



Mesure de la hauteur d'eau océanique par GNSS embarqué sur un drone marin de surface

■ Anne DUCARME

Le dernier rapport du GIEC met en évidence l'accélération de l'élévation du niveau moyen de la mer passant de 1,3 mm/an pendant la première moitié du XX^e siècle à 3,7 mm/an entre 2006 et 2018 (GIEC 2023).

Pour comprendre et anticiper les impacts futurs des changements environnementaux sur les populations et les écosystèmes, la mesure du niveau marin est un outil précieux.

MOTS-CLÉS

GNSS, PPP, niveau marin, USV, marégraphe, centrale inertielle

Introduction

Depuis près de vingt ans, la couverture globale des satellites altimétriques permet d'étudier les dynamiques océaniques avec une précision centimétrique sur l'ensemble de la planète, en complément des marégraphes qui offrent de longues séries d'observations, mais restent localisés. Confronter les mesures altimétriques à des observations *in situ* permet de qualifier et de valider les observations des satellites. Avec le développement des capteurs et des méthodes de traitement GNSS (*Global Navigation Satellite System*), de nombreux systèmes permettent aujourd'hui de mesurer le niveau de la mer, aussi bien de manière localisée (bouées GNSS) qu'en mouvement, via l'utilisation de bateaux supports (navires commerciaux, de croisière...) ou des plateformes plus légères (catamarans, nappes flottantes...) (Lycourghiotis, 2022).

Utiliser un drone marin de surface apporte d'autres avantages : acquérir des mesures du niveau marin moins localisées que les marégraphes pendant plusieurs heures, en continu et en autonomie, tout en mesurant simultanément d'autres données (salinité, température...) grâce à différents capteurs. Les drones sont également plus manœuvrables dans les zones à fort trafic maritime.

Le DriX

Le DriX est un drone de surface développé par la société française iXblue et lancé en décembre 2017 pour des applications hydrographiques (*figure 1*). Véritable navire autonome, il mesure près de 7,7 m de long pour 80 cm de large (Exail, 2022). Il est doté d'une coque hydrodynamique ainsi que d'une quille lestée et rétractable lui assurant une bonne stabilité. Les capteurs sont intégrés dans une gondole située à 2 m sous la ligne de flottaison, ce qui permet de limiter les perturbations provenant de la plateforme et du bruit généré par le moteur. Ils sont également à l'écart des bulles d'air produites par l'étrave pénétrant dans les vagues.

La coque du DriX est surmontée d'un mât accueillant tous les équipements liés à la veille nautique, à l'anticollision et aux différentes communications. Le mât possède une prise d'air pour le

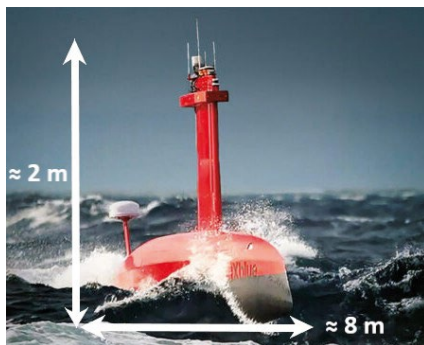


Figure 1. DriX en navigation (ixblue.com).

moteur et est équipé de projecteurs. À l'avant de la coque, un compartiment étanche abrite l'électronique et la distribution électrique du drone. Propulsé par un moteur diesel de 38 cv, le DriX peut naviguer de manière continue pendant 24 heures à la vitesse de 14 nœuds (environ 26 km/h) et jusqu'à 10 jours à la vitesse de 4 nœuds (environ 7 km/h) selon les spécifications techniques du constructeur (voir bibliographie). Deux alternateurs reliés au moteur permettent de recharger les batteries qui alimentent les différents capteurs embarqués.

La campagne DRIXMED22

Le plan de renouvellement de la Flotte océanographique française (FOF) amène l'Ifremer à exploiter les nouvelles technologies disponibles pour adapter ses capacités hydrographiques et océanographiques. En ce sens, l'utilisation des USV (*Unmanned Surface Vessel ou drone de surface naval*) permettrait d'augmenter la productivité des levés hydrographiques, océanographiques et atmosphériques, tout en conservant une qualité optimale des mesures.

L'unité Navires et systèmes embarqués (NSE) de l'Ifremer s'est tournée vers la société iXblue afin d'évaluer les performances proposées par l'un de ses USV : le DriX. Dans ce contexte, une campagne d'essais d'océanographie physique a été menée du 19 au 25 septembre 2022 en Méditerranée avec le Navire Océanographique (NO) l'Europe. La société iXblue a intégré des instruments scientifiques sur le DriX. L'objectif était, d'une part, de comparer les données acquises par le DriX à celles collectées par le NO l'Europe et, d'autre part, d'évaluer les performances du dispositif sur des critères d'endurance



et de qualité des données pour pouvoir les comparer aux systèmes employés actuellement.

Afin de mener cette évaluation technique, scientifique et opérationnelle de l'USV, la gondole du DriX a été équipée de nombreux capteurs dont une centrale inertielle iXblue PHINS (PHotonic Inertial Navigation System) Compact C7. Sur le mât, ont été installés une antenne GNSS (GA830) et un récepteur GNSS (SEPT ASTERX-U Marine) (figure 2).

Dans le cadre de ce stage, nous avons cherché à évaluer l'opportunité d'utiliser une antenne GNSS géodésique embarquée sur un drone marin de surface en mouvement, le DriX, pour cartographier le niveau de la mer. Ce travail s'appuie sur les données acquises pendant la campagne DRIXMED22 (figure 3), de 2022, citée précédemment.

Nous allons détailler la méthodologie adoptée pour traiter les données GNSS, puis présenter les résultats des différentes comparaisons réalisées afin de qualifier et de valider les mesures acquises par le DriX.

Méthodologie de traitement des observations GNSS

Les données GNSS récupérées à l'issue de la campagne DRIXMED22 sont des données brutes au format constructeur. La première étape consiste à développer une chaîne de traitement (figure 4) pour aboutir à un positionnement précis. À cette fin, nous avons élaboré un script permettant de passer de fichiers bruts SBF (*Septentrio Binary Format*) aux fichiers RINEX 3. Il fait appel à plusieurs utilitaires dont les fichiers exécutables sont annexés au fichier Python afin de pouvoir le diffuser par la suite.

Nous nous sommes ensuite demandé quel mode de traitement était le plus adéquat pour traiter les données de l'antenne GNSS embarquée sur le DriX. Selon les applications et la précision recherchée (du mètre au millimètre), différents modes de positionnement peuvent être utilisés. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes focalisés sur une méthode de positionnement précise absolue en temps différé : le

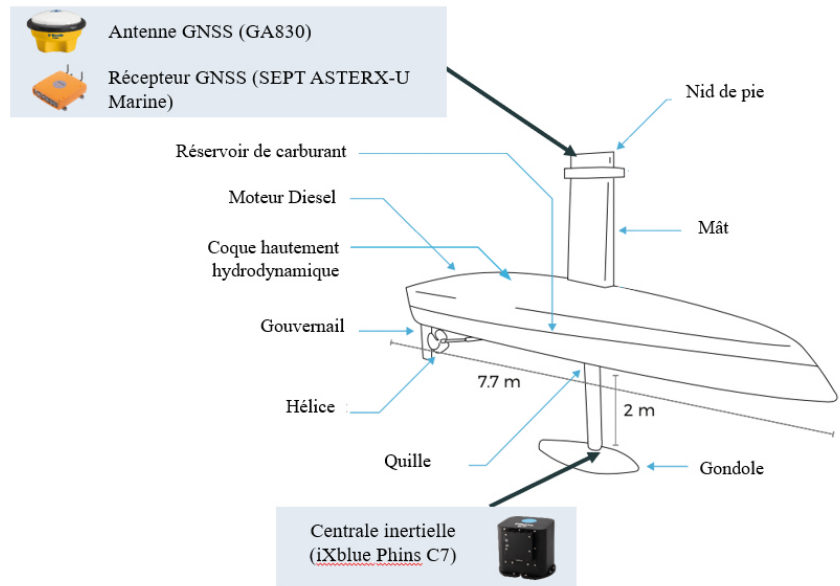


Figure 2. Structure du drone DriX (réalisation personnelle à partir d'une production iXblue).

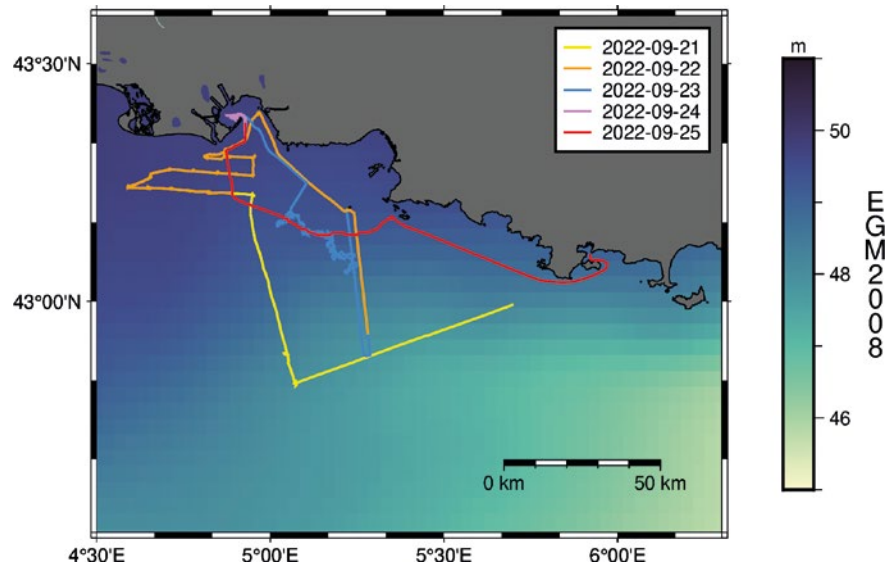


Figure 3. Trajectoire journalière du DriX. Le fond de carte représente l'ondulation du géoïde selon le modèle EGM2008.

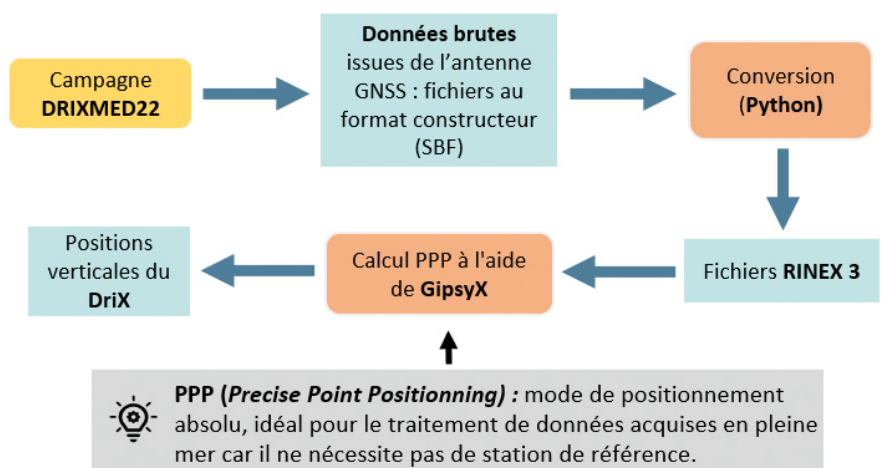


Figure 4. Chaîne de traitement mise en place.



Positionnement Ponctuel Précis (PPP) qui, à la différence du traitement différentiel, ne nécessite pas de station de référence et permet donc de traiter des observations GNSS plus éloignées de la côte. Pour le calcul, nous avons utilisé le logiciel GipsyX (Bertiger et al., 2020) associé à des scripts Python permettant de modifier facilement les paramètres de traitement.

Nous avons d'abord réalisé différents traitements sur les données issues de la station GNSS permanente de Marseille appartenant au Réseau GNSS Permanent (RGP). L'objectif était de prendre en main le paramétrage d'un calcul réalisé avec GipsyX, pour une station située à proximité de la trajectoire du DriX, afin de valider les paramètres utilisés, notamment pour l'estimation des corrections des mouvements géophysiques (marée terrestre, surcharge océanique, ondulation du géoïde et marée océanique).

Nous avons ensuite appliqué le même paramétrage pour le traitement des données du DriX, puis nous avons cherché à qualifier la solution obtenue en sortie. Nous avons d'abord étudié les erreurs formelles sur la position 3D afin d'écarter les points aberrants, puis nous avons complété notre analyse par une étude de la qualité des fichiers RINEX à l'aide du logiciel Anubis (Vaclavovic et Dousa, 2015). Nous avons constaté des valeurs élevées de trajets multiples pour certains jours de mesures. Nous avons aussi remarqué que l'utilisation d'une seule constellation donne un GDOP moyen de 2,27 alors que si l'on s'appuie sur l'ensemble des constellations (GPS, Galileo et Glonass), le GDOP moyen est amélioré avec une valeur de 1,36 (figure 5).

Rattachement des mesures au niveau marin

L'étape suivante consiste à rattacher les mesures issues de l'antenne GNSS du DriX au niveau de la mer. Afin de prendre en compte les mouvements du porteur, nous avons exploité les données de la centrale inertielle embarquée dans la gondole du drone (figure 6). Nous avons corrigé les hauteurs ellipsoïdales des varia-

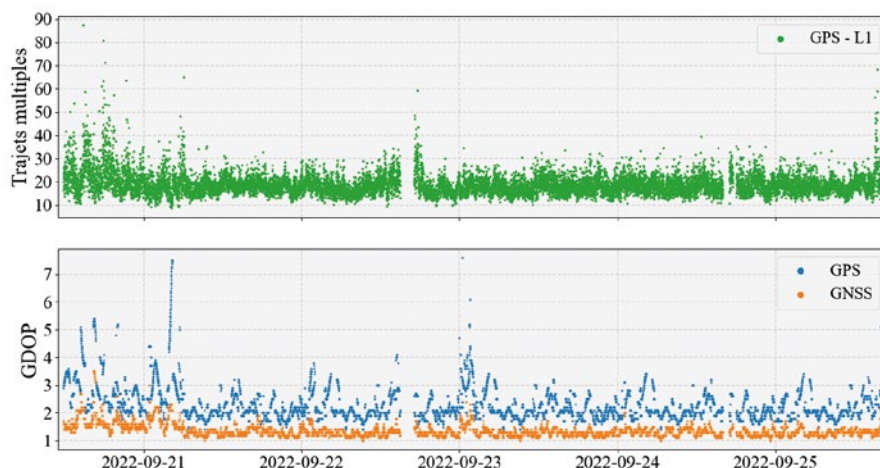


Figure 5. Indicateurs de qualité calculés à l'aide du logiciel ANUBIS.

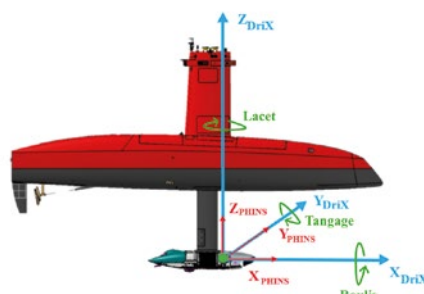


Figure 6. Référentiels utilisés et angles d'Euler (roulis/tangage/lacet).

tions liées aux angles d'Euler (roulis/tangage/lacet) et au pilonnement, puis nous avons retiré la distance entre la centrale inertielle et la ligne de flottaison afin d'obtenir une série temporelle du niveau de la mer.

Nous avons alors constaté que la prise en compte des mouvements du DriX, principalement du pilonnement (variant de 78 cm à 1,51 m), permettait de diminuer nettement les variations haute fréquence (figure 7).

Afin de qualifier les hauteurs d'eau obtenues, deux tests ont été réalisés : une comparaison statique avec des

données issues de marégraphes et une comparaison spatiale avec des données altimétriques.

La qualité moyenne des données observée pendant la phase de prétraitement s'est confirmée dans la phase d'analyse. Sur plusieurs périodes, nous avons remarqué un nombre important de sauts de cycle (1000 à 2000) et une forte variabilité temporelle des solutions. Avec la comparaison aux marégraphes permanents, nous avons estimé des écarts moyens entre le DriX et le marégraphe côtier de -2,9 cm +/- 10,4 cm (La-Seyne-sur-Mer) et 11,9 cm +/- 17,4 cm (Fos-sur-Mer). Pour compléter cette comparaison, deux autres modes de traitement GNSS ont été testés : un traitement PPP multiconstellation et un traitement différentiel. L'écart au marégraphe est réduit par l'utilisation de la multiconstellation avec, pour la session à Fos-sur-Mer (figure 8), un écart passant de 11,9 cm +/- 17,4 cm à 3,4 cm +/- 7,7 cm et davantage avec l'utilisation d'un traitement différentiel (6,9 cm +/- 4,0 cm). Il reste encore

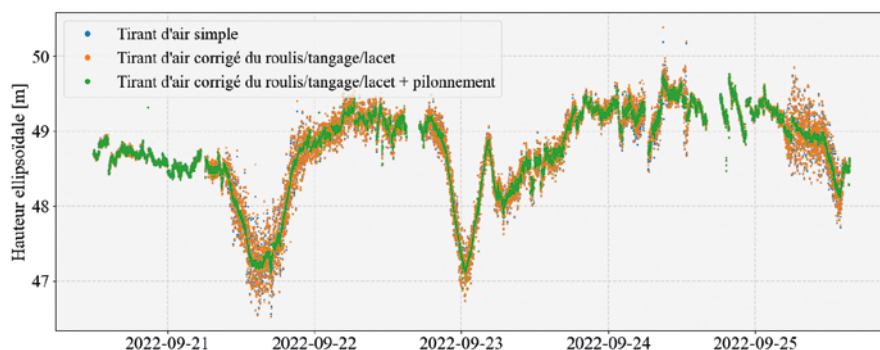


Figure 7. Hauteurs ellipsoïdales corrigées des mouvements du DriX par le bras de levier simple de 1.870 m, par le bras corrigé des angles roulis/tangage/lacet et par le bras corrigé des angles et du pilonnement.

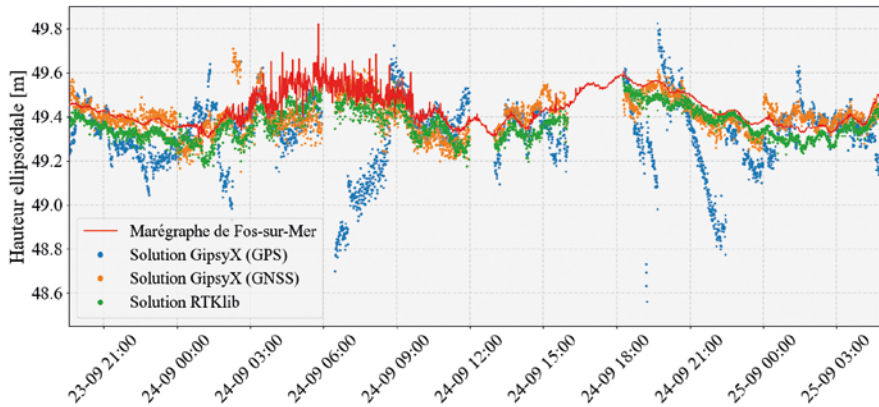


Figure 8. Comparaison au marégraphe permanent de Fos-sur-Mer.

plusieurs facteurs à explorer pour tenter d'expliquer les différents biais comme des imprécisions ou des erreurs, dans la détermination du bras de levier ou encore l'enfoncement dynamique du DriX à prendre en compte.

Nous avons ensuite comparé les hauteurs obtenues avec le DriX à un modèle de hauteur moyenne (MSS CNES CLS 2015) pour obtenir une comparaison spatiale. Nous avons constaté que l'utilisation de la solution PPP GNSS réduisait les écarts entre le modèle et la solution DriX de $-4,2 \text{ cm} \pm 17,9 \text{ cm}$ à $0,9 \text{ cm} \pm 12,3 \text{ cm}$ (figure 9). Ainsi, si l'on souhaite mesurer le niveau marin à des fins de comparaison avec des données altimétriques, le traitement multiconstellation est à privilégier. Nous pensons aussi que des trajets unidirectionnels à vitesse constante pourraient permettre une réception continue des signaux GNSS et l'obtention d'une meilleure qualité de positionnement.

Conclusion

Les mesures du DriX nous ont permis de déterminer le niveau marin avec une précision de l'ordre d'une dizaine

de centimètres. Pour les marégraphes permanents, nous avons obtenu un écart de $7,3 \text{ cm} \pm 2,9 \text{ cm}$ (La-Seyne-sur-Mer) et $6,9 \text{ cm} \pm 4,0 \text{ cm}$ (Fos-sur-Mer). Pour les mesures altimétriques, nous avons obtenu un écart de $0,9 \text{ cm} \pm 12,3 \text{ cm}$ par rapport au modèle MSS CNES CLS 2015. Des interrogations demeurent concernant les traitements GNSS dont le rôle est non négligeable dans l'estimation de la composante verticale lorsque l'on souhaite se rapprocher du centimètre. Nos analyses ont montré qu'il était important d'avoir une bonne visibilité des satellites (éviter les masques, GDOP correct...), en ce sens, le traitement multiconstellation est à privilégier.

Pour qualifier complètement le système, il faudrait mettre en place d'autres campagnes de tests dédiées avec notamment de nouvelles sessions de mesures à proximité de marégraphes pour contraindre la détermination des bras de levier du DriX. Nous pourrions également envisager des comparaisons avec des bouées GNSS ou une évaluation plus complète de l'enfoncement dynamique de la plateforme.

Pour la suite, ces premières analyses

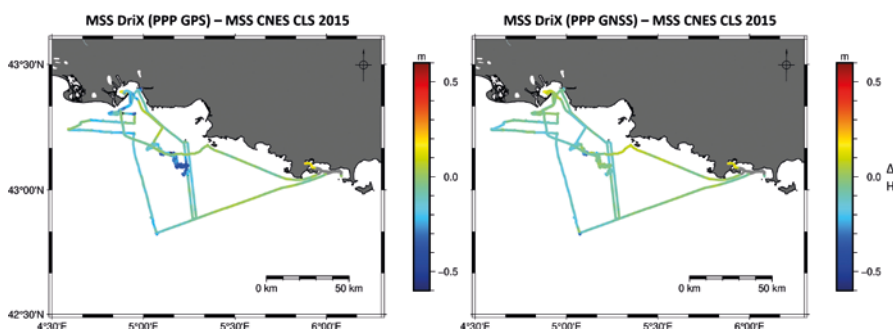


Figure 9. Différence entre MSS obtenue à l'aide des mesures du DriX (traitement GPS à gauche, traitement GNSS à droite) et le modèle MSS CNES CLS 2015 aux positions du DriX.

vont aider à traiter les données acquises durant la campagne CSWOT du printemps 2023 afin de comparer la cartographie du niveau de la mer, *in situ* avec les premières observations du satellite à large fauchée SWOT. ●

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Lab-STICC à l'ENSTA Bretagne et a été financé par le projet ISblue (isblue.fr).

Contact

Anne DUCARME

Ingénieur géomètre-topographe ESGT
anne.ducarme@orange.fr

Références

- BERTIGER W., BAR-SEVER Y., DORSEY A. et al. (2020). *GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research*, Advances in Space Research, 66, pp. 469-489.
- GIEC, 2023. Synthesis Report (SYR) of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6) (85 p.).
- Exail (2022). *DriX Datasheet*, 2022.
- LYCOURGHOTIS S. et KARIOTOU F. (2022). *The "GPS/GNSS on Boat" Technique for the Determination of the Sea Surface Topography and Geoid: A Critical Review*, Coasts, 2, pp. 323-340.
- VACLAVOVIC P. et DOUSA J. (2015). *G-Nut/Anubis: Open-Source Tool for Multi GNSS Data Monitoring with a Multipath Detection for New Signals, Frequencies and Constellations*. In: Rizos, C., Willis, P. (eds) IAG 150 Years. International Association of Geodesy Symposia. Cham : Springer, 143, pp.775-782.

ABSTRACT

The latest IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report highlights the accelerating rise in mean sea level, from 1.3 mm/year in the first half of the 20th century to 3.7 mm/year between 2006 and 2018 (IPCC 2023). Measuring sea level is a valuable tool for understanding and anticipating the future impact of environmental change on populations and ecosystems.