MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

cnes
CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

Estimation du niveau de la mer par réflectométrie interférométrique GNSS avec filtre de Kalman

***Alvaro Santamaría**, CNES/GET, Toulouse, France* *alvaro.santamaria@cnes.fr*
Aurélien Pira, ULR/LIENSs, La Rochelle, France
Guy Wöppelmann, ULR/LIENSs, La Rochelle, France

PARTENAIRE SCIENCE COMES TO TOWN
Financé par l'Union européenne

MARINE NATIONALE 400 ANS

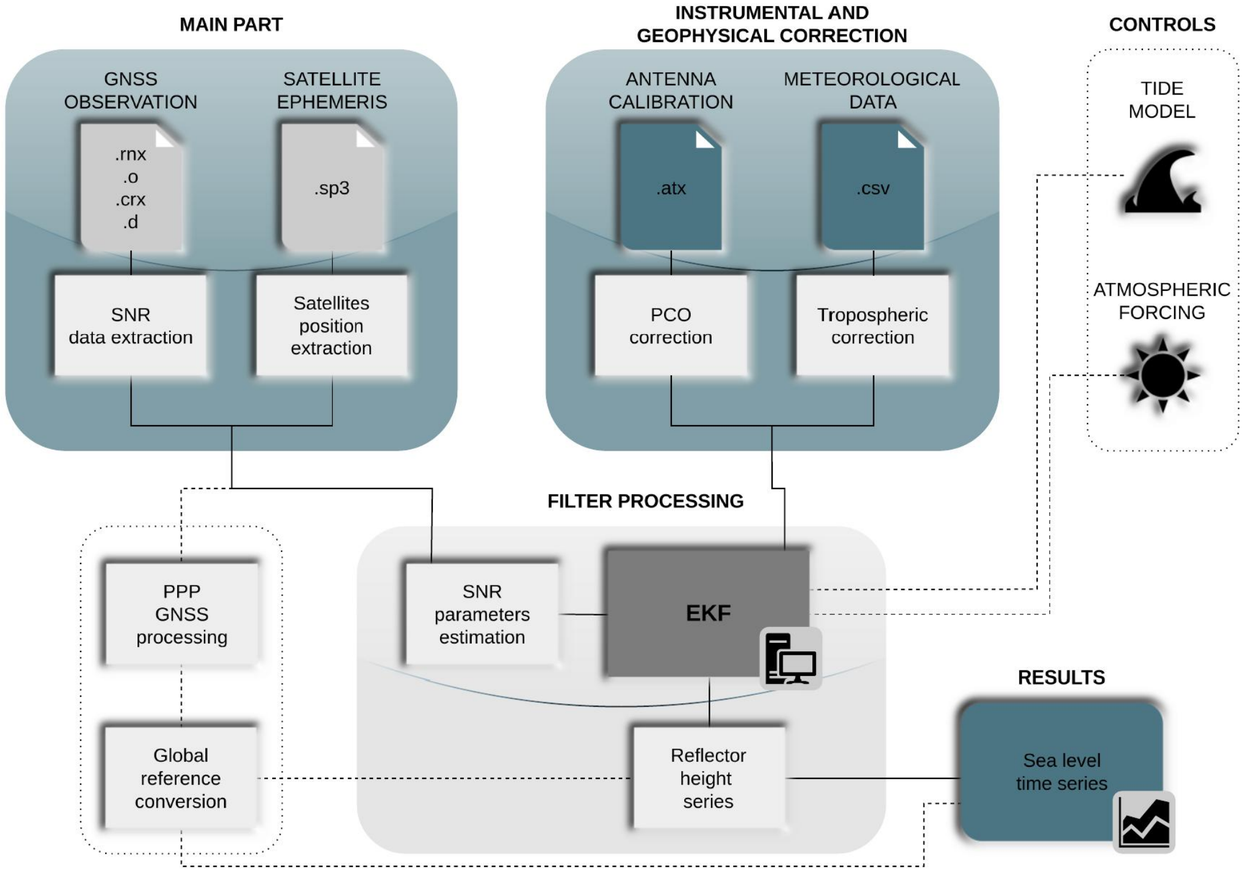
Alvaro SANTAMARIA
CNES

Structure de l'algorithme

Entrées:
- Lecture des fichiers RINEX, extraction et élimination de la tendance des mesures SNR, calcul approximatif des coordonnées de l'antenne, calcul de l'élévation et azimut des satellites observés, contrôle de qualité (duration de l'arc, plage d'élévation et d'azimut, etc), sélection de l'échantillonnage SNR.
- Interpolation des données météorologiques (température, pression, humidité) et calcul de la correction troposphérique, extraction des corrections de centre de phase.
- Calcul de la prédiction de marée et interpolation des données du forçage atmosphérique (pression, vent).

Traitement:
- Calcul de l'état initial de l'oscillation SNR, du bruit du processus et du bruite de mesure pour chaque arc SNR.
- Lancement du filtre et du lissage.

Sortie:
- Série de hauteur de la surface de l'eau au échantillonnage temporel choisi et par rapport au point de référence de l'antenne GNSS.



Alvaro SANTAMARIA
CNES

REFLECTOR HEIGHT (RH)

$$RH = \frac{fo \cdot \lambda}{2}$$

SNR OBSERVATION EQUATION

(Bilich and Larson, 2008 ; Larson et al., 2008)

$$SNR_{(t,arc)} = A_{(t,arc)} \cdot \sin\left[2 \cdot \pi \cdot fo_{(t,arc)} \cdot \sin\left(\varepsilon_{(t,arc)}\right) + \varphi_{(t,arc)}\right]$$

$$SNR_{(t,arc)} = A_{(t,arc)} \cdot \sin\left[\frac{4 \cdot \pi \cdot RH_{(t)} + \Delta PCO_{(arc)}}{\lambda_{(arc)}} \cdot \sin\left(\varepsilon_{(t,arc)}\right) + \varphi_{(t,arc)}\right]$$

Common estimated variable

RH : reflector height

For all simultaneous SNR measurements

Specific estimated variable

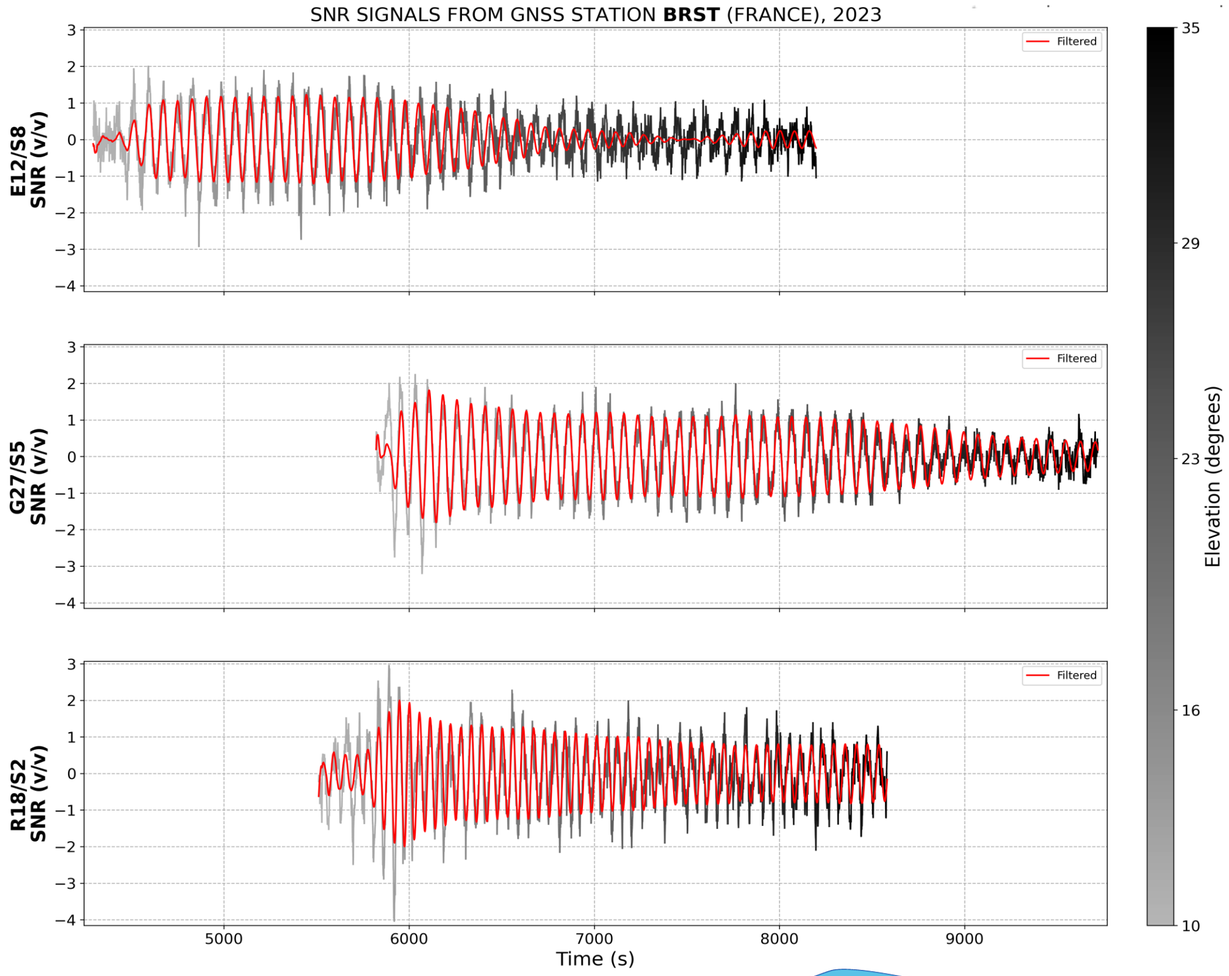
A : amplitude

φ : initial phase (constant)

Specific unestimated variable

ε : corrected elevation (Bennett, 1982)

For each SNR arc



Alvaro SANTAMARIA
CNES

Considérations pratiques de l'algorithme

- S'agissant d'un filtre qui estime un état dynamique, l'échantillonnage de la solution obtenue est un choix de l'utilisateur. Ça peut être celui des mesures SNR enregistrées ou pas. S'il y a des mesures disponibles à l'échantillonnage choisi, le filtre fera une assimilation des mesures, sinon il fera une prédiction à partir de l'état dynamique connu et de sa covariance.

- En mode post-traitement, le filtre permet de calculer des séries longues par blocs d'une journée et en enchainant l'état dynamique d'un jour au suivant.
  Le mode post-traitement permet aussi de lancer le lissage vers l'arrière pour améliorer la convergence du filtre lors de la première journée si besoin (optionnel).

- La phase initiale de l'oscillation SNR est estimée au début de chaque arc SNR et cette valeur est fortement contrainte lors du déroulement du filtre.
  Une erreur sur l'estimation de la phase initiale peut potentiellement affecter la qualité de la solution du filtre, mais c'est facile de détecter en mode post-traitement.
  Le besoin d'estimer la phase initiale établie une limite d'élévation plus basse pour les arcs SNR des satellites descendants.

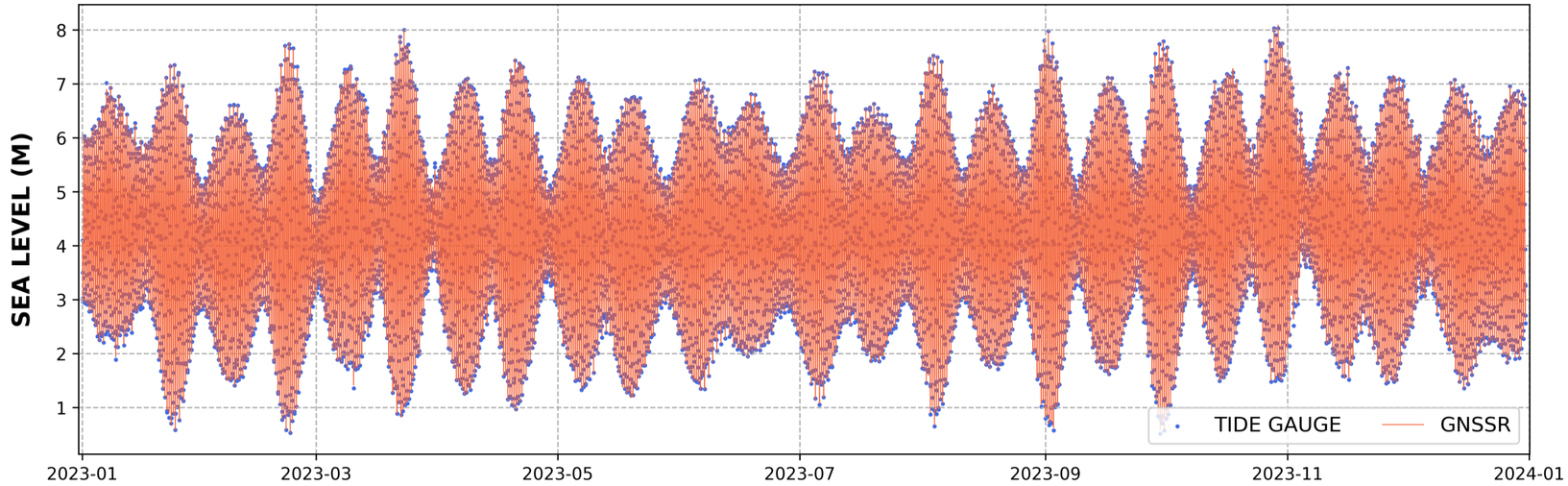
- Les corrections PCO sont optionnelles, mais généralement recommandées. La plupart des antennes GNSS géodésiques ont des variations des PCO par fréquence de seulement quelques mm; le pire cas a une différence de 6 cm. Il peut y avoir aussi des erreurs de calibration des antennes GNSS. Pour certains sites, on a observé une dégradation de la solution quand les corrections PCO ont été appliquées.

- Les mesures SNR sont assez peu précises car très bruitées. La capacité du filtre pour détecter des variations de hauteur rapides dépend beaucoup du nombre d'arcs SNR simultanés et de leur qualité, c.-à-d., du nombre de constellations suivies, nombre de fréquences suivies, nombre d'antennes GNSS et du nombre des réflexions sur une grande surface d'eau autour de l'antenne GNSS.

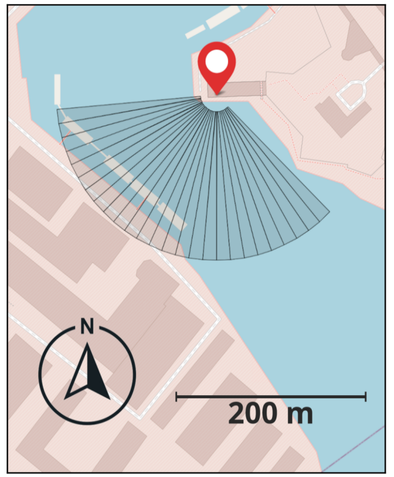
- Le filtre donne la solution optimale par rapport aux informations d'entrée. La qualité de la solution peut se dégrader si les informations d'entrée ne sont pas correctes. La disponibilité et la qualité des informations d'entrée dépendent de chaque site. En mode post-traitement, il est possible de tester plusieurs configurations par site pour trouver celle qui fonctionne le mieux en fonction des objectifs.

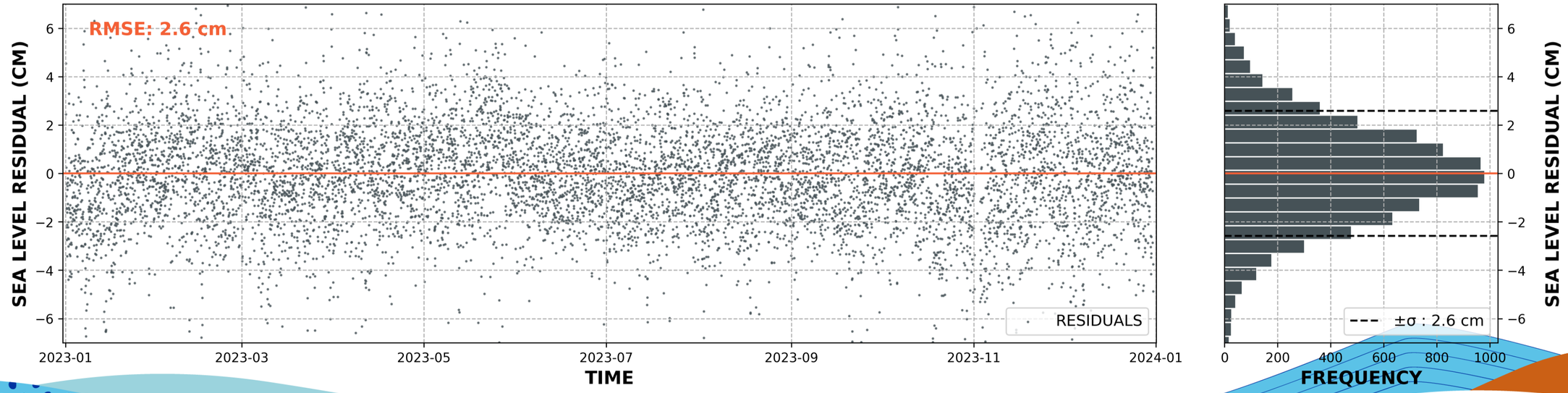
Alvaro SANTAMARIA
CNES

HOURLY SEA LEVEL TIME SERIES AT BRST (FRA), 2023



BRST GNSSR STATION

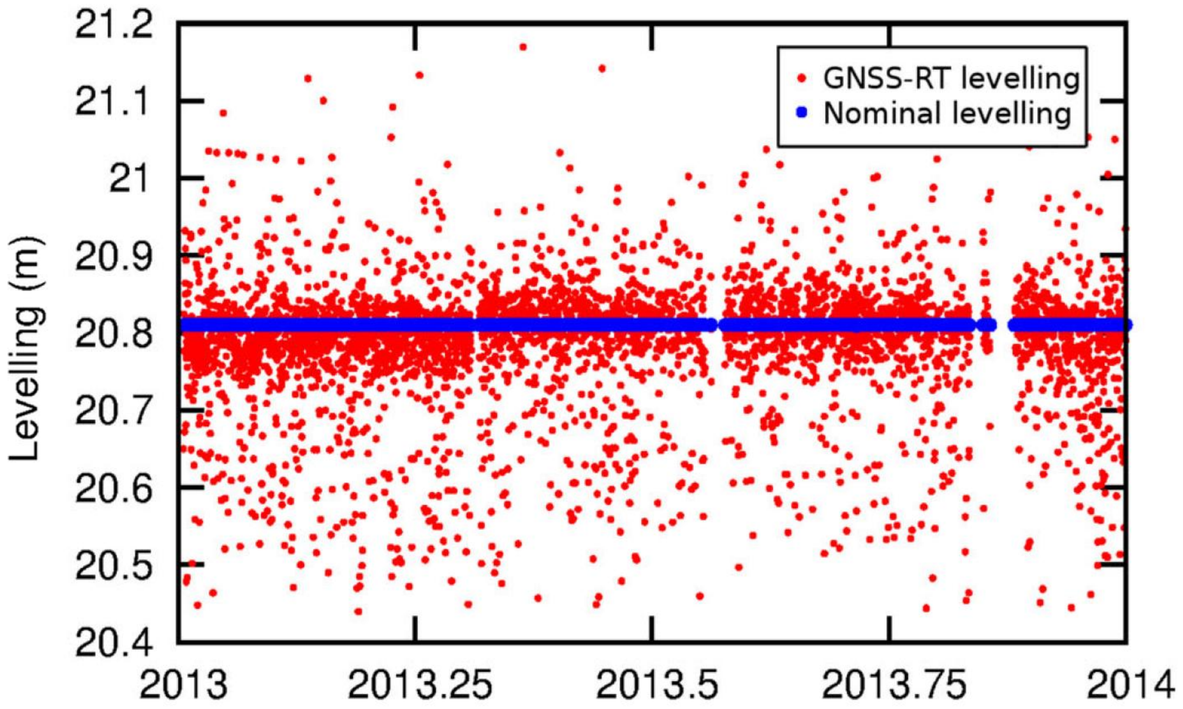




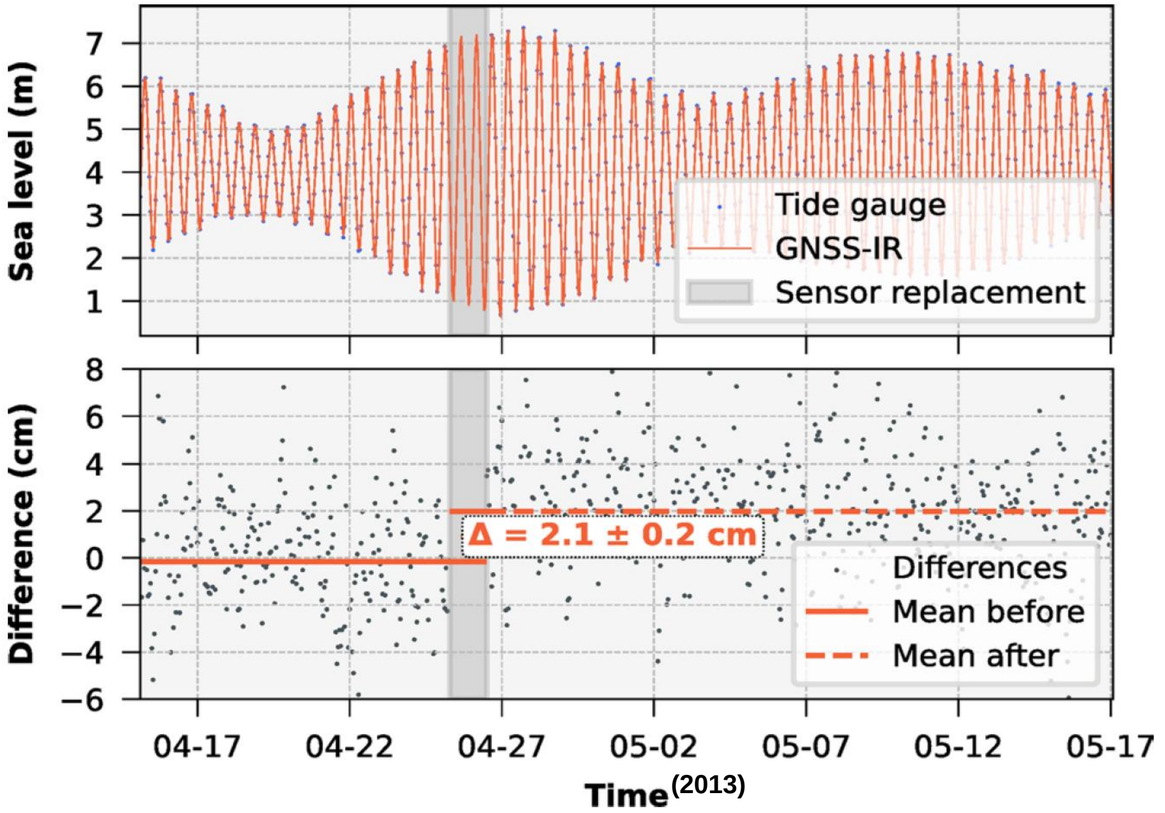
Alvaro SANTAMARIA
CNES

Exemple d'application: calibration du zéro du marégraphe

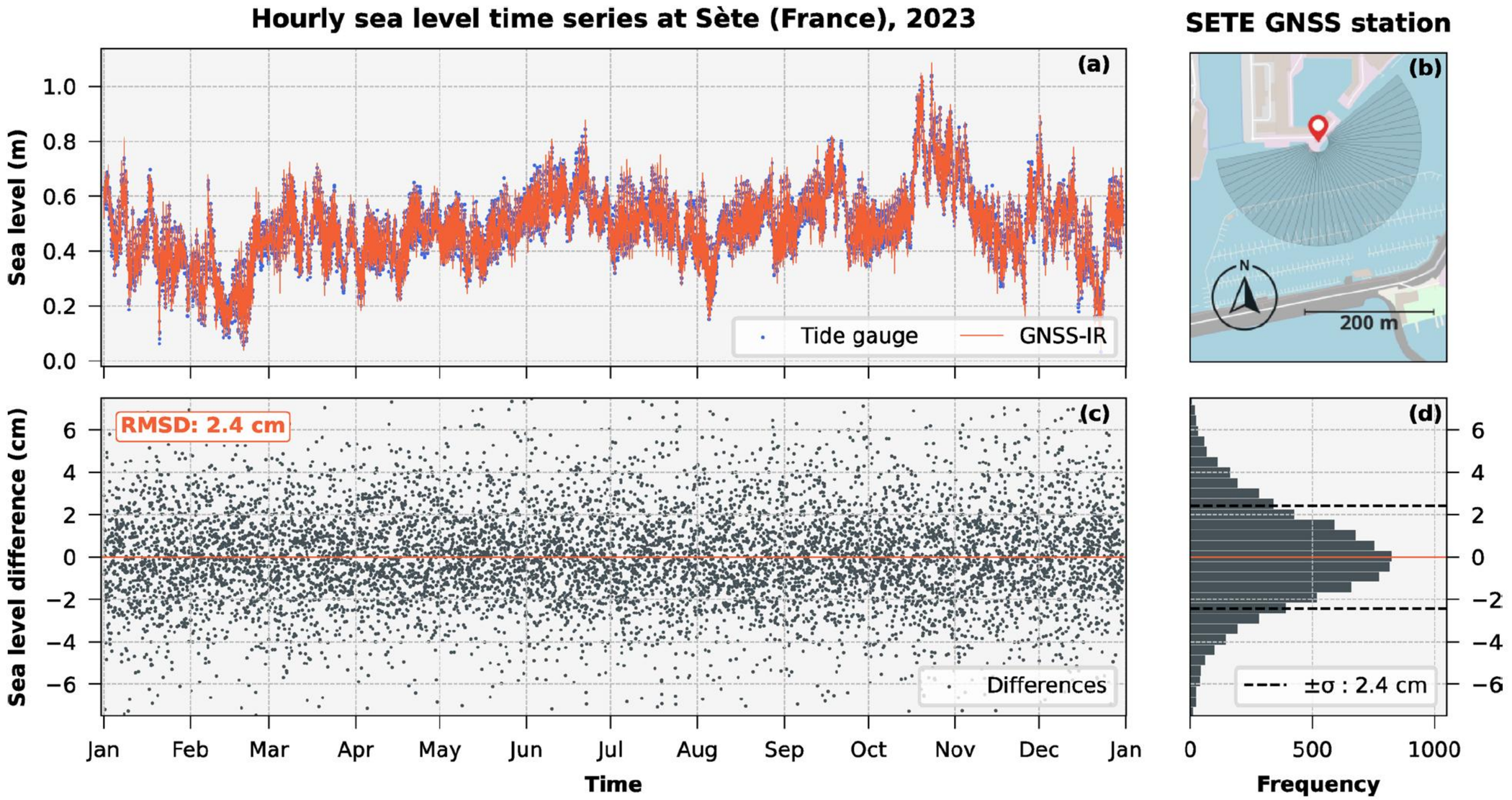
Santamaría-Gómez et al. (2015)



Pira et al. (2025)

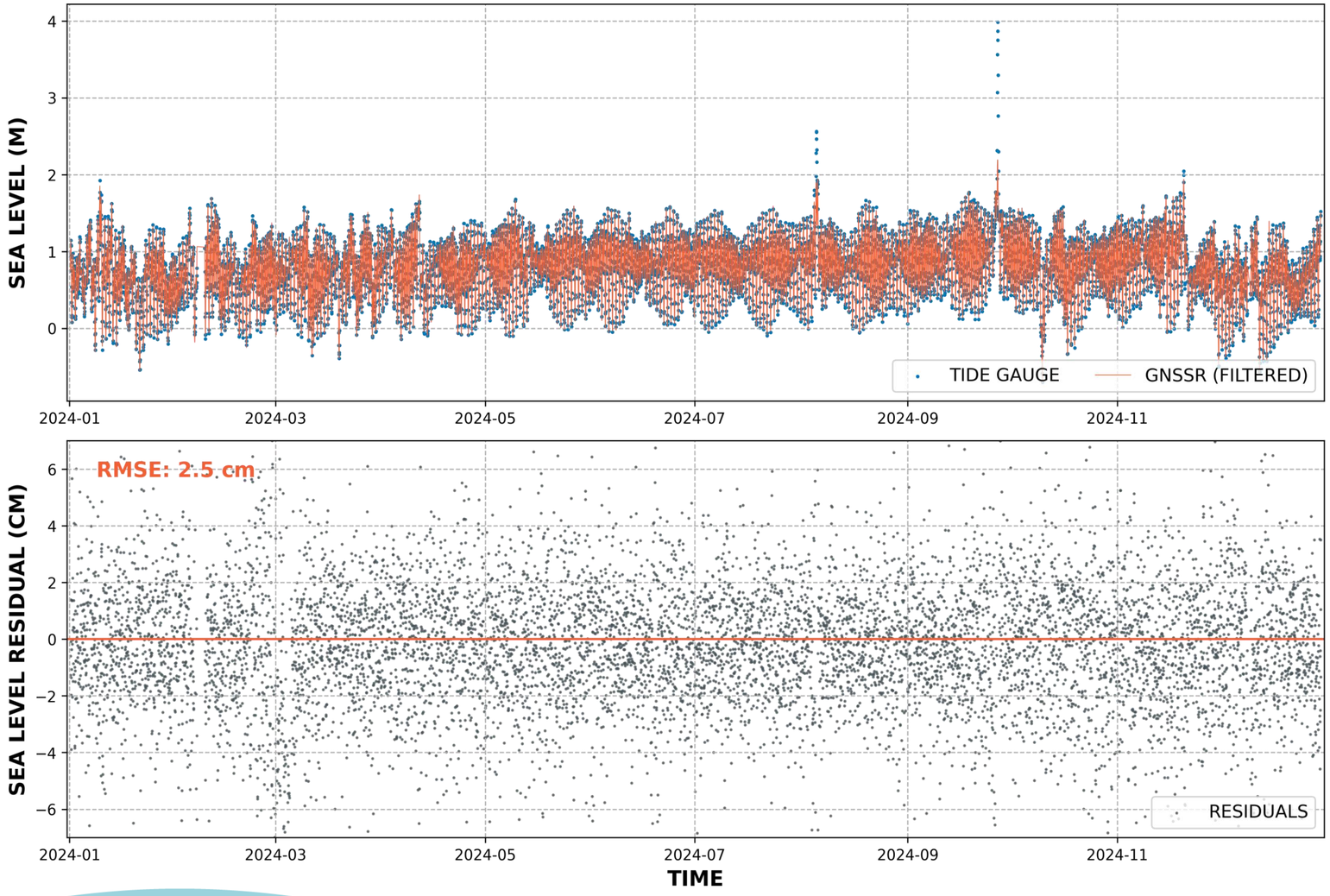


Alvaro SANTAMARIA
CNES

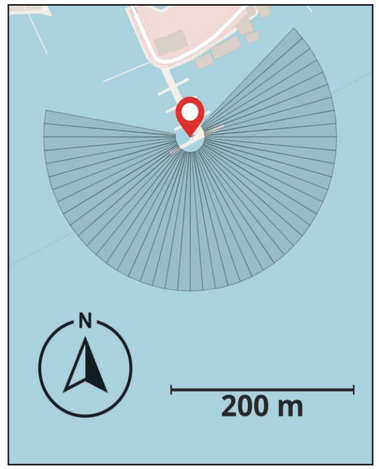


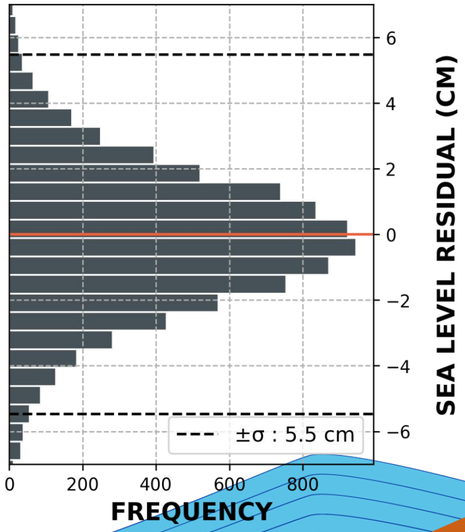
Alvaro SANTAMARIA
CNES

HOURLY SEA LEVEL TIME SERIES AT FLCK (USA), 2024



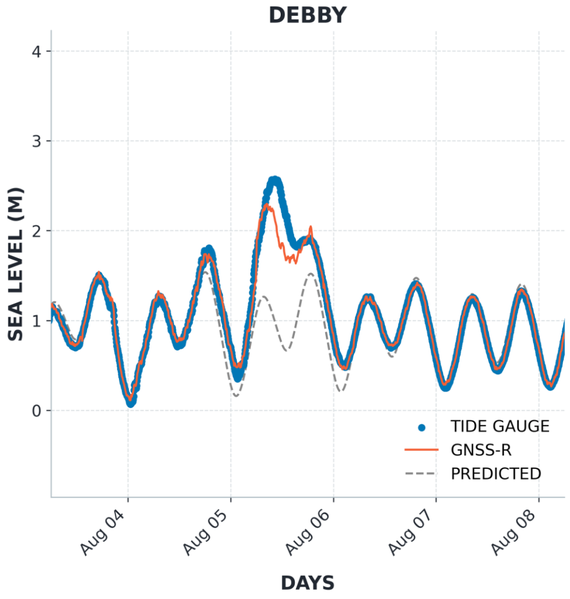
FLCK GNSSR STATION

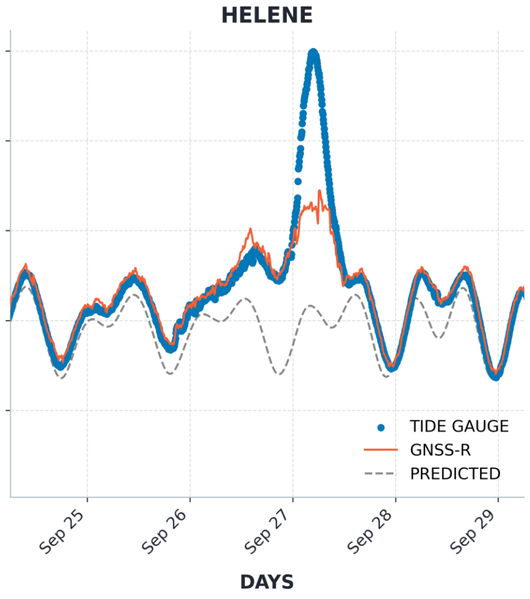


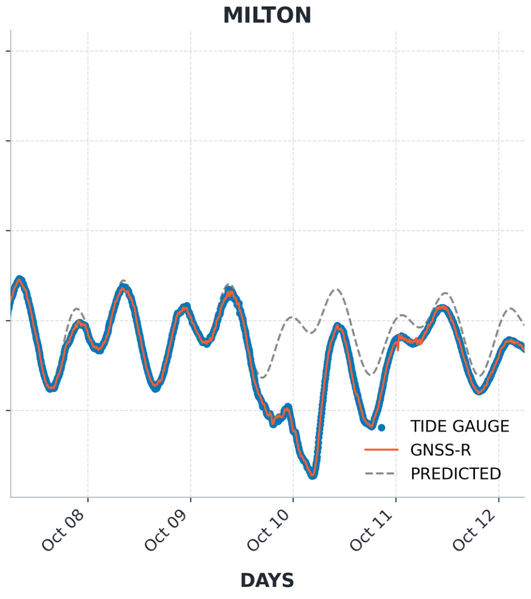


Alvaro SANTAMARIA
CNES

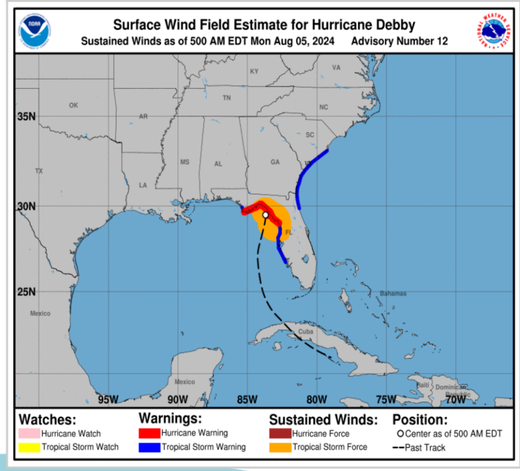
SEA LEVEL TIME SERIES AT FLCK DURING 2024 HURRICANES SEASON

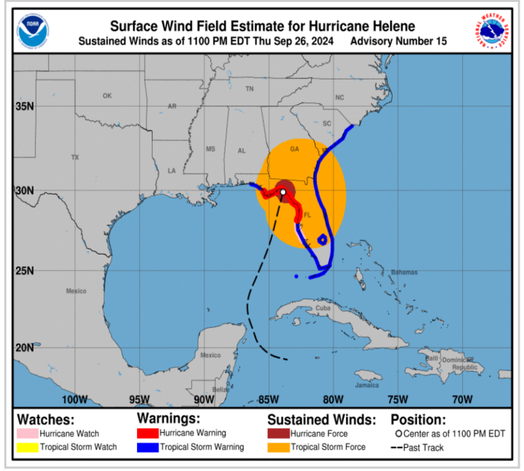


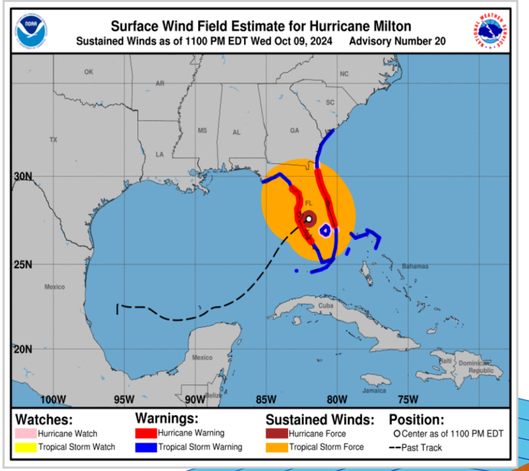




HURRICANE TRAJECTORY







Etat actuel et future de l'algorithme

La méthode et son implémentation ont été publiées (Pira et al., 2025 GPS Solutions).
Le code de l'algorithme qui a été développé n'est pas actuellement disponible. Une réécriture est en cours avec des améliorations (notamment la vitesse d'exécution) et des nouvelles fonctionnalités.
Cette méthode est en cours de développement par plusieurs groups en France et à l'étranger.

Perspectives d'amélioration en cours et à venir :

D'un point de vue des mesures SNR :

- Intégration des mesures SNR à partir des antennes horizontales, amélioration de la qualité de l'oscillation SNR, arcs SNR plus longs et plus optimales pour les satellites descendants.
- Intégration des mesures SNR à partir d'un ou plusieurs flux de données en temps réel (format NMEA ou RTCM) pour le suivi direct et pour les systèmes d'alerte.
- Intégration des mesures SNR simultanées de plusieurs antennes en proximité afin d'améliorer la précision de la hauteur de la surface moyenne ou le suivi de ses variations spatiales.

D'un point de vue du modèle ajusté :

- Intégration de paramètres empiriques pour corriger le délai troposphérique et produire des estimations de la pression de vapeur d'eau de la couche la plus proche de la surface de l'eau.
- Intégration d'autres contrôles pour améliorer la qualité de la prédiction du filtre comme la dynamique côtière et le forçage atmosphérique, notamment le vent.