

ÉVOLUTION INSTRUMENTALE DES MARÉGRAPHES DU RÉSEAU RONIM

par Noé Poffa ⁽¹⁾ et l'équipe projet RONIM ^(a)

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet RONIM (réseau d'observation du niveau des mers), le SHOM met en place et maintient en condition opérationnelle un réseau moderne de marégraphes, dans les ports principaux de France métropolitaine et d'outre-mer.

Depuis quelques années, les marégraphes de ce réseau sont également associés à des programmes d'alerte liés aux risques environnementaux de l'évolution du niveau de la mer. Les contraintes opérationnelles du réseau ont donc évolué engendrant notamment une modernisation du matériel d'acquisition et de transmission des données des sites d'observatoires de marée.

Cet article présente les évolutions instrumentales majeures des marégraphes opérés par le SHOM au sein du réseau RONIM. Il traite dans un premier temps de la technologie des capteurs de niveau employés par les marégraphes pour ensuite décrire plus précisément le type de données produites.

La dernière partie couvre les systèmes de transmission utilisés, axe majeur de l'évolution récente des marégraphes côtiers numériques.

ABSTRACT

Within its RONIM project, the SHOM operates and maintains in operational conditions a state-of-the-art network of tide gauges located in harbours around metropolitan France and in overseas French territories.

Since a few years, those tide gauges are also part of alert programmes linked to the environmental risks of sea-level rising. The operational constraints of this network have thus risen and the tide gauges data acquisition and transmission systems have been upgraded.

This paper describes the major instrumental evolution of tide gauges operated by SHOM within the RONIM network. The tide gauges sea-level sensors technology is firstly reviewed to then describe more precisely the type of data produced.

The second part of the paper covers the data transmission systems which are one of the main recent development in coastal numeric tide gauges.

⁽¹⁾ Agent sous contrat département ingénierie des équipements scientifiques (IES)
division des moyens généraux et spécifiques (MGS) de la direction des opérations (DO)
SHOM, 13 rue du Chatellier, CS 92803, 29228 Brest Cedex 2, France (Mél : noe.poffa@shom.fr)

^(a) Equipe projet RONIM : IETA R. Créach, IEF J.C. Kerinec, OE B. Croguennoc, OE C. Kervella, TMD V. Goirand, TMD R. Le Gall, ASC T. Lenglard, IDEF B. Tréguier

1. PRÉSENTATION

1.1 Introduction

Depuis 1992 avec le lancement du projet de réseau d'observation du niveau des mers (RONIM), le SHOM installe, modernise et densifie son réseau de marégraphes côtiers numériques (MCN). Cette modernisation, liée à la fois aux avancées technologiques dans le domaine des capteurs de niveau et des outils de transmission de données, s'est effectuée en plusieurs étapes.

Les marégraphes du réseau RONIM visent à produire des séries de mesures continues, pérennes et précises. Les données acquises par les marégraphes (hauteur d'eau et pression atmosphérique) sont exploitées par le SHOM et mises à disposition d'autres organismes. Elles répondent ainsi à de nombreux besoins [1] tels que la prédiction de la marée, l'étude de l'évolution du niveau moyen des océans, l'étude statistique des surcotes et décotes et des niveaux extrêmes ou encore la calibration des radars altimètres embarqués sur satellite.

Depuis la mise en place du RONIM, l'intérêt pour les mesures marégraphiques est allé croissant. C'est ainsi que le SHOM a vu ces dernières années son expertise associée à de nombreux programmes à la fois d'observation du niveau des mers (GLOSS¹, ESEAS², SONEL³), de prévision (PREVIMER⁴) et d'alerte lié au risque tsunami dans plusieurs bassins océaniques, océan Indien (CNATOI⁵), Caraïbes (TSUAREG⁶), Pacifique⁷ et enfin Méditerranée et Atlantique nord-est (CRATANEM⁸).

C'est particulièrement sur cette nouvelle problématique d'alerte opérationnelle que s'est basée l'évolution instrumentale récente des MCN.

En outre, face à l'intérêt multiple de ces mesures, le secrétariat général de la mer (SGM) a approuvé l'instruction « relative à l'observation du niveau de la mer et à la gestion et à la diffusion des données en résultant », qui formellement confie au SHOM le rôle de référent du domaine [2]. Le SHOM est ainsi invité à partager ses pratiques instrumentales et notamment de moyens de transmission opérationnels.

1.2 État du réseau RONIM en 2011

Au lancement du projet RONIM, le SHOM opérait cinq marégraphes permanents basés sur des technologies à flotteur dont le marégraphe historique de l'observatoire de La Penfeld à Brest.

¹ Global *Sea Level* Observing System

² European *SEA level* Service

³ Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales

⁴ Projet d'océanographie côtière opérationnelle

⁵ Centre National d'Alerte aux Tsunamis dans l'Océan Indien

⁶ Tsunami Alerte Régionale

⁷ Article de S. Lannuzel publié dans ces annales

⁸ Centre Régional d'Alerte aux Tsunamis en Atlantique Nord Est et Méditerranée

Au mois d'avril 2011, le nombre de ces observatoires instrumentés par le SHOM et opérés en partenariat avec différents organismes (ports, CCI, IGN...) se porte à 38 MCN, dont 31 sont situés en métropole et à Monaco (Fig.1), six en outre-mer (Martinique, Guadeloupe, Guyane française, La Réunion, Mayotte, et Nouvelle-Calédonie) et un à Madagascar, en partenariat avec Météo-France et la direction de la météorologie de Madagascar (projet CNATOI). 31 de ces sites sont équipés d'une liaison temps réel par Internet et sept autres, liés au projet CRATANEM, sont équipés de la liaison satellite à cadence de transmission de 6 min.

Par ailleurs, trois des marégraphes de l'océan Indien (Mayotte, La Réunion et Madagascar) sont équipés de la transmission satellite à la cadence de 15 min.

Cinq nouveaux sites en métropole sont prévus pour être instrumentés à l'échéance 2012 (l'île de Groix, l'île d'Aix, Port Férréol, la Figueirette et l'île Rousse).

Le réseau RONIM sera donc à cette date composé de 41 MCN équipés de la dernière technologie de mesure de niveau radar et de transmission de données en temps réel.

2. ÉVOLUTION DES MARÉGRAPHES

L'évolution des observatoires de marée permanents a suivi à la fois l'évolution de la technologie des capteurs et celle du type de données requis par les utilisateurs.

Le choix de la technologie radar pour la mesure du niveau d'eau s'est fait au détriment des systèmes à flotteur, à pression ou à ultrasons pour des raisons de précision et de stabilité de la mesure, de facilité d'installation et du peu d'entretien nécessaire [3].

Enfin, l'abandon progressif pour certains sites des puits de tranquillisation a été rendu possible par l'intégration des télémètres radar en air libre. Il se justifie également par la nécessité non plus de mesurer seulement la marée ou le niveau moyen, mais aussi des phénomènes de plus haute fréquence, comme les ondes de tempêtes ou tsunamis, pour lesquels les puits de tranquillisation traditionnels peuvent être moins adaptés.

2.1 Technologie radar

La mesure de niveau par onde radar, développée à l'origine pour des mesures de niveau de produits pétroliers, existe depuis les années 70.

Au début très coûteuse, cette technologie se démocratise vers la fin des années 80 pour être aujourd'hui universellement répandue, notamment dans toutes les industries de process (chimie, pharmaceutique, agro-alimentaire...), de production d'énergie (raffineries, centrales nucléaires...) ou de traitement des eaux.

De nombreux fabricants d'instrumentation industrielle proposent sur le marché des capteurs de niveau radars de technologies et performances diverses.

On distingue plusieurs principes de mesure, avec ou sans contact avec l'interface du produit mesuré.

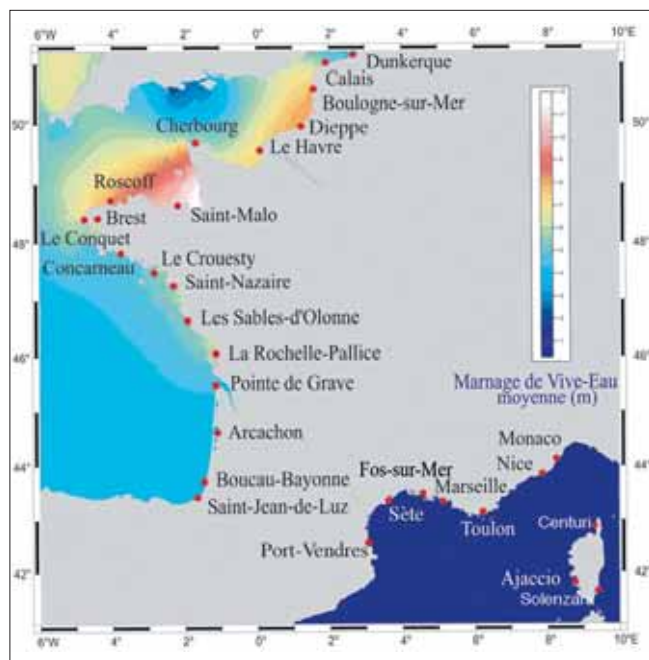


Fig.1 : MCN RONIM situés en France métropolitaine

Le radar à onde pulsé, popularisé notamment par le constructeur Vega [4], fonctionne sur le principe d'une mesure directe du temps de propagation de la micro-onde émise par l'instrument et réfléchi par la surface de l'eau.

Le radar FMCW pour *Frequency Modulated Continuous Wave* ou onde continue à fréquence modulée, se base sur un principe de balayage de fréquence. On ne mesure plus ici un intervalle de temps mais une différence de fréquence directement reliée à la distance entre le capteur et la surface mesurée. Cette technique nécessitant une puissance de calcul supérieure n'a été introduite que plus tardivement dans les capteurs de niveau industriels.

Enfin la technique TDR pour *Time Domain Reflectometry* est similaire au radar pulsé mais ici l'onde se déplace le long d'un câble conducteur. C'est donc une méthode intrusive à l'opposé des deux précédentes qui ne demandent aucun contact avec le produit mesuré.

Les capteurs radars de la marque Krohne choisis par le SHOM pour équiper ses marégraphes ont été sélectionnés pour leur précision et leur robustesse ainsi que pour leur capacités à fonctionner dans diverses configurations sur des surfaces plus ou moins agitées.

L'ancienne génération des BM100 (TDR) et BM70 (FMCW) est progressivement remplacée par les Optiflex 1300C (TDR) et Optiwave 7300C (FMCW) [5]. Ces derniers modèles présentent en effet l'avantage d'une consommation électrique moindre (de l'ordre de 4mA au lieu de 500mA) adaptée à des sites autonomes pendant plusieurs jours de fonctionnement continu sur batterie. Cette nouvelle génération de capteurs offre également une plus grande précision de mesure de surfaces agitées grâce à une

fréquence d'émission de l'onde radar plus élevée (autour de 26 GHz pour l'Optiwave contre 10 GHz pour le BM70) et une facilité d'installation optimisée par une taille et un poids réduits. La haute fréquence de fonctionnement de l'Optiwave associée à une antenne adéquate permet, en outre, de concentrer le signal émis dans un cône d'émission restreint (de l'ordre de 4° d'ouverture) facilitant ainsi l'installation de ce dispositif dans des zones contenant des obstructions (puits, bords de quais..).

Le choix de la technologie Krohne par le SHOM s'est également justifié par la nécessité de pouvoir maîtriser la calibration de tous les paramètres de l'instrument, chaque site marégraphique étant unique.

En effet, malgré un souci de standardisation, il est impossible de répéter exactement deux fois la même installation, chaque site possédant ses propres particularités du fait de l'infrastructure en place (le plus souvent réalisée par les partenaires locaux) et de la situation du site choisi (hauteur de marnage, type de puits, port plus ou moins abrité de la houle, etc...). Dans ces conditions, il est essentiel d'avoir une parfaite maîtrise de la mesure qui peut être perturbée par des échos parasites, des déviations électro-magnétiques du signal dues par exemple à des masses de fer environnantes ou encore une atténuation de la propagation de l'onde [6].

Les capteurs Krohne ont l'avantage d'être entièrement paramétrables et d'éventuelles corrections peuvent être directement appliquées sur la mesure. Par ailleurs, comme la plupart des instruments industriels, ils utilisent le protocole de communication numérique HART qui permet une calibration ou un diagnostic à distance. Ce protocole intégré à la centrale d'acquisition de mesures et pris en charge dans le logiciel de supervision des marégraphes au SHOM permet notamment d'intervenir à distance sur les capteurs en cas de panne.

Ce type de communication numérique rend également possible la mise en place d'une liaison hertzienne sécurisée avec le capteur, ceci permet donc l'installation légère de marégraphes autonomes sur panneaux solaires dans des lieux difficilement accessibles par réseau filaire.

Ce type d'installation est par exemple mis en œuvre sur le site de l'île d'Aix où il est nécessaire de faire une installation d'encombrement minimale sur une jetée isolée servant à l'accostage des bateaux.

2.2 La mesure radar en air libre

A la différence des systèmes à ultrasons, le radar n'est pas influencé par le vent où la température extérieure et ne nécessite donc pas d'abri ou de compensation en température uniquement réalisable en puits de tranquillisation. Par ailleurs l'évolution des radars eux-mêmes, par les avancées en traitement du signal et des gammes de fréquence utilisées, permet dorénavant de mesurer avec précision la position de la surface de l'eau même si celle-ci est fortement agitée.

Depuis 2009, le SHOM a donc étudié la possibilité de s'affranchir des puits de tranquillisation en plaçant des télémètres radars à l'air libre en mesure directe au dessus de

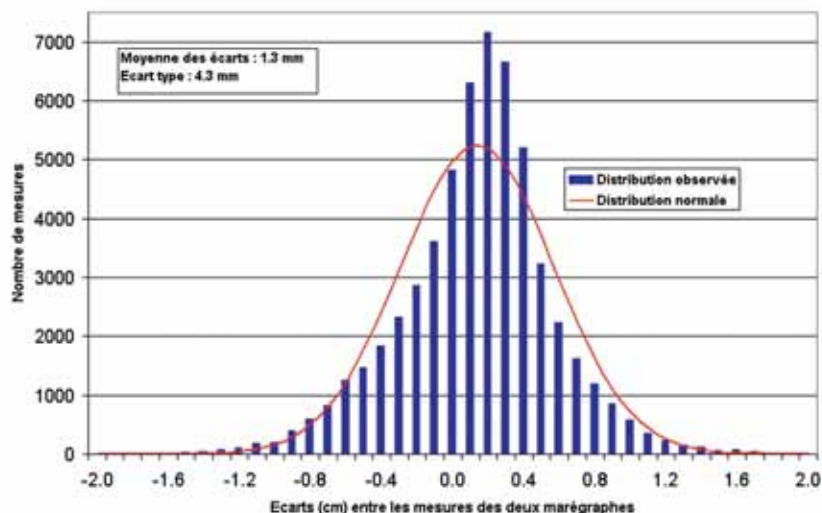


Fig.2 : Différences BM100-Optiwave (1 an de données)

l'eau. Ce type d'installation est déjà utilisé par de nombreux observatoires de marée à travers le monde (Norvège, Royaume Uni, Espagne...) ainsi qu'en France par certains ports français (Bordeaux). Dans le cadre de cette étude, un capteur Optiwave a été placé à l'air libre à l'extérieur du puits de La Penfeld à Brest. La comparaison des données de ce capteur avec celles issues du capteur de référence BM100 situé à l'intérieur du puits a permis de valider cette installation et de rendre ce système opérationnel.

Sur une année complète de mesures entre novembre 2009 et novembre 2010, les écarts observés entre les deux marégraphes sont en effet relativement faibles compte-tenu des incertitudes en jeu. Sur 365 jours complets de mesure (mesures moyennées sur 2 min toutes les 10 min.), 97,2 % des écarts observés entre les deux marégraphes sont en effet inférieurs ou égal au centimètre. Les 2,8 % restants sont inférieurs à 2,6 cm et l'écart type calculé sur la totalité de ces écarts est de 4,3 mm (Fig.2).

Ceci paraît être un excellent résultat dans la mesure où plusieurs paramètres sont susceptibles de justifier des écarts plus ou moins importants indépendamment des capteurs utilisés.

Premièrement, la hauteur d'eau à l'intérieur du puits de tranquillisation n'est pas sous certaines conditions forcément la même qu'à l'extérieur, le puits agit en effet comme un filtre dont la fonction de transfert dépend des courants, de la pression atmosphérique, etc.. [1]. Néanmoins les résultats de séries de mesure à la sonde lumineuse (mesure de référence), effectuées simultanément à l'intérieur et en dehors du puits les 20 et 21 janvier 2011 tendent à prouver que la différence de niveau due à cette fonction de transfert est minimale (par beau temps).

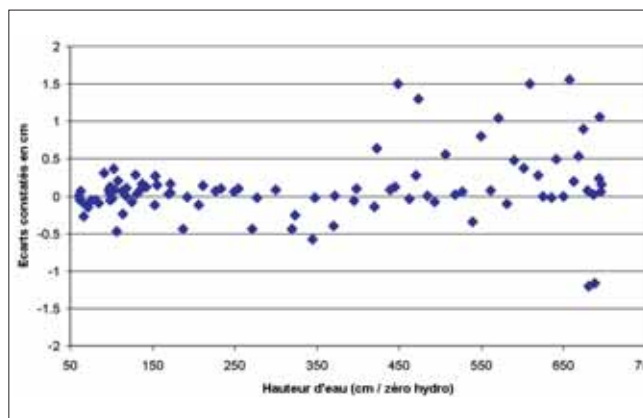


Fig.3 : Différences observées entre la hauteur d'eau à l'intérieur et à l'extérieur du puits de Brest - Penfeld

On observe en effet que les différences entre les hauteurs d'eau mesurées à l'intérieur et à l'extérieur du puits sur un cycle complet de marée sont minimales. La dispersion des écarts est plus importante à marée haute en raison d'une surface plus agitée à l'extérieur rendant la mesure sonde lumineuse plus aléatoire mais la moyenne des écarts reste très proche de 0 (Fig.3). Malgré cela deux jours de mesures ne sont pas forcément représentatifs des variétés de conditions à plus long terme.

Une erreur instrumentale importante concerne également l'heure associée à chaque mesure. En effet les deux systèmes possèdent des horloges internes distinctes dont la remise à l'heure périodique n'empêchait pas des dérives pouvant parfois atteindre plusieurs dizaines de secondes. Or, à mi-marée à Brest, lors de forts coefficients, il est aisé d'atteindre plusieurs centimètres de marnage sur des laps de temps bien inférieurs à la minute. Ce problème est

désormais résolu par la remise à l'heure automatique des centrales d'acquisition utilisées par le SHOM qui rend impossible des dérives d'horloge supérieures à cinq secondes. Néanmoins, sur certains des écarts observés, il est clair que cette dérive d'horloge est à mettre en cause.

Enfin, malgré l'intégration sur deux minutes des séries de mesures, l'incertitude sur la détermination du niveau d'eau reste plus grande à l'extérieur lorsque la surface est agitée, on observe en effet des écarts types plus importants sur la mesure extérieure qu'intérieure.

2.3 Exemples d'implantations

Sur les bases des résultats de ce site test, le SHOM a pu déployer dans le cadre de RONIM des marégraphes basés sur des capteurs à l'air libre sur les sites de Calais et Boulogne-sur-Mer (Fig.4). Ces installations se justifiaient notamment pour des raisons d'envasement récurrents de ces deux sites qui rendaient complexe l'utilisation de puits de tranquillisation. Dans un contexte où les interventions de nettoyage ne peuvent être garanties par les partenaires, la technique de mesure à l'air libre résout en effet le problème.

Hormis l'avantage économique certain que représentent de telles installations s'affranchissant de la construction et de l'entretien d'un puits et de son infrastructure, le marégraphe à l'air libre est particulièrement intéressant dans le cadre de systèmes d'alerte.

Les nouvelles applications demandées aux marégraphes et évoquées précédemment, exigent la possibilité de mesurer certains mouvements très dynamiques de la surface de la mer comme un retrait ou une élévation rapide lié à une onde de tsunami.



Fig.4 : Vue de situation du marégraphe de Boulogne-sur-Mer où la distance à mesurer peut dépasser 12 m

Or, s'il est difficile d'appréhender précisément les problèmes que poserait la mesure d'un tel phénomène dans un puits de tranquillisation [7], le principe de mesure en air libre permet de s'affranchir d'éventuels retards ou filtrages liés au puits. C'est pour cette raison que les nouveaux marégraphes déployés par le SHOM dans le cadre du réseau d'alerte CRATANEM utilisent des capteurs en air libre fixés sur potence (Fig. 5).



Fig.5 : Capteur Optiwave sur potence à Solenzara

2.4 Données recueillies

L'acquisition des mesures de niveau brutes par le radar, est réalisée par une centrale qui effectue un traitement de la mesure avant de l'archiver. Ce traitement consiste en l'application de coefficients d'étalonnage servant à corriger d'éventuelles erreurs de pente ou d'offset de la mesure. Ces coefficients de correction, spécifiques à chaque site, sont calculés lors d'un étalonnage selon les procédures en vigueur au SHOM [3][9].

La centrale d'acquisition effectue également un filtrage numérique du bruit de houle ou de clapot par moyennage d'une série continue de mesures. Dans le cas des MCN, le temps d'intégration utilisé pour la moyenne est défini à deux minutes (soit 120 mesures à raison d'une acquisition par seconde) à cadence de 10 minutes (période d'archivage). Ce principe de mesure moyennée sur 2 minutes toutes les 10 minutes a été défini au SHOM pour tous les marégraphes utilisés dans des sites portuaires pour l'analyse des marées et le calcul des niveaux moyens [8][9].

Le temps d'intégration requis sera plus important pour des mesures effectuées au large des côtes, donc plus bruitée par la houle (4 minutes d'intégration pour les marégraphes plongeurs en pleine mer).

En ce qui concerne les données utilisées dans le cadre d'une problématique d'alerte, il est nécessaire d'avoir des cadences d'intégration et d'archivage bien inférieures afin de pouvoir saisir un événement plus haute-fréquence. Les règles de l'échantillonnage définissent en effet une période maximum d'échantillonnage inférieure de moitié à la période du phénomène mesuré (théorème de Shannon). On considère en marégraphie qu'il faut que cette période d'échantillonnage soit très inférieure afin de reproduire correctement les oscillations mesurées. Ainsi pour des périodes de seiches d'environ 5 minutes comme on peut l'observer à Groix, on pourra par exemple définir un temps d'intégration d'une minute (soit 5 fois inférieur) afin d'étudier correctement le phénomène [8].

Les standards d'acquisition de mesures généralement admis pour la prévention du risque tsunami par des centres d'alertes nationaux et régionaux recommandent un moyennage sur 15 secondes des données de hauteur d'eau [10][11]. Le système de transmission mis en place par le

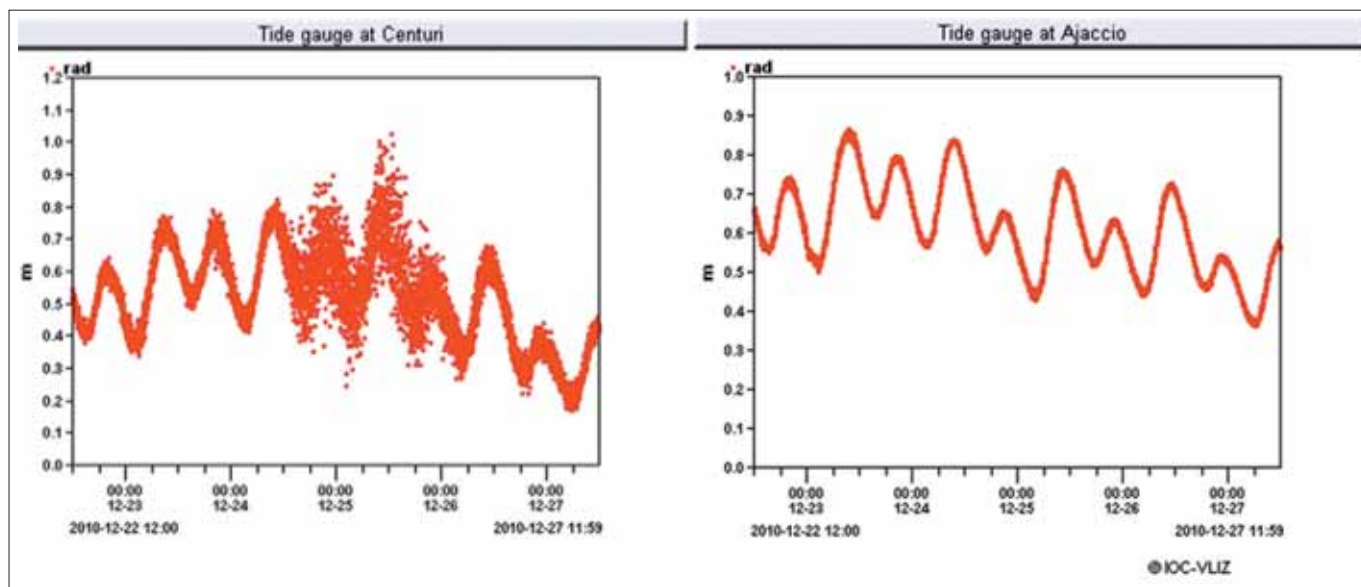


Fig.6 : Comparaison des données temps réel à Centuri et Ajaccio pour la période du 22 au 27/12/2010

SHOM sur ses marégraphes satisfait donc ces exigences en diffusant en temps réel une donnée à la minute moyennée sur 15 secondes.

Parallèlement à cette transmission quasi-instantanée, les mesures moyennées sur deux minutes sont sauvegardées sur la carte mémoire de la centrale d'acquisition du marégraphe (capacité de stockage supérieure à une année de mesures) et transmises toutes les semaines au SHOM.

Les MCN répondent ainsi à un double besoin qu'on pourrait résumer en la production de mesures filtrées pour les applications traditionnelles et de mesures « brutes » pour les applications d'alerte.

Ces mesures « brutes » ou du moins peu filtrées, le sont d'autant moins si le capteur du marégraphe est à l'air libre. La différence entre les marégraphe situés à l'intérieur et hors du puits de tranquillisation à Brest n'est à première vue pas flagrante vu la situation très abritée de l'observatoire et le fort marnage. Elle est en revanche beaucoup plus évidente sur les sites de Méditerranée du fait du faible marnage qui rend la dispersion des mesures plus visible. Les graphes de la figure 6 illustrent la différence entre une mesure en puits de tranquillisation (Ajaccio) et une mesure à l'air libre (Centuri). Ces deux marégraphe sont comparables dans la mesure où ils sont tous deux placés dans des ports pénétrés par la houle d'ouest et où, dans de mauvaises conditions météorologiques, la surface de l'eau au niveau du marégraphe peut être très agitée.

A la vue de ces deux séries de données « temps réel », il est clair que la dispersion des mesures est bien plus importante à Centuri qu'à Ajaccio. On remarque notamment que lors de la période du 24 au 25 décembre 2010 où une forte houle d'ouest frappait tout le littoral ouest de la Corse, les mesures effectuées à Centuri sont extrêmement dispersées allant jusqu'à plus de 40 cm de différence entre deux mesures consécutives (1 minute d'écart) contre à peine 1 cm à Ajaccio. Si on considère sur cette même période non plus les données moyennées à 15 secondes mais à 2 minutes, on

obtient alors une courbe beaucoup plus lissée mais dont les mesures présentent tout de même des écarts types d'environ 10 cm sur les deux minutes d'intégration (contre moins d'un demi centimètre à Ajaccio).

Ces considérations illustrent l'intérêt et les limites des durées d'intégration choisies et des implantations des marégraphe à l'air libre ou en puits de tranquillisation.

En offrant deux types de données, les marégraphe RONIM peuvent répondre à de multiples besoins par la diffusion en temps réel des données brutes et l'archivage sécurisé de données moyennées.

La technique de mesure en air libre mise en place depuis 2009 présente avantages et inconvénients. S'il est incontestable qu'elle ne permet pas un lissage des courbes de marée aussi « propre » que pour les installations en puits de tranquillisation, cette technique reste cependant très intéressante. Les données par temps calme sont entièrement valides puisque chaque marégraphe est étalonné et vérifie les exigences des stations GLOSS définissant un niveau de précision requis inférieur au cm pour des mesures individuelles de hauteur d'eau [12].

Particulièrement adaptés aux problématiques d'alerte, les marégraphe installés en air libre présentent en outre les avantages non négligeables d'un faible coût et d'une plus grande facilité de mise en œuvre [13].

Début 2011, 4 MCN du réseau RONIM rendent opérationnelle cette technique en Manche et en Méditerranée.

3. TRANSMISSION EN « TEMPS RÉEL » DES DONNÉES DES MARÉGRAPHES

Depuis 2006 et l'installation d'une liaison temps réel par internet des données du marégraphe de Brest, le SHOM équipe progressivement tous les sites RONIM. Les données transitant par Internet sont redistribuées par le SHOM vers

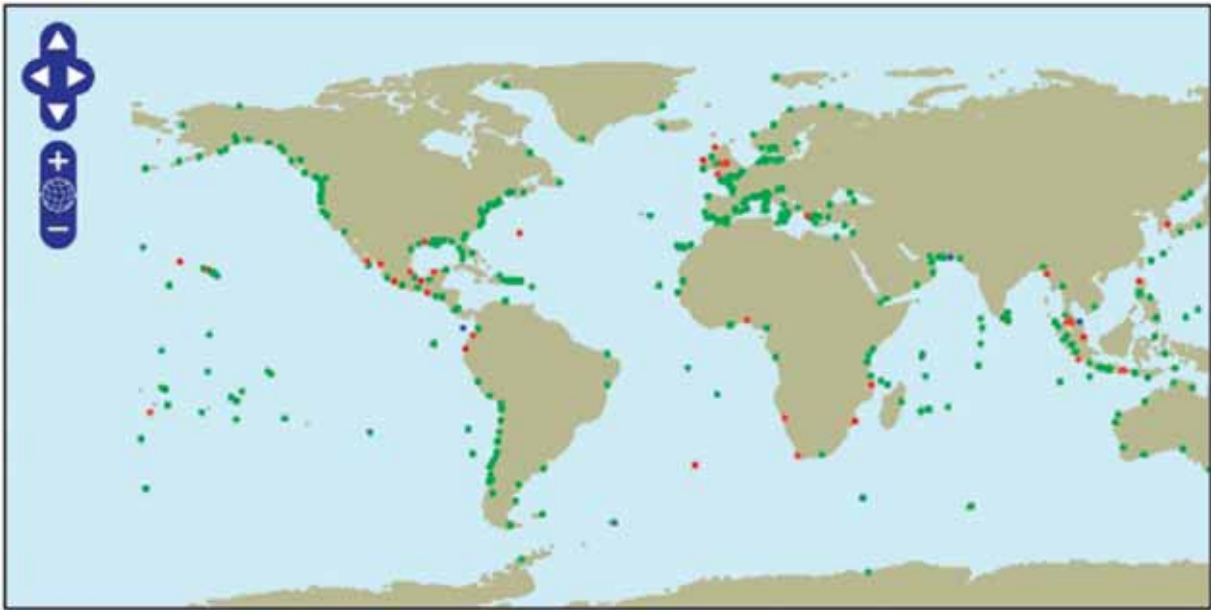


Fig.7 : Planisphère des marégraphes du portail internet de l'IOC « Sea Level Station monitoring Facility »

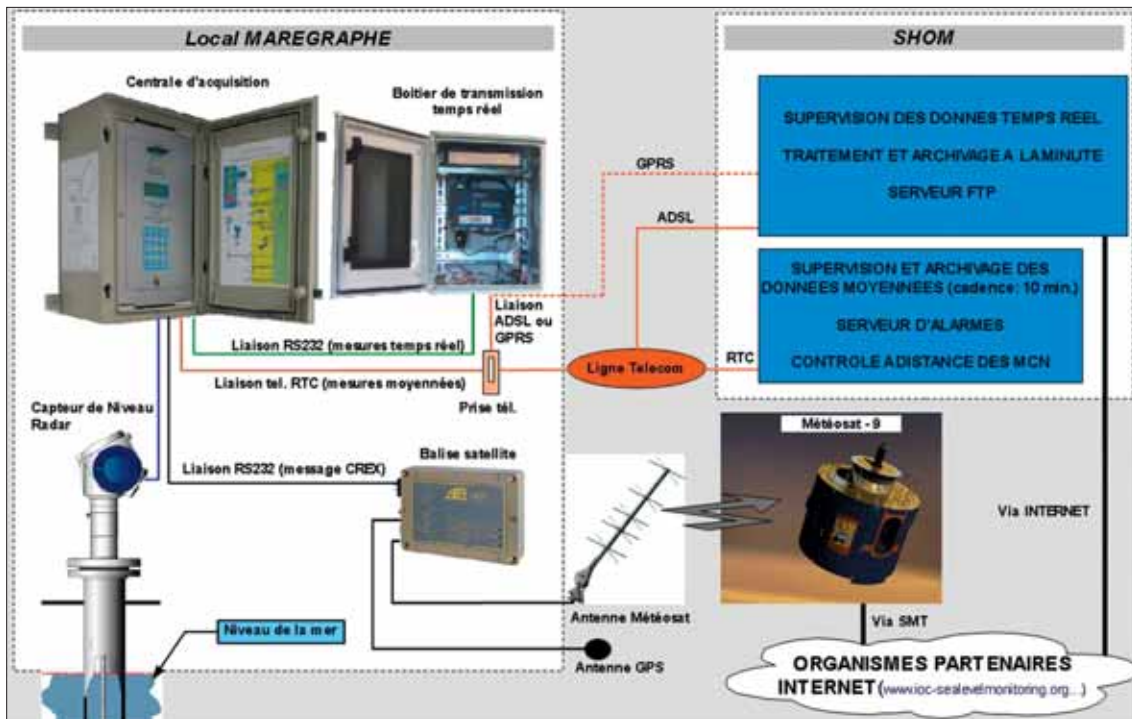


Fig.8 : Schéma de principe des connexions des MCN

divers portails tel celui global de l'IOC¹ (Fig.7) pour le contrôle des marégraphes temps réel des programmes GLOSS et d'alerte tsunami² ou bien le portail français PREVIMER³.

Les données temps réel sont également ouvertes aux centres d'alertes aux tsunamis comme dans le cas du CRATANEM coordonné par le CEA pour le territoire français.

Par ailleurs, en plus de la liaison internet, les marégraphes faisant partie des réseaux d'alerte aux tsunamis sont équipés d'une deuxième liaison par le satellite géostationnaire Météosat-9 de l'organisation européenne EUMETSAT. Les données transitant par Météosat sont redistribuées par EUMETSAT sur le système mondial de télécommunication (SMT) de l'organisation météorologique mondiale (OMM) et sont ainsi disséminés vers les organismes accrédités (Fig. 8).

Le chapitre suivant décrit plus précisément l'instrumentation et les protocoles utilisés pour la réalisation de la transmission en temps réel des mesures marégraphiques.

¹ Intergovernmental Oceanographic Commission

² <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>

³ <http://www.previmer.org/>

3.1 Transmission par les réseaux ADSL / GPRS

Les centrales d'acquisition de mesures développées par la société ELTA sur spécifications du SHOM disposent d'une sortie temps réel de la donnée qui transmet sous forme numérique la valeur de hauteur d'eau. Celle-ci est la distance mesurée par le capteur de niveau et corrigée par le calculateur de la centrale pour être ramenée à une hauteur relative au zéro hydrographique local.

La donnée de hauteur d'eau est diffusée chaque seconde et agrémentée d'une mesure de pression atmosphérique par heure. Elle se présente comme une chaîne de caractères ASCII donnant pour chaque mesure la date, l'heure, la hauteur d'eau, un code de validité de la mesure et le cas échéant un code d'alarme.

Les chaînes de caractères ci-après illustrent par exemple une série de mesures.

```
20101217 150000 +0543.8 cm 0
20101217 150001 +0544.0 cm 0
20101217 150002 +0544.1 cm 0
```

C'est cette donnée à la seconde qui est transmise au SHOM par internet, soit par ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) sur le réseau téléphonique classique, soit par GPRS (*General Packet Radio System*) sur les réseaux mobiles. Le choix de la transmission terrestre ou mobile se fait en fonction des réseaux disponibles sur site et des avantages locaux de l'une ou l'autre possibilité. En général le GPRS est utilisé sur les sites les plus isolés non-éligibles à l'ADSL.

Actuellement dix des 27 sites RONIM équipés le sont par GPRS, les autres passent par l'ADSL, soit en transitant par

le réseau du port partenaire soit par abonnement direct chez un fournisseur d'accès.

Les protocoles de télécommunications TCP (*Transmission Control Protocol*) ou UDP (*User Datagram Protocol*) sont utilisés pour la transmission des données. Le protocole TCP est de préférence utilisé sur les connexions ADSL; le serveur de collecte du SHOM initie alors une session de dialogue durant laquelle il va demander les données au marégraphe. Lorsqu'il fonctionne en mode UDP, le marégraphe envoie les données sans attendre de réponse. Le mode UDP ne nécessite ainsi pas de communication dans les deux sens; c'est pourquoi il est utilisé dans des cas spécifiques, par exemple en GPRS ou dans certains ports si les données transitent par leur réseau interne.

Par ailleurs, dans le cadre du projet CRATANEM, les données des marégraphes qui seront transmises directement au CEA (coordinateur du centre d'alerte en France) seront cryptées et passeront par des liaisons VPN (Réseau Privé Virtuel). Afin de satisfaire ces exigences, le SHOM utilise des routeurs ADSL et GPRS de type industriel (commercialisés par la société Westermo) associés à des convertisseurs Série-Ethernet de la marque Moxa qui, connectés à la sortie temps réel de la centrale d'acquisition, permettent aux données d'être transmises avec les paramètres de sécurité requis.

La donnée à la seconde qui arrive par internet au SHOM est ensuite traitée par un logiciel d'acquisition afin d'être archivée et rediffusée.

Comme l'illustre le synoptique de la Figure 9, le traitement en temps réel des données permet notamment un contrôle instantané des mesures afin de détecter d'éventuelles anomalies (caractères aberrants, pics, valeurs constantes, absence de données...).

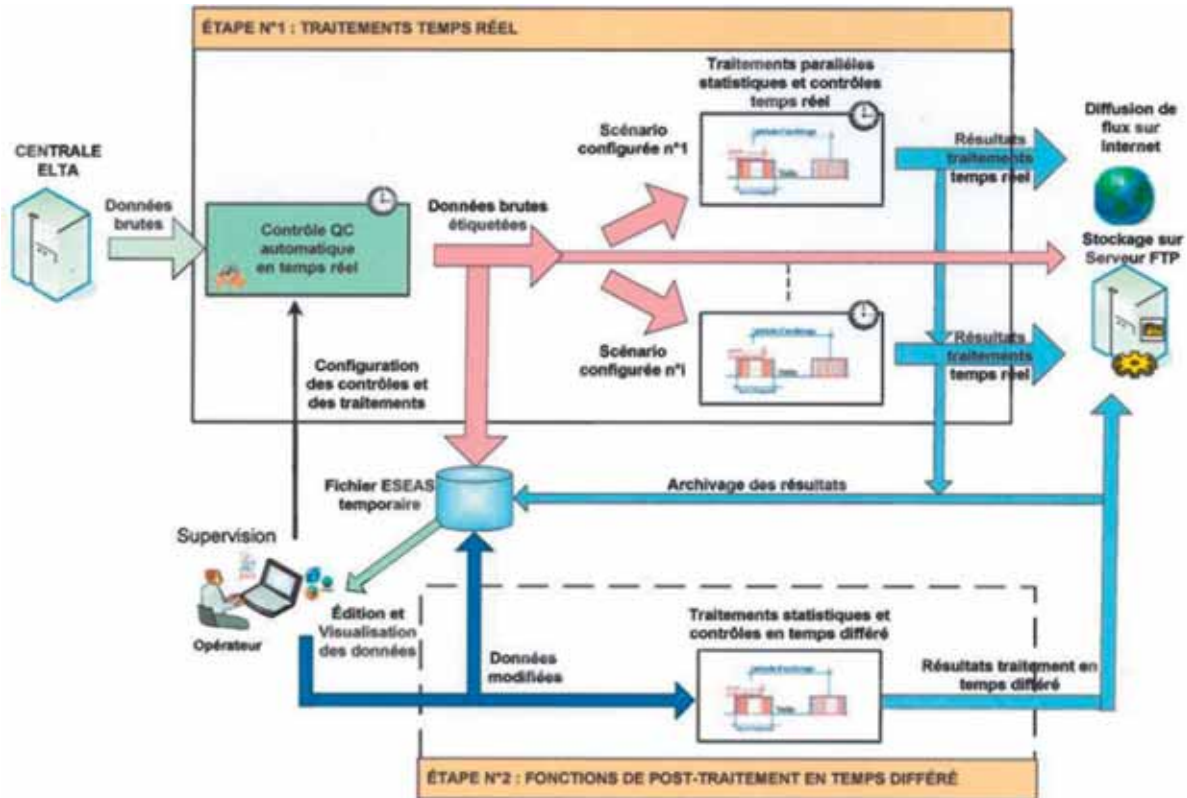


Fig. 9 : Cinématique des traitements des données réalisés par le logiciel temps réel

La donnée brute arrivant à chaque seconde, c'est également à ce stade que va être effectué l'intégration et le traitement des mesures moyennées. Cette étape consiste en une intégration sur 15 secondes telle qu'énoncée au chapitre précédent, puis à un deuxième contrôle qualité qui prend notamment en compte les calculs de surcotes et décotes établies d'après les prédictions de marée du SHOM. A l'issue de l'ensemble de ces traitements automatiques, les données produites moyennées sur 15 secondes, sont diffusées sous forme de flux sur Internet et les résultats des traitements sont déposés sur un serveur au SHOM.

Le site Internet du projet PREVIMER (Fig.10) développé sur une collaboration SHOM – Ifremer – Météo-France permet par exemple de visualiser les mesures temps réels des MCN comparées aux prévisions de hauteur d'eau calculées par les modèles PREVIMER.

3.2 Transmission par satellite

La redondance des observations des marégraphes nécessaire aux systèmes d'alerte est assurée par une seconde transmission « temps réel » des données. On emploie ici le terme de DCP (*Data Collection Platform*) comme terminologie pour désigner les marégraphes transmettant leurs données par le biais des DCS (*Data Collection System*). Les DCS sont actuellement opérés dans le monde par les satellites géostationnaires Météosat (EUMETSAT – Europe), GOES (NOAA – États -

Unis), GMS (Agence Météorologique Japonaise) Fen Yung (Administration Météorologique Chinoise) et GOMS (Roshydromet – Russie). Fen Yung et GOMS n'étant actuellement pas pourvoyeurs de services, ils sont remplacés par le satellite Météosat pour l'océan indien. La couverture globale est ainsi assurée (Fig.11 page suivant).

Les marégraphes RONIM associées au CNATOI et au CRATANEM sont donc sous la couverture du satellite Météosat-9 situé à 0° de longitude. EUMETSAT réceptionne les messages du satellite sur sa station au sol d'Usingen et les rediffuse ensuite sur le système mondial de télécommunication (SMT).

De même que pour les données temps réel transmises via internet, les mesures transmises par satellite sont des moyennes sur 15 secondes effectuées à chaque minute par la centrale d'acquisition du marégraphe.

L'association des marégraphes à un réseau d'alerte nécessite une cadence de transmission des données en accord avec le temps de réaction demandé par le système d'alerte. Dans le cas d'une alerte Tsunami, ce temps de réaction dépend de la vitesse de propagation de l'onde de tsunami, de la proximité des zones sismogènes et de la taille du bassin océanique considéré [10].

En fonction également des possibilités de transmission offertes par le DCS, les cadences de transmission ont été

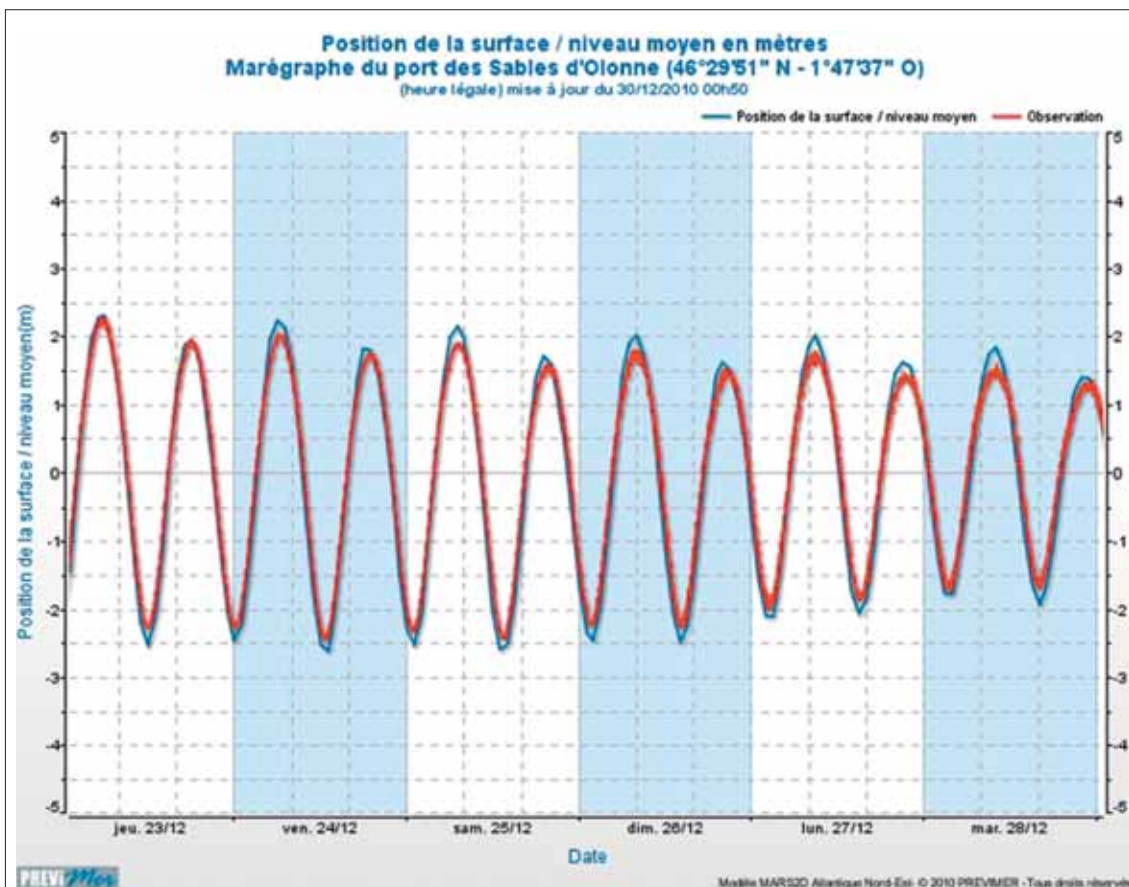


Fig.10 : Exemple de données PREVIMER

fixées à 15 minutes pour les marégraphes de l'océan Indien et à 6 minutes pour les stations du réseau CRATANEM. La cadence de transmission à 6 minutes acquise par le SHOM auprès d'EUMETSAT en 2009 a été jugée acceptable par le CEA et est donc en cours d'implémentation sur les 10 stations prévues en France métropolitaine.

3.2.1 Format des messages transmis sur le SMT

Afin de pouvoir être routés par EUMETSAT sur le SMT, les messages transmis par les DCP doivent adhérer au formats, structures et procédures définies par l'OMM. Les messages diffusés sur le GTS se composent de trois parties distinctes : l'en-tête, l'identifiant et le message contenant les données.

Sur conseil de Météo-France et de l'Australian Bureau of Meteorology [14] et en suivant les recommandations éditées par l'OMM, le SHOM a donc fixé ces paramètres afin de produire des messages valides et interprétables par tous les organismes concernés.

L'en-tête du message employé pour le routage sur le SMT doit être de la forme générique « TTAAii CCCC ». Le code définit le type de donnée et leurs origines géographiques et CCCC le centre d'origine des bulletins. Dans le cas de données marégraphiques, le code SZ définissant des données de surface du niveau de la mer a été adopté. On utilisera le localisateur FR01 ou IO01 selon que les marégraphes sont situés en France métropolitaine (FR01) où dans l'océan Indien (IO01). Le centre d'origine des messages est dans tous les cas EUMETSAT. Le paramètre CCCC est donc exclusivement fixé à « EUMS ». L'en tête se termine ensuite par 6 caractères définissant la date et l'heure de compilation du bulletin.

L'identifiant est un code hexadécimal donné pour chaque DCP par EUMETSAT

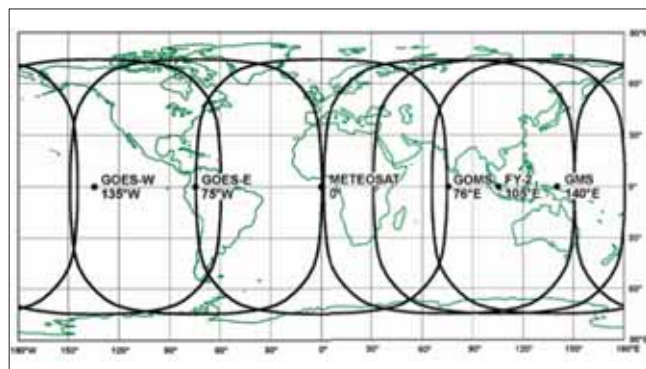


Fig. 11 : Couverture satellite du DCS

Le message contenant les données de hauteur d'eau est ensuite codé en CREX (*Character form for the Representation and EXchange of meteorological data*). Ce type de codage est avec le BUFR (*Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*) le seul codage de données d'observations météorologiques reconnu universellement et recommandé par l'OMM pour ses applications présentes et futures. Ces codes font appel à des tables clairement définies par l'OMM [15] et le CREX présente l'avantage d'être interprété directement par un humain (contrairement au BUFR qui est un code binaire).

L'exemple de message suivant présente ce codage tel qu'il est actuellement employé pour transmettre les données des marégraphes :

```
CREX++
T000103 A001 D01021 D06019 R01015 B22038++
-1278194 04525889 FR030 2010 10 02 23 57 //// 11 07 00 01
01943 01941 01937 01931 01933 01929 01926 01921 01919 01914 01914
01906 01899 01898 01898++
7777 (Fig. 12)
```



Fig. 12 : Format et codage d'un message transmis sur le SMT

3.2.2 Instrumentation des sites MCN

La mise en place de la transmission satellitaire sur les marégraphes du SHOM a donné lieu à une évolution spécifique des centrales d'acquisition Marelda. Le codage des hauteurs d'eau en CREX et l'association à la centrale d'un transmetteur satellite fabriqué par la société OTT (OTT HDR) a ainsi été rendu possible. La balise de transmission satellite, synchronisé par GPS, émet sur la bande de fréquence allouée par EUMETSAT via une antenne d'émission de type Yagi (Fig. 13).

Le retour d'expérience du SHOM sur ce système de transmission montre sa fiabilité et on estime à environ 95% le taux de réussite de la transmission des messages de hauteur d'eau mesurée [16]. Une redondance des données contenues dans le message peut également être envisagée afin de s'affranchir de la majeure partie des pertes liées à la transmission.

La photographie de la figure 14 illustre l'intégration du système complet d'acquisition et de transmission des données.

Les principaux éléments sont :

- la centrale d'acquisition Marelda ;
- son alimentation sécurisée et son modem RTC ;
- le convertisseur Ethernet et le routeur ADSL / GPRS ;
- le transmetteur satellite OTT HDR ;
- un chargeur et 2 batteries de 48 et 80AH.

La totalité de ces éléments peut s'assembler dans un coffret étanche d'1 mètre par 1 mètre afin d'être implanté sur tout site sans nécessité de local dédié.

La connexion vers une ligne téléphonique est nécessaire pour la transmission des alarmes et le téléchargement des données moyennées vers le SHOM. L'armoire est également reliée au secteur et dispose d'une autonomie minimum de 3 jours sur batteries en cas de coupure. Une autonomie totale sur panneaux solaire est également envisageable.



Fig.13 : Antenne de transmission vers Météosat-9 installée sur le site du MCN de Dzaoudzi (Mayotte)



Fig.14 : Intégration du système MCN

4. RÉFÉRENCES

[1] B. Simon, 2007 : « La marée océanique côtière », Institut Océanographique, Collection Synthèses, Paris, 433 pp.

[2] Instruction du Premier ministre relative à l'observation du niveau de la mer et à la gestion et à la diffusion des données en résultant (n° 863/SGMER du 20 avril 2010) : http://www.circulaires.gouv.fr/pdf/2010/06/cir_31210.pdf

[3] R. Leroy « Apport des télémètres radar en hydrographie et évaluation de leurs performances ». *Annales Hydrographiques* (Vol.5, n° 774, 2009).

[4] P. Devine, « Radar Level Measurement – The users Guide, Vega Controls », 2000.

[5] Gamme de produits Niveaumétrie -KROHNE- 09/2010 - 4000305502 - BR Level R02 fr : www.krohne.com/html/dlc/CA_OVERVIEW_LEVEL_fr_100916.pdf

[6] RAP2010-012 (interne SHOM) : « Rapport des installations et étalonnages des marégraphes du réseau RONIM en 2009 ».

[7] Y. Namegaya et al., « In situ Measurements of Tide Gauge Response and Corrections of Tsunami Waveforms from the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 », *Pure appl. Geophys.* 166 (2009) 97–116.

[8] H. Dolou, Rapport d'étude n°11/86 (n° 451 EPSHOM/E/OC/NP du 20/11/86) : « Recommandations concernant le choix des périodes d'échantillonnages et durées d'intégration des courantomètres et marégraphes Suber ».

[9] R. Créach : « Mesures marégraphiques », Guide GU2008-056 (interne SHOM), Version : 2.1, Dernière modification le 20/10/2010.

[10] Intergovernmental Oceanographic Commission *Technical Series* 73, « Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas », NEAMTWS Implementation Plan Version 3.3, October 2008.

[11] IOC Training Course Report N° 91, Paris, 30 June 2008, « Summary of the IOC-GLOSS-PRSN Caribbean Training Course for Operators of Sea Level Stations ».

[12] IOC (2006). *Manual on Sea Level Measurement and Interpretation*, IV: An Update to 2006 : http://www.psmsl.org/train_and_info/training/manuals/manual_14_final_21_09_06.pdf

[13] Belén Martín Míguez, Ronan Le Roy, Guy Wöppelmann, « The Use of Radar Tide Gauges to Measure Variations in Sea Level along the French Coast » *Journal of Coastal Research* 24 4C 61–68 West Palm Beach, Florida July 2008.

[14] Kelvin Wong, Australian Bureau of Meteorology, « 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.

[15] WMO « International Codes, with information on the migration to TDCF » : <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOCodes.html>

[16] Fiche N° 475 DO/MGS/NP du 22/07/2010 (interne SHOM) : « Validation de la transmission à cadence de 6 min via Météosat dans le cadre du projet CRATANEM ».