



Journée Low COAST 2022

## Une bouée GNSS low-cost pour la mesure de la vapeur d'eau au-dessus des océans

V. Bennini<sup>1</sup>, M. Bouasria<sup>2</sup>, Y. Grit<sup>3</sup>, P. Bosser<sup>4</sup>, A. Panetier<sup>4</sup>

1: IMT Atlantique, Plouzané, France.

2: IUEM, Plouzané, France.

3: ENSTA Bretagne, Brest, France.

4: Lab-STICC, ENSTA Bretagne, Brest, France.

Météorologie/climatologie par GNSS :

- Pour la **détermination précise des coordonnées** (< quelques dizaines de mms), nécessité d'estimer le **retard à la propagation dans la troposphère** (*ZTD*) au même titre que la position.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad [m]$$

- *ZHD* : retard **hydrostatique** ( $\propto$  Pression de surface)
- *ZWD* : retard **humide**
- Restitution de **contenus intégrés en vapeur d'eau** (*IWV*, quantité utilisée pour l'étude de la vapeur d'eau atmosphérique) à partir de ces retards à la propagation :

$$IWV = Q(T_m)ZWD \quad [kg\ m^{-2}]$$

$T_m$  : température moyenne de la colonne atmosphérique humide

→ **Précision : 1–2 kg m<sup>-2</sup> IWV** (2–10%) en **statique** (stations terrestres fixes) et **temps différé** [Gue+16]

Utilisation courante en climatologie/météorologie pour des antennes **fixes** et **terrestres** (voire permanentes)

➔ **Avantage de l'antenne GNSS** : capteur passif (pas de brouillage induit), facilement déployable, peu énergivore

Prix d'un lot récepteur + antenne GNSS géodésique ~ 4-20k€

Utilisation variée :

- **Adéquation** avec des mesures issues d'instruments métrologiques conventionnels [Bev+92; Elg+97]
- Utilisation en **climatologie** ou lors de **campagnes de recherche** sur les processus météorologiques [Boc+16; Had+18]
- Assimilation des ZTD ou IWV dans les modèles de **prévision numérique du temps** pour des stations terrestres fixes en temps quasi réel [Pol+07; Ben+12]

Mesure GNSS – Vapeur limitée à la terre...

➔ Apport des mesures GNSS – Vapeur d'eau réalisées en pleine mer :

- Origine de phénomènes météorologiques sévères et à risque.
- Zone souvent limitée à des observations de surface ou issue de télédétection par satellite.

Quelle utilisation des mesures GNSS – Vapeur d'eau en mer ?

- **Météorologie** : potentiel des navires d'opportunité, des bouées scientifiques ; équipement simple et autonome possible.
  - ➔ Attentes en terme de précision / latence :  $2 \text{ kg m}^{-2}$  / 15 min pour la prévision à 1h [Off10]
- **Climatologie** : potentiel des navires de recherche, déjà équipés ; analyse en temps différé pour la validation des modèles de climat, la compréhension de phénomènes intenses, etc.
  - ➔ Attentes en terme de précision : 1 à  $2 \text{ kg m}^{-2}$

Plusieurs expérimentations récentes confirment la technique :

- La **campagne EUREC4A** (2020), avec la mesure d'IWV GNSS depuis 3 navires [Bos+21]
- Le **projet MAP-IO** (depuis 2020), avec la mesure routinière d'IWV GNSS (J+1, J+3) depuis le Marion-Dufresne en Océan Indien [Bos+22]

Des limites :

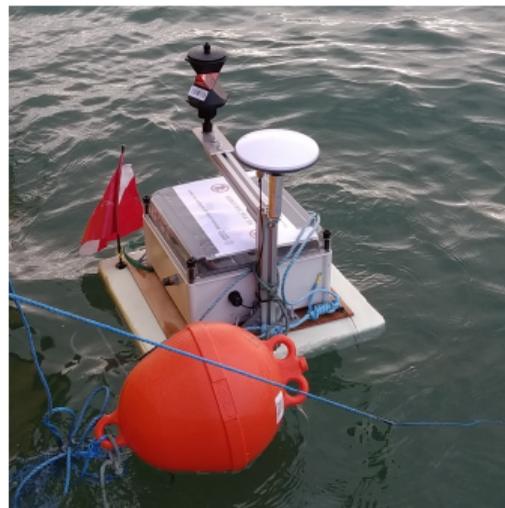
- Pour l'analyse : Forte **corrélation entre la correction troposphérique estimée et le mouvement** (vertical) du porteur.
  - ➔ Travaux méthodologiques en cours [Pan+22]
- **Transmission / diffusion** des données
  - ➔ Travaux en cours pour la transmission de données de navires en Méditerranée (Robusta3A)
- En campagne, difficultés de disposer d'une densité suffisante de systèmes en mer
  - ➔ **Développements de systèmes *low cost*, facilement déployable**

### Développement d'une bouée GNSS *low cost* pour la restitution d'IWV avec un incertitude $\sim 2 \text{ kg m}^{-2}$

- Profiter de l'expansion récente des applications de positionnement / télédétection à partir de récepteurs GNSS bifréquences *low cost* [Kni+20; Kri+20; Pur+21]

Première étape: un fonctionnement en mode "campagne" :

- Autonomie d'**un mois**
  - **Analyse en temps différé** des données brutes, en **PPP** (ne nécessitant pas de réseaux de stations terrestres fixes à proximité pour déploiement global, position  $\sim \text{cm}$ )
  - Prix **500€**
  - **Utilisation de logiciels *open source*** pour le formatage et l'analyse des données (RTKlib, Pride PPP-AR)
- Travaux réalisés dans le cadre du projet *Guérledan*, mêlant étudiants de l'ENSTA Bretagne, l'IUEM et L'IMT-A



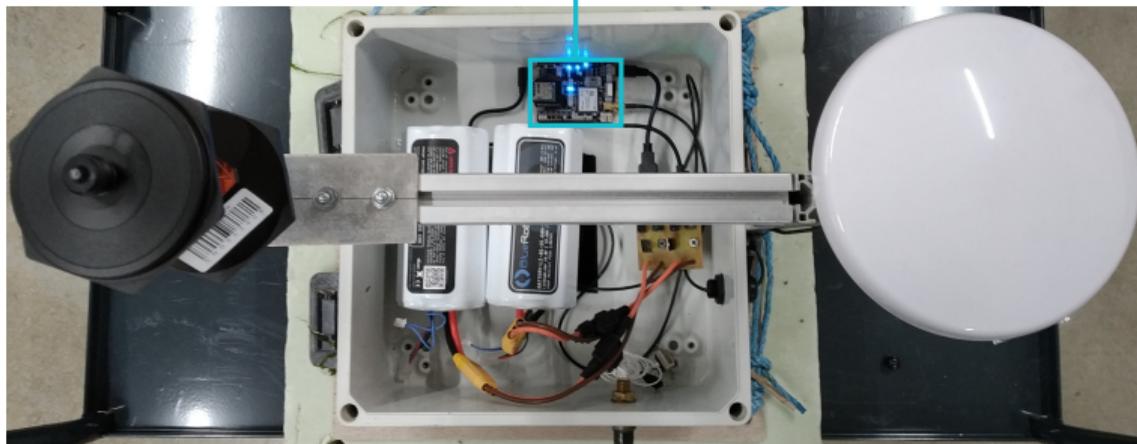
## Description du prototype

vue de dessus



## Description du prototype

vue de dessus

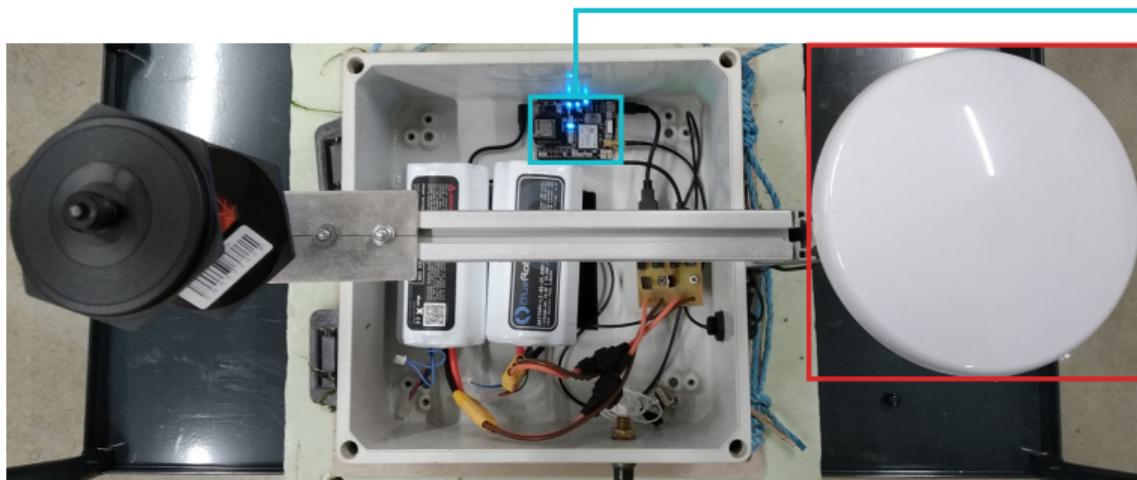


Carte électronique :

- Module UBlox ZED F9P
- Microcontrôleur sur socket Xbee (UART Tx)
- Carte microSD 32Gb
- Consommation  $\sim 0.75$  W

## Description du prototype

vue de dessus



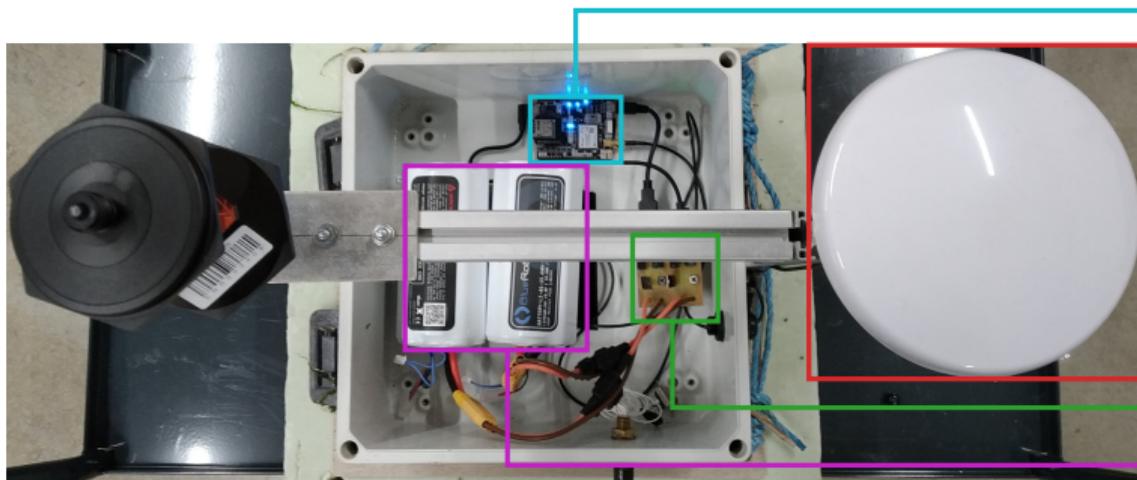
Carte électronique :

- Module UBlox ZED F9P
- Microcontrôleur sur socket Xbee (UART Tx)
- Carte microSD 32Gb
- Consommation  $\sim 0.75$  W

Antenne calibrée multiGNSS IP67

## Description du prototype

vue de dessus



Carte électronique :

- Module UBlox ZED F9P
- Microcontrôleur sur socket Xbee (UART Tx)
- Carte microSD 32Gb
- Consommation  $\sim 0.75$  W

Antenne calibrée multiGNSS IP67

Carte d'alimentation

2× batteries Lithium-ion 230 Wh

## Description du prototype



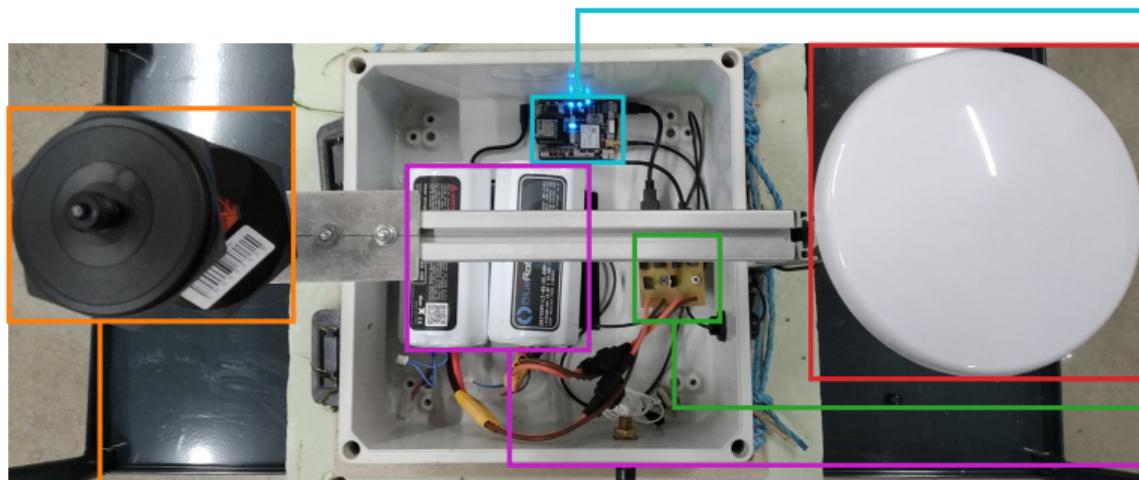
ENSTA  
BRETAGNE



ISblue



vue de dessus



Carte électronique :

- Module UBlox ZED F9P
- Microcontrôleur sur socket Xbee (UART Tx)
- Carte microSD 32Gb
- Consommation  $\sim 0.75$  W

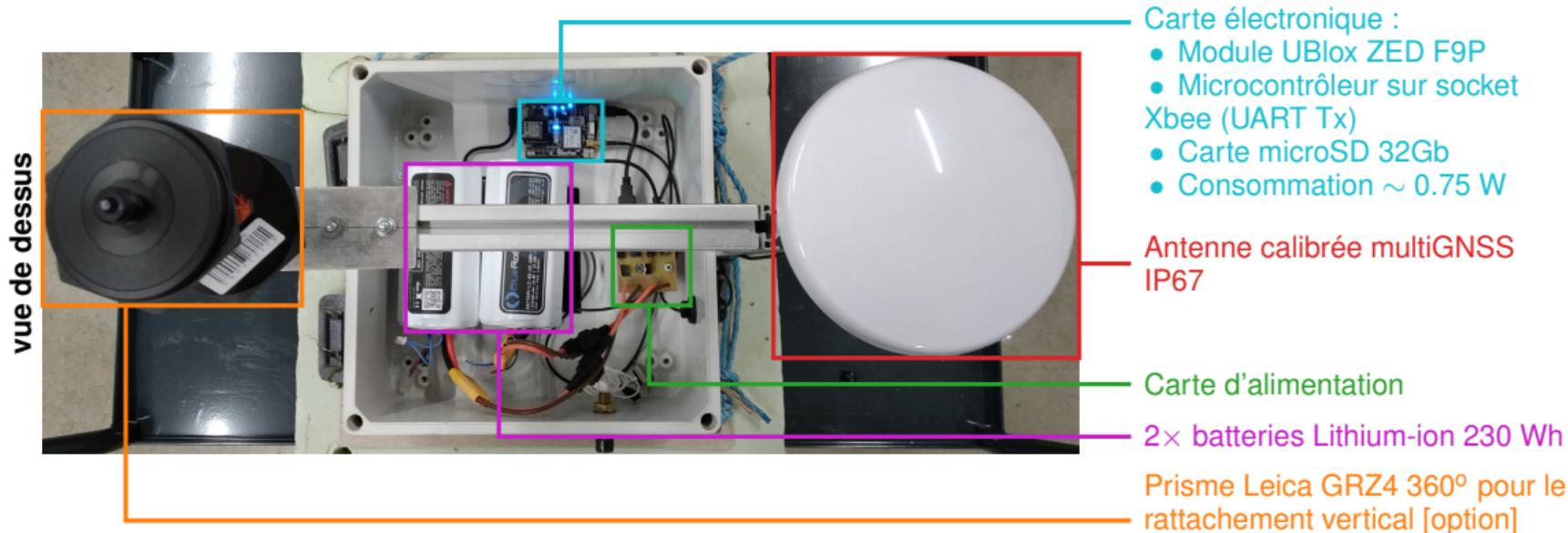
Antenne calibrée multiGNSS IP67

Carte d'alimentation

2× batteries Lithium-ion 230 Wh

Prisme Leica GRZ4 360° pour le rattachement vertical [option]

## Description du prototype



**Autonomie  $\sim$  25 jours avec 2 batteries**

**Prix  $\sim$  900€ (dont 600€ pour les 2 batteries)**

## Évaluation à Terre



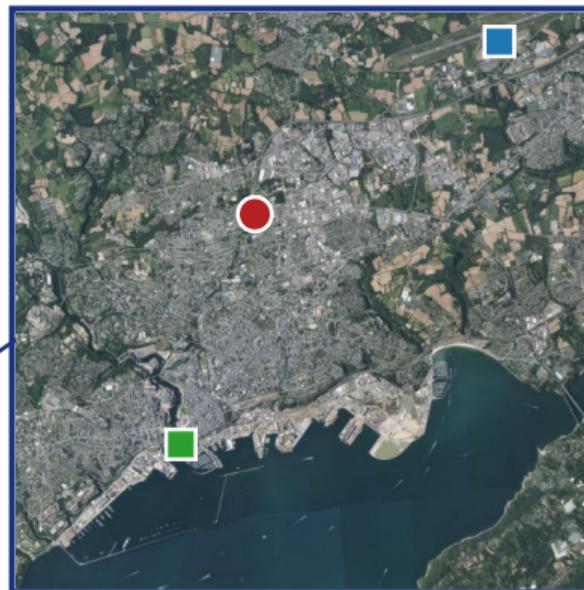
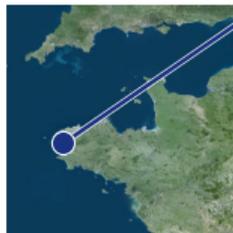
ENSTA  
BRETAGNE



ISblue



- Analyse **PPP statique** des mesures de la **bouée** sur une période de 12 jours en août 2021.
- Comparaison avec les stations GNSS proches ( $< 5$  km, (**BRST** & **GUIP**))

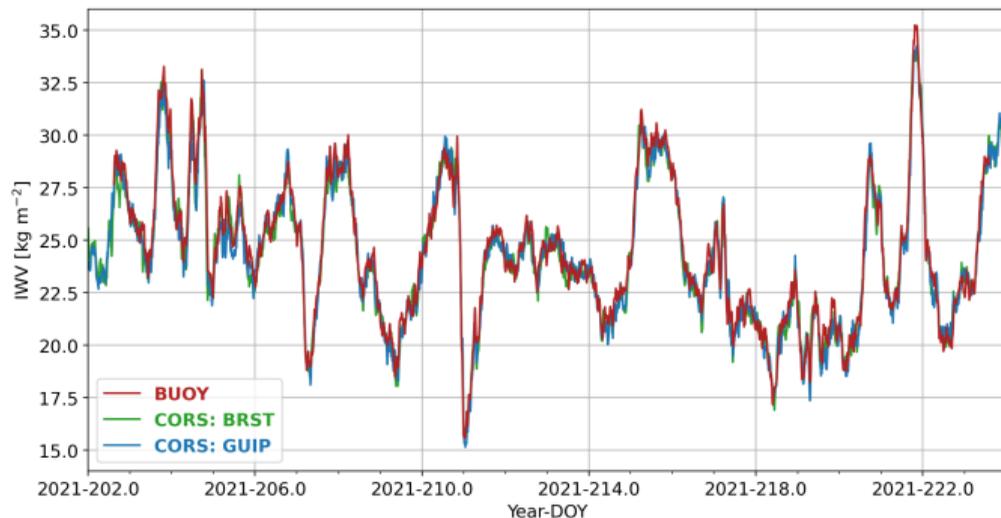


10 km

- Analyse **PPP statique** des mesures de la **bouée** sur une période de 12 jours en août 2021.
- Comparaison avec les stations GNSS proches (< 5 km, (**BRST** & **GUIP**))

	Npts	bias $\pm$ stdev [ $\text{kg m}^{-2}$ ]
<b>BRST</b>	6041	$-0.22 \pm 0.55$
<b>GUIP</b>	6041	$-0.22 \pm 0.54$

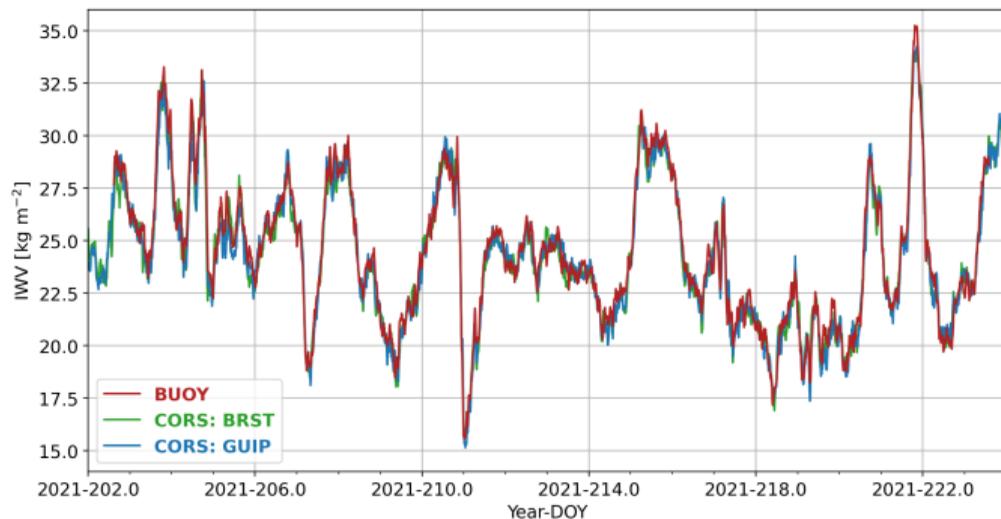
- Très bon accord malgré un faible biais
- Écart-types avec les antennes permanentes de l'ordre de  $0.5 \text{ kg m}^{-2}$ , similaire entre antennes permanentes.



- Analyse **PPP statique** des mesures de la **bouée** sur une période de 12 jours en août 2021.
- Comparaison avec les stations GNSS proches (< 5 km, (**BRST** & **GUIP**))

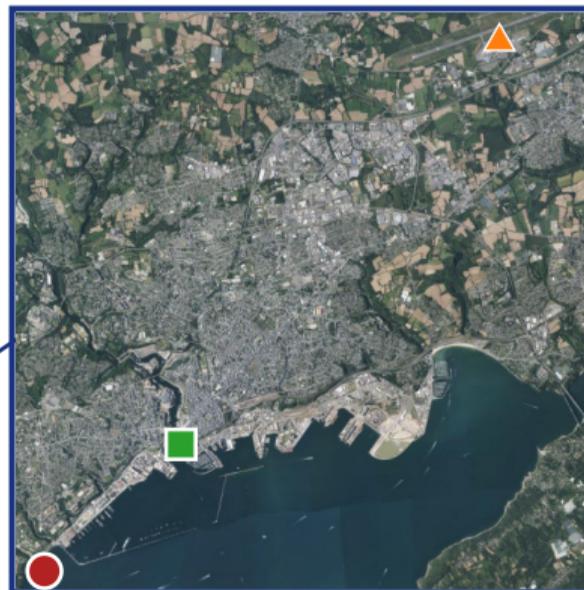
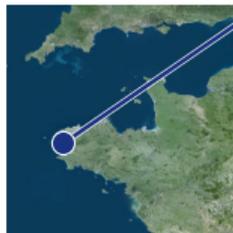
	Npts	bias $\pm$ stdev [ $\text{kg m}^{-2}$ ]
<b>BRST</b>	6041	$-0.22 \pm 0.55$
<b>GUIP</b>	6041	$-0.22 \pm 0.54$

- Très bon accord malgré un faible biais
- Écart-types avec les antennes permanentes de l'ordre de  $0.5 \text{ kg m}^{-2}$ , similaire entre antennes permanentes.



➔ **Restitution de mesures de vapeur d'eau de qualité similaire à celle des stations permanentes.**

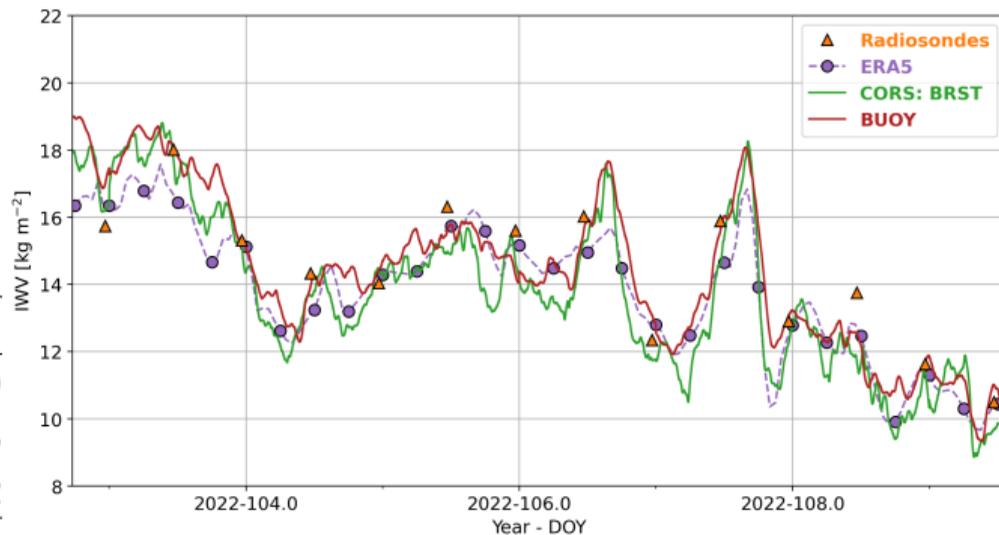
- Analyse **PPP cinématique** des mesures de la **bouée** durant 8 jours en avril 2022
- Comparaison avec les **radiosondages** (Météo-France), la réanalyse **ERA5** et la station de référence **BRST**



10 km

- Analyse **PPP cinématique** des mesures de la **bouée** durant 8 jours en avril 2022
- Comparaison avec les **radiosondages** (Météo-France), la réanalyse **ERA5** et la station de référence **BRST**

	Npts	bias $\pm$ stdev [ $\text{kg m}^{-2}$ ]
<b>Radiosonde</b>	14	+0.10 +/- 0.70
<b>ERA5</b>	164	-0.55 +/- 0.78
<b>BRST</b>	19483	-0.61 +/- 0.62



- Accord global entre les différentes techniques
- Biais négatif important / **ERA5** and **BRST** (**BUOY** plus humide) ; faible biais / **Radiosonde**
- RMS des écarts inférieur à  $1 \text{ kg m}^{-2}$
- Par rapport à **BRST**, 99.3% des différences sont à  $\pm 2 \text{ kg m}^{-2}$

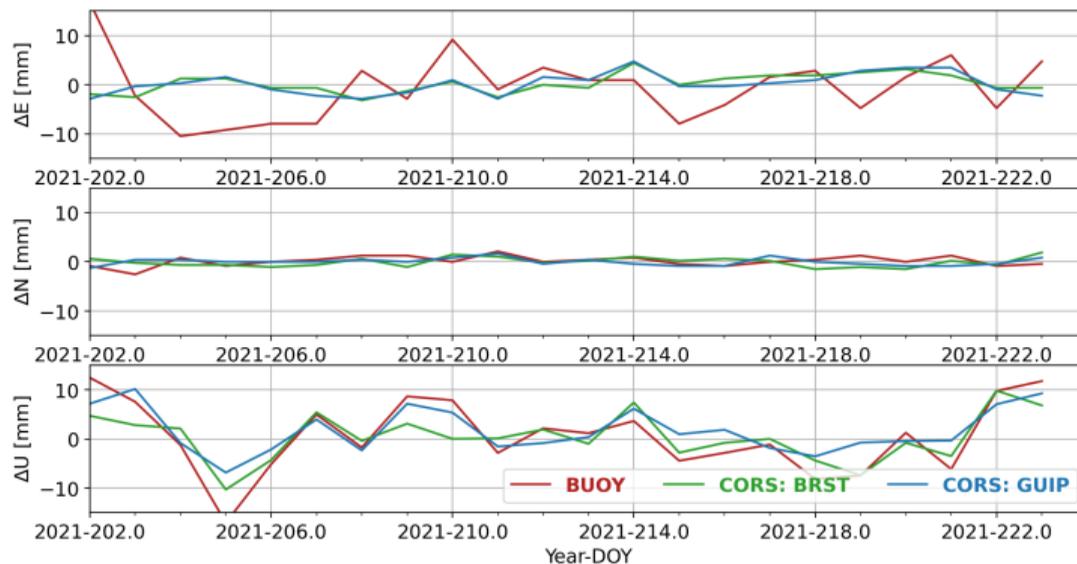
- Malgré un possible biais humide, les écarts avec des techniques plus conventionnelles sont inférieurs à **2 kg m<sup>-2</sup> RMS**, ce qui rend la **technique adaptée pour des utilisations en climatologie**.
- Ces résultats **confirment l'utilisation d'une bouée GNSS low cost** pour l'observation de la vapeur d'eau atmosphérique au-dessus des océans.

Quelques perspectives :

- **Analyse approfondie des données GNSS brutes**, dont la recherche d'un éventuel biais humide
- Intégration de **capteurs météorologiques low-cost** (pression, température)
- Installation de **panneaux solaires** pour augmenter l'autonomie
- **Nouveau design** de la bouée pour une meilleure tenue en mer
- Développement d'un système de **récupération automatique des données**
- **Fiabilisation du système** : acquisition, récupération des données, etc.
- Déploiement sur un porteur quelconque (navire d'opportunité, bouée instrumentée).

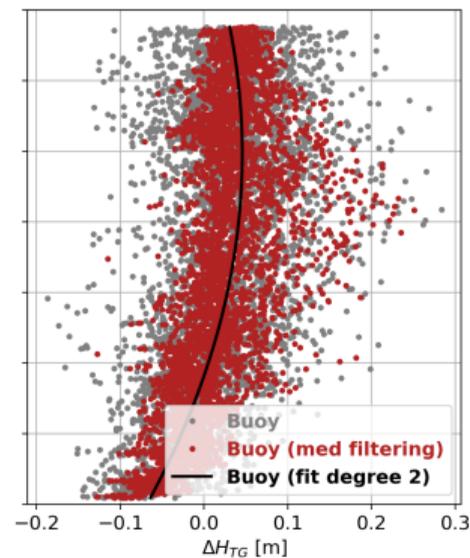
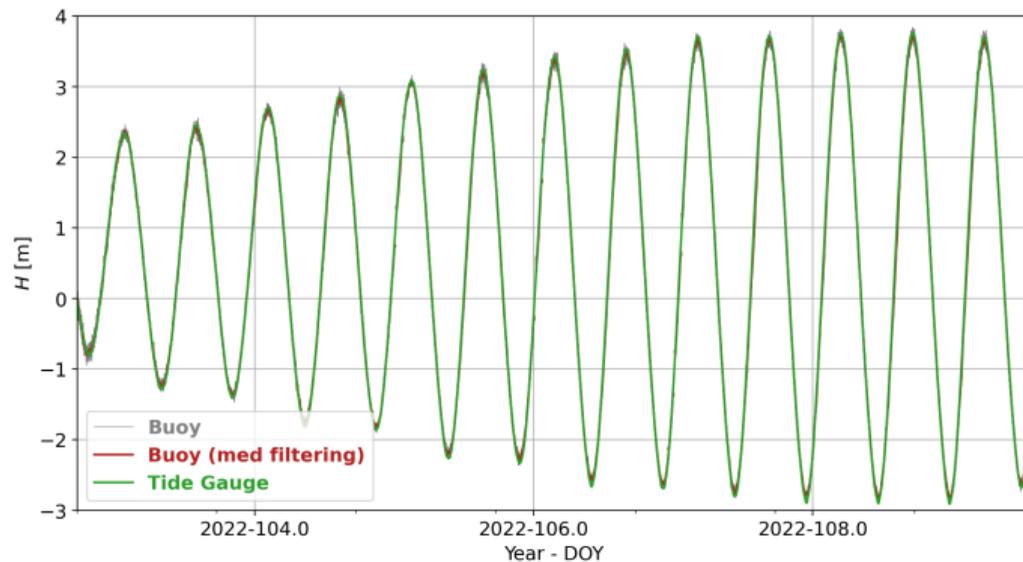
Backup slides

## Variations des positions quotidiennes



Variations des positions verticales instantanées (RMS  $\sim 5$  cm)

SSH / Van de Casteele diagram



## References



G. V. Bennitt et al. "Operational Assimilation of GPS Zenith Total Delay Observations into the Met Office Numerical Weather Prediction Models". In: **Monthly Weather Review** 140 (2012), pp. 2706–2719. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00156.1.



M. Bevis et al. "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System". In: **Journal of Geophysical Research** 97 (1992), pp. 15787–15801.



O. Bock et al. "A high-quality reprocessed ground-based GPS dataset for atmospheric process studies, radiosonde and model evaluation, and reanalysis of HyMeX Special Observing Period". In: **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** 142 (2016), pp. 56–71. DOI: 10.1002/qj.2701.



P. Bosser et al. "Integrated water vapour content retrievals from ship-borne GNSS receivers during EUREC<sup>4</sup>A". In: **Earth System Science Data** 13.4 (2021), pp. 1499–1517. DOI: 10.5194/essd-13-1499-2021.



P. Bosser et al. "Routine Measurement of Water Vapour Using GNSS in the Framework of the Map-Io Project". In: **Atmosphere** 13.6 (June 2022), p. 903. DOI: 10.3390/atmos13060903.



G. Elgered et al. "Measuring regional atmospheric water vapor using the Swedish Permanent GPS Network". In: **Geophysical Research Letters** 24.21 (1997), pp. 2663–2666. DOI: 10.1029/97GL02798.

## References



G. Guerova et al. "Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe". In: **Atmospheric Measurement Techniques** 9.11 (2016), pp. 5385–5406. DOI: [10.5194/amt-9-5385-2016](https://doi.org/10.5194/amt-9-5385-2016).



D. Hadad et al. "Surface and Tropospheric Water Vapor Variability and Decadal Trends at Two Supersites of CO-PDD (Cézeaux and Puy de Dôme) in Central France". In: **Atmosphere** 9.8 (2018). DOI: [10.3390/atmos9080302](https://doi.org/10.3390/atmos9080302).



Philip J. Knight et al. "A low-cost GNSS buoy platform for measuring coastal sea levels". In: **Ocean Engineering** 203 (May 2020), p. 107198. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2020.107198](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107198).



Andreas Kriemeyer et al. "High Quality Zenith Tropospheric Delay Estimation Using a Low-Cost Dual-Frequency Receiver and Relative Antenna Calibration". In: **Remote Sensing** 12.9 (Apr. 2020), p. 1393. DOI: [10.3390/rs12091393](https://doi.org/10.3390/rs12091393).



D. Offler. **EIG EUMETNET GNSS Water Vapour Program : Products requirements document version 1.0**. Tech. rep. EUMETNET, 2010.



A. Panetier et al. "Investigation of shipborne GNSS ZTD retrieval processing parameters by simulation". In: **EGU General Assembly 2022**. Vienna, Austria, May 2022. DOI: [10.5194/egusphere-egu22-5237](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5237). URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03679131>.



P. Poli et al. "Forecast impact studies of zenith total delay data from European near real-time GPS stations in Météo-France 4DVAR". In: **Journal of Geophysical Research** 112 (2007), p. D06114. DOI: [10.1029/2006JD007430](https://doi.org/10.1029/2006JD007430).

## References

---



David J. Purnell et al. "Precise water level measurements using low-cost GNSS antenna arrays". In: **Earth Surface Dynamics** 9.3 (June 2021), pp. 673–685. DOI: [10.5194/esurf-9-673-2021](https://doi.org/10.5194/esurf-9-673-2021).