



© N. Gravier

Le programme MAP-IO et son volet GNSS pour l'observation de la vapeur d'eau sur les Océans Austral et Indien

Coloque G2 2024 – 18/03/2024

Pierre Bosser⁽¹⁾, Pierre Tulet⁽²⁾, Aurélie Panetier^(1,3)

(1) Lab-STICC (UMR 6285) / ENSTA Bretagne, Brest, France

(2) LAERO (UMR 5560) / Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, France

(3) IPGP (UMR 7154) / IGN, Paris, France



1 Le programme MAP-IO

MAP-IO, *Marion Dufresne Atmospheric Programme - Indian Ocean*

[Tul+24]



D'accès difficile, les Océans Austral et Indien sont les océans les moins étudiés au monde.

- Changement climatique : quelle évolution du puits de carbone austral (40% de l'absorption océanique globale), du transport des aérosols et de l'ozone ?
- Problème pour la prévision météorologique, les modèles climatiques et la calibration des systèmes spatiaux en raison du manque d'observation (vapeur d'eau entre autres)

Labellisé par la CNFH (2021-2024) et bénéficiant du FEDER, le programme **MAP-IO** vise à palier ce manque d'observation :

- Mise à profit de la plateforme que constitue le Marion-Dufresne
- Déploiement d'un ensemble d'instruments in-situ et de télédétection pour l'étude de l'atmosphère et de l'océan

Trois objectifs principaux:

- 1 Bancarisation de données pour les études de processus atmosphériques et océanographiques
- 2 Validation et la calibration des capteurs spatiaux et des modèles de PNT
- 3 Suivi des changements globaux sur les océans Indien et Austral

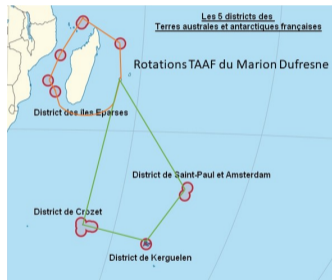
MAP-IO, Marion Dufresne Atmospheric Programme - Indian Ocean

[Tul+24]



Les points forts du programme :

- Observation régulière d'une région peu documentée lors des 4 opérations portuaires des TAAF (OP) annuelles (120 jours / an)
→ Variabilité intra-saisonnière, tendances et évolutions climatiques
- Mesures additionnelles aux campagnes de la FOF (200 jours / an)
- 18 Instruments autonomes pour l'observation de 20 paramètres biologiques, atmosphériques et océaniques.



Le personnel de l'OSUR assure l'entretien du matériel lors des escales à La Réunion.
Possibilité d'embarquement pour les partenaires lors des OP et de certaines campagnes.



2 Mesure de la vapeur d'eau par GNSS depuis le Marion Dufresne

Mesure de la vapeur d'eau par GNSS



Météorologie/climatologie par GNSS :

- Pour la **détermination précise des coordonnées** ($\lesssim 10$ mm), nécessité d'estimer le **retard à la propagation dans la troposphère** (*ZTD*) au même titre que la position.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (\text{m})$$

- *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 :

$$IWV = Q(T_m) \times ZWD \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$$

T_m : température moyenne de la colonne atmosphérique humide

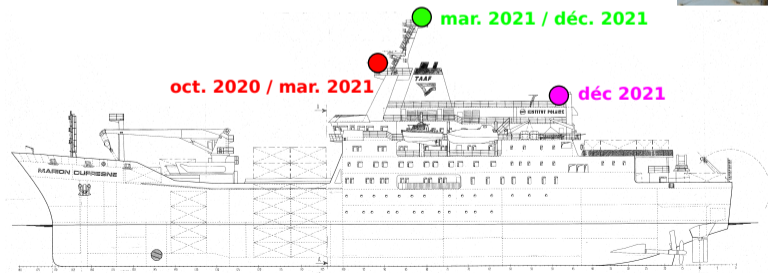
- **Précision 0.5–1.5 kg·m⁻² IWV** (3–10 mm ZTD) en **statique** et **temps différé** [Gue+16]
- **Précision 1–3 kg·m⁻² IWV** (6–20 mm ZTD) sur un **porteur marin** [Bos+21; Bos+22; Pan23]

Dispositif expérimental

[Bos+22; Tul+24]



- Première antenne installée en octobre 2020
- 3 positions successives; changements liés à des problèmes d'interférence (radar, iridium).
- Données archivées sur navire, diffusées à une cadence journalière (fin 2020) puis horaire (début 2023).



Analyse des données

[Bos+22; Pan+23]



L'analyse routinière est actuellement effectuée à l'aide de Gipsy-Oasis v6.4 en mode PPP-AR, avec une stratégie optimisée pour un porteur marin mobile.

Initialement, 3 solutions :

- Calcul **repro**, sur 9 mois en 2021–2022 (pour validation), avec les produits finaux du JPL
 - Solution à 30 s
 - Conversion ZTD/IWV à partir des réanalyses ERA5
- Calcul **ultra**, routinier, à J+1, depuis mars 2021, avec les produits ultra-rapid du JPL
 - Solution à 300 s
 - Conversion ZTD/IWV à partir des mesures météo in-situ
- Calcul **rapid**, routinier, à J+3, depuis mars 2021, avec les produits rapid du JPL
 - Solution à 30 s
 - Conversion ZTD/IWV à partir des mesures météo in-situ

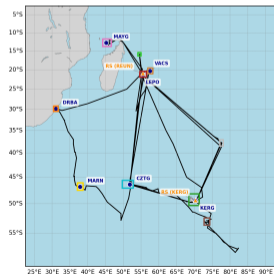
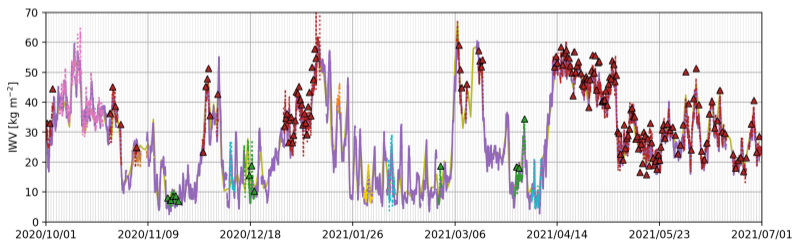
Validation des mesures

[Bos+22]



Validation des **mesures GNSS embarquées (repro)** sur la période octobre 2020 - juin 2021.

- Antennes GNSS terrestres: **Crozet**, **Kerguelen**, **Marion & Prince Edouard**, **La Réunion**, **Mayotte**, **Maurice**, **Durban** [RMS $\sim 1-3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
- Radiosonde: **La Réunion** (\blacktriangle), **Kerguelen** (\blacktriangle) [RMS $\sim 3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
- Réanalyse climatique globale **ERA5**: TCWV (0.25° , 1 h) [RMS $\sim 3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$]



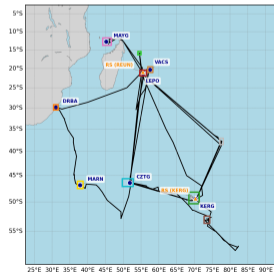
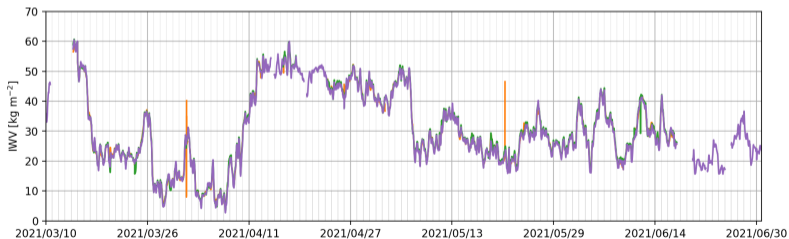
Validation du calcul routinier

[Bos+22]



Validation du **calcul routinier** la période mars - juin 2021 ; données manquantes <10%.

- **Analyse GNSS de référence** des données acquises en mer (@ 30 s)
 - Routinier, **ultra** (J+1, IWV @ 300 s) [RMS ~ $1.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
 - Routinier, **rapid** (J+3, IWV @ 30 s) [RMS ~ $0.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
- Résultats routiniers diffusés quotidiennement (AERIS)

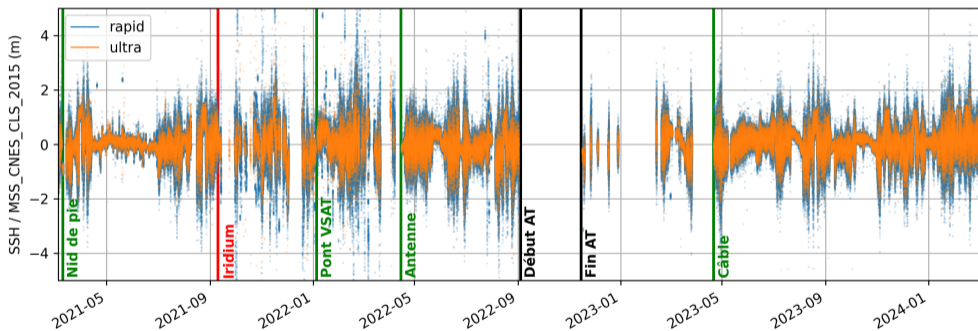


Calcul routinier sur 3 ans (mars 2021 – mars 2024)

SSH



(Quicklooks des 30 derniers jours visibles sur : <https://www.ensta-bretagne.fr/bosser/processing>)

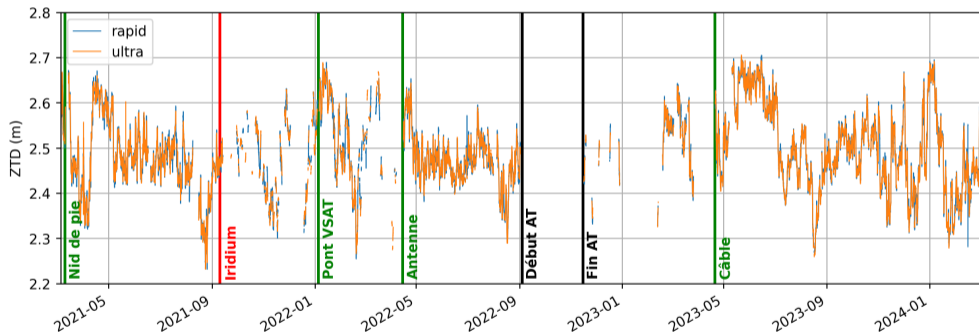


Calcul routinier sur 3 ans (mars 2021 – mars 2024)

ZTD



(Quicklooks des 30 derniers jours visibles sur : <https://www.ensta-bretagne.fr/bosser/processing>)



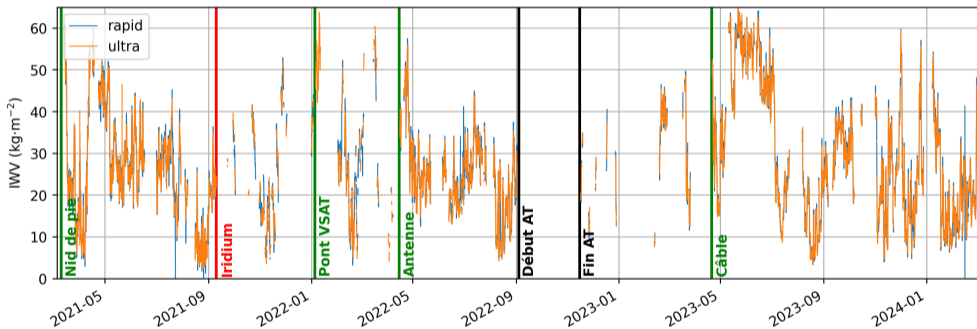
Données disponibles sur 67% de la période

Calcul routinier sur 3 ans (mars 2021 – mars 2024)

IWV



(Quicklooks des 30 derniers jours visibles sur : <https://www.ensta-bretagne.fr/bosser/processing>)



Données disponibles sur 52% de la période



3 Vers une mesure en temps quasi-réel

Calcul PPP en temps quasi-réel



Contexte :

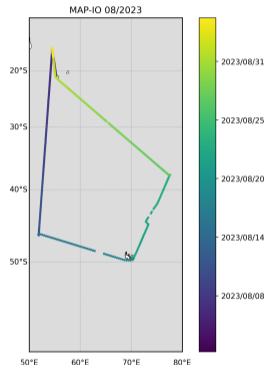
- Pour la prévision numérique du temps, une mise à disposition des ZTD/IWV GNSS à h+30min est nécessaire.
- Les données GNSS sont mises à disposition à une cadence horaire à h+15min depuis début 2023.

→ Évaluation d'un calcul NRT (*Near Real-Time*) en été 2023 lors de l'OP2 TAAF de 2023

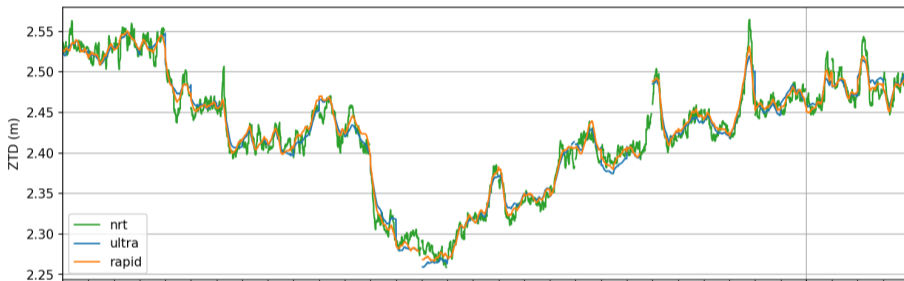
Calcul multi-GNSS (GRE) avec GipsyX 2.0 en mode PPP :

- Calcul horaire sur 24h, résolution temporelle de 30 s
- Utilisation des produits GDGPS à 1 Hz mis à disposition par le JPL et mis à jour avec une latence inférieure à 10 s

Exactitude recherchée pour la PNT régionale : $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ($\sim 15 \text{ mm ZTD}$) à 30 min

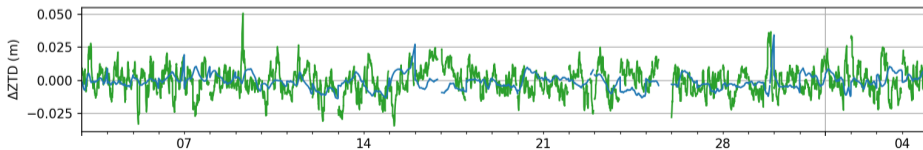


Évaluation de la solution troposphérique en temps quasi-réel



ultra vs rapid
 -1.0 ± 5.4 mm

nrt vs rapid
 -0.7 ± 10.3 mm



sept.
2023



4 Conclusion

Conclusion



- Concept du programme validé, avec 18 instruments opérationnels pour des mesures routinières
- Volet GNSS:
 - Calculs routinier à J+1 et J+3 validés et pleinement opérationnels ; disponibilité de l'ordre de 70% sur la période
 - Calcul NRT possible et validé sur une OP ; confrontation aux analyse et prévision Arpège en cours (RDV à l'EGU !)
→ Chaîne d'assimilation à adapter si intérêt de Météo-France.
- Programme ouvert à tout nouveau participant ! Quelques conditions :
 - Autonomie de l'instrument
 - Maintenance de l'instrument
 - Participation financière au programme en attente d'un financement pérenne (~1–3K€ / an / labo pour entretien, moyens informatiques, etc.)
- Labellisation du programme en cours (Instrument National ACTRIS-FR ?), insertion des instruments dans SNO.



Références



P. Bosser et al. “Integrated water vapour content retrievals from ship-borne GNSS receivers during EUREC⁴A”. 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. 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.



A. Panetier et al. “Sensitivity of Shipborne GNSS Estimates to Processing Modeling Based on Simulated Dataset”. In: **Sensors** 23.14 (2023). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s23146605.



A. Panetier. “GNSS Embarqué sur Porteur Marin pour l’Observation de la Vapeur d’Eau Atmosphérique en Mer”. PhD thesis. ENSTA Bretagne, 2023.



P. Tulet et al. “MAP-IO, an atmospheric and marine observatory program onboard Marion Dufresne over the Southern Ocean”. In: **Earth System Science Data Discussions** 2024 (2024), pp. 1–43. DOI: 10.5194/essd-2023-531.