

La mesure du niveau de la mer par bouées GPS : l'expérience multi-capteurs de l'île d'Aix

■ Gaël ANDRE - Belén MARTÍN MÍGUEZ - Valérie BALLU - Laurent TESTUT - Guy WÖPPELMANN - Pascal TIPHANEAU

La mesure du niveau de la mer dans un référentiel mondial avec une précision sub-centimétrique représente un réel défi dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de l'élévation du niveau des mers qui en résulte. Les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) permettent la mesure directe du niveau de la mer rapporté à un référentiel géocentrique. Nous présentons ici les résultats d'une expérience multi-instruments avec trois bouées équipées d'un système de positionnement par satellite (GPS), un marégraphe radar et une échelle de marée. Cette expérience s'est déroulée à l'île d'Aix (côte ouest de la France) les 27 et 28 mars 2012. Les bouées équipées de GPS ont été évaluées par rapport aux mesures du marégraphe conventionnel. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les données des bouées GPS et celles du marégraphe radar est comprise entre 1 cm et 2,2 cm, ce qui est satisfaisant pour les applications marégraphiques et offre d'intéressantes perspectives pour les futures études sur l'évolution du niveau de la mer.

MOTS-CLÉS

Bouées GNSS, Marégraphe radar, Hauteur d'eau, Ellipsoïde

En dépit des avancées technologiques récentes de l'altimétrie satellitaire, les mesures du niveau de la mer destinées aux applications marégraphiques et aux études sur les variations du niveau de la mer liées au changement climatique reposent encore beaucoup sur les mesures locales effectuées par les marégraphes. Ces mesures sont liées à l'ancrage au sol des marégraphes soumis aux mouvements terrestres (mouvements épirogéniques). L'ancrage au sol exige d'installer des infrastructures à terre permettant de surveiller la stabilité du support au cours du temps. Ceci a conduit le Système mondial d'observation du



Figure 1. Observatoire du niveau de la mer de l'île d'Aix. Cet observatoire comprend un marégraphe radar, une station météorologique et une station GPS.

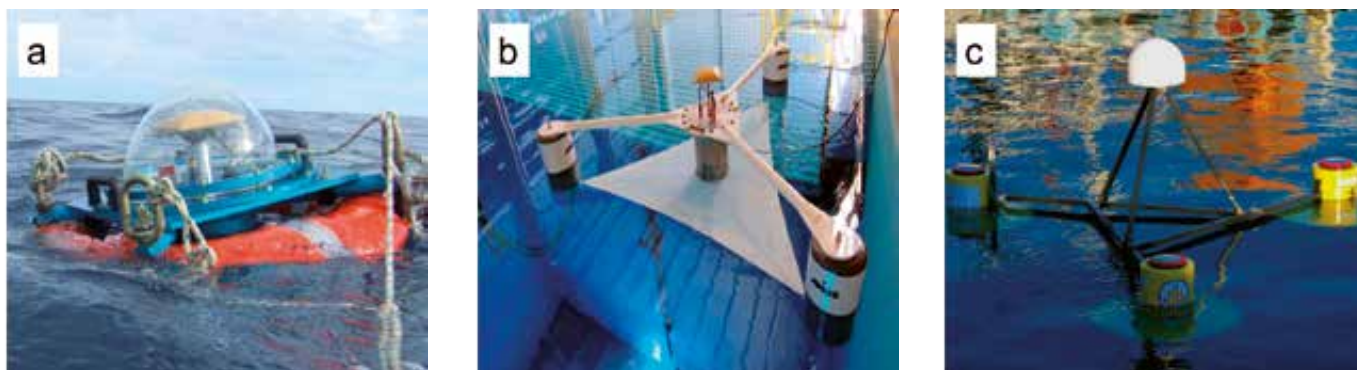


Figure 2. Photographies des trois bouées GPS : a) IPGP ; b) INSU ; c) SHOM.

niveau de la mer (GLOSS), sous l'égide de la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, à recommander l'installation de stations GNSS fonctionnant en continu au niveau des marégraphes et à mettre leurs données à libre disposition via son centre de collecte de données dédié (COI, 2012). Le contrôle de la stabilité du terrain et des dérives instrumentales exige un nivellement et un étalonnage réguliers qui peuvent s'avérer difficiles à mettre en place dans des zones éloignées. La technique GNSS présente un avantage important dans la mesure où elle fournit des données référencées selon un système de référence géocentrique mondial alors que les marégraphes fournissent des mesures du niveau de la mer par rapport à la croûte terrestre. C'est l'une des raisons pour lesquelles Löfgren et al. (2011) et Larson et al. (2013) ont étudié la possibilité d'utiliser un marégraphe GNSS fixe utilisant une méthode réflectométrique pour surveiller à long terme le niveau de la mer. Afin d'affranchir les mesures du niveau de la mer des mouvements épirogéniques, une autre solution consiste à utiliser des bouées GPS permettant d'évaluer la hauteur du niveau de la mer indépendamment de la dérive du capteur du marégraphe, de l'infrastructure à terre et de la stabilité du terrain. Certains articles ont présenté différentes applications des bouées GPS, telles que l'étalonnage des marégraphes côtiers sur des îles éloignées (Watson et al., 2008 ; Testut et al., 2010 ; Martín-Míguez et al., 2012 ; Fund et al., 2013), la mesure du niveau d'eau dans des zones au large (Bouin et al., 2009 ; Ballu et al., 2010), et dans les fleuves (Apel et al., 2012)

ou encore dans les systèmes d'alerte aux tsunamis (Schöne et al., 2011).

Ces précédents travaux ont encouragé trois équipes françaises différentes, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), l'Institut National des Sciences de l'Uni-

vers (INSU) et l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), à concevoir leurs propres bouées GPS pour différents objectifs.

En 2012, ces équipes ont mené une expérience d'inter-comparaison sur l'île d'Aix sur la côte ouest de la France

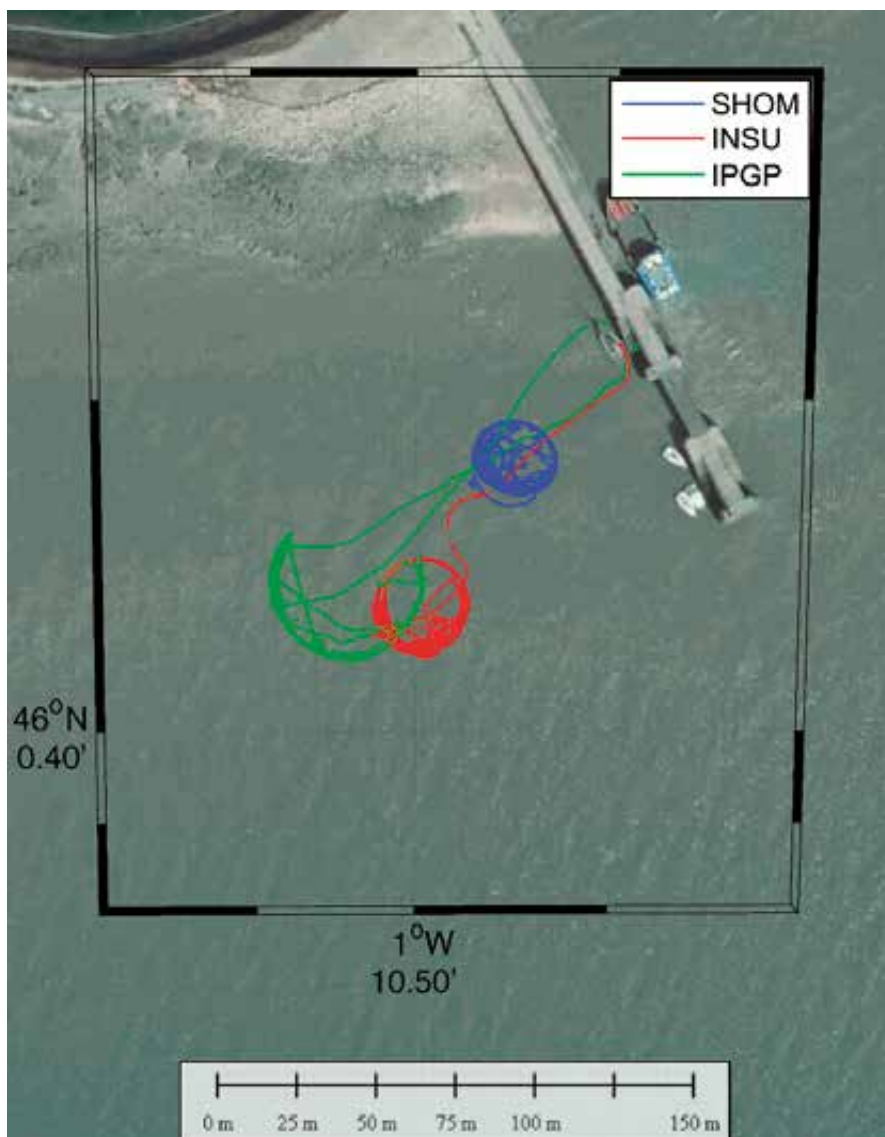


Figure 3. Trajectoires des bouées GPS.



(Figure 1) pour mener une expérience d'inter-calibration en bénéficiant des installations mises à disposition sur ce site. L'île d'Aix est un observatoire historique du niveau de la mer équipé d'un marégraphe radar, d'un marégraphe à pression, d'une station météorologique et d'une station GPS permanente. Par ailleurs, les autorités locales sont sensibles aux questions scientifiques liées à l'élévation du niveau de la mer et aux risques côtiers, tout particulièrement depuis le passage de la tempête Xynthia ayant sévèrement frappé cette partie des côtes les 27 et 28 février 2010.

Matériel et méthodes

■ L'expérience

Les 27 et 28 mars 2012, trois prototypes de bouées GPS (Figure 2) ont été déployés à proximité de l'île d'Aix. Le site de déploiement est une zone de 10 mètres de profondeur relative abritée (Figure 3), située à environ 100 m du quai où sont installés l'échelle de marée, le marégraphe à pression et le marégraphe radar appartenant au Réseau français d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM – SHOM). La zone d'expérimentation est également située à proximité de la station de référence ILDX du Réseau GNSS Permanent (RGP – IGN). Le 28 mars, des mesures de la hauteur du niveau de la mer ont été prises manuellement sur un cycle de marée par lecture directe de l'échelle de marée et avec une sonde lumineuse. Par ailleurs, des mesures de gravité absolue et relative, de courant et de nivellement, ont été réalisées.

Des données ont été collectées par les trois bouées du 27 au 28 mars pendant environ 30 heures (Tableau 1). L'enregistrement de la bouée IPGP a été interrompu le 27 mars entre 13 h 28 et 14 h 44 en raison d'une entrée d'eau dans le module de réception.

■ Traitement des données GPS

Les données GPS ont été post-traitées en mode cinématique en utilisant la station Ile d'Aix du réseau GNSS permanent de l'IGN (station ILDX, notée "Station GPS" sur la figure 1).

Bouée	Date de début	Interruption	Date de fin	Echantillonnage
SHOM	27/03/2012 10 h 34	Aucune	28/03/2012 16 h 52	5 Hz
INSU	27/03/2012 09 h 44	Aucune	28/03/2012 17 h 12	5 Hz
IPGP	27/03/2012 08 h 34	Le 27/03/2012 entre 13 h 28 et 14 h 44	28/03/2012 17 h 17	1 Hz

Tableau 1 : Périodes de mesure des bouées et fréquences d'échantillonnage.

Bouée	Poids	Diamètre	Hauteur d'antenne	Autonomie	Récepteur	Antenne
SHOM	65 kg	2,5 m	92,7 cm	10 jours	Trimble SPS852 GNSS	Leica AT504GG LEIS choke ring
INSU	20 kg	2 m	33,5 cm	5 jours	TOPCON GB1000	PG-A1 avec plan de masse
IPGP	30 kg	0,75 m	14,9 cm	3 jours	TOPCON GB1000	PG-A1 avec plan de masse

Tableau 2 : Dimensions et caractéristiques principales des bouées.

Le traitement a été réalisé en mode différentiel avec résolution entière des ambiguïtés. Ceci implique d'avoir recours à une station de référence statique dont la position est connue qui collecte les données et qui réduit en même temps les erreurs systématiques communes aux stations cinématique et fixe, telles que les corrections atmosphériques, d'orbites de satellites, d'horloge des satellites et d'horloge des récepteurs. La précision de la solution dépend de la longueur de la ligne de base puisque l'utilisation d'une méthode différentielle suppose que l'ionosphère et la troposphère sont identiques aux deux extrémités de la ligne de base. Par conséquent, la méthode de traitement cinématique ne permet pas de traiter avec précision les données des bouées GPS à une trop grande distance d'une station de référence à terre. Les progrès en matière de méthode PPP (*Precise Point Positioning*) offrent une solution alternative qui permet de réaliser des mesures à une plus grande distance des côtes sans avoir recours à une station fixe à terre (Fund et al., 2013).

Le traitement des données s'est fait en deux étapes en utilisant les orbites précises du service GNSS internatio-

nal (IGS). Dans un premier temps, les données de la station à terre ILDX ont été traitées en mode statique à l'aide du logiciel GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2010a et b) afin de calculer sa position au sein du système de référence terrestre international 2008 (ITRF08 ; Altamimi et al., 2011), utilisant l'ellipsoïde du système de référence géodésique 1980 (GRS80). Dans un second temps, les positions des bouées ont été estimées par rapport à la station ILDX à l'aide du module TRACK de cette même suite logicielle, permettant le traitement cinématique en mode différentiel. Dans notre cas, la station de référence à terre ILDX est très proche de la zone de déploiement des bouées GPS (environ 400 mètres). Cette proximité permet d'utiliser le module TRACK sur les deux fréquences L1 (1,6 GHz) et L2 (1,2 GHz) séparément. On obtient ainsi de meilleurs résultats pour les lignes de base courte qu'avec l'utilisation de la combinaison linéaire iono-free.

■ Caractéristiques des bouées

La bouée IPGP (Figure 2a) a été conçue au départ pour des projets de géodésie terrestre et marine exigeant des mesures précises de la hauteur d'eau. Une des applications est l'étude de



► mouvements verticaux sous-marins pour laquelle on estime la hauteur de sites immergés par rapport à l'ellipsoïde, et les variations de hauteur de ces sites, en combinant la mesure de hauteur de la surface de l'eau avec la mesure de la hauteur de la colonne d'eau déduite des mesures de pression par un marégraphe (Ballu et al., 2010).

Cette bouée se compose d'un cylindre hébergeant le récepteur (Topcon TOPCON GB1000), l'électronique, les capteurs auxiliaires (température, pression et accéléromètre à 6 composantes) et les batteries. Sur le dessus du cylindre sont placés l'antenne (PG-A1 avec plan de masse) et les appareils de communication (module X-Bee permettant de contrôler à tout moment à distance le bon fonctionnement du récepteur). La flottabilité est assurée par une bouée de sauvetage conventionnelle. La bouée a été conçue pour être expédiée à l'étranger, prête à l'emploi, et être déployée en mer depuis un bateau de type Zodiac par une ou deux personnes. Sa forme cylindrique et son poids relativement lourd (30 kg) sont destinés à éviter les risques de chavirage en haute mer (Tableau 2). Avec une antenne dépassant peu de la surface (<15 cm), cette bouée permet de suivre les mouvements de la surface de l'eau. Un bloc batterie rechargeable à l'énergie solaire peut être raccordé au cylindre principal pour prolonger l'autonomie initiale de 3 jours et permettre des déploiements de longue durée.

La bouée INSU (Figure 2b) a été mise au point par la Division Technique de l'INSU/CNRS (Mellet, 2009) dans le cadre du réseau de marégraphes du Sud de la France (ROSAME ; Testut et al., 2006). Cette bouée est une version améliorée de la bouée GPS conçue au départ par une équipe australienne (Watson et al., 2003) pour la calibration des mesures altimétriques. Elle a été conçue pour être utilisée dans des zones éloignées et/ou difficiles d'accès et peut être maniée par seulement 2 personnes. Elle est la plus légère des trois bouées testées (Tableau 2) avec un poids de seulement 20 kg pour un diamètre de 2 m et une autonomie de 5 jours. Elle est équipée d'un récepteur Topcon GB1000 et d'une antenne

PG-A1 avec plan de masse. Une toile est tendue entre les trois extrémités et au centre de la bouée pour améliorer sa stabilité.

La bouée SHOM (Figure 2c) a été conçue pour mesurer avec précision la hauteur ellipsoïdale de la surface de l'eau. Cet appareil stable et robuste peut être utilisé pour la calibration des marégraphes, la mesure du niveau de la mer dans des zones éloignées ou non instrumentées ou la validation des surfaces de références verticales maritimes comme VORF (Turner et al. 2010) au Royaume-Uni ou BATHYELLI, (Pineau-Guillou, 2009) en France. La bouée pèse 65 kg pour une surface de quasiment 2,5 m², la hauteur d'antenne au-dessus de la surface est d'environ 1 m et son autonomie est d'une dizaine de jours (Tableau 2).

Cette bouée est équipée d'un récepteur GNSS Trimble SPS852 et d'une antenne Leica AT504GG LEIS de type choke-ring utilisée pour réduire les multi-trajets. Sa structure massive

et ses flasques de stabilisation d'un mètre de diamètre réduisent nettement les mouvements haute-fréquence de la surface de l'eau.

Résultats

■ Trajectoires des bouées

Les trajectoires suivies par les bouées sont représentées sur la Figure 3. Les bouées GPS ont été mouillées entre 50 mètres (SHOM) et 100 mètres (IPGP et INSU) du quai sur lequel le marégraphe radar est installé. Les bouées sont fixées à un poids mort immergé autour duquel elles peuvent bouger librement jusqu'à une distance maximale imposée par la longueur de l'amarre. Les trois bouées ayant été déployées sur plus d'une journée, elles ont été soumises aux courants des marées, ce qui explique la forme quasi circulaire observée. Dans cette zone, les courants sont forts et localement très variables en raison de la présence du quai. On peut noter que la bouée IPGP n'a pas décrit un cercle complet et que la tension sur l'amarre semble plus constante (Figure 3). Ceci est probablement dû à une position différente de cette bouée par rapport aux courants locaux et indique que les caractéristiques du flux hydrodynamique peuvent fortement varier localement.

■ Test de Van de Castele

Le test de Van de Castele est une méthode couramment utilisée pour évaluer les performances d'un marégraphe (COI, 1985 ; Martin Miguez et al., 2012). Il implique la mesure simultanée de hauteurs du niveau marin à la fois par le marégraphe testé et par le capteur utilisé comme référence (échelle de marée, sonde lumineuse, etc.). Les différences entre les deux mesures sont alors calculées (ΔH_e) et reportées sur l'axe X alors que la hauteur du niveau de la mer (H_e) est représentée sur l'axe Y. Ainsi, une ligne verticale centrée sur zéro indique le bon étalonnage du marégraphe testé.

Dans un premier temps, la performance du marégraphe radar a été évaluée. Même si les capteurs radar sont une technologie bien connue

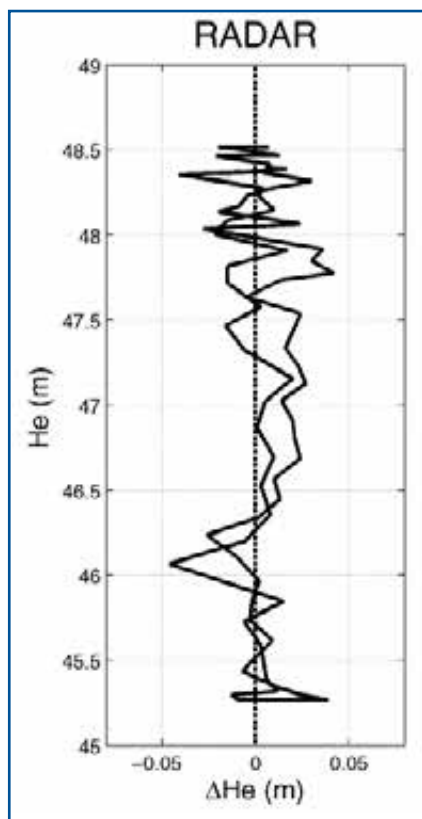


Figure 4. Résultats du test de Van de Castele pour le marégraphe radar en utilisant les mesures de l'échelle de marée comme référence.

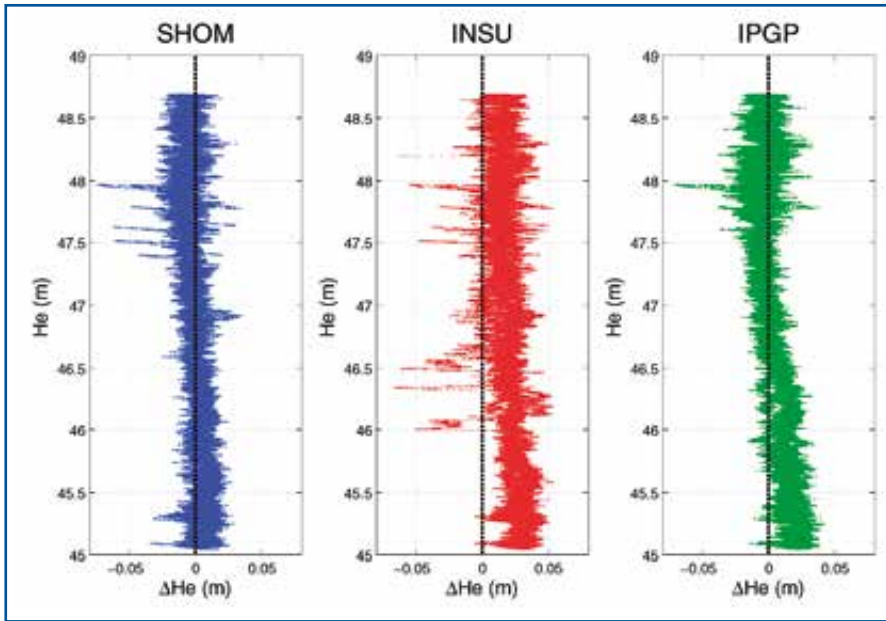


Figure 5. Résultats du test de Van de Castele pour les bouées GPS en utilisant le marégraphe radar comme référence.

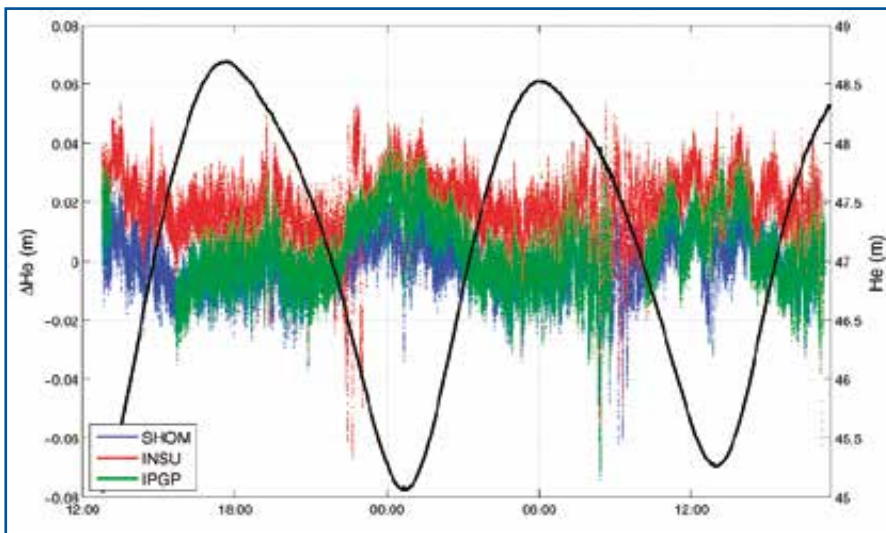


Figure 6. Hauteurs d'eau mesurées par le marégraphe radar (H_e) par rapport à l'ellipsoïde GRS80 (en noir, axe Y de droite), et différences (ΔH_e) entre les mesures des bouées GPS et celle du marégraphe radar (en couleur, axe Y de gauche).

utilisée par de nombreux réseaux marégraphiques (Martin Miguez et al., 2008), ils doivent être régulièrement étalonnés pour leur garantir de bonnes performances.

Au cours de l'expérience menée sur l'île d'Aix, les mesures du marégraphe radar ont fait l'objet d'un contrôle qualité et d'une correction pour éviter la présence de pics. Ces mesures ont ensuite été comparées aux mesures visuelles prises à l'échelle de marée le 28 mars (Figure 4). Bien que quelque peu rudimentaires, les mesures

visuelles prises par des opérateurs expérimentés par mer calme sont fiables à 1-2 centimètres près (Test et al., 2010). L'écart-type et la moyenne des différences ΔH_e s'élèvent respectivement à 1,76 cm et 0,37 cm. Ces valeurs sont comparables aux précédents résultats obtenus pendant les opérations de maintenance du réseau RONIM (Martin Miguez et al., 2008) et sont adaptées aux applications marégraphiques.

Dans un second temps, les performances des bouées GPS ont été

étudiées. Après vérification de l'étalonnage du marégraphe radar, nous avons utilisé celui-ci comme référence pour évaluer la performance des bouées. Les données GPS ont été traitées à 1 Hz puis lissées et ré-échantillonnées à 1 minute pour être homogènes avec les mesures du marégraphe radar. Les hauteurs du niveau marin enregistrées par le marégraphe référencées initialement par rapport au zéro des cartes (zéro hydrographique) ont été référencées à l'ellipsoïde en utilisant les mesures de nivellement géométrique obtenues entre le repère du marégraphe et la station GPS ILDX, en considérant une pente du géoïde nulle entre les deux sites distants d'environ 400 mètres. Enfin, les diagrammes de Van de Castele ont été établis à partir des différences entre les données du marégraphe référencées à l'ellipsoïde et les mesures des bouées GPS (ΔH_e). Ces diagrammes sont représentés sur la Figure 5. Les différences ΔH_e sont de l'ordre de quelques centimètres pour les trois appareils. Les diagrammes de Van de Castele montrent une ligne droite verticale si l'instrument n'est pas faussé par une erreur systématique, telle qu'un facteur d'échelle, par rapport à l'instrument de référence.

Dans notre cas (Figure 5), les diagrammes ne sont pas parfaitement droits et verticaux. Toutefois, nous ne pouvons suspecter de facteur d'échelle sur les données GPS et nous avons vérifié que le marégraphe radar était bien étalonné (par rapport à l'échelle de marée, Figure 4). La forme des diagrammes de Van de Castele observée pour les trois bouées pourrait résulter de la topographie dynamique existant entre le marégraphe radar et les sites d'implantation des bouées. La différence de comportement entre les trois bouées sera étudiée plus en détail dans la section suivante.

■ Résultats de la comparaison

La Figure 6 montre les hauteurs du niveau marin mesurées par le marégraphe radar (H_e) par rapport à l'ellipsoïde GRS80 et les séries temporelles des différences (ΔH_e) entre les hauteurs du niveau marin des trois

Bouée	Moyenne	Ecart-type	RMSE
SHOM	0,13 cm	0,94 cm	0,95 cm
INSU	1,84 cm	1,14 cm	2,16 cm
IPGP	0,33 cm	2,15 cm	2,18 cm

Tableau 3. Valeurs statistiques des différences entre les données des bouées GPS et celles du marégraphe radar.



bouées GPS et celles du marégraphe radar. Ces résultats montrent une bonne concordance entre les données des bouées GPS et celles du marégraphe. Les valeurs statistiques ont été calculées à partir des différences pour les trois bouées. La différence moyenne est comprise entre 0,13 cm et 1,84 cm, l'écart-type entre 0,94 et 2,15 cm et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre 0,95 et 2,18 cm (voir *Tableau 3*).

Les différences entre les statistiques des trois bouées reflètent différents phénomènes :

- la valeur moyenne des différences correspond à la précision du référencement "absolu" intégrant les biais de traitement GPS, les erreurs de nivellement résultant à la fois de la détermination de la hauteur de l'antenne par rapport à la surface de l'eau et du référencement du marégraphe par rapport à l'ellipsoïde (nivellement entre le marégraphe et la station de référence ILDX), et également la différence locale de hauteur d'eau entre le marégraphe de référence et la bouée GPS résultant de la topographie dynamique locale ;
- l'écart-type reflète le niveau de bruit de chaque série temporelle intégrant, d'une part, le mouvement réel de la bouée et, d'autre part, le bruit aléatoire de traitement, du radar et des instruments GPS. Comme le prévoit sa conception, la bouée SHOM est la plus stable. Elle filtre mécaniquement le mouvement induit par les ondes courtes de surface. En revanche, la bouée IPGP est plus sensible aux ondes haute fréquence ;
- la RMSE est l'association des deux facteurs décrit ci-dessus. Elle reflète dans un seul paramètre le bruit de la série (y compris le mouvement réel de la bouée) et la différence au niveau du référencement absolu.

Discussion

Cette expérience est un cas pratique permettant d'évaluer les performances de plusieurs bouées GPS de conception différente pour la mesure précise du niveau de la mer. La comparaison entre les mesures fournies par les bouées et le marégraphe radar montre clairement la capacité des bouées à fournir une mesure de hauteur d'eau avec une précision centimétrique. Néanmoins, cette étude révèle quelques différences :

- les données de la bouée INSU montre une différence moyenne d'environ 2 cm par rapport au marégraphe radar. Cette différence peut être due à un réel écart sur la hauteur d'eau lié à la topographie dynamique, ce qui ne peut être écartée au vu des forts courants rencontrés dans cette zone. Elle peut également être causée par une tension excessive de la toile de stabilisation, qui pourrait avoir légèrement tordu la bouée vers le haut et modifié ainsi la hauteur de l'antenne ;
- les différences entre les mesures radar et celles des bouées semblent être liées au cycle de marée pour les trois bouées, qui se traduit par une pente sur les diagrammes de Van de Casteele (*Figure 5*). Ce comportement est accentué sur les données de la bouée IPGP et est clairement visible sur la *Figure 6*. La bouée IPGP fournit des hauteurs similaires au marégraphe radar et à la bouée SHOM à marée haute et à mi-marée, mais elle mesure une hauteur du niveau marin supérieur de 2 cm à celui du marégraphe radar et de la bouée SHOM pendant les deux périodes de basse mer. Cet écart entre les trois bouées en termes de variations résiduelles peut refléter les variations spatiales de la topographie dynamique et pourrait s'expliquer

par la distance par rapport au quai ;
 - il n'est pas surprenant de constater que la conception des bouées influence leur comportement en mer. La bouée la plus large et la plus lourde conçue par le SHOM atténue les mouvements haute-fréquence et n'est pas perturbée par les vagues tandis que la bouée IPGP "danse" sur la surface, suivant ainsi de près les mouvements de la surface de l'eau. En raison de sa conception intermédiaire (plus légère mais plus large que la bouée IPGP), la bouée INSU présente un comportement intermédiaire. Ces différents comportements peuvent être adaptés à différents objectifs scientifiques en fonction de la gamme de fréquence des variations du niveau de la mer que l'on souhaite étudier.

Conclusions

Une expérience multi-appareils a été menée sur l'île d'Aix (côte ouest de la France) les 27 et 28 mars 2012. A cet effet, trois bouées équipées de GPS ont été déployées afin d'évaluer leur performance en termes de mesure du niveau de la mer. Ces trois bouées GPS sont des prototypes différents conçus par trois organismes indépendants (SHOM, INSU et IPGP) possédant chacun un champ d'étude, d'application et un intérêt scientifique différents. Par conséquent, la conception et les caractéristiques techniques de ces bouées GPS sont différentes (voir *Tableau 2*). Les bouées INSU et IPGP sont légères et facilement déployables (depuis un hélicoptère ou un bateau pneumatique rigide). La bouée SHOM est plus lourde mais sa structure massive lui procure plus de stabilité et de robustesse. Nous avons démontré que la conception de la bouée avait un impact non négligeable sur sa précision et sa justesse. L'écart important affiché par la bouée INSU (18,4 mm), encore à l'étude, devrait nous alerter sur les précautions à prendre lors de l'étalonnage et du déploiement des antennes GPS.

La comparaison entre les mesures fournies par les bouées et le marégraphe radar a clairement démontré la



performance satisfaisante des bouées. Ces résultats indiquent que les bouées GPS sont capables de mesurer la hauteur du niveau marin au centimètre près, un degré de précision comparable à celui du marégraphe radar de référence. Ceci prouve le potentiel global dont disposent ces bouées pour mesurer avec précision les hauteurs du niveau marin directement référencées à l'ellipsoïde GRS80.

Les mesures du marégraphe conventionnel sont par nature liées à la terre. Par conséquent, elles sont limitées aux zones côtières et leur pertinence dans les études globales dépend de la qualité du suivi des mouvements épirogéniques. Les mesures des bouées GPS représentent un outil prometteur pour étalonner les marégraphes ou les mouillages côtiers, et permet de les référencer directement à un système de référence géocentrique (absolu) puisqu'elles ne dépendent pas des mouvements terrestres. Néanmoins, cet outil présente encore certaines contraintes pratiques, à la fois au niveau technique (autonomie de la batterie et robustesse de la conception pour une résistance en haute mer) et du traitement des données. Pour répondre aux défis futurs du suivi du niveau de la mer à l'échelle de l'océan, nous travaillons actuellement sur des mesures de bouées GPS autonomes à long terme comme dans le cadre de l'observatoire sur le niveau de la mer MoMAR (Ballu et al., 2012).

De nouvelles perspectives de traitement des données pour les zones off-shore sont offertes par le développement des techniques PPP. Plusieurs études ont déjà utilisé cette méthode de traitement afin de déterminer les positions des bouées (Kuo et al., 2012 ; Fund et al., 2013). Les résultats ne sont pas encore aussi concluants que ceux obtenus avec le traitement différentiel lorsqu'une station de référence est disponible à courte distance puisque de nombreuses erreurs (troposphère, orbites) ne s'annulent pas. Cependant, grâce aux améliorations continues des méthodes de traitement PPP, l'utilisation des bouées GPS ne devrait plus être très longtemps limitée aux zones côtières. ●

Remerciements

Nous souhaiterions remercier le personnel de la DT/INSU (M. Calzas, A. Guillot), du SHOM (Y-M. Tanguy, R. Legouge, Y. Dupont, G. Jan, S. Enet et J-P. Boivin), de l'IPGP (O. Pot, B. Lecomte et T. Gabsi), et du LIENSs (M. Gravelle et T. Guyot) pour leur contribution au développement des bouées et leur participation à l'expérience de l'île d'Aix. Les auteurs remercient Xavier Bertin (LIENSs) pour sa contribution sur la topographie dynamique autour de l'île d'Aix et Sylvain Loyer (CLS) sur le traitement des données GPS. Nous souhaitons exprimer notre gratitude aux autorités locales de l'île d'Aix pour l'intérêt qu'elles ont porté et leur soutien logistique. Les données sur le niveau de la mer de l'île d'Aix sont la propriété du LIENSs et du SHOM et sont disponibles sur le site web REFMAR (<http://refmar.shom.fr>). Cette expérience a été menée dans le cadre du projet SONEL (www.sonel.org). Les auteurs remercient l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI), propriétaire des droits d'auteur, d'avoir fourni son accord pour la publication de la traduction de l'article original en anglais "Measuring sea-level with GPS-equipped buoys : a multi-instruments experiment at Aix Island" publié dans la revue *International Hydrographic Review* (IHR), édition de Novembre 2013. (original version in english published by the international hydrographic organization - translation into french published by shom - france. This publication is a translation of IHO International Hydrographic Review (IHR). The IHO has not checked this translation and therefore takes no responsibility for its accuracy. In case of doubt the source version of the publication in English should be consulted.)

Contacts

Gaël ANDRE

Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM),
gael.andre@shom.fr

Belén MARTÍN MÍGUEZ

Centro Tecnológico del Mar (CETMAR),
bmartin@cetmar.org

Valérie BALLU

Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP)
LIENSs (Université de la Rochelle-CNRS)
valerie.ballu@univ-lr.fr

Laurent TESTUT

LEGOS (CNES-IRD-CNRS-Université Paul Sabatier),
laurent.testut@legos.obs-mip.fr

Guy WÖPPELMANN

LIENSs (Université de la Rochelle-CNRS),
guy.woppelman@univ-lr.fr

Pascal TIPHANEAU

LIENSs (Université de la Rochelle-CNRS)
pascal.tiphaneau@univ-lr.fr

Références bibliographiques

- Altamimi, Z., Collilieux, X. and Métivier, L. (2011). "ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame", *Journal of Geodesy*, 85, 8, pp. 457-473.
- Apel, H., Hung, N.G., Thoss, H. and Schone, T. (2012). "GPS buoys for stage monitoring of large rivers", *Journal of Hydrology*, 412, pp.182-192.
- Ballu, V., Bouin, M.N., Calmant, S., Folcher, E., Bore, J.M., Ammann, J., Pot, O., Diament, M. and Pelletier, B. (2010). "Absolute seafloor vertical positioning using combined pressure gauge and kinematic GPS data", *Journal of Geodesy*, 84, 1, pp. 65-77.
- Ballu, V., de Viron, O., Crawford, W.C., Cannat, M. and Escartin, J. (2012). "Long-term observations of seafloor pressure variations at Lucky Strike volcano, Mid-Atlantic Ridge", AGU Fall Meeting, San Francisco, 3-7 Dec. 2012.
- Bouin, M.N., Ballu, V., Calmant, S., Pelletier, B., Ammann, J., Bore, J.M. and Folcher, E. (2009). "Methodology of kinematic GPS experiment for local sea surface mapping, Vanuatu", *Journal of Geodesy*, 83, 21, pp. 1203-1217
- Fund, F., Perosanz, F., Testut, L. and Loyer, S. (2013). "An Integer Precise Point Positioning technique for sea surface observations using a GPS buoy", *Advances in Space Research*, 51, 8, pp. 1311-1322.
- Herring, T.A., King, R.W. and McClusky, S.C. (2010a). *GAMIT: Reference Manual*. GPS Analysis at MIT, Release 10.4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Herring, T. A., King, R.W. and McClusky, S.C. (2010b). *GLOBK Global Kalman Filter*





VLBI and GPS analysis program, Release 10.4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

IOC (1985). *Manual on sea-level measurement and interpretation, Volume I – Basic procedures*, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals & Guides No 14.

IOC (2012). *The Global Sea Level Observing System Implementation Plan 2012*, Intergovernmental Oceanographic Commission, Technical Series No. 100.

Kuo, C.Y., Chiu, K.W., Chiang, K.W., Cheng, K.C., Lin, L.C., Tseng, H.Z., Chu, F.Y., Lan, W.H. and Lin, H.T. (2012). "High-frequency sea level variations observed by GPS buoys using precise point positioning technique", *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, pp. 209-218.

Larson, K., Löfgren, J. and Haas, R. (2013). "Coastal Sea Level Measurements Using a Single Geodetic GPS Receiver", *Advances in Space Research*, 51, 8, pp. 1301-1310.

Löfgren J., Haas R. and Johansson J. (2011). "Monitoring coastal sea level using reflected GNSS signals", *Advances in Space Research*, 47, pp. 213-220.

Martin Miguez, B., Le Roy, R. and Wöppelmann, G. (2008). "The use of radar tide gauges to measure the sea level along the French coast", *Journal of Coastal Research*, 24, 4C, pp. 61-68.

Martin-Miguez, B., Testut, L. and Wöppelmann, G. (2012). "Performance of modern tide gauges: towards mm-level accuracy", *Scientia Marina*, 76, pp. 221-228.

Mellet, M. (2009). *Conception d'une bouée GPS et étude de faisabilité d'un système GPS tracté pour mesurer le niveau de la mer*, Rapport de projet de fin d'études ENSIETA.

Pineau-Guillou, L. (2009). "Projet BATHYELLI : Détermination du zéro hydrographique à partir de l'altimétrie spatiale et du GPS", *Navigation*, 57, pp. 226.

Schöne, T., Pandoe, W., Mudita, I., Roemer, S., Illigner, J., Zech, C. and Galas, R. (2011). "GPS water level measurements for Indonesia's Tsunami Early Warning System", *Natural Hazards Earth System Science*, 11, pp. 741-749.

Testut, L., Wöppelmann, G., Simon, B. and Téchiné, P. (2006). "The Sea Level at Port-aux-Français, Kerguelen Island, from 1950 to the present", *Ocean Dynamics*, 56, 5-6, pp. 464-472.

Testut, L., Martin-Miguez, 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.

Turner, J.F., Iliffe, J.C., Ziebart, M.K., Wilson, C. and Horsburgh, K.J. (2010). "Interpolation of Tidal Levels in the Coastal Zone for the Creation of a Hydrographic Datum", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 3, pp. 605-613.

Watson, C., Coleman, R. and Handsworth, R. (2008). "Coastal tide gauge calibration: a case study at Macquarie Island using GPS buoy techniques", *Journal of Coastal Research*, 24, 4, pp. 1071-1079.

Watson, C., White, N., Church, J., Burgette, R., Tregoning, P. and Coleman, R. (2003). "Absolute Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 Using GPS Buoys in Bass Strait, Australia Special Issue: Jason-1 Calibration/Validation", *Marine Geodesy*, 26, 3-4, pp. 285-304.

ABSTRACT

Measuring sea-level in a global reference frame with sub-centimeter accuracy is a relevant challenge in the context of current global warming and associated sea-level rise. Global Navigation Satellite Systems (GNSS) can provide sea-level measurements directly referenced in an absolute geocentric frame. We present here the results of a multi-instruments experiment with three buoys equipped with Global Positioning System (GPS), a radar tide gauge and a tide pole. This experiment was carried out at Aix Island (West coast of France) on the 27-28 March 2012. The GPS-equipped buoys were evaluated against conventional tide gauge measurements through a Van de Casteele test. The Root Mean Square Error (RMSE) computed from the difference between the GPS-buoys and radar tide gauge data ranges from 1 cm to 2.2 cm, which is suitable for tidal applications and offers interesting perspectives for future sea-level variations studies.

Olivier Reis

Ingénieur géomètre-topographe

ENSAI Strasbourg - Diplômé de l'Institut

de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg

9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES

Téléphone / télécopie : 03 87 98 57 04

Courriel : o.reis@infonie.fr

Pour toutes vos traductions d'allemand
et d'anglais en français
en topographie – géodésie – géomatique
– GNSS

Reinhard Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe

Interprète diplômé de la Chambre

de commerce et d'industrie de Berlin

Heinrich-Heine-Straße 17, D-10179 BERLIN

Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60

Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61

Courriel : stoelzel@aol.com

Pour toutes vos traductions de français
et d'anglais en allemand
géomatique – GNSS – infrastructures
de transport

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service