

Aurélien Pira

Master 1 - Géosciences et géophysique du littoral

Réalisation d'une bouées GNSS pour la mesure en temps réel du niveau de la mer



Rapport de stage



Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué au bon déroulement de mon stage ainsi qu'à la rédaction de ce rapport.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de stage, M. Coulombier Thibault. Je le remercie d'avoir répondu favorablement à ma demande de stage, pour son encadrement, son implication et son aide à la rédaction de ce rapport. Au cours des huit dernières semaines, il m'a permis d'acquérir des connaissances certaines dans le domaine de l'instrumentation en milieu marin et m'a permis de vivre un stage particulièrement enrichissant et agréable, malgré le contexte actuel compliqué.

Je tiens également à remercier chaleureusement M. Ancelin Julien, qui m'a entouré tout au long de ce stage. Je le remercie particulièrement pour m'avoir transmis une partie de son savoir dans le domaine du positionnement par satellite ainsi que sa passion pour son travail. Je le remercie pour sa patience, son aide et sa bonne humeur.

Je remercie M. Dausse Denis pour m'avoir encadré sur la partie électronique de ce projet. Je le remercie pour son implication lors des essais en mer et sa gentillesse au cours des huit dernières semaines.

Je souhaite remercier M. Lachaussée Nicolas pour sa participation au projet, notamment lors des sorties en mer.

Je remercie M. Gravelle Médéric pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté lors du traitement des données.

Je remercie M. de Viron Olivier pour son aide en traitement du signal et en statistique.

Enfin, je remercie M. Woppelmann Guy, mon tuteur lors de ce stage, pour son aide dans mes démarches et pour son aide dans l'évaluation des résultats.

Résumé

La surveillance du niveau de la mer et des marais est un enjeu majeur dans la compréhension des dynamiques côtières et hydrologiques. Plusieurs études ont montré l'efficacité des bouées GNSS appliquées à la mesure du niveau de la mer. Toutefois, leur usage est généralement limité par le coût élevé d'un tel dispositif.

Trois prototypes de bouées GNSS-RTK ont été développés afin de répondre à des problématiques liées à la surveillance en temps réel des variations du niveau de la mer et des marais littoraux. La réalisation des bouées est caractérisée par un besoin de réduction importante des coûts et s'élève à environ 600€.

Les bouées ont été construites autour d'une structure centrale imprimée en 3D et sont équipées de trois flotteurs montés sur des bras en acier inoxydable. La réception des signaux GNSS est assurée par un récepteur bi-fréquences Drotek-F9P, utilisable avec les constellations GPS, GLONASS, Galileo et Beidou. Les corrections RTK sont obtenues par le réseau de base, Centipède, et traitées en temps réel par un Raspberry-Pi. La liaison est assurée par un module 4G et deux antennes externes.

Des essais réalisés sur l'île d'Aix (France) ont permis d'évaluer la précision des bouées en comparant les données obtenues avec celles d'un marégraphe radar. La comparaison est réalisée avec les données corrigées en temps réel et celles corrigées en post-traitement. Les résultats obtenus montrent une erreur quadratique moyenne (RMSE) comprise entre 1,93 et 3,03 cm validant ainsi l'utilisation des bouées GNSS-RTK développée de manière économique pour un usage marégraphe.

Introduction

Comprendre l'évolution des zones littorales dans un contexte de réchauffement climatique est l'un des enjeux actuels des sciences marines. L'observation en temps réel de la propagation des ondes océaniques et des variations du niveau de la mer et des marais littoraux, sont autant d'applications possibles nécessitant des mesures verticales les plus précises possible.

Bien que l'utilisation des marégraphes traditionnels reste encore une des techniques couramment utilisées pour la mesure in-situ, plusieurs expériences ont montré l'efficacité des bouées équipées de récepteur GNSS pour la mesure du niveau de la mer.

Le système de positionnement par satellites (GNSS) désigne l'ensemble des constellations de satellites disponibles à des fins de positionnement géospatial. Les satellites des constellations GPS, GLONASS, Galileo et Beidou, émettent en permanence une série d'informations sur deux fréquences L1 et L2, résultantes de la modulation de la fréquence fondamentale des horloges atomiques situées à bord. Ces fréquences, appelées porteuses, sont utilisées par les récepteurs GNSS, afin de déterminer leur position (Kaplan et Hegarty, 2017). Aujourd'hui, l'évolution importante de la précision des récepteurs GNSS a permis une avancée considérable des techniques de mesures verticales par satellite.

Une expérience menée sur l'île d'Aix (France) en 2012, a comparé trois prototypes de bouées équipées de récepteur GNSS réalisés par l'IPGP, l'INSU et le SHOM, à un marégraphe radar sur une durée de 30h (Andre et al., 2013). L'une d'entre elles, équipée d'un récepteur Topcon GB1000 et d'une antenne Topcon PG-A1. Les deux autres, équipées de récepteurs Trimble SPS852 et d'antenne Leica AT504GG. Les enregistrements ont montré une erreur quadratique moyenne (RMSE) comprise entre 1 cm et 2,2 cm entre les données obtenues à l'aide du marégraphe radar et celles obtenues à l'aide des trois bouées, validant ainsi la méthode de mesure du niveau de la mer par satellite pour des applications marégraphe et pour l'étude du niveau de la mer de manière générale.

Watson et al. (2008) ont montré qu'il était possible d'utiliser les bouées GNSS pour la calibration des marégraphes côtiers dans les zones particulièrement reculées ou difficiles d'accès. L'île Macquarie, située dans les eaux subantarctiques australiennes, et l'un des rares endroits dans l'océan Austral à disposer d'un marégraphe traditionnel. Les conditions climatiques et les vagues qui frappent la région, associées à un littoral accidenté, rendent l'utilisation et la calibration de ce type d'instruments extrêmement difficile par des techniques traditionnelles.

Bien qu'elle soit une solution efficace, l'utilisation de bouées GNSS reste relativement onéreuse puisque les prototypes réalisés utilisent des récepteurs dont le coût est compris entre 2 000 € et

10 000 € associés à des antennes dont le coût avoisine les 3 000 € (Knight et al., 2020). Leur utilisation est donc limitée à de petites échelles.

PJ. Knight et al. (2020) ont démontré l'efficacité des bouées GNSS réalisées de manière économique en utilisant un récepteur GNSS mono fréquence U-blox M8T. L'ensemble était contenu dans un coffret étanche IP67 et assemblé sur un châssis réalisé à l'aide de tubes d'échafaudage équipé de quatre flotteurs. Le coût total de la réalisation s'élevant à environ 350 €. Des enregistrements ont été effectués en septembre 2018 au Pays de Galles sur une période d'environ 48h. Le récepteur était configuré pour recevoir les signaux provenant des constellations GPS et GLONASS avec un taux d'échantillonnage de 5Hz. Les résultats obtenus en post traitement (PPK) ont montré une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 1,4 cm par rapport à un marégraphe local (UK National Tidal Gauge Network).

L'efficacité des bouées GNSS pour une utilisation marégraphique est donc avérée. De plus, l'évolution récente des techniques de cinématique en temps réel (RTK) permet l'obtention immédiate des données de positionnement avec une précision centimétrique (Lahaye et Ladet, 2014). La méthode est basée sur l'utilisation d'une base fixe, ouvrant ainsi l'usage de la mesure verticale par satellite à des fins de surveillance. Par exemple, Kato et al. (2001) ont utilisé une bouée GNSS avec un récepteur monofréquence à cinématique en temps réel (RTK) pour la surveillance des tsunamis. Toutefois, l'obtention des données de correction nécessite un abonnement à un réseau de base, généralement privé, dont le coût annuel s'élève à environ 2 000€ par dispositif (Teria.fr, Orphéon.fr) augmentant

considérablement les coûts d'utilisation. De surcroît, la surveillance en temps réel du niveau de la mer par satellite est généralement délaissée au profit de marégraphes traditionnels. Le développement récent du réseau collaboratif, Centipède (Ancelin, 2021) permet l'obtention de données de correction de manière totalement libre et gratuite.

Le laboratoire LIENSs (LIttoral ENvironnement et Sociétés) est spécialisé dans l'étude des zones littorales et mène des études pluridisciplinaires. Le Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) vise à fournir des données de grande qualité pour l'étude du niveau de la mer à partir de marégraphes et de techniques modernes de géodésie.

Cette étude propose d'aborder la réalisation et l'évaluation des performances de trois prototypes de bouées GNSS, réalisés au sein du LIENSs, et destinés à la surveillance en temps réel du niveau de la mer. L'un des trois prototypes est développé pour l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), partenaire du projet, et destiné à la surveillance des marais littoraux. Le développement des bouées est articulé autour d'un cahier des charges établi et d'une réduction maximale des coûts de fabrication. Les performances des bouées ont été évaluées grâce à une série de mesures réalisée le 26 mai 2021 sur l'île d'Aix (France) à proximité d'un observatoire historique du niveau de la mer équipé d'un marégraphe radar, et d'une station GPS permanente. La comparaison est effectuée selon deux méthodes de mesure. Une méthode utilisant la cinématique temps réel (RTK) et les corrections du réseau de bases fixes, Centipède, et une méthode nécessitant le post-traitement des données (PPK).

Matériels et méthodes

Châssis

Le châssis de la bouée est basé sur une platine centrale réalisée en impression 3D (fig.1) à partir d'un filament Prusament en polyéthylène téréphtalate (PETG). Le PETG dispose d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques. Il possède une grande résistance aux chocs tout en conservant une bonne flexibilité. L'impression 3D permet une réalisation rapide tout en limitant les coûts de production. La structure interne est imprimée en nid d'abeilles afin d'apporter à l'ensemble d'avantage de légèreté et de rigidité. Le gcode du modèle 3D est disponible sous licence Creative Commons (Ancelin, 2021).

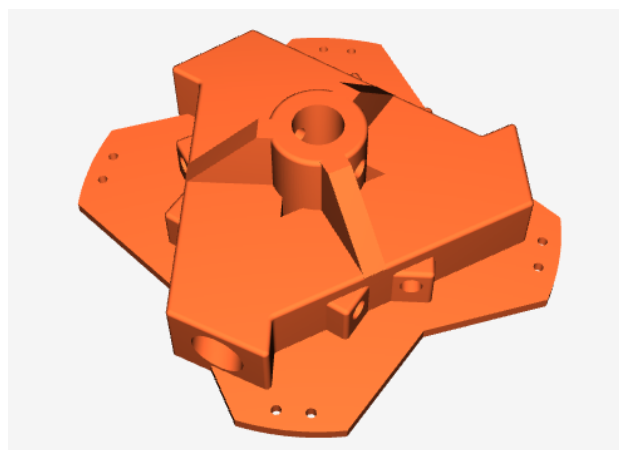


Fig.1 : Platine centrale utilisée pour l'assemblage des bouées

Les bras et la quille ont été réalisés en acier inoxydable A4 (316) de 20 mm de diamètre et 75 cm de longueur. Cette configuration apporte à la bouée une excellente stabilité tout en permettant un transport avec les bras montés. La quille du modèle destiné à un usage en marais (INRAE) a été réduite à 25 cm afin de diminuer le tirant d'eau. Les bras sont emmanchés sur le support centrale de façon triangulaire afin de renforcer la structure centrale. Ils sont maintenus à l'aide de 3 boulons en acier inoxydable A4 M8 x 100 mm et disposés de manière à liés mécaniquement les bras entre eux. La quille est fixée à l'aide d'un boulon en acier inoxydable M8 x 55 mm. Deux rondelles en nylon ont été ajoutées afin de minimiser les contraintes de serrage sur la partie cylindrique inférieure en PETG. La flottabilité est assurée par 3 flotteurs PB810 en PVC de 155 x 188 mm disposants chacun, d'une flottabilité de 3,0 kg. Le diamètre interne des flotteurs, initialement de 35mm, a été adapté au diamètre des tubes par l'ajout de bagues de réduction en nylon, réalisées à l'aide d'un tour à métaux.

La partie instrumentale a été installée dans un boîtier en polycarbonate IP66, de 160 x 160 x 90,5 mm fixé sur la platine centrale au moyen de 4 boulons M4 x 15 mm et de quatre rondelles anti-desserrement en acier inoxydable A4. Le boîtier a été testé en immersion complète sur une durée de 5h et a montré une parfaite étanchéité.

Raspberry Pi Zéro

L'ensemble du matériel et des logiciels nécessaires au fonctionnement de la bouée sont centralisés sur un Raspberry Pi Zéro.

Cette version du Raspberry Pi a été choisie pour sa taille réduite et sa consommation électrique quatre fois inférieure à celle de la version standard. Il est équipé d'un microprocesseur ARM cadencé à 1 GHz ainsi que de 512 Mo de RAM (Raspberrypi, 2021). Cette configuration lui confère des performances amplement suffisantes pour l'exécution de toutes les tâches de fond nécessaires à l'envoi et la réception des données de correction. Les bouées pouvant subir une exposition importante aux rayonnements solaires, le microprocesseur a été équipé d'un dissipateur thermique en aluminium pour optimiser son refroidissement.

En termes de connexion, le Raspberry Pi dispose d'une interface Wi-Fi permettant l'accès aux fichiers contenus sur la carte SD au moyen d'une connexion SSH ainsi qu'un connecteur série 40 broches (UART) utilisé pour la connexion avec le module Drotek F9P.

Récepteur GNSS

Le choix du récepteur GNSS a été porté sur un module RTK Drotek DP0601. Il est équipé d'un module de communication multifréquences Ublox ZED-F9P permettant une réception simultanée des constellations GPS, GLONASS, Galileo et Beidou avec une fréquence d'échantillonnage de 5Hz (Tab.1).

GNSS	Parameter	GPS+GLO+GAL+BDS	GPS+GLO	GPS+BDS	GPS
Update rate		5 Hz	8 Hz	8 Hz	10 Hz
Heading accuracy		0.4 deg	0.4 deg	0.4 deg	0.4 deg

Tab.1 : Performances de la base mobile DP0601 dans différents modes GNSS (Drotek, 2021)

Antenne de réception

Le DP0601 est associé à une antenne Drotek DA910. Il s'agit d'une antenne active multi bande L1 / L2 à gain élevé (40 dB). L'antenne est fixée sur un mat en aluminium de 75 mm de longueur afin de diminuer le masque présent en cas de vagues importantes. Le mat est fixé au centre du capot à l'aide d'un écrou M10 et d'une rondelle large en acier inoxydable. L'assemblage a été réalisé à l'aide de mastic pour garantir l'étanchéité du capot.

Le capot est traversé par un connecteur TNC passe cloison Telegartner femelle-femelle certifié IP67. Cette configuration a été choisie pour permettre le transport des bouées avec l'antenne de réception GNSS démontée.

Antenne 4G

La réception des corrections et l'envoi des données corrigées sont assurées par une clé 4G Huawei E3372h-320 et deux antennes LTE Bingfu omnidirectionnelles à gain de 5 dBi.

La clé Huawei E3372h-320 possède des dimensions relativement faibles (28 x 88 mm), mais intègre toutefois deux connecteurs CRC9 permettant d'y connecter deux antennes externes au moyen d'un adaptateur SMA-CRC9. La liaison avec le Raspberry Pi est effectuée au moyen d'un adaptateur USB femelle/micro USB.

Les antennes Bingfu sont fixées aux extrémités du capot de manière à obtenir la distance maximale entre les deux antennes. Elles sont équipées d'un passe cloison situé à la base de l'antenne permettant le passage des câbles coaxiaux et leur fixation à travers le capot ainsi que d'un joint torique monté à la graisse silicone pour garantir l'étanchéité.

Alimentation

La mise sous tension de la bouée est effectuée au moyen d'un interrupteur à lames souples (ILS) Reed Switches fixé à l'intérieur du boîtier à l'aide de deux embases adhésives et d'un aimant de diamètre 10 x 5 mm situé à l'extérieur du boîtier. L'ILS est constitué d'une ampoule de verre scellée hermétiquement et possède une capacité maximale de contact de 1A. La coupure est alors effectuée sur le fil de phase entre la batterie et le Raspberry. L'activation de la bouée s'effectue en retirant l'aimant. L'utilisation d'un ILS permet la mise sous tension des bouées sans perçage du boîtier et réduit le risque de mise hors tension dans le cas où celle-ci serait vandalisée.

L'alimentation des bouées s'effectue au moyen de batteries externes d'une capacité de 20 000 mAh. Le dimensionnement des batteries a été effectué de manière à posséder une autonomie suffisante pour des relevés journaliers tout en limitant la taille des bouées.

Le prototype destiné à l'INRAE possède une configuration légèrement différente et intègre un convertisseur d'appoint Adafruit PowerBoost 1000 C équipé d'un circuit de recharge pour batteries au lithium et d'un commutateur automatique. Cette configuration est adaptée pour un usage en marais et permet une utilisation sur secteur tout en garantissant une continuité des enregistrements en cas de coupure de courant. L'Adafruit PowerBoost 1000 C est alors associé à une batterie lithium-ion haute capacité de 13 400 mAh garantissant à la bouée une autonomie théorique d'environ 29 heures.

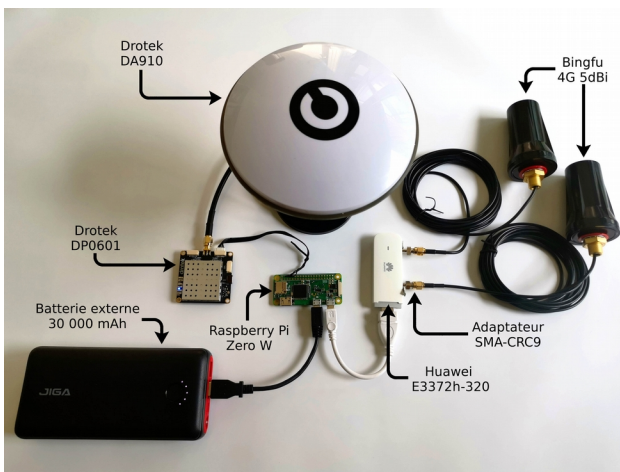


Fig. 2 : Schéma d'implantation des composants

Technique RTK

Développée dans le but d'accroître la précision des valeurs de positionnement géographique, la cinématique temps réelle (RTK) est une technique de

correction différentielle basée sur la différence de phase des signaux émis par les satellites.

La technique RTK utilise la différence de phase pour la correction, c'est à dire la différence entre l'instant où un signal est émis depuis le satellite et l'instant auquel il est enregistré par le récepteur (Lahaye et Ladet, 2014). Cette technique permet un positionnement théorique environ 150 fois plus précis qu'une utilisation du code seul. Par ailleurs, elle permet une utilisation à des fins de surveillance puisque les valeurs peuvent être corrigées en temps réel sans nécessiter de post traitement.

Dans la pratique, la technique RTK s'appuie sur la transmission en temps réel de données de corrections d'une base fixe, de position connue, à un dispositif mobile (rover) dont on cherche à déterminer précisément la position. La station fixe permet une résolution des ambiguïtés liées à la dégradation du signal et à la déviation des trajectoires des signaux satellitaires induite par leur passage à travers les couches ionosphériques et troposphériques. Ces ambiguïtés étant identiques pour deux zones situées proches l'une de l'autre, il est alors possible d'utiliser les corrections calculées par la base afin de permettre un alignement correct des signaux par le dispositif mobile et ainsi obtenir une position verticale au centimètre près (Lahaye et Ladet, 2014).

Aujourd'hui, la généralisation de l'électronique amateur et l'accessibilité à du matériel de plus en plus précis et de moins en moins cher, entraîne le développement de plusieurs projets ambitieux. Initialement développé pour des projets d'autoguidage agricole, le réseau de bases fixes collaboratif, Centipède, permet l'obtention de correction RTK en s'affranchissant du coût d'un abonnement à un réseau privé (Ancelin, 2019). Soutenu financièrement par des instituts de recherche, des organismes publics, des agriculteurs et des entreprises privées, le projet Centipède couvre désormais plus de 90 % du territoire métropolitain.

Post traitement

Le fonctionnement interne des bouées est basé sur RTKBASE, développé depuis octobre 2019 autour d'un noyau Linux (Debian), initialement pour un usage de géoréférencement libre (Péneau, Ancelin, 2019). RTKBASE équipe notamment l'ensemble des bases fixes du réseau Centipède (Ancelin, 2019). La version utilisée a subi des adaptations pour une utilisation sur un rover.

RTKBASE intègre la librairie RTKLIB (Tomoji, 2013) qui contient notamment RTKCONV, un module de conversion des données brutes en format RINEX (Receiver Independant EXchange Format),

RTKRCV, un module de correction différentielle, et RTKPLOT, un module de visualisation des données. La configuration de RTKBASE est accessible au moyen d'une interface web intuitive, facilitant l'utilisation des bouées. L'accès aux données et aux fichiers de configuration présents sur le Raspberry peut être effectué sans ouvrir les bouées au moyen d'une connexion sans fil à l'aide du protocole de communication SSH.

Les bouées réalisent deux types d'acquisitions.

Une méthode d'acquisition en temps réel (RTK) au format '.pos' réalisée à l'aide de la base fixe 'LIENSS' du réseau Centipède. Les données corrigées à l'aide de RTKRCV sont transmises à un serveur central et visibles en temps réel au moyen de la plateforme d'observation libre, Grafana.

Une méthode d'acquisition des données brutes au format '.ubx' qui nécessitera un post-traitement ultérieur (PPK). Les données seront alors post-traitées avec RTKPOST.

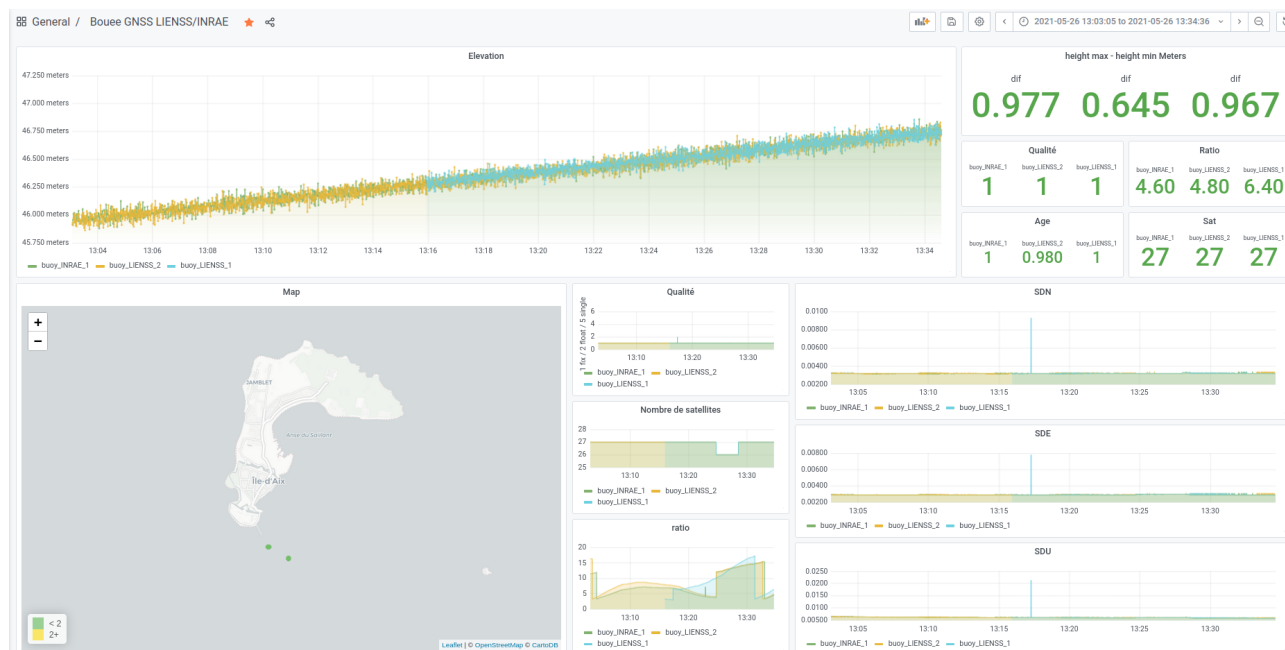


Fig.3 : Interface de Grafana utilisée pour le suivi des bouées en temps réel

Résultats

Essais des bouées sur l'île d'Aix

Les trois bouées ont été installées le 26 mai 2021 sur deux sites d'expérimentation (Fig.5) situés à proximité de l'île d'Aix (France). Les conditions de mer étaient affectées d'un coefficient de 103, soit un marnage de 5,62m. L'île d'Aix est un observatoire marégraphique historique pour l'étude du niveau de la mer, équipé d'un marégraphe radar dont la précision est évaluée à plus ou moins 3mm. Par ailleurs, l'île dispose d'une station fixe du réseau GNSS permanent (RGP).

Les bouées ont été amarrées à des corps morts équipés de bouées flottantes de manière à pouvoir se déplacer librement autour du point d'ancrage (Fig.4).



Fig.4 : Bouée LIENSS.2 amarrée à un corps mort

Les bouées INRAE.1 et LIENSS.1 étaient installées sur la même ligne d'amarrage à une distance d'environ 170 m du marégraphe. La bouée LIENSS.2 à une distance d'environ 400 m du marégraphe (Fig.5).

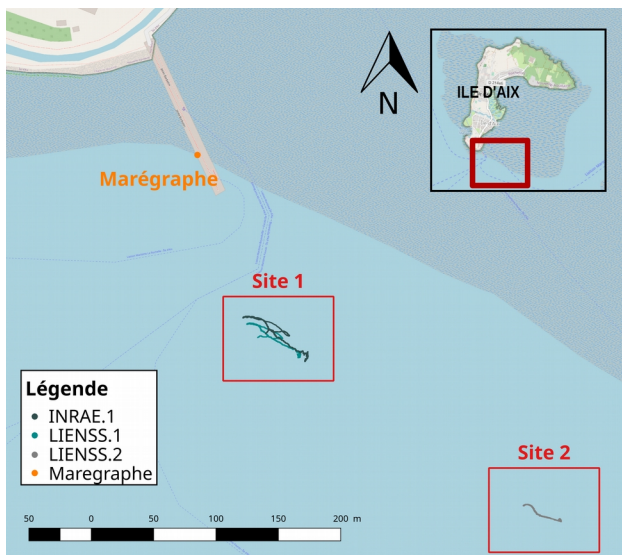


Fig.5 : Position du marégraphe et sites d'implantation des bouées

Stabilité des bouées

Malgré la présence d'un clapot important et d'un fort courant durant la période de flot, les observations menées sur le terrain font état d'une excellente stabilité des bouées. Les bouées INRAE.1 et LIENSS.1, fixées sur la même ligne d'amarrage mais équipées de quilles de longueur différente ont montré un comportement parfaitement similaire.

Conversion des données du marégraphe

Le Drotek F9P enregistre la hauteur ellipsoïdale relative à l'ellipsoïde IAG GRS 1980. Or, les valeurs du marégraphe sont données par rapport au zéro hydrographique (SHOM, 2021).

La station permanente de l'île d'Aix (ILDX) est située à une hauteur ellipsoïdale de 59.0418 m (IGN, 2021). Les dernières campagnes de nivellement réalisées dans la région font état d'un dénivelé entre le marégraphe et le zéro hydrographique de 15.712 m (SONEL, 2016). Les valeurs du marégraphe ont donc été majorées de 43.330 m.

Enregistrement

Les bouées ont enregistré simultanément les données corrigées en temps réel (Fig.6) et les valeurs brutes du Drotek F9P avec une fréquence d'échantillonnage de 1Hz. La bouée LIENSS.1 a subi plusieurs coupures des services RTK dont deux arrêts majeurs entre 9h35 et 9h46 et entre 10h11 et 11h15. L'enregistrement des données brutes n'a pas été affecté par ce dysfonctionnement.

Les données brutes ont été post-traitées par rapport à la base ILDX du RGP en utilisant le mode 'kinematic' du logiciel RTKPOST (Fig.7). Le traitement réalisé intègre les satellites de la constellation GPS et les éphémérides fournis par l'IGN (IGN, 2021).

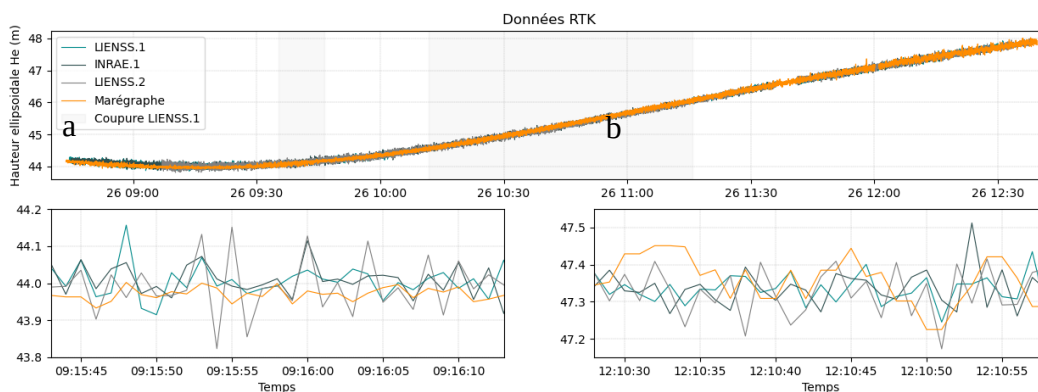


Fig.6 : Données brutes des bouées obtenues par la méthode RTK et données du marégraphe - 1Hz

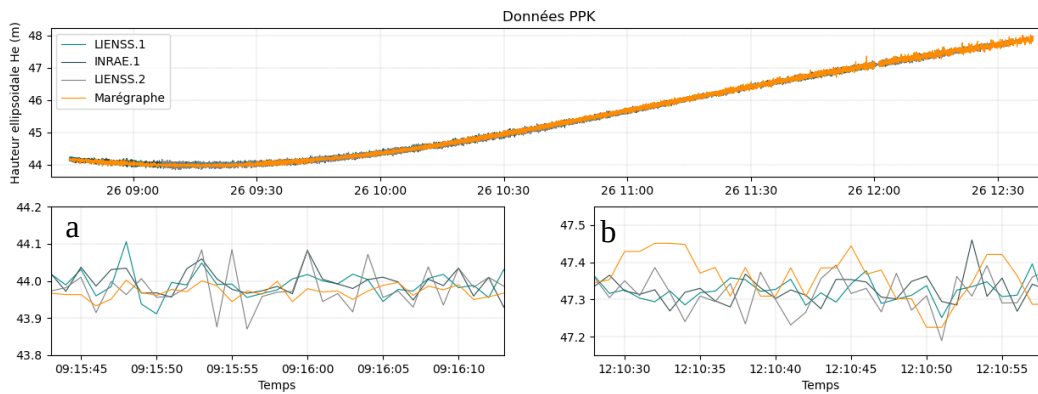


Fig.7 : Données des bouées obtenues en post-traitement (GPS et éphémérides) et données du marégraphe – 1Hz

L'ensemble des données obtenues montrent un signal fortement marqué par des oscillations à haute fréquence. Les valeurs obtenues en RTK montrent une amplitude du signal pouvant atteindre 35cm lors de l'étape (Fig.6a) et 20 cm durant la période de flot (Fig.6b). Les valeurs issues du marégraphe sont marquées par les mêmes oscillations mais montrent une amplitude moyenne de 5 cm à l'étape et de 25 cm durant la période de flot. L'amplitude est légèrement réduite sur les données post-traitées (Fig.7 a,b).

La présence d'oscillations similaires sur les données du marégraphe et celles des bouées, montre qu'il ne s'agit pas d'un phénomène aléatoire mais de

l'enregistrement des variations liées aux vagues. En effet, la fréquence d'échantillonnage des bouées et du marégraphe ne permet pas d'enregistrer ce type de signaux sans repliement du spectre (aliasing).

Un filtrage a été effectué en appliquant une moyenne par échantillon de 30 secondes sur les quatre signaux dans le but de s'affranchir de l'effet des vagues et ne

conserver que le signal de marée. Cette méthode de filtrage a été préférée à une moyenne glissante de manière à limiter les erreurs liées à la présence d'éventuelles valeurs aberrantes (Gobron et al., 2019). Les résultats obtenus montrent une forte similitude entre les valeurs des bouées GNSS et celles du marégraphe.

Étude statistique

La validation d'un modèle de mesure peut être effectuée par le calcul de trois estimateurs. Le coefficient de détermination (R^2), l'erreur moyenne absolue (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces estimateurs font référence à une valeur prédite. Dans notre cas, les valeurs obtenues par le marégraphe seront donc considérées exactes.

Le coefficient de détermination permet d'évaluer de façon simple, la similitude des mesures réalisées par deux instruments simultanément. Dans un cas parfait, la dépendance entre les mesures réalisées par les deux instruments doit être parfaitement linéaire et le coefficient doit tendre vers 1.

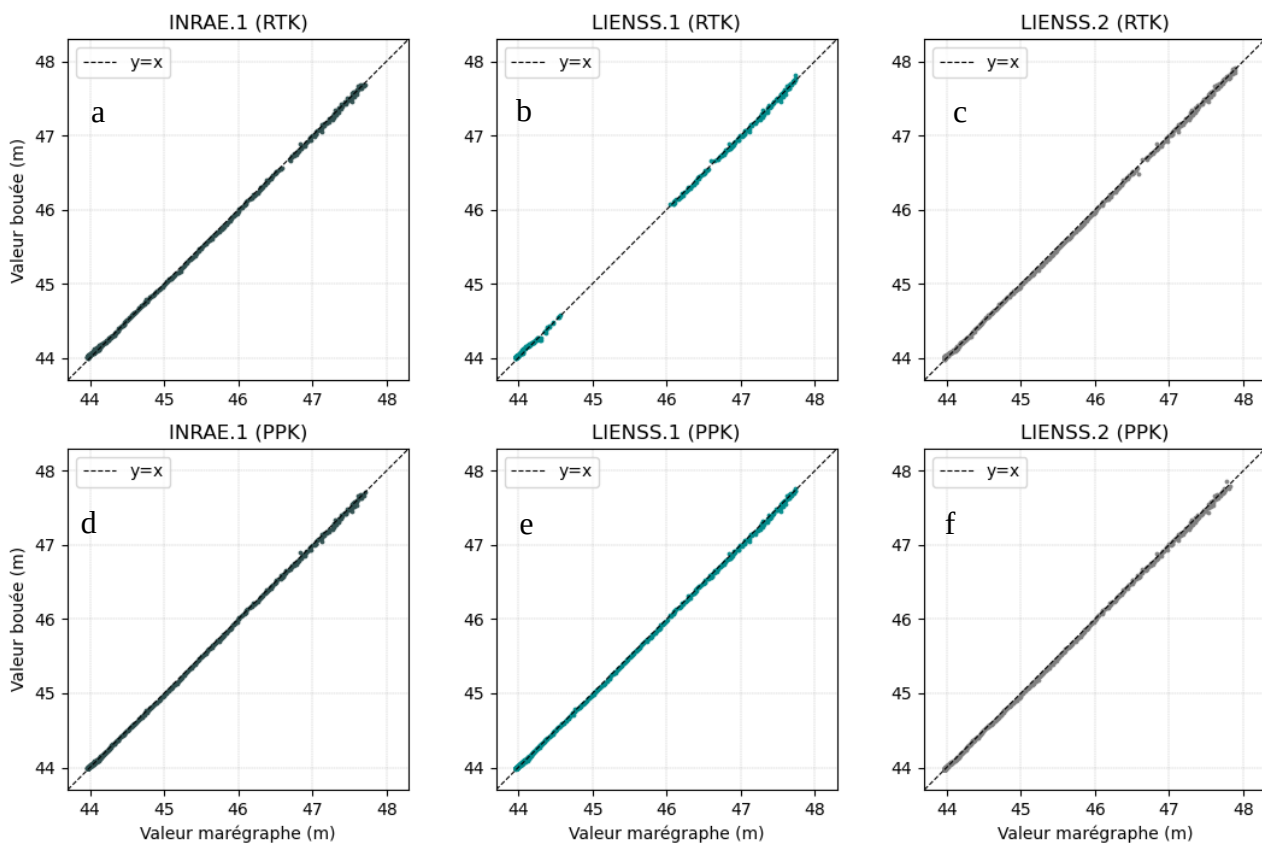


Fig.8 : Dépendance linéaire entre les valeurs du marégraphe et celles des bouées filtrées. Valeurs RTK (a, b, c) et post-traitées (d, e, f)

L'observation détaillée des données montre une tendance des bouées à enregistrer des valeurs légèrement plus élevées que celles du marégraphe durant l'étape et légèrement plus basses durant la période de flot (fig.8). Cependant, les coefficients calculés sont compris entre 0,9995 et 0,9996 pour les données obtenues en RTK et augmente légèrement pour les valeurs obtenues en post-traitement (tab.2).

L'erreur moyenne absolue permet d'estimer la différence moyenne observées entre les mesures effectuées par deux instruments simultanément. Enfin, le RMSE fournit une indication par rapport à la dispersion des valeurs par rapport à la prédiction. Il permet donc de quantifier la qualité des résultats obtenus en fonction d'une valeur de référence, ici, celle du marégraphe. Le tableau 2 reprend l'ensemble des valeurs statistiques calculées.

Bouée	Coefficient de détermination R^2	Erreur moyenne absolue (cm)	Écart-type des différences (cm)	RMSE (cm)
Valeurs RTK				
INRAE 1	0.9995	0.25	2.73	2.75
LIENSS 1	0.9996	0.97	2.87	3.03
LIENSS 2	0.9996	0.53	2.33	2.39
Valeurs PPK				
INRAE 1	0.99974	0.66	1.85	1.96
LIENSS 1	0.99976	0.57	1.84	1.93
LIENSS 2	0.99971	1.04	1.85	2,12

Tab.2 : Valeurs statistiques calculées sur les différences entre les données filtrées

Diagramme de Van de Castele

Le diagramme de Van de Castele (VdC) est un outil couramment utilisé dans l'évaluation des marégraphes. Il est la représentation des différences de valeurs mesurées par un instrument utilisé comme

étalon (marégraphe) et celles mesurées par l'instrument à évaluer sur l'axe des abscisses (Δh_e) et la hauteur ellipsoïdale mesurée par l'instrument sur l'axe des ordonnées (H_e). Il est donc nécessaire que les deux instruments effectuent des mesures simultanées (Gobron et al., 2019).

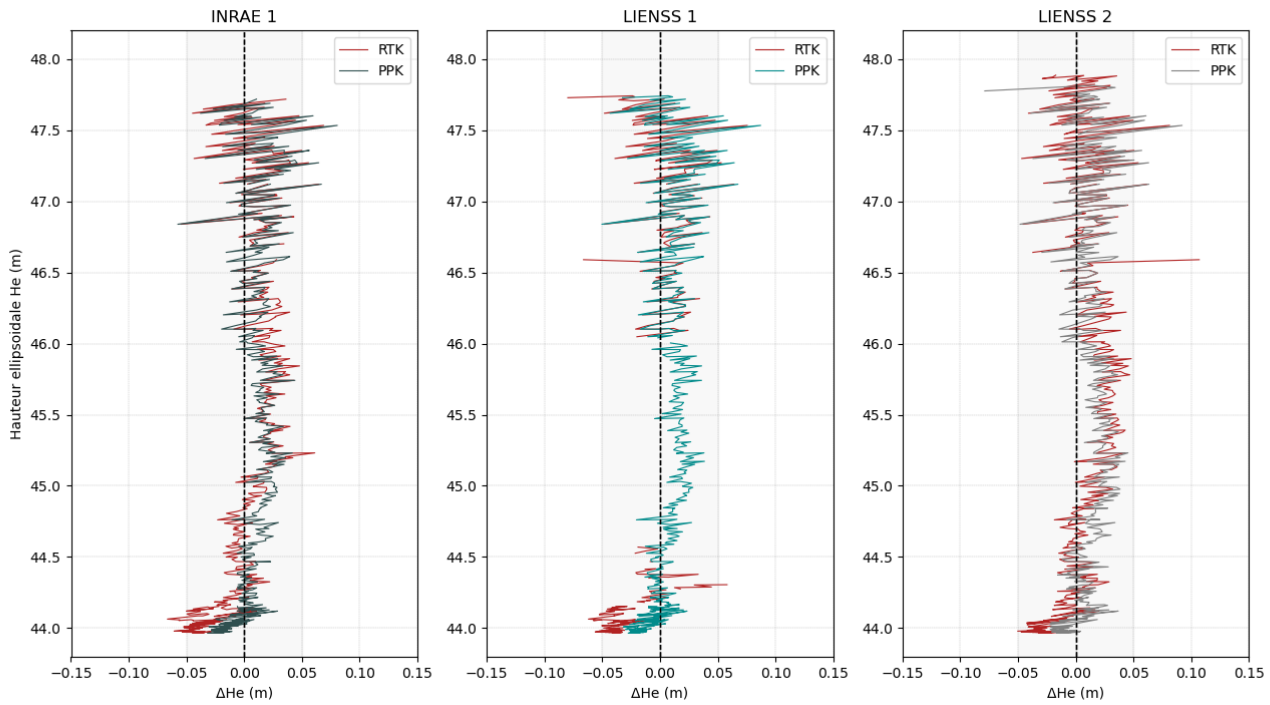


Fig.9 : Diagramme de VdC des trois bouées en utilisant le marégraphe comme référence

Les résultats obtenus par le test de VdC (fig.9) montrent un schéma globalement identique pour les trois bouées et montrent des valeurs du marégraphe supérieures à celles des bouées en période de flot et inférieures à celles des bouées en période d'étales. Les valeurs post-traitées font état d'une différence négative comprise entre 2,5 et 3 cm en période d'étales et à la fin de la période de flot. Une différence positive comprise entre 3 et 4 cm est enregistrée durant la période de flot. Le même schéma est visible pour les données obtenues en RTK avec des différences entre les valeurs des deux instruments, légèrement plus importantes.

Autonomie des bouées

Afin d'évaluer avec précision leur autonomie réelle, les bouées ont été placées sur le toit du laboratoire et ont enregistré jusqu'à épuisement complet des batteries. Des mesures de courant ont été réalisées sur la bouée LIENSS.2 à l'aide d'un ampèremètre branché en série entre la batterie et le Raspberry Pi dans le but d'évaluer la consommation moyenne de l'ensemble de la chaîne d'acquisition (Fig.2). Les données enregistrées montrent une consommation moyenne de 426 mAh marquée par des pics entre 600 et 931 mAh, soit une autonomie d'environ 25h pour la bouée INRAE.1 et de 32h pour les bouées LIENSS.1 et LIENSS.2 (Tab.2).

	Capacité théorique	Autonomie	Capacité utile
INRAE.1	13 500 mAh	24h58m	10 636 mAh
LIENSS.1	20 000 mAh	31h42m	13 504 mAh
LIENSS.2	20 000 mAh	32h15m	13 738 mAh

Tab.2 : Valeurs de capacités théoriques et réelles et valeurs d'autonomie

Discussion et conclusion

Trois prototypes de bouées GNSS ont été réalisées dans le but de fournir des instruments à bas coût capable d'effectuer des mesures du niveau de la mer avec une précision centimétrique. Des essais ont été réalisés à proximité de l'île d'Aix le 26 mai 2021 dans des conditions de mer marquées par un clapot important et un marnage élevé.

Les bouées, équipées de récepteur Drotek F9P et d'antenne Drotek DP0601, ont enregistré le niveau de la mer à une fréquence de 1Hz durant une période d'environ 4h selon deux types d'acquisitions. Une méthode utilisant une base fixe et permettant l'obtention des données corrigées en temps réel (RTK), et une méthode nécessitant un post-traitement des valeurs obtenues (PPK). Les données fournies par les bouées ont été comparées à celles fournies par un marégraphe radar de précision connue situé à proximité de la zone d'expérimentation.

L'ensemble des signaux a montré des oscillations à haute fréquence, pouvant être liées à l'effet des vagues. Toutefois, la fréquence d'échantillonnage ne permet de déterminer si cet effet est accentué par des phénomènes de résonance, particulièrement sur le signal du marégraphe. Malgré de légères variations, les tests de VdC ne montrent pas d'erreurs significatives (Gobron et al., 2019). Les différences positives observées durant la période de flot (fig.9) peuvent être interprétées comme étant liées aux paramètres hydrodynamiques de la région.

Le marégraphe de l'île d'Aix est situé sur la partie ouest d'une jetée en béton. Le marnage de 5,62m est à l'origine de courant de flot important de direction ouest-est qui peuvent ainsi provoquer un phénomène de convergence de l'eau au pied du marégraphe, entraînant une légère surcote. Par ailleurs, des phénomènes de résonance peuvent avoir lieu au pied de la jetée, particulièrement exposée à la houle. Les bouées ont également pu subir un léger enfoncement lié à la tension des lignes d'amarrage lors de l'exposition aux forts courants de marée en période de flot.

L'élaboration d'un diagramme de VdC nécessite l'enregistrement d'un cycle de marée complet. Ici, les mesures n'ont été réalisées que sur une période d'environ 4h. Ainsi, le comportement des bouées en période de jusant n'a pas pu être évalué. Un test complet permettrait alors d'évaluer l'impact de l'inversion des courants de marées sur les mesures

des bouées et du marégraphe.

Les tests statistiques réalisés montrent la capacité des bouées GNSS à effectuer des mesures précises du niveau de la mer. La différence moyenne entre les valeurs relevées par les bouées et le marégraphe est comprise entre 0,25 et 0,97 cm pour les valeurs obtenues en RTK et entre 0,57 et 1,04 cm pour les valeurs obtenues en post-traitement. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée sur les données obtenues en post-traitement est comprise entre 1,93 et 2,12 cm. Ces résultats sont du même ordre de grandeurs que ceux obtenus par Andre et al. (2013), qui ont obtenu une RMSE comprise entre 0,95 et 2,18 cm. Ils peuvent donc être jugés pertinents pour une application marégraphique.

Les différences moyennes observées peuvent, ici encore, être liées aux paramètres hydrodynamiques présents autour de l'île d'Aix ainsi qu'à l'erreur des instruments. Des enregistrements effectués sur une plus longue période et dans des conditions de mer plus calmes permettraient alors de mieux identifier les sources d'erreurs possibles.

L'autonomie des bouées a été évaluée en condition réelle d'utilisation. Les données obtenues ont montré une consommation moyenne d'environ 430 mAh correspondant à une autonomie théorique des bouées équipées de batteries de 20 000 mAh d'environ 46h. Or, l'autonomie réelle des bouées LIENSS.1 et LIENSS.2 a été évaluée à environ 32h, soit 70 % de la capacité théorique des batteries. L'autonomie réelle de la bouée INRAE.1 a été estimée à environ 25h, soit 78 % de la capacité théorique de la batterie. Ces différences peuvent être liées à la qualité des cellules employées lors de la conception des batteries ou aux circuits de protections qui protègent les batteries d'une décharge trop importante. La capacité utile des batteries est toutefois amplement suffisante pour réaliser des séries de mesures à l'échelle journalière.

L'efficacité des bouées GNSS à bas coût ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude du niveau de la mer et des marais littoraux. L'obtention de données en temps réel peut être appliquée à des usages de surveillance. Par ailleurs, le faible coût des bouées peut mener à une multiplication des dispositifs et un déploiement massif. L'usage des bouées GNSS peut alors être étendu à l'étude des mouvements hydrodynamiques ou l'étude des déformations des plans d'eau.

Bibliographie

- Ancelin, J. (2021) « État du réseau », *Centipede*. Disponible sur : <https://centipede.fr/index.php/view/map/?repository=cent&project=centipede>
- Ancelin, J. (2021) « Fabriquer une base RTK », Docs.centipede. Disponible sur : <https://docs.centipede.fr/docs/base/>
- Ancelin, J. (2021) « Tripod Buoy », *Prusaprinters*. Disponible sur : <https://www.prusaprinters.org/prints/67146-tripod-buoy>
- Andre, G. et al. (2013) « La mesure du niveau de la mer par bouées GPS : l'expérience multi-capteurs de l'île d'Aix », *Revue XYZ*, N° 140, pp. 26-33. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01257873>
- Drotek (2021) « DA910 Antenna », *Store Drotek*, Disponible sur : https://github.com/drotek/datasheets/raw/master/DrotekDoc_0910%20-%20DA910%20Antenna.pdf
- Drotek (2021) « DP0601 GNSS RTK (F9P) », *Store Drotek*, Disponible sur : [https://github.com/drotek/datasheets/raw/master/DrotekDoc_0891B08A%20-%20DP0601%20GNSS%20RTK%20\(F9P\).pdf](https://github.com/drotek/datasheets/raw/master/DrotekDoc_0891B08A%20-%20DP0601%20GNSS%20RTK%20(F9P).pdf)
- Gobron, K. et al. (2019) « Assessment of Tide Gauge Biases and Precision by the Combination of Multiple Collocated Time Series », *American Meteorological Society*. DOI : 10.1175/JTECH-D-18-0235.1
- IGN (2021), « Ephémérides ». Disponible sur : <ftp://rgpdata.ign.fr/pub/products/ephemerides/2159/>
- IGN (2021) « Réseau GNSS permanent », *rgp.ign*. Disponible sur : <http://rgp.ign.fr/STATIONS/#ILDX>
- Kato, T. et al. (2001) « Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System », *JDR Vol.13 No.3*, pp. 460-471. DOI : 10.20965/jdr.2018.p0460
- Knight, P.J. et al. (2020) « A low-cost GNSS buoy platform for measuring coastal sea levels », *Ocean Engineering*, 203(107198). DOI : [10.1016/j.oceaneng.2020.107198](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107198)
- Lahaye, R. et Ladet, S. (2014) « Les réseaux de correction différentielle », *Cahier des Techniques de l'INRA*, pp. 36-43. ISSN 0762-7339. Disponible sur: https://www6.inrae.fr/cahier_des_techniques/content/download/3810/34089/version/3/file/08_CH1_LAHAYE_corrections_différentielle.pdf
- Péneau, S. (2019) « Rtkbase », *Github*. Disponible sur : <https://github.com/Stefal/rtkbase>
- Raspberrypi (2021) « Technical specifications », *Raspberry Pi Zero*. Disponible sur : <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero/>
- REFMAR (2021) « Marégraphe île d'Aix », *Data.shom*. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#189>
- SONEL (2016) « Leveling of île d'Aix », *Sonel*. Disponible sur : <https://www.sonel.org/spip.php?page=nivellement&idStation=3004>
- Tomoji, T. (2013) « Rtklib », *Github*. Disponible sur : <https://github.com/tomojitakasu>