows pour la manipulation, le traitement, le contrôle de la qualité et la visualisation graphique des données. Les outils du TASK sont destinés à rendre les choses le plus simple possible (par exemple, l'auto-marquage des données, la détection des trous, la détection des données aberrantes, le décalage en temps, la visualisation

graphique sophistiquée avec une identification et une suppression faciles des données erronées. Le package contient le logiciel de prédiction des marées POLTIPS-3 pour la production de tableaux de marées annuels entièrement mis en forme. Pour de plus amples informations, écrivez à dataproducs@noc.ac.uk ou suivez le lien <http://noc.ac.uk/using-science/products/tidal-harmonic-analysis>.

8.3 Obligations des fournisseurs de données

On pourrait penser que toutes les données sur le niveau de la mer passent automatiquement à travers une chaîne de traitement de données rapides en temps réel, après quoi des données de haute qualité seraient mises à la disposition des scientifiques et autres. Toutefois, alors que certaines données suivent ce cheminement, ce n'est pas le cas pour l'essentiel.

La raison principale pour laquelle la chaîne ne peut pas toujours être entièrement automatique est liée au contrôle qualité en temps différé. Ce n'est qu'à ce point

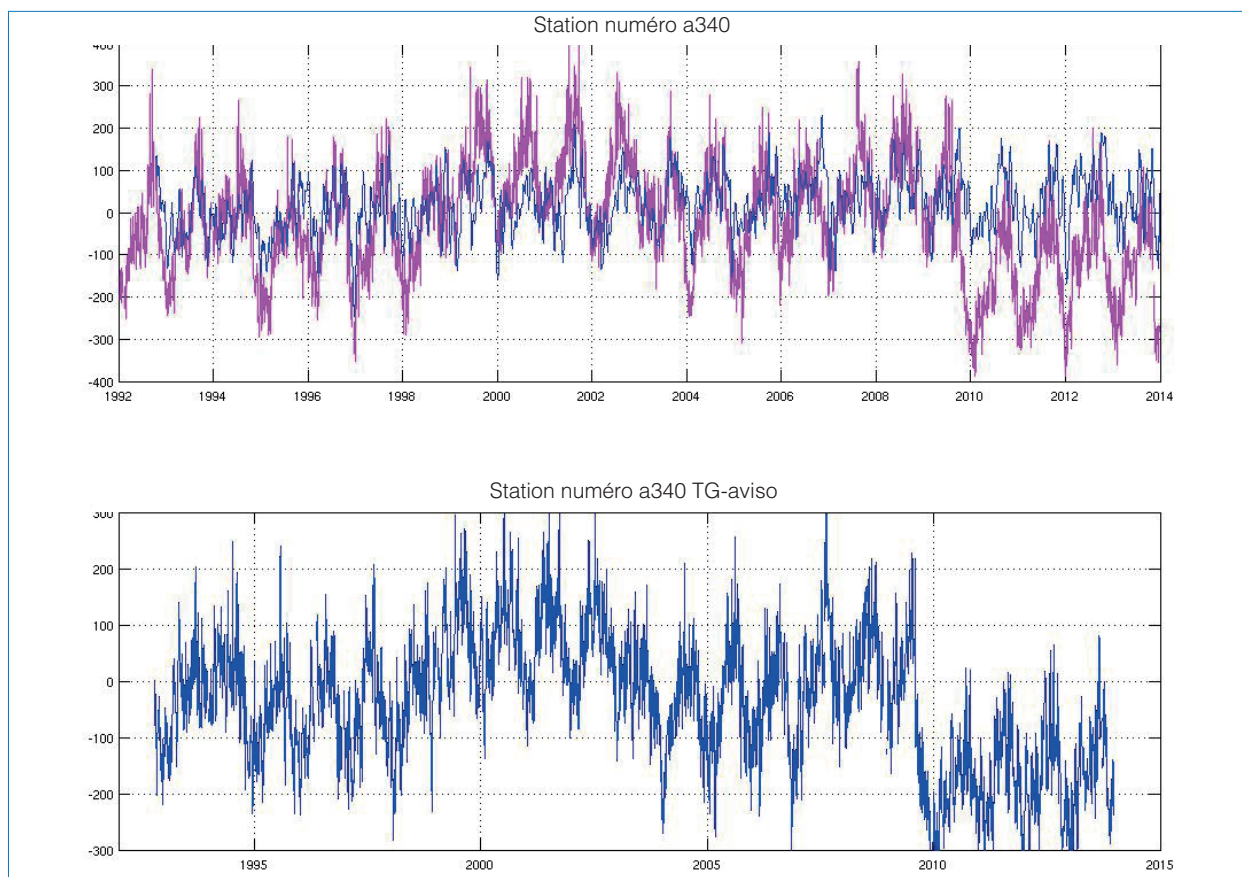


Figure 8.3

(b) Un ensemble de données corrigé pour le marégraphe a été reçu et confirme qu'il correspond maintenant à l'altimétrie.

que toutes les informations disponibles sur l'étalonnage des capteurs, le nivellement des repères pour les niveaux de référence, etc. sont collectées et consignées afin d'obtenir le produit final. Par conséquent, il doit y avoir une collaboration permanente entre les opérateurs des stations, les centres nationaux d'assemblage des données et les centres d'observation du niveau de la mer à toutes les étapes de la chaîne. La COI (2012) affirme clairement les obligations des fournisseurs de données :

- Assurer que les données en temps réel sont transmises au SLSMF de la COI automatiquement dans ce cas.
- Mettre des données à débit rapide à la disposition du Centre de données rapides du GLOSS, qui les soumettra à un contrôle qualité partiel puis les mettra à son tour à la disposition de l'ensemble de la communauté dans un délai de 4 à 6 semaines. Dans certains cas, le Centre pourra accéder aux données en temps réel du SLSMF et y effectuer un contrôle qualité partiel comme indiqué ci-dessus.
- Mettre des données en temps différé, qui ont été soumises à un contrôle qualité complet, à la disposition de l'un des centres de données temps

différé (BODC ou UHSLC) au plus tard en septembre de l'année suivant l'année d'acquisition.

- Mettre des valeurs mensuelles et annuelles du niveau moyen de la mer, accompagnées d'informations complètes sur le niveau de référence et de métadonnées, à la disposition du PSMSL au plus tard en septembre de l'année suivant l'année d'acquisition.

9. Support de formation et contacts

Le PSMSL maintient des pages web (http://www.psmsl.org/train_and_info/) qui donnent accès aux supports de formation élaborés principalement pour GLOSS. Ce matériel comprend :

- La liste des ouvrages sur les marées et le niveau des mers ; les liens aux rapports du GLEC ; des informations sur la géodésie et sur l'altimétrie satellitaire ainsi que d'autres informations utiles.
- Les précédents volumes du présent Manuel.
- Des liens vers les personnes contacts pour l'observation du niveau de la mer dans plusieurs pays (ces coordonnées deviennent rapidement obsolètes et le PSMSL accueille toujours favorablement toute mise à jour à l'adresse électronique psmsl@noc.ac.uk).
- Des logiciels d'analyse de la marée (voir également la Section 8.2.3).

Il s'agit également d'un portail vers différents produits, comprenant :

- Un afficheur dynamique des tendances et anomalies du niveau de la mer
- Logiciel d'analyse en ondelettes croisées et de cohérence par ondelettes
- Informations sur les reconstructions du niveau de la mer
- Archives d'auteurs contenant des ensembles de données sur les publications relatives au niveau de la mer qui ont été archivées auprès du PSMSL
- Informations sur la couverture des données par le PSMSL et les statuts de GLOSS.

L'ensemble de pages web GLOSS (<http://www.gloss-sealevel.org>) offre un accès au :

- Statut du réseau
- Manuel des stations GLOSS (description de chaque station du réseau principal)
- Rapports nationaux et techniques issus des réunions du groupe d'experts GLOSS
- Information sur les cours de formation dans le cadre de GLOSS
- Guide indiquant où obtenir des données sur le niveau de la mer.

Les ressources nationales de formation et d'information sur le niveau de la mer comprennent celles fournies par

les pays suivants :

- Australie (Australian Tides Manual, Permanent Committee for Tides and MSL, 2004)
- France (<http://refmar.shom.fr> et <http://www.sonel.org>)
- États-Unis, NOAA (<http://tidesandcurrents.noaa.gov/>)
- États-Unis, le programme COMET à l'Université du Colorado (<https://www.meted.ucar.edu>) contient un important volume de matériel de formation pour la communauté de la géoscience sur des thèmes tels que l'utilisation du GNSS, l'exploration, l'hydrographie, les ondes de tempêtes et la planification dans la perspective de l'augmentation du niveau de la mer.

Il existe également des supports d'information et des logiciels produits par d'autres, qui seront intéressants pour GLOSS. Il s'agit entre autres :

- D'une liste de publications récentes sur le niveau de la mer établie par l'Université du Colorado (<http://sealevel.colorado.edu/>).
- Du module d'analyse des marées T-Tide (<http://www.eos.ubc.ca/~rich/>) qui, tout comme le module de l'Université d'Hawaii auquel il est fait référence à la Section 8.2.3, est basé sur le Canada Tidal Package de l'Institut des sciences de la mer.
- Les centres de données altimétriques présentés sous le lien http://www.psmsl.org/train_and_info/training/reading/ offrent leurs propres ressources pour la formation.

Tous ceux qui ont contribué à l'élaboration du présent Manuel ou qui figurent sur la liste des auteurs des articles présentés dans le Supplément sont disposés à partager leur expertise sur des aspects de la surveillance du niveau de la mer. Une liste de personnes dans chaque pays ayant une expérience soit des marégraphes radar soit des données sur les marégraphes radars est fournie au **Tableau 9.1a** ; d'autres coordonnées sont disponibles dans le document de l'OHI (2015). Les personnes ayant une expérience des méthodes de transmission par satellite en liaison avec les marégraphes, et qui peuvent également être contactées pour des conseils, sont également mentionnées dans le **Tableau 9.1b**. (Bien entendu, ces listes ne sont pas exhaustives.) Des conseils d'ordre général sur le système d'observation GLOSS peuvent être obtenus auprès du Secrétariat technique du GLOSS (t.aarup@unesco.org).

Tableau 9.1

(a) Contacts utiles en relation avec les marégraphes dans chaque pays

Ce tableau contient la liste des pays et des organismes présentés comme entretenant des marégraphes radar (OHI (2015) ou représenté par les personnes ayant contribué à l'élaboration du présent Manuel. Dans la plupart des cas, un nom et une adresse électronique sont fournis. La dernière colonne renvoie au fabricant du marégraphe que nous considérons comme le plus utilisé par cet organisme/ce pays à partir du mois d'avril 2016.

Afrique du Sud	Ruth Farre, SANHO	hydrosan@iafrica.com	O
Allemagne	Tilo Schöne, GFZ	tschoene@gfz-potsdam.de	O
	Stephan Mai, BAFG	mai@bafg.de	
	Gunter Liebsch, BKG	gunter.liebsch@bkg.bund.de	V
Australie	Bill Mitchell, Bureau of Meteorology	b.mitchell@bom.gov.au	V
	John Broadbent, Maritime Safety Queensland	tides@msq.qld.gov.au	V
Bahreïn	Rashid Abdulla Al Suwaidi, Survey&Land Reg.	rasid.alsuwaidi@slrb.gov.bh	O
Brésil	Luiz Nonnato, Univ. São Paulo	luiz.nonnato@usp.br	O
Chili	Juan Fierro et Jorge Gaeta, SHOA	oceanografia@shoa.cl	V
Danemark	Lonny Hansen, DMI	lha@dm.dk	EH
Espagne	Begoña Pérez Gómez, Puertos del Estado	bego@puertos.es	M
	Elena Tel, Inst. Español de Oceanografía	elena.tel@md.ieo.es	V
	Bernat Puyol, Instituto Geográfico Nacional	bpuyol@fomento.es	V
États-Unis	Robert Heitsenrether, NOAA	robert.heitsenrether@noaa.gov	W
	Mark Merrifield, UHSLC	markm@soest.hawaii.edu	V,S
France	Gael André, SHOM	gael.andre@shom.fr	K
	Guy Wöppelmann, Univ. La Rochelle	guy.woppelmann@univ-lr.fr	
	Laurent Testut, LEGOS, Toulouse	laurent.testut@legos.obs-mip.fr	
Inde	Prakash Mehra, NIO	pmehra@nio.org	
	Srinivas Kumar, INCOIS	srinivas@incois.gov.in	
Israël	Israel Oceanographic and Limnological Research		M
Italie	Giovanni Arena, ISPRA	giovanni.arena@isprambiente.it	O
Japon	Hironori Hayashibara, JMA	tide@climar.kishou.gov.jp	T
Norvège	Tor Torresen	tor.torresen@statkart.no	M
Nouvelle Zélande	Glen Rowe, LINZ	growe@linz.govt.nz	
Oman	Dr. Juma, Directorate General of Meteorology	j.almaskari@met.gov.om	S
Pays-Bas	Koos Doekes, Rijkswaterstaat	koos.doekes@rws.nl	Ra
Pérou	Directorate of Hydrography and Navigation	dihidronav@dhn.mil.pe	G,V
Philippines	Hydrography, NMRIA		
Royaume-Uni	Jeff Pugh, National Oceanography Centre	jpugh@noc.ac.uk	O,V,W
	Travis Mason, Channel Coast Observatory	travis.mason@noc.soton.ac.uk	R

EH = Endress and Hauser,
Ra = Radac,

G = GEONICA,
S = Sutron,

K = Krohne, M = MIROS,
T = Tokyo Keikei,

O = OTT,
V = VEGAPULS,

R = Rosemount,
W = Waterlog.

(b) People with Experience of Satellite Data Transmission Methods together with Tide Gauges

ARGOS	Laurent Testut, France	laurent.testut@legos.obs-mip.fr
GOES/METEOSAT/MTSAT	Tilo Schöne, Allemagne	tschoene@gfz-potsdam.de
	Peter Foden, Royaume-Uni	prf@noc.ac.uk
	Jeff Pugh, Royaume-Uni	jpugh@noc.ac.uk
	Robert Heitsenrether, Etats-Unis	robert.heitsenrether@noaa.gov
INMARSAT BGAN	Mark Merrifield, Etats-Unis	markm@soest.hawaii.edu
	Juan Fierro and Jorge Gaeta, Chili	oceanografia@shoa.cl
	Tilo Schöne, Allemagne	tschoene@gfz-potsdam.de
IRIDIUM	Robert Heitsenrether, Etats-Unis	robert.heitsenrether@noaa.gov
VSAT	Tilo Schöne, Allemagne	tschoene@gfz-potsdam.de
	Prakash Mehra, Inde	pmehra@nio.org

Références

Les références indiquées en italique ne sont pas mentionnées explicitement dans le texte et sont incluses pour fournir des informations sur les précédents travaux portant sur les marégraphes radar.

- Altamimi, Z., Collilieux, X. and Métivier, L. 2011. ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame, *Journal of Geodesy*, 85, 457–473, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.
- Bevis, M., Scherer, W. and Merrifield, M. 2002. Technical issues and recommendations related to the installation of continuous GPS Stations at tide gauges. *Marine Geodesy*, 25, 87-99, doi:10.1080/014904102753516750.
- Blasi, C.J. 2009. A new technology for the measurement of the sea level and the sea state. Environmental Geology, 57, 331–336, doi:10.1007/s00254-008-1632-2.*
- Blasi, C., Mai, S., Wilhelmi, J., Zenz, T. and Barjenbruch, U. 2014. A powerful method of measuring sea wave spectra and their direction. Pp.913-920 in, *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrosience and Engineering*, 28 September – 2 October 2014, Hamburg (eds. Lehfeldt, R. and Kopmanns, R.), ISBN 978-3-939230-32-8.
- Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W.C., Plag, H-P, Stein, S. and Okal, E. 2006. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. *Geophysical Research Letters*, 33, L11309, doi:10.1029/2006GL026145.
- BOM, 2006. A brief description of the CREX sea level bulletins to be issued by the Australian Bureau of Meteorology on GTS with effect from 18 December 2006. Report of the Australian Bureau of Meteorology. Available from https://www.wmo.int/pages/prog/www/ois/Operational_Information/Newsletters/2000_2009/2008/Jan08/CREXbulletinsBOM.pdf.
- Boon, J.D., Heitsenrether, R.M. and Bushnell, M. 2009. Microwave-acoustic water level sensor comparisons: sensor response to change in oceanographic and meteorological parameters. *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2009 Conference, Biloxi*, 26-29 October 2009, pp.1-10.
- Boon, J.D., Heitsenrether, R.M. and Hensley, W.M. 2012. Multi-sensor evaluation of microwave water level error. *Proceedings of Oceans '12, Hampton Roads, Virginia, MTS/IEEE*, 8pp., doi:10.1109/OCEANS.2012.6405079.
- Boon, J.D. 2013. Microwave water level measurement error. A reanalysis of 2011 multi-sensor data. U.S. Army Field Research Facility, Duck, North Carolina. Internal Report. 23pp.
- Boon, J.D. 2014. Reducing wave-induced microwave water-level measurement error with a least squares-designed digital filter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31, 481-502, doi:10.1175/JTECH-D-13-00160.1.
- Broadbent, G.J. 2005. Experience with radar sensor equipped tide gauges in Queensland. Proceedings of the ATON (Aids TO Navigation) Conference, Canberra, Australia, March 2005.*
- Brooks, B.A., Merrifield, M.A., Foster, J., Werner, C.L., Gomez, F., Bevis, M. and Gill, S. 2007. Space geodetic determination of spatial variability in relative sea level change, Los Angeles basin. *Geophysical Research Letters*, 34, L01611, doi:10.1029/2006GL028171.
- Brumbi, D. 2003. Fundamentals of radar technology for level gauging. 4th Edition. Duisberg: KROHNE Messtechnik GmbH & Co.
- Brumbi, D. and Van Zyl, I. 2009. Modern technologies for level measurement. Paper A4.2 (pp.97-102) in *Proceedings of the SENSOR+TEST Conference, Volume I*, 26-28 May 2009, Nürnberg, Germany.
- Burns, S.D. 2009. The METEOSAT data collection system. *Proceedings of the 2009 EUMETSAT Meteorological Satellites Conference, Bath, UK*, 21-25 September 2009. Available from <http://www.eumetsat.int>.
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D. and Unnikrishnan, A.S. 2013. Sea Level Change. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Devine, P. 2000. Radar level measurement – The users guide. Published by VEGA Controls Ltd., UK. ISBN 0-9538920-0-X. 154pp.

- Eberlein, L. and Liebsch, G. 2003. Experiences with the Vega radar gauge on a buoy. Proceedings of the GLOSS Experts Meeting No.8, Workshop on New Technical Developments in Sea and Land Level Observing Systems, Tuesday-Thursday October 14-16 2003, IOC, UNESCO, 1 Rue Miollis, Paris. Available from http://www.gloss-sealevel.org/technical_forum/documents/lutzeberlein.pdf.
- EUMETSAT. 2013. TD 16 - Meteosat data collection and distribution service. Darmstadt: Germany. 63pp. Available from <http://www.eumetsat.int/website/home/Data/MeteosatServices/MeteosatDataCollectionServices/index.html>.
- Ewans, K., Feld, G. and Jonathan, P. 2014. On wave radar measurement. *Ocean Dynamics*, 64, 1281–1303, doi:10.1007/s10236-014-0742-5.
- Forbes, S., MacAulay, P., Coolen, C. and Carmichael, F. 2009. A laser-based water level sensor and robust insulated and heated multi-well stilling well system for ice-prone temperate and sub-arctic environments. Presentation at U.S. Hydro 2009, 11-14 May 2009, Norfolk, Virginia. Available from <http://ushydro.thsoa.org/us09papers.htm>.
- Fulford, J.M., Ester, L.W. and Heaton, J.W. 2007. Accuracy of radar water level measurements. US Geological Survey report. United States Committee for Irrigation and Drainage (SCID), 4th International Conference on Irrigation and Drainage, Sacramento, California. Available from <http://www.waterlog.com/media/pdfs/usgs-study-small.pdf>.
- Hannsen, R.F. 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 308pp.
- Heitsenrether, R.M., Bushnell, M.H. and Boon, J.D. 2008. *Understanding the impact of surface waves on microwave water level measurements. MTR/IEEE Oceans 2008 Conference and Exhibition, Québec City, Canada, 15-18 September 2008. 9pp.*
- Heitsenrether, R.M. 2010. Using microwave radar for long term remote sensing of ocean surface dynamics. Proceedings of the 17th Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, 8-12 June 2009, Stowe, Vermont. American Meteorological Society. Available from <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/154150.pdf>.
- Heitsenrether, R. and Davis, E. 2011. Test and evaluation report. Limited acceptance of the Design Analysis WaterLog H-3611i microwave radar water level sensor. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 061. Available from http://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Technical_Report_NOS_CO-OPS_061.pdf.
- Heitsenrether, R.M., Hensley, W.M. and Boon, J.D. 2011. *Results from NOAA's test and evaluation of microwave radar water level sensors and plans for a transition to operational applications. Proceedings of the MTS/IEEE Oceans'11 Conference, 19-22 September 2011, Kona, Hawaii.*
- Heitsenrether, R., Hensley, W. and Krug, W. 2012. Measurement requirements for radar water level sensor laboratory verification tests. NOAA Internal Report. 8pp.
- Holgate, S., Foden, P., Pugh, J. and Woodworth, P. 2008. Real time sea level data transmission from tide gauges for tsunami monitoring and long term sea level rise observations. *Journal of Operational Oceanography*, 1, 3-8, doi:10.1080/1755876X.2008.11081883.
- Holgate, S.J., Matthews, A., Woodworth, P.L., Rickards, L.J., Tamisiea, M.E., Bradshaw, E., Foden, P.R., Gordon, K.M., Jevrejeva, S. and Pugh, J. 2013. New data systems and products at the Permanent Service for Mean Sea Level. *Journal of Coastal Research*, 29, 493-504, doi:10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1.
- IHO, 2015. Inventory of Tide Gauges in Member States (October 2015). A compilation of tide gauges and their operators by the International Hydrographic Organization. Available from http://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/IHOTC_Misc/TideGaugeInventory.pdf.
- Illigner, J., Sofian, I., Abidin, H., Arief Syafi'i, M., Schöne, T. (2016): Coastal Sea Level Monitoring in Indonesia – Connecting the Tide Gauge Zero to Leveling Benchmarks. - In: Rizos, C., Willis, P. (Eds.), IAG 150 Years: Proceedings of the IAG Scientific Assembly in Postdam, Germany, 2013, (International Association of Geodesy Symposia; 143), Cham : Springer International Publishing, p. 451-457. http://doi.org/Doi:10.1007/1345_2015_23
- IOC, 2006. Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume IV: An Update to 2006. (eds. T. Aarup, M. Merrifield, B. Pérez, I. Vassie and P. Woodworth). Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides No. 14. Paris: UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission.

- IOC, 2011. Working group on tsunamis and other hazards related to sea-level warning and mitigation systems (TOWS-WG). Inter-ICG Task Team 1 on Sea Level Monitoring for Tsunami. Available from <http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001939/193911e.pdf>.
- IOC, 2012. The Global Sea Level Observing System (GLOSS) Implementation Plan – 2012. UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission. 37pp. (IOC Technical Series No. 100). Available from <http://ioc.unesco.org>.
- IOC, 2014. Manual on quality control of sea level observations (eds. M.J. Garcia et al.), in press. UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission: Paris.
- IOOS, 2014. Manual for real-time quality control of water level data. A guide to quality control and quality assurance for water level observations (eds. Bushnell, M. et al.). Version 1.0. Integrated Ocean Observing System (IOOS) report. Available from <http://www.ioos.noaa.gov/qartod/>.
- Irish, J.L., Wozencraft, J.M., Cunningham, A.G. and Giroud, C. 2006. Nonintrusive measurement of ocean waves: Lidar wave gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 1559-1572, doi:10.1175/JTECH1936.1.
- Larson, K. M., Löfgren, J. and Haas, R. 2013. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in Space Research*, 51(8), 1301–1310, doi:10.1016/j.asr.2012.04.017.
- Leigh, G.E. 2009 (date uncertain). Bottles, pots and pans? – Marking the surveys of the U.S. Coast & Geodetic Survey and NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration report. Available from http://www.ngs.noaa.gov/web/about_ngs/history/indexhUSCGS.shtml [accessed November 2011].
- Leuliette, E.W., Nerem, R.S. and Mitchum, G.T. 2004. Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason altimeter data to construct a continuous record of mean sea level change. *Marine Geodesy*, 27, 79-94, doi:10.1080/01490410490465193.
- Mai, S. and Zimmermann, C. 2000. Applicability of radar level gauges in wave monitoring. *Proceedings of the 2nd International Conference on Port Development and Coastal Environment*, Varna, Bulgaria, 2000.
- Martín Míguez, B., Pérez Gómez, B. and Álvarez Fanjul, E. 2005. The ESEAS-RI sea level test station: Reliability and accuracy of different tide gauges. *International Hydrographic Review*, 6, 1. 2–11.
- Martín Míguez, B., Le Roy, R. and Wöppelmann, G. 2008a. The use of radar tide gauges to measure variations in sea level along the French coast. *Journal of Coastal Research*, 24, 61-68, doi:10.2112/06-0787.
- Martín Míguez, B., Testut, L. and Wöppelmann, G. 2008b. The Van de Casteele test revisited: an efficient approach to tide gauge error characterization. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 1238-1244, doi:10.1175/2007JTECH0554.1
- Martín Míguez, B., Testut, L. and Wöppelmann, G. 2012. Performance of modern tide gauges: towards mm-level accuracy. *Advances in Spanish Physical Oceanography (Scientia Marina)*, 76 S1, 221-228, doi: 10.3989/scimar.03618.18A.
- Matthäus, W. 1972. On the history of recording tide gauges. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, B*, 73, 26-34, doi:10.1017/S0080455X00002083.
- Mazzotti, S., Lambert, A., Henton, J., James, T.S. and Courtier, N. 2011. Absolute gravity calibration of GPS velocities and glacial isostatic adjustment in mid-continent North America. *Geophysical Research Letters*, 38, L24311, doi:10.1029/2011GL049846.
- Mehra, P., Prabhudesai, R.G., Joseph, A., Vijaykumar, Agarvadekar, Y., Luis, R., Damodaran, S. and Viegas, B. 2009. A one year comparison of radar and pressure tide gauge at Goa, West Coast of India. *Proceedings of the International Symposium on Ocean Electronics (SYMPOL)*, Cochin, 18-20 November 2009 (eds. Pillai, P.R.S. and Supriya, M.H.), 173-183.
- Mehra, P., Agarvadekar, Y., Vijaykumar, Luis, R. and Nadaf, L. 2012. Comparison of sea-level measurements using microwave radar and subsurface pressure gauge deployed in Mandovi estuary in Goa, Central West Coast of India. In, *Ocean Sensing and Monitoring* (eds. Hou, W.W. and Amone, R.). *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Vol.8372, 7pp. Available from <http://drs.nio.org/drs/handle/2264/4081>.
- Meldrum, D. 2013. A brief analysis of the evolution of the Satellite Communications market with regard to various classes of in situ low-power marine environmental observation platform. Report to the Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology, Observations Coordination Group. Washington, D.C., September 2013.

- Mitchum, G.T. 2000. An improved calibration of satellite altimetric heights using tide gauge sea levels with adjustment for land motion. *Marine Geodesy*, 23, 145-166, doi:10.1080/01490410050128591.
- Moray, R. 1665-66. Considerations and enquiries concerning tides, by Sir Robert Moray; Likewise for a further search into Dr. Wallis's newly publish't hypothesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1, 298-301, doi:10.1098/rstl.1665.0113.
- National Resources Canada (NRC), 2015. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp>.
- NOAA, 2013a. Field installation guide. Field installation procedures for Design Analysis WaterLog® H3611i Microwave Radar Water Level Sensor using the Sutron Data Collection Platform. Version 1.0. January 2013. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, National Ocean Service Center for Operational Oceanographic Products and Services. 65pp.
- NOAA, 2013b. A guide to CO-OPS SHEF and CREX products. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 026. Revised 2013. Available from http://www.co-ops.nos.noaa.gov/publications/NOAA_Technical_Report_NOS_COOPS_026.pdf.
- NOAA, 2015. NOAA guidance document for determination of vertical land motion at water level stations using GPS technology. NOAA Technical Report NOS 139.18pp. Available from https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/NOS_Tech_report_139.pdf.
- Park, J., Heitsenrether, R. and Sweet, W. 2014. Water level and wave height estimates at NOAA tide stations from acoustic and microwave sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31, 2294-2308, doi:10.1175/JTECH-D-14-00021.1.
- Parker, B.B. 2007. Tidal Analysis and Prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3. Available from <http://tidesandcurrents.noaa.gov>.
- PCTMSL, 2004. Australian Tides Manual. Permanent Committee on Tides and Mean Sea Level (PCTMSL). Special Publication No. 9, Version 4.3. 69pp. Available from <http://www.icsm.gov.au/tides/>.
- Pérez, B., Alvarez-Fanjul, E., Pérez, S., de Alfonso, M. and Vela, J. 2013. Use of tide gauge data in operational oceanography and sea level hazard warning systems. *Journal of Operational Oceanography*, 6, 1-18.
- Pérez, B., Payo, A., López, D., Woodworth, P. and Alvarez-Fanjul, E. 2014. Overlapping sea level time series measured using different technologies: an example from the REDMAR Spanish Network. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 589-610, doi:10.5194/nhess-14-589-2014.
- Pérez Gómez, B. 2014. Design and implementation of an operational sea level monitoring and forecasting system for the Spanish coast. PhD Thesis, University of Cantabria.
- Poffa, N. (ed.) 2014. Guidelines for sea level data transmissions through GTS in the frame of coastal hazard warning systems. V 1.0, November 2014. Available from the Measuring and Instrumentation Department of SHOM, France. <http://refmar.shom.fr/documents/10227/106226/Guidelines-for-sea-level-data-transmissions-GTS-coastal-warning-systems.pdf>.
- Poulquien, S. and others. 2011. Recommendations for in-situ data Real Time Quality Control. EuroGOOS Publication No. 27. EuroGOOS, Norrköping, Sweden. 23pp. Available from <http://eurogoos.eu/increasing-eurogoos-awareness/publications/>.
- Prior-Jones, M. 2011. Satellite communications systems buyers' guide. Internal Report. British Antarctic Survey, Cambridge.
- Pugh, D.T. and Woodworth, P.L. 2014. Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9781107028197. 408pp.
- Quartly, G.D., Guymer, T.H. and Srokosz, M.A. 1996. The effects of rain on Topex radar altimeter data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13, 1209-1229, doi:10.1175/1520-0426(1996)013<1209:TEOR OT>2.0.CO;2.
- Ray, R.D., Beckley, B.D. and Lemoine, F.G. 2010. Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements. *Advances in Space Research*, 45, 1510-1522, doi:10.1016/j.asr.2010.02.020.
- Riley, K. and Jethra, R. 2012. Use guided-wave radar to measure water level in steam loops. CEP Magazine, American Institute of Chemical Engineers, December 2012, 22-26.
- Rütten, S., Mai, S., Wilhelmi, J., Zenz, T., Winkelbauer, J., Fröhle, P. and Barjenbruch, U. 2013. Comparison of directional spectra of sea waves estimated by an array of radar sensors and a directional waverider buoy. *Proceedings of 6th SCACR International Short Conference on Applied Coastal Research, Lisbon, Portugal*.

- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Collilieux, X., Guichard, M., Míguez, B.M., Tiphaneau, P. and Wöppelmann, G. 2012. Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field. *Global and Planetary Change*, 98-99, 6-17, doi:10.1016/j.gloplacha.2012.07.007.
- Santamaría-Gómez, A., Watson, C., Gravelle, M., King, M. and Wöppelmann, G. 2015. Levelling co-located GNSS and tide gauge stations using GNSS reflectometry. *Journal of Geodesy*, 89, 241-258, doi:10.1007/s00190-014-0784-y.
- Santamaría-Gómez, A. and Watson, C. 2016. Remote leveling of tide gauges using GNSS reflectometry: case study at Spring Bay, Australia. *GPS Solutions*, doi:10.1007/s10291-016-0537-x.
- Schöne, T., Schön, N. and Thaller, D. 2009. IGS tide gauge benchmark monitoring pilot project (TIGA): Scientific benefits. *Journal of Geodesy*, 83, 249-261, doi:10.1007/s00190-008-0269-y.
- Shirman, B. 2003. Comparison of a radar and float gauge at Haifa. *Proceedings of the GLOSS Experts Meeting No.8, Workshop on New Technical Developments in Sea and Land Level Observing Systems*, Tuesday-Thursday October 14-16 2003, IOC, UNESCO, 1 Rue Miollis, Paris. Available from <http://www.gloss-sealevel.org/>.
- Teferle, F.N., Bingley, R.M., Orliac, E.J., Williams, S.D.P., Woodworth, P.L., McLaughlin, D., Baker, T.F., Shennan, I., Milne, G.A., Bradley, S.L. and Hansen, D. 2009. Crustal motions in Great Britain: evidence from continuous GPS, Absolute Gravity and Holocene sea-level data. *Geophysical Journal International*, 178(1), 23-46, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04185.x.
- Testut, L., Martín Míguez, B., Wöppelmann, G., Tiphaneau, P., Pouvreau, N. and Karpytchev, M. 2010. Sea level at Saint Paul Island, southern Indian Ocean, from 1874 to the present. *Journal of Geophysical Research*, 115, C12028, doi:10.1029/2010JC006404.
- Vassie, J.M., Woodworth, P.L. and Holt, M.W. 2004. An example of North Atlantic deep ocean swell impacting Ascension and St. Helena islands in the central South Atlantic. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(7), 1095-1103, doi:10.1175/1520-0426(2004)021<1095:AEONAD>2.0.CO;2.
- Vinogradov, S. V. and Ponte, R. M. 2011. Low frequency variability in coastal sea level from tide gauges and altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 116, C07006, doi:10.1029/2011JC007034.
- Warne, J. and Brewster, A. 2014. Australian Tsunami Warning Sea Level Observation System: ASLOS Siting Specification. Bureau of Meteorology, Report ASLOS-NMD-004.
- Washburn, S.A., Haines, B.J., Born, G.H. and Fowler, C. 2011. The Harvest Experiment LIDAR system: water level measurement device comparison for Jason-1 and Jason-2/OSTM calibration. *Marine Geodesy*, 34, 277-290, doi:10.1080/01490419.2011.590114.
- Wikipedia, 2015a. <http://en.wikipedia.org/wiki/FMCW>.
- Wikipedia, 2015b. http://en.wikipedia.org/wiki/Extremely_high_frequency.
- WMO, 2010. Manual on Stream Gauging. Volume I – Fieldwork. World Meteorological Organization Report WMO-No. 1044. 254pp.
- Wöppelmann, G. and Marcos, M. 2016. Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54, doi:10.1002/2015RG000502.
- Woodworth, P.L., Vassie, J.M., Spencer, R. and Smith, D.E. 1996. Precise datum control for pressure tide gauges. *Marine Geodesy*, 19(1), 1-20.
- Woodworth, P.L. and Smith, D.E. 2003. A one year comparison of radar and bubbler tide gauges at Liverpool. *International Hydrographic Review*, 4(3), 42-49.
- Woodworth, P. L., Hughes, C. W., Bingham, R. J. and Gruber, T. 2012. Towards worldwide height system unification using ocean information. *Journal of Geodetic Science*, 2(4), 302-318, doi:10.2478/v10156-012-004-8.
- Woodworth, P.L., Pugh, D.T. and Plater, A.J. 2015. Sea-level measurements from tide gauges. Chapter 35 (pp.557-574) in, *Handbook of Sea-Level Research*, First Edition. Edited by Ian Shennan, Antony J. Long, and Benjamin P. Horton. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd.

Appendice 1:

Marégraphes radar des principaux fabricants à partir d'avril 2016

Marégraphe	Type de radar	Fréquence du radar	Pleine largeur de l'angle du faisceau	Précision type	Mesure Temps	Consommation d'énergie	Sortie	Adresses Internet	Notes
OTT Kalesto	FMCW	24,125 GHz	10 degrés	1 cm	17 s pour 40 mesures dont la moyenne est déterminée par la suite	500 mA à 12 V DC en mode actif	RS485	N/P	1
VEGAPULS 61	Impulsion	26 GHz	10 degrés	2 mm	cycle de mesure d'environ 450 msec	22 mA maximum à 12V DC	Boucle de courant/HART 4-20 mA	www.vega.com	2
Waterlog H-3611	Impulsion	26 GHz	10 degrés	3 mm	cycle de mesure type 420 msec	12 mA à 12 V DC généralement en mode actif	SDI-12	www.waterlog.com	
OTT RLS	Impulsion	24 GHz	12 degrés	3 mm	débit brut de 16 Hz, moyenne de 20 secondes	12 mA à 12 V DC en mode actif	SDI-12 et RS485	www.ott.com	
Campbell Scientific CS475-477	Impulsion	26 GHz	10 degrés (pour CS475 et 476) ou 8 degrés (pour CS477)	5 mm	N/M	14 mA à 12 V DC généralement	SDI-12	www.campbellsci.com	3
Endress et Hauser FMR245 (successeur FMR52)	Impulsion	26GHz	10 degrés (avec antenne de 7,62 cm)	2 mm	N/M	N/M	Boucle de courant/HART 4-20 mA	www.uk.endress.com	
GEONICA DATAMAR 2000C/3000C	Impulsion	26GHz	8 degrés	1 mm	1 s	10 mA à 12V DC	SDI-12	www.geonica.com	
Valeport VRS-20	Impulsion	25 GHz	12 degrés	10 mm	débit brut de 8 Hz, moyenne de 10 à 360 secondes	35 mA à 12V DC	RS-232/485 et SDI-12	www.valeport.co.uk	
Sutron RLR-003	Impulsion	6,2 GHz	32 degrés	3 mm	10 Hz	<36 mA en mode actif de 12V DC	SDI-12	www.sutron.com	
Tokyo Keiki MRG-10	Impulsion	5,8 GHz	17 degrés	10 mm	1 Hz	Fonctionne à 16-36V	Boucle de courant/HART RS-422A ou 4-20 mA	www.tokyo-keiki.co.jp	

Marégraphe	Type de radar	Fréquence du radar	Pleine largeur de l'angle du faisceau	Précision type	Mesure Temps	Consommation d'énergie	Sortie	Adresses Internet	Notes
Krohne BM70	FMCW	10 GHz	12 degrés	5 mm	1 Hz	~10 W à 24 V DC	Boucle de courant/ HART 4-20 mA (numérique)	http://krohne.com/	4
Krohne Optiwave 7300C	FMCW	24-26 GHz	8 degrés	3 mm	1 Hz	25 mA à 12 V DC (moins pour la sortie numérique)	Boucle de courant/ HART 4-20 mA (numérique)	http://krohne.com/	4
Miros Rangefinder SM-094/2	Modulation de fréquences	Modulation triangulaire 9,4-9,8 GHz	5 degrés (faisceau étroit) ou 10 degrés (faisceau large)	Mesures individuelles d'1 cm, moyenne d'1 mm	20-60,000 msec ou « mode d'observation » pour la mesure des ondes	<500 mA à 24 V DC (10W)	RS422	www.miros.no	5
Radar Radac WaveGuide	FMCW	Modulation triangulaire 9,8-10,3 GHz	10 degrés	1 cm	1 sec	24-64 VDC / 100-240 VAC/ 6 Watt	RS232	http://radac.nl/	6
Marégraphe/appareil de mesure des vagues Waveradar Rex de Rosemount (anciennement SAAB)	FMCW	Modulation triangulaire 9,7-10,3 GHz	10 degrés	6 mm	10 Hz	<650 mA à 24 V DC en mode de fonctionnement	RS232 ou Analogue	www.rsaqua.co.uk	
Krohne BM100	Impulsion	2 GHz	radar à ondes guidées (puits d'environ 60 cm de diamètre nécessaire)	3 mm si la portée <6 m, 3 mm + 0,02 % de portée si la portée >6 m	1 Hz	500 mA à 24 V DC	RS485	http://krohne.com/	4,7
Krohne Optiflex 1300C	Impulsion	2 GHz	radar à ondes guidées (puits d'environ 30 cm de diamètre nécessaire)	3 mm si la portée <10 m, 0,03 % de portée si la portée >10m	1 Hz	25 mA à 12 V DC (moins pour la sortie numérique)	Boucle de courant/ HART 4-20 mA (numérique)	http://krohne.com/	4,7
VEGAFLEX 81	Impulsion	2 GHz	radar à ondes guidées	2 mm	cycle de mesure <500 millisecondes	21,5 mA maximum à 12 V DC	Boucle de courant/HART 4-20 mA	www.vega.com	7
Marégraphe portatif CEETIDE								www.ceehydrosystems.com	8

Appendice 1 Notes

1. Le Kalesto n'est plus fabriqué aujourd'hui (il a été remplacé par l'OTT RLS) il mais continue d'être largement utilisé à travers le monde.
2. Il existe d'autres instruments VEGAPULS de la même famille. Selon l'inventaire de l'OHI, le VEGAPULS 62 est utilisé au Pérou et en Espagne, bien que le dispositif ait été conçu pour des applications bien plus robustes que le VEGAPULS 61. De même, selon l'inventaire de l'OHI, un capteur Vaisala QHR104 est utilisé au Chili pour obtenir des niveaux d'eau moyens d'1 minute à partir d'échantillons de 4 Hz. Ce capteur est en fait un VEGAPULS 62 avec une interface SDI-12. Nous comprenons que le VEGAPULS 62 est également utilisé par des groupes allemands. Le VEGAPULS 63 serait utilisé en Australie tout comme le C-band VEGAPULS 66 (Metters et Ryan, Supplément).
3. Le marégraphe de Campbell Scientific est une version du VEGAPULS-61 munie d'une interface SDI-12.
4. Le Krohne BM70 a été remplacé par l'Optiwave 7300C et le BM100 par l'Optiflex 1300C. Le SHOM était probablement le seul service à utiliser les versions antérieures.
5. Diverses versions du marégraphe Miros sont disponibles avec différentes portées et largeurs du faisceau d'antenne. Il existe un modèle ultérieur de SM-140 muni de composants électroniques, un boîtier et un logiciel modifiés et doté d'une puissance de sortie plus élevée.
6. Le marégraphe radar est disponible dans les versions appropriées pour un fonctionnement en plein air et dans un puits.
7. Cet appareil ne transmet pas le radar en plein air mais le long d'un guide d'onde à câble vertical suspendu dans un puits.
8. Il s'agit sans doute d'un marégraphe radar robuste destiné à aux opérations de ports ou au terrain.

Les instruments de cette liste comprennent tous ceux mentionnés dans OHI (2015).

L'exactitude type découle des renseignements du fabricant et il convient de rester circonspect en comparant les performances sur la base de ces valeurs. « Sortie » énumère uniquement les méthodes principales ; dans certains cas, l'instrument peut avoir plusieurs méthodes de sortie.

N/P = Non pertinent, N/M = Non mentionné

Appendice 2 :

Liste des acronymes

ASI	Alimentation sans interruption
BAFG	Bundesanstalt für Gewässerkunde (Allemagne)
BKG	Agence fédérale pour la cartographie et la géodésie (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Allemagne)
BM	Point de référence
BODC	Centre de données océanographiques de Grande-Bretagne
CA	Courant alternatif
CARIBE-EWS	Système d'alerte aux tsunamis et autres risques côtiers dans la mer des Caraïbes et les régions adjacentes
CIU	Coastal Impacts Unit (Queensland, Australie)
CGNSS@TG	Station GNSS en continu associé au marégraphe
CNDO	Centre national de données océanographiques (États-Unis)
CNES	Centre national d'études spatiales (France)
CNRS/INSU	Centre National de la Recherche Scientifique/Institut National des Sciences de l'Univers (France)
COI	Commission océanographique intergouvernementale (de l'UNESCO)
CREX	code à caractères pour la représentation et l'échange des données météorologiques
DORIS	Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellite
EMODnet	Réseau européen d'observation et de données du milieu marin
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
FAI	Fournisseur d'accès à Internet
FM-CW	Radar à modulation de fréquence d'onde entretenue (Frequency Modulated – Continuous Wave)
GEO	Orbite terrestre géostationnaire
GFZ	Centre de recherche allemand pour les géosciences
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GLOSS	Système mondial d'observation du niveau de la mer
GNSS	Système mondial de navigation par satellite
GNSSBM	Repère de la station GNSS
GOES	Satellite géostationnaire opérationnel d'étude de l'environnement
GPRS	Service général de radiocommunication par paquets
GPS	Système de positionnement universel
GRGS	Groupe de recherches en géodésie spatiale (Toulouse, France)
HDR	Débit binaire élevé
HF/VHF/UHF	Haute / très haute / ultra haute fréquence
HRPCD	PCD à débit élevé
ICSU	Conseil international pour la science

IGN	Institut géographique national (Espagne)
IGS	Service GPS international
INSAR	Interférométrie par radar à synthèse d'ouverture
IOTWMS	Système d'alerte aux tsunamis et de mitigation dans l'océan Indien
IP	Protocole Internet
IPGP	Institut de Physique du Globe de Paris (France)
ITRF	Repère de référence terrestre international
JCOMM	Commission technique mixte d'océanographie et de météorologie maritime (COI-OMM)
JMA	Office météorologique japonais
LEO	Orbite basse
LIDAR	Détection et télémétrie par la lumière
MCC	Centre de contrôle des missions
MEO	Orbite moyenne
MSL	Niveau moyen de la mer (Mean Sea Level)
MTSAT	Système de satellite météorologique
NEAMTWS	Système d'alerte rapide aux tsunamis et de mitigation dans l'Atlantique du Nord-Est, la Méditerranée et les mers adjacentes
NIO	Institut océanographique national (Inde)
NOAA	Agence nationale d'étude de l'atmosphère et des océans (États-Unis)
NODC	Centre national de données océanographiques
NOC	Centre océanographique national (Royaume-Uni)
OHI	Organisation hydrographique internationale
OMM	Organisation météorologique mondiale
PBMA	Plus basse mer astronomique
PCD	Plateforme de collecte des données
PPP	Protocole point par point
PSMSL	Service permanent du niveau moyen des mers
PTF	Protocole de transfert de fichiers
PTT	Plate-forme de terminaux d'émission (du système ARGOS)
PTWC	Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique
PTWS	Système d'alerte aux tsunamis et de mitigation dans le Pacifique
PZR	Point de mesure nulle
RADAR	Détection et télémétrie par radioélectricité
REDMAR	Réseau de marégraphie de l'administration portuaire espagnole
RLR	Niveau de référence local révisé
RNCan	Ressources naturelles Canada
RSM	Marqueur de référence
RTCP	Réseau téléphonique commuté public
SANHO	Bureau hydrographique de la marine (Afrique du Sud)

SHOA	Service hydrographique et océanographique de la marine (Chili)
SHOM	Service hydrographique et océanographique de la Marine (France)
SIM	Carte d'identification d'abonné
SMT	Système mondial de télécommunications
SONEL	Système d'observation du niveau des eaux littorales (France)
TGBM	Repère du marégraphe
TGZ	Zéro du marégraphe
TIGA	Projet TIGA (« Tide Gauge ») du Service GPS international
UHSLC	Centre sur le niveau de la mer de l'Université de Hawaïi
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
USGS	Service géologique des États-Unis
TUC	Temps universel coordonné (ou UTC en anglais)
VLIZ	Institut flamand de la mer (Belgique)
VSAT	Microstation terrienne
WDS	Système mondial de données (ICSU)
WHSU	Système mondial d'unification des mesures altimétriques

Appendice 3 :

Contenu du Bulletin du GTS et exemple de Message de PCD utilisant le code CREX

Contenu du bulletin du GTS

En-tête abrégé

Les en-têtes de l'OMM sont déterminés à l'aide des définitions de l'OMM. Un exemple tiré d'un en-tête provenant d'un marégraphe du SHOM serait SZIO01 EUMS 031216.

Le code de l'en-tête du bulletin précise le type et la forme de données ainsi que les informations géographiques (6 caractères, ici SZIO01). Les deux premiers caractères de ce code identifient le type de donnée : pour les données du marégraphe, SZ est approprié, étant donné que « SZ est attribué aux données du niveau de la mer et aux données sur les tsunamis dans les grands fonds océaniques dans toute forme alphanumérique y compris le CREX ».

Les deux prochains caractères identifient la région ou la zone de la PCD : IO représente l'océan Indien (CA représenterait les Caraïbes, etc.) et les nombres sont différents d'un bulletin à l'autre mais ne revêtent pas une signification particulière.

L'indicateur du lieu d'origine représente alors la station d'origine ou la station qui prépare le bulletin du GTS (4 caractères, EUMS). Pour les plateformes de collecte de données EUMETSAT traitées par Offenbach RTH, l'indicateur du lieu d'origine est EUMS.

Ces deux premiers codes sont suivis du groupe de la date qui indique le jour du mois et l'heure (UTC) de l'observation ou de la préparation du bulletin (6 caractères, 031216 pour un rassemblement des données le troisième jour du mois à 12:16 UTC).

Identifiant de code

L'identifiant de code identifie le type de données contenues dans le message. CREX++ identifiera par exemple un message du CREX.

Message météorologique

Le message météorologique est constitué des données réelles du bulletin, qui peuvent contenir jusqu'à 15 ko pour les messages codés ASCII ou 500 ko de données binaires codées. Le délai prescrit pour assurer la rapidité dans la livraison des bulletins de la PCD à l'interface GTS est de 10 minutes au plus suivant l'arrivée au Centre de contrôle des missions EUMETSAT, ce qui peut être contraignant pour les systèmes d'alerte précoce tels que les systèmes d'alerte aux tsunamis dans la Méditerranée et les Caraïbes. Les bureaux ou instituts de météorologie nationaux ayant un équipement spécial (environ 10 000 euros/an), tels que les centres d'alerte aux tsunamis, ont un accès direct au GTS pour recevoir les messages le plus tôt possible.

En ce qui concerne les fournisseurs de données sur le niveau de la mer pour qui un retard de quelques minutes est acceptable, les données et messages sur le niveau de la mer peuvent être visualisés et téléchargés à travers le SLSMF de la COI. Ce service, mis au point et exploité par VLIZ sous les auspices de la COI offre aux fournisseurs de données sur le niveau de la mer, un outil en ligne unique pour partager leurs données. La participation est directe et une simple demande de connexion permet aux utilisateurs de paramétrer une station GTS sur le plan du site. Il s'agit d'un service gratuit et qui ne nécessite aucun équipement. En 2014, environ 900 marégraphes à travers le monde ont été exposés, presque la moitié utilisant une liaison GTS.

Exemple de message de la PCD utilisant un code CREX

L'exemple donné ci-après est un message généré par la PCD exploitée par le SHOM. Les PCD de marégraphes SHOM dans la région méditerranéenne ont un intervalle de transmission de 6 minutes, ce qui permet la transmission de 6 mesures du niveau d'eau à raison d'une par minute. En outre, les 6 précédentes mesures sont ajoutées à la section de données afin d'obtenir des messages reproduits pour redondance. Un message contient par conséquent 12 mesures.

Les descripteurs de données dans l'en-tête permettent à l'utilisateur de préciser :

- i. Version du CREX utilisée
- ii. Type de donnée
- iii. Emplacement du marégraphe (Latitude /Longitude)
- iv. Type d'incrément
- v. Date des mesures
- vi. Divers contrôles de qualité
- vii. Niveau de référence de mesure

L'intégralité du message est reproduite et décodée ci-dessous :

CREX++

T000103 A001 D01021 D06019 R01012 B22038++

4615833 -00122056 FR034 2013 07 01 13 25 //// 11 07 00 01

04038 04023 04009 04002 03989 03975 03962 03951 03934 03922 03907 03907++

7777

Interprétation de l'exemple

Ligne Groupe Signification

- 1 CREX Indicateur d'un message CREX
- 2 T000103 Table principale CREX numéro 00, 1ère édition, Version 03
- A001 Type de donnée 001 : Données de surface – mer
- D 01 021 Emplacement avec latitude et longitude précis.
- D 06 019 Identification du relevé des marées, contrôle des niveaux d'eau, incrément de temps
 - R01012 Reproduire 1 descripteur 12 fois
- B22038 Élévation de la marée par rapport au niveau de référence des cartes marines local
- ++ Fin de la section des données
- 3 4615833 Latitude : 46,15833 degrés
- 00122056 Longitude : -001,22056 degrés
- FR034 numéro d'observatoire de marée SHOM FR034
- 2013 Année : 2013
- 07 Mois : Juillet
- 01 Jour : 01
- 13 Heure : 13 h UTC
- 25 Minute de la première mesure dans le message : 25
- //// Pas de donnée sur la température sur la surface de la mer
- 11 Données de qualité
- 07 Aucun contrôle manuel du niveau d'eau effectué
- 00 Incrément de temps : 0 minute appliquée à l'heure de base de 13:25 UTC le 01/07/2013
- 01 Incrément de temps d'une minute
- 4 04038 Élévation de marée de 4 038 mm à 13h25 UTC,
- 04023 Élévation de marée de 4 023 mm à 13h26 UTC,
- etc... (12 mesures en tout)

Manuels et Guides de la COI

No.	Title
1 rev. 2	Guide to IGOSS Data Archives and Exchange (BATHY and TESAC). 1993. 27 pp. (English, French, Spanish, Russian)
2	International Catalogue of Ocean Data Station. 1976. (Out of stock)
3 rev. 3	Guide to Operational Procedures for the Collection and Exchange of JCOMM Oceanographic Data. Third Revised Edition, 1999. 38 pp. (English, French, Spanish, Russian)
4	Guide to Oceanographic and Marine Meteorological Instruments and Observing Practices. 1975. 54 pp. (English)
5 rev. 2	Guide for Establishing a National Oceanographic Data Centre. Second Revised Edition, 2008. 27 pp. (English) (Electronic only)
6 rev.	Wave Reporting Procedures for Tide Observers in the Tsunami Warning System. 1968. 30 pp. (English)
7	Guide to Operational Procedures for the IGOSS Pilot Project on Marine Pollution (Petroleum) Monitoring. 1976. 50 pp. (French, Spanish)
8	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 16)
9 rev.	Manual on International Oceanographic Data Exchange. (Fifth Edition). 1991. 82 pp. (French, Spanish, Russian)
9 Annex I	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 17)
9 Annex II	Guide for Responsible National Oceanographic Data Centres. 1982. 29 pp. (English, French, Spanish, Russian)
10	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 16)
11	The Determination of Petroleum Hydrocarbons in Sediments. 1982. 38 pp. (French, Spanish, Russian)
12	Chemical Methods for Use in Marine Environment Monitoring. 1983. 53 pp. (English)
13	Manual for Monitoring Oil and Dissolved/Dispersed Petroleum Hydrocarbons in Marine Waters and on Beaches. 1984. 35 pp. (English, French, Spanish, Russian)
14	Manual on Sea-Level Measurements and Interpretation. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. I: Basic Procedure. 1985. 83 pp. (English)
	Vol. II: Emerging Technologies. 1994. 72 pp. (English)
	Vol. III: Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. 2002. 55 pp. (English)
	Vol. IV: An Update to 2006. 2006. 78 pp. (English)
	Vol. V: Radar Gauges. 2016. 104 pp. and Supplement: Practical Experiences. 118 pp. (English)
15	Operational Procedures for Sampling the Sea-Surface Microlayer. 1985. 15 pp. (English)
16	Marine Environmental Data Information Referral Catalogue. Third Edition. 1993. 157 pp. (Composite English/French/Spanish/Russian)
17	GF3: A General Formatting System for Geo-referenced Data
	Vol. 1: Introductory Guide to the GF3 Formatting System. 1993. 35 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 2: Technical Description of the GF3 Format and Code Tables. 1987. 111 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 3: Standard Subsets of GF3. 1996. 67 pp. (English)
	Vol. 4: User Guide to the GF3-Proc Software. 1989. 23 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 5: Reference Manual for the GF3-Proc Software. 1992. 67 pp. (English, French, Spanish, Russian)
	Vol. 6: Quick Reference Sheets for GF3 and GF3-Proc. 1989. 22 pp. (English, French, Spanish, Russian)
18	User Guide for the Exchange of Measured Wave Data. 1987. 81 pp. (English, French, Spanish, Russian)

No.	Title
19	Guide to IGOSS Specialized Oceanographic Centres (SOCs). 1988. 17 pp. (English, French, Spanish, Russian)
20	Guide to Drifting Data Buoys. 1988. 71 pp. (English, French, Spanish, Russian)
21	(Superseded by IOC Manuals and Guides No. 25)
22 rev.	GTSP Real-time Quality Control Manual, First revised edition. 2010. 145 pp. (English)
23	Marine Information Centre Development: An Introductory Manual. 1991. 32 pp. (English, French, Spanish, Russian)
24	Guide to Satellite Remote Sensing of the Marine Environment. 1992. 178 pp. (English)
25	Standard and Reference Materials for Marine Science. Revised Edition. 1993. 577 pp. (English)
26	Manual of Quality Control Procedures for Validation of Oceanographic Data. 1993. 436 pp. (English)
27	Chlorinated Biphenyls in Open Ocean Waters: Sampling, Extraction, Clean-up and Instrumental Determination. 1993. 36 pp. (English)
28	Nutrient Analysis in Tropical Marine Waters. 1993. 24 pp. (English)
29	Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements. 1994. 178 pp. (English)
30	MIM Publication Series:
	Vol. 1: Report on Diagnostic Procedures and a Definition of Minimum Requirements for Providing Information Services on a National and/or Regional Level. 1994. 6 pp. (English)
	Vol. 2: Information Networking: The Development of National or Regional Scientific Information Exchange. 1994. 22 pp. (English)
	Vol. 3: Standard Directory Record Structure for Organizations, Individuals and their Research Interests. 1994. 33 pp. (English)
31	HAB Publication Series:
	Vol. 1: Amnesic Shellfish Poisoning. 1995. 18 pp. (English)
32	Oceanographic Survey Techniques and Living Resources Assessment Methods. 1996. 34 pp. (English)
33	Manual on Harmful Marine Microalgae. 1995. (English) [superseded by a sale publication in 2003, 92-3-103871-0. UNESCO Publishing]
34	Environmental Design and Analysis in Marine Environmental Sampling. 1996. 86 pp. (English)
35	IUGG/IOC Time Project. Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. 1997. 122 pp. (English)
36	Methodological Guide to Integrated Coastal Zone Management. 1997. 47 pp. (French, English)
37	International Tsunami Survey Team (ITST) Post-Tsunami Survey Field Guide. 2nd Edition. 2014. 120 pp. (English) Post-Tsunami Survey Field Guide. First Edition. 1998. 61 pp. (English, French, Spanish, Russian)
38	Guidelines for Vulnerability Mapping of Coastal Zones in the Indian Ocean. 2000. 40 pp. (French, English)
39	Manual on Aquatic Cyanobacteria – A photo guide and a synopsis of their toxicology. 2006. 106 pp. (English)
40	Guidelines for the Study of Shoreline Change in the Western Indian Ocean Region. 2000. 73 pp. (English)
41	Potentially Harmful Marine Microalgae of the Western Indian Ocean Microalgues potentiellement nuisibles de l'océan Indien occidental. 2001. 104 pp. (English/French)
42	Des outils et des hommes pour une gestion intégrée des zones côtières - Guide méthodologique, vol.III/ Steps and Tools Towards Integrated Coastal Area Management – Methodological Guide, Vol. II. 2001. 64 pp. (French, English; Spanish)
43	Black Sea Data Management Guide (Cancelled)
44	Submarine Groundwater Discharge in Coastal Areas – Management implications, measurements and effects. 2004. 35 pp. (English)

No.	Title
45	A Reference Guide on the Use of Indicators for Integrated Coastal Management. 2003. 127 pp. (English). ICAM Dossier No. 1
46	A Handbook for Measuring the Progress and Outcomes of Integrated Coastal and Ocean Management. 2006. iv + 215 pp. (English). ICAM Dossier No. 2
47	TsunamiTeacher – An information and resource toolkit building capacity to respond to tsunamis and mitigate their effects. 2006. DVD (English, Bahasa Indonesia, Bangladesh Bangla, French, Spanish, and Thai)
48	Visions for a Sea Change. Report of the first international workshop on marine spatial planning. 2007. 83 pp. (English). ICAM Dossier No. 4
49	Tsunami preparedness. Information guide for disaster planners. 2008. (English, French, Spanish)
50	Hazard Awareness and Risk Mitigation in Integrated Coastal Area Management. 2009. 141 pp. (English). ICAM Dossier No. 5
51	IOC Strategic Plan for Oceanographic Data and Information Management (2008–2011). 2008. 46 pp. (English)
52	Tsunami risk assessment and mitigation for the Indian Ocean; knowing your tsunami risk – and what to do about it. 2009. 82 pp. (English)
53	Marine Spatial Planning. A Step-by-step Approach. 2009. 96 pp. (English; Spanish). ICAM Dossier No. 6
54	Ocean Data Standards Series:
	Vol. 1: Recommendation to Adopt ISO 3166-1 and 3166-3 Country Codes as the Standard for Identifying Countries in Oceanographic Data Exchange. 2010. 13 pp. (English)
	Vol. 2: Recommendation to adopt ISO 8601:2004 as the standard for the representation of date and time in oceanographic data exchange. 2011. 17 pp. (English)
55	Microscopic and Molecular Methods for Quantitative Phytoplankton Analysis. 2010. 114 pp. (English)
56	The International Thermodynamic Equation of Seawater—2010: Calculation and Use of Thermodynamic Properties. 2010. 190 pp. (English)
57	Reducing and managing the risk of tsunamis. Guidance for National Civil Protection Agencies and Disaster Management Offices as Part of the Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North-eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Region – NEAMTWS. 2011. 74 pp. (English)
58	How to Plan, Conduct, and Evaluate Tsunami Exercises / Directrices para planificar, realizar y evaluar ejercicios sobre tsunamis. 2012. 88 pp. (English, Spanish)
59	Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. 2011. 70 pp. (Español solamente)
60	Global Temperature and Salinity Profile Programme (GTSP) — Data user's manual, 1st Edition 2012. 2011. 48 pp. (English)
61	Coastal Management Approaches for Sea-level related Hazards: Case-studies and Good Practices. 2012. 45 pp. (English)
62	Guide sur les options d'adaptation en zone côtières à l'attention des décideurs locaux – Aide à la prise de décision pour faire face aux changements côtiers en Afrique de l'Ouest / A Guide on adaptation options for local decision-makers: guidance for decision making to cope with coastal changes in West Africa / Guia de opções de adaptação a atenção dos decisores locais: guia para tomada de decisões de forma a lidar com as mudanças costeiras na África Ocidental. 2012. 52 pp. (French, English, Portuguese). ICAM Dossier No. 7.
63	The IHO-IOC General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) Cook Book. 2012. 221 pp. (English). Also IHO Publication B-11
64	Ocean Data Publication Cookbook. 2013. 41 pp. (English)
65	Tsunami Preparedness Civil Protection: Good Practices Guide. 2013. 57 pp. (English)

No.	Title
66	IOC Strategic Plan for Oceanographic data and Information Management (2013-2016). 2013. 54 pp. (English/French/Spanish/Russian)
67	IODE Quality Management Framework for National Oceanographic Data Centres (in preparation)
68	An Inventory of Toxic and Harmful Microalgae of the World Ocean (in preparation)
69	A Guide to Tsunamis for Hotels: Tsunami Evacuation Procedures (in preparation)
70	A guide to evaluating marine spatial plans. 2014. 96 pp. (English)



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture



Commission
océanographique
intergouvernementale

Commission océanographique intergouvernementale

Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
7, place de Fontenoy
75352 Paris 07 SP, France
Tel: +33 1 45 68 10 10
Fax: +33 1 45 68 58 12
Website: <http://ioc.unesco.org>