Mesure du niveau marin par réflectométrie interférométrique GNSS - évaluation des méthodes fréquentielles.

Odilon J. Houndegnonto[1], Pierre Bosser[1], Gaël André[2], Clémence Chupin[1] & Ronan Autret[2]

[1]Lab-STICC/ENSTA, [2]Shom

Contexte et motivations

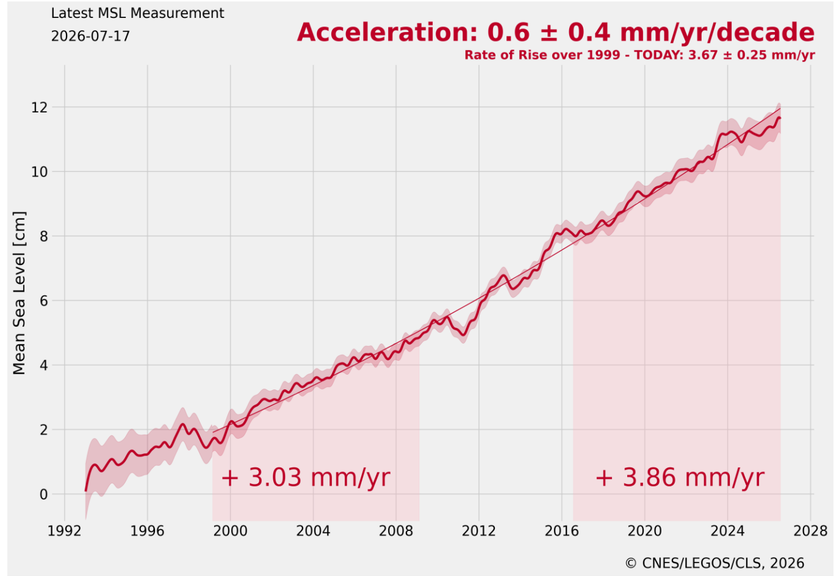
Le changement climatique provoque une élévation du niveau moyen des mers, accentuant la vulnérabilité des zones côtières et engendrant des impacts environnementaux et socio-économiques particulièrement significatifs:

- La submersion marine et destruction des logements.
- L'érosion côtière et destruction des infrastructures côtières (environ 20% des côtes françaises)
- Retrait de ligne de côte et destruction des structures de falaise côtière.
- Événements extrêmes de vague de Tsumani et de la houle.


Plage de l'Almanarre (Hyères, dep. Var, France.)


Soulac-Sur-Mer en Gironde, France.


Dégradation de voie en Thaïlande



Besoin de mesures continues et précises du niveau marin à faible coût et facile à déployer.

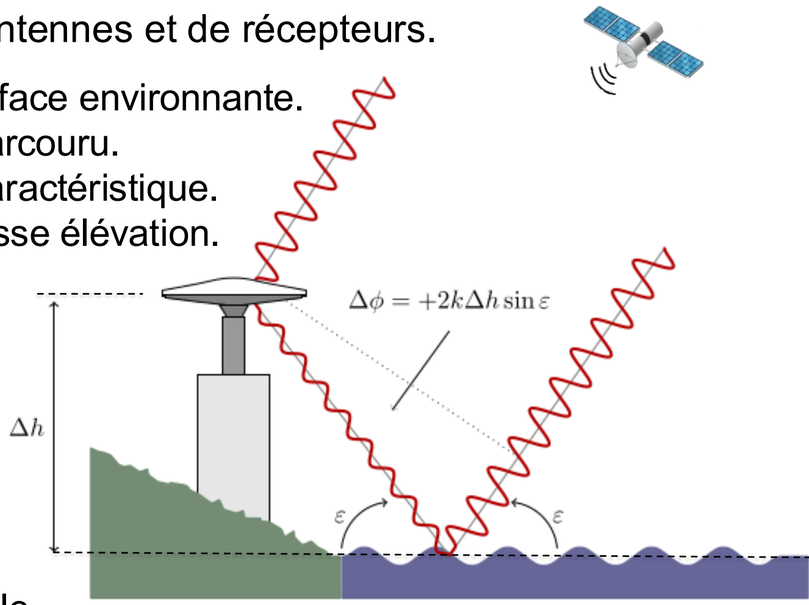
Complément aux marégraphes classiques pour la surveillance du niveau marin côtier et l'étude du climat.

La réflectométrie interférométrique GNSS (GNSS-IR) émerge comme une technique opportuniste prometteuse pour l'observation du niveau marin.

Principe de mesure du niveau marin par Réflectométrie Interférométrique GNSS

Les constellations GNSS sont destinées à du positionnement à travers des système de réseaux d'antennes et de récepteurs.

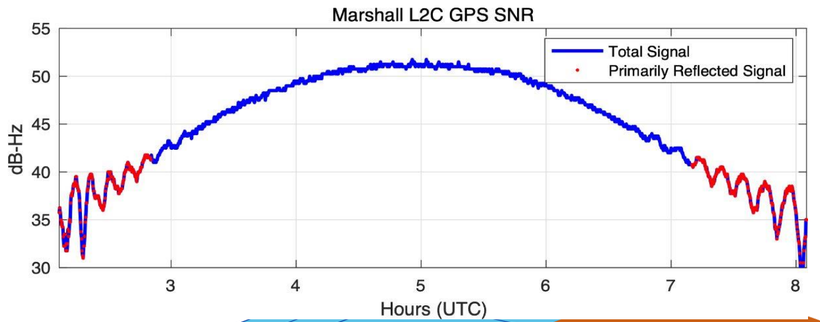
- Une antenne GNSS reçoit simultanément les signaux directs des satellites et ceux réfléchis par la surface environnante.
- Les **signaux réfléchis** ("*trajet multiple*") sont déphasés dû au chemin géométrique supplémentaire parcouru.
- La génération d'interférence entre signaux direct et réfléchis se traduit par un **signal-à-bruit (SNR)** caractéristique.
- La **hauteur antenne–surface réfléchissante** (Δh) module la fréquence des oscillations du SNR à basse élévation.



$$SNR = \overline{SNR} + \delta SNR \quad \Longrightarrow \quad \delta SNR = A\sin\left(\frac{4\pi\Delta h}{\lambda}\sin\epsilon + \phi\right) \quad \Longrightarrow \quad f_{\sin\epsilon} = \frac{2\Delta h}{\lambda}$$

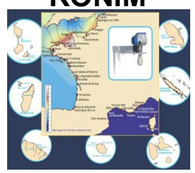
La détermination de Δh permet d'estimer la variation du niveau marin au voisinage de l'antenne GNSS.

La présence généralisée d'antennes GNSS sur les côtes rend cette technique particulièrement accessible.

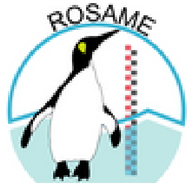


Réseaux actifs dans le déploiement d'antenne GNSS pour l'observation du niveau marin.

RONIM



ROSAME



SONEL

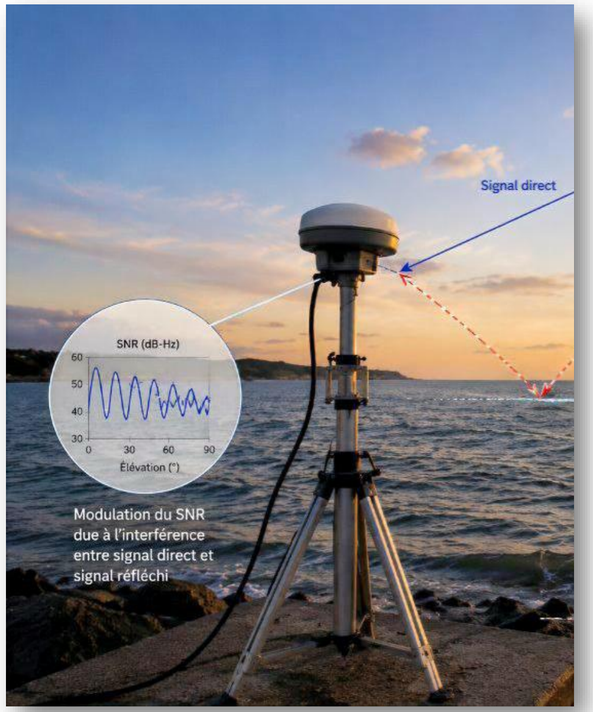
National Oceanography Centre — Permanent Service for Mean Sea Level

GLOSS — Global Sea Level Observing System

Objectifs de l'étude

La mesure du niveau marin par réflectométrie interférométrique GNSS (IGNSS-R) repose sur deux types de méthodes:

Méthode d'analyse fréquentielle du SNR **&** **Méthode de modélisation inverse du SNR**



Détermination de la hauteur antenne–surface réfléchissante (Δh) par analyse fréquentielle des oscillations du SNR en fonction du sinus de l'angle d'élévation du satellite, dans l'empreinte azimutale de la surface cible d'intérêt.

Évaluation de la méthode spectrale GNSS-IR sur plusieurs stations permanentes françaises colocalisées avec des marégraphes (Brest, Saint-Jean-de-Luz, Marseille), en analysant: ses performances, ses limites et ses écarts par rapport aux mesures de marégraphe de référence.

Données et outils d'analyse

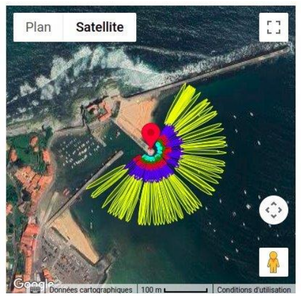
Gnssrefl: package python pour la GNSS-IR (Roesler & Larson, 2018; K. Larson, 2024)

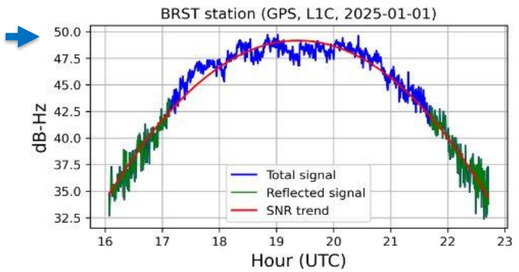
- Extraction du SNR des fichiers RINEX avec cartographie caractéristique de la surface cible.
- Traitement du SNR avec extraction de oscillation par arc de satellite.
- Détermine la fréquences de Nyquist GNSS-IR par **Périodogramme de Lomb-Scargle** (LSP).
- Contrôle de qualité et estimation de la **hauteur antenne–surface réfléchissante** (Δh).
- Régression par ***splines cubiques*** et série temporelle du niveau marin local.

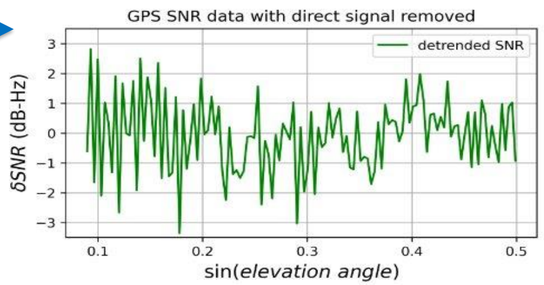
Les données de marégraphe proviennent de la base de données Shom (https://data.shom.fr/)

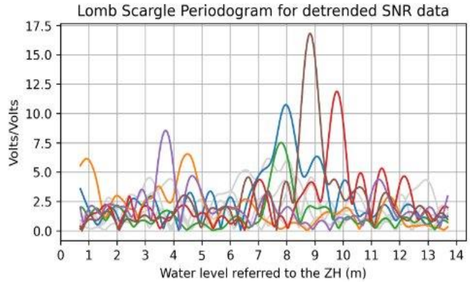
Les données GNSS proviennent de la base de données SONEL (https://www.sonel.org/)

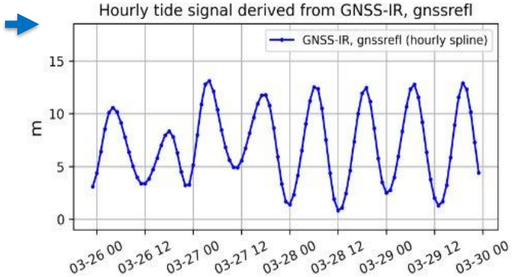
Station	Brest (brst)	Saint Jean de Luz (scoa)	Marseille (mars)
Caractéristiques de la station GNSS et du marégraphe			
Antenna height	2.0431 m	0 m	0.0685 m
Ellipsoid height	65.79 m	59.486 m	61.811 m
Zero hydrographic	47.03 m	46.6 m	48.60 m
Gnssrefl : paramètres et configuration			
Frequencies	**GPS : L1 & L2C ; GLONASS : L1 & L2 ; GALILEO: L1 & L5**		
Azimuth (mask)	120° to 250°	0° to 240°	140° to 280°
Elevation angle (e)	12° to 20°	5° to 25°	4° to 10°
Min SNR amplitude	6	5	6
Peack2noise	2.8	2.8	1.5
Priori height range	10 m to 20 m	5 m to 15 m	9 m to 15 m
Period (DOY)	2021: 01 to 92	2021: 161 to 253	2022: 274 to 365



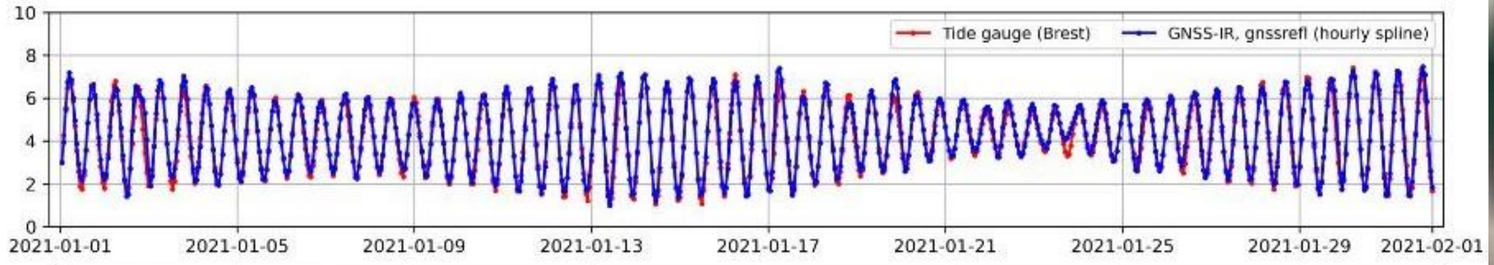


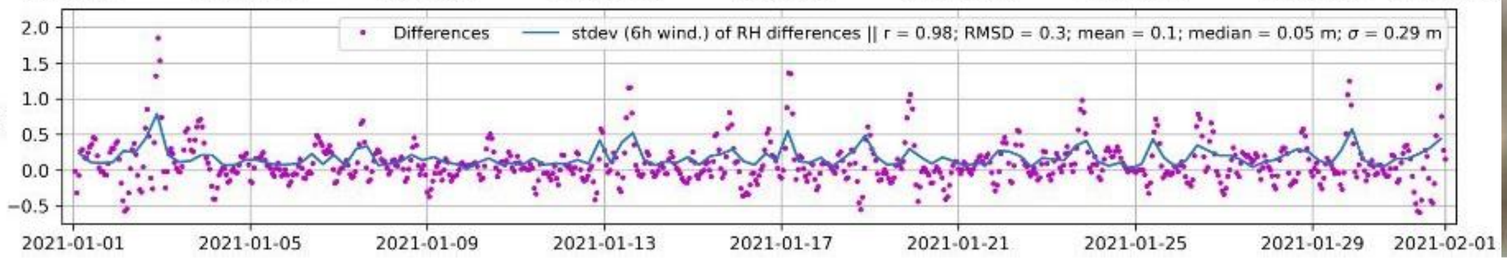


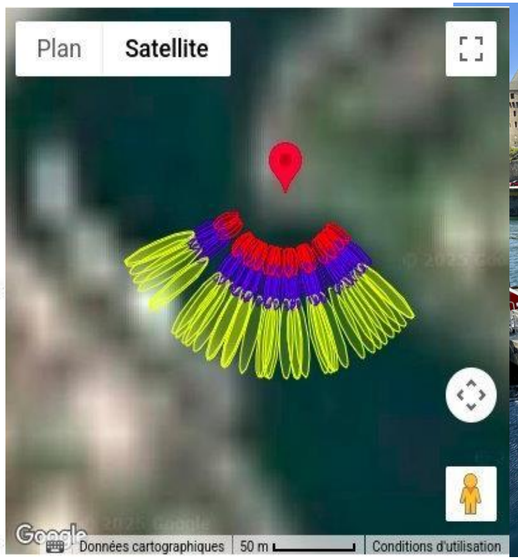




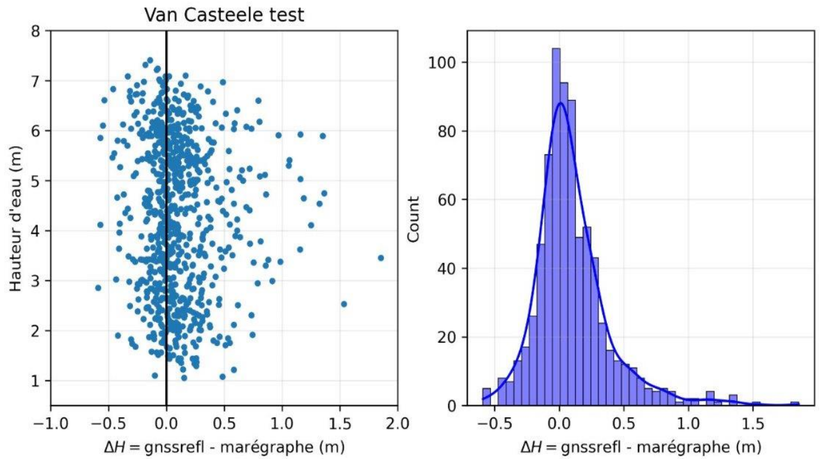
Application à la station de marégraphe de Brest







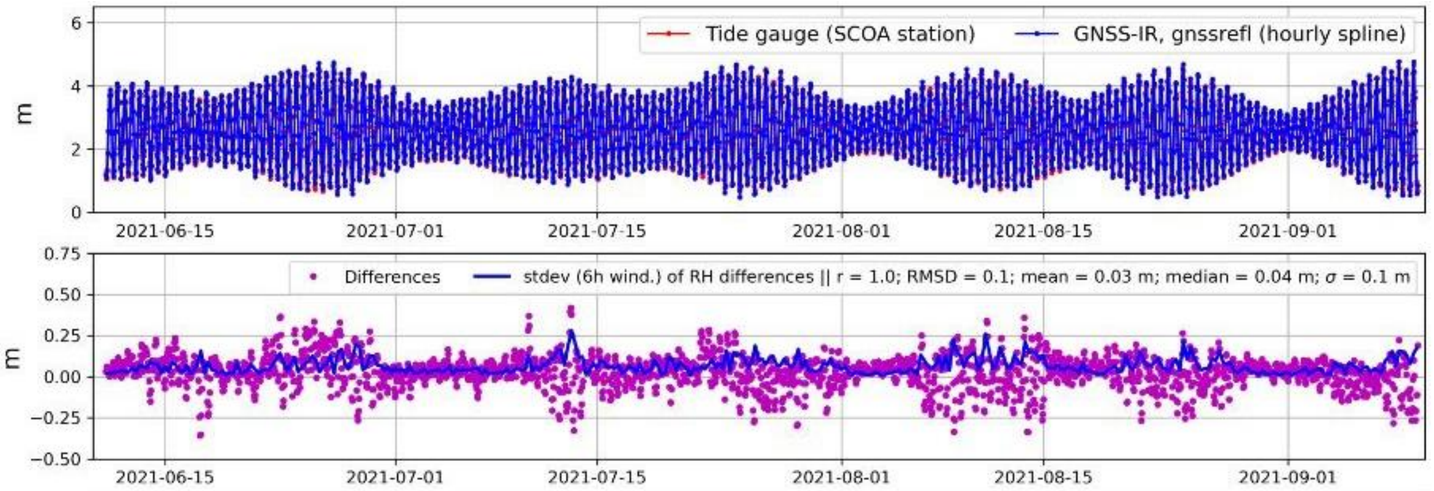


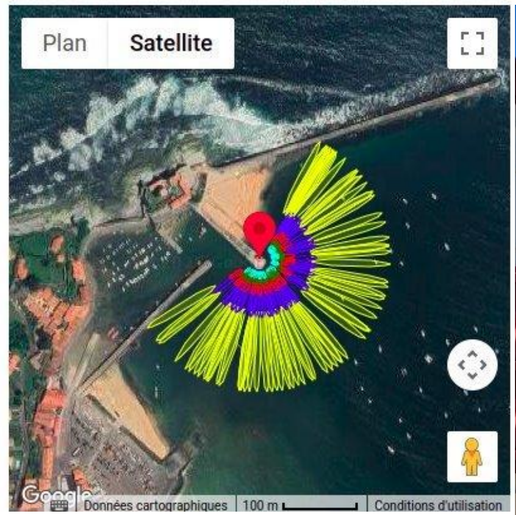


Cycle de marée bien reproduit, avec de légers écarts sporadiques:

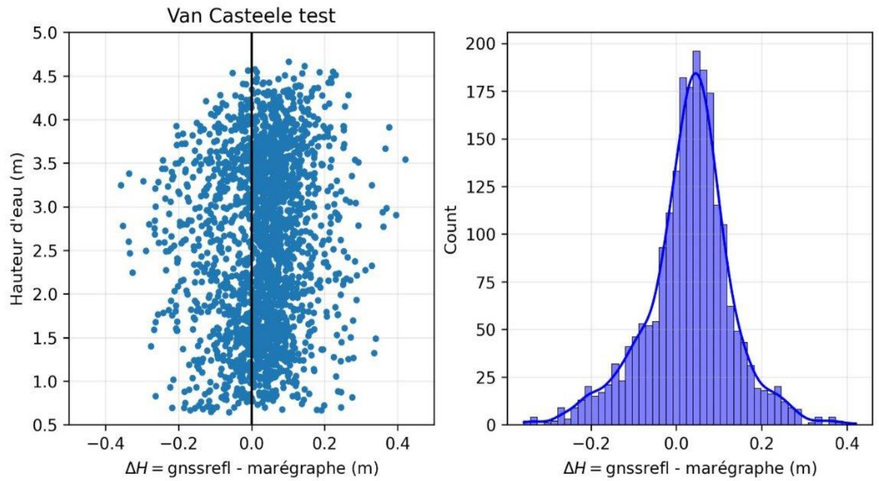
- Très forte concordance entre les séries (r=0.98), avec une différence moyenne de 10 cm, traduisant une dispersion des différence de l'ordre de 29 cm (RMSE = 30 cm).

Application à la station de marégraphe de Saint-Jean-de-Luz





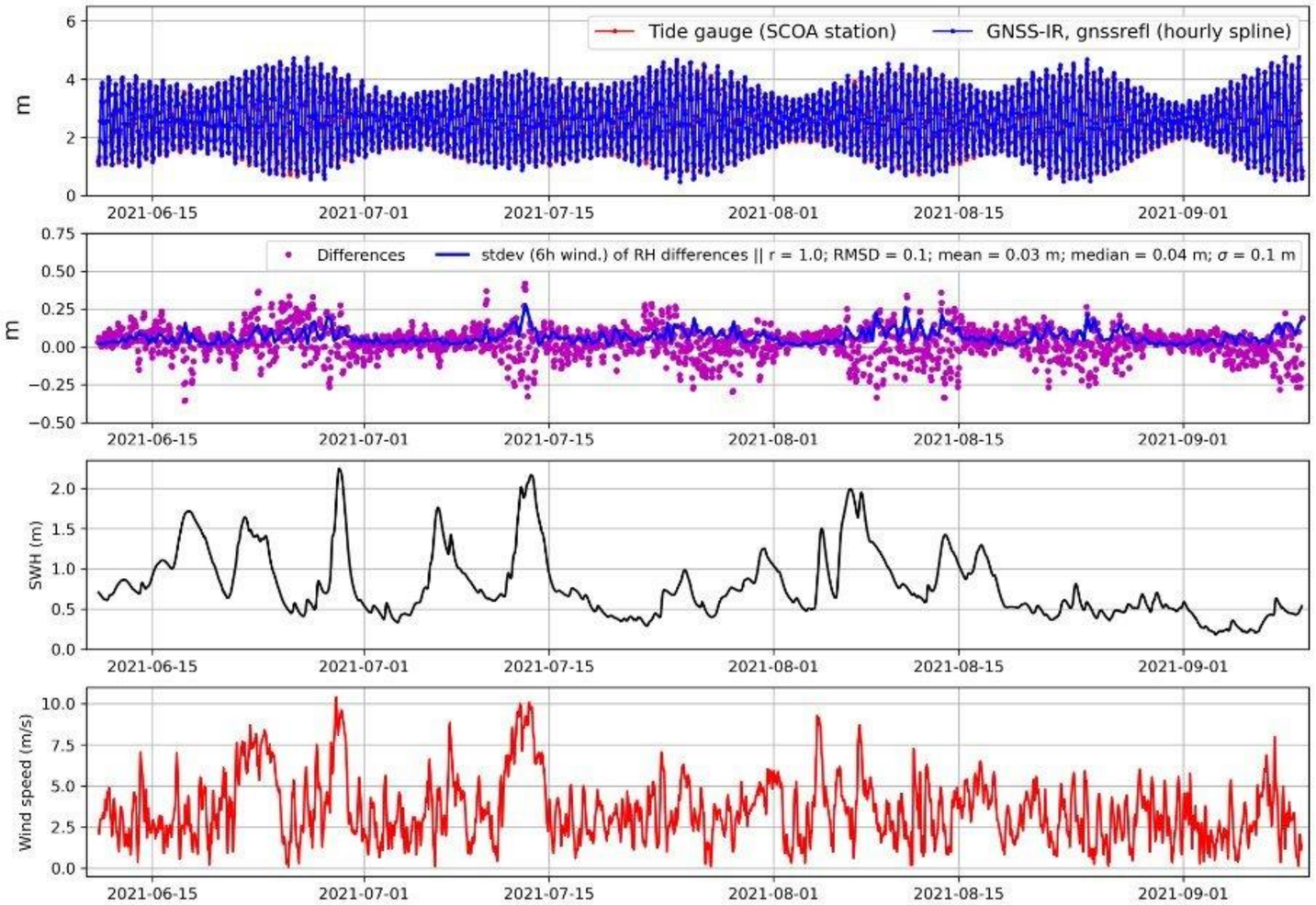


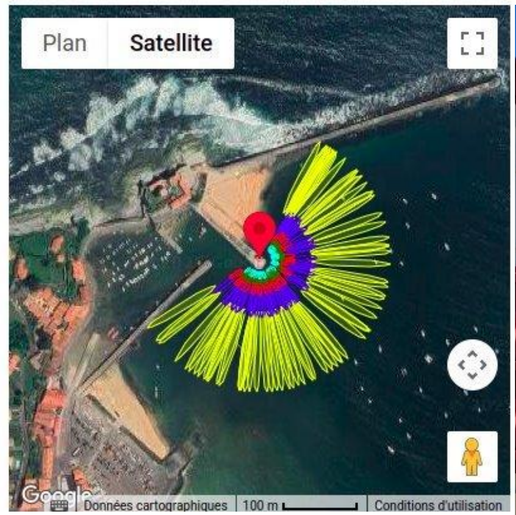


Cycle de marée bien reproduit, avec quelques écarts sporadiques:

- Très forte concordance entre les séries (r=1), avec une différence moyenne de 3 cm, traduisant une dispersion des différence de l'ordre de 10 cm (RMSE = 10 cm).

Application à la station de marégraphe de Saint-Jean-de-Luz



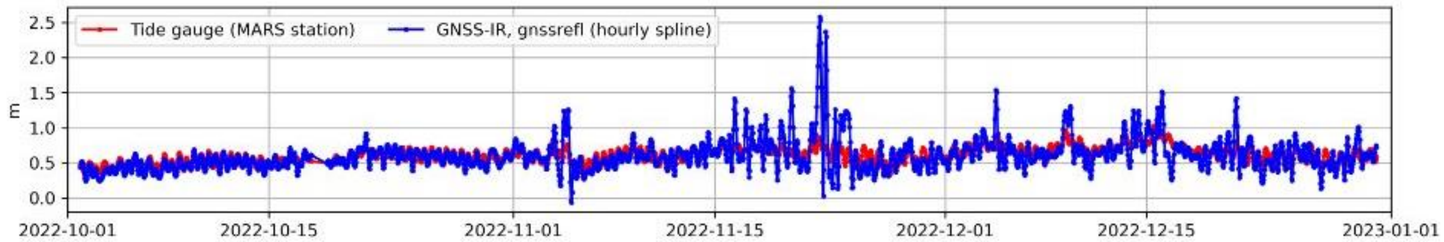


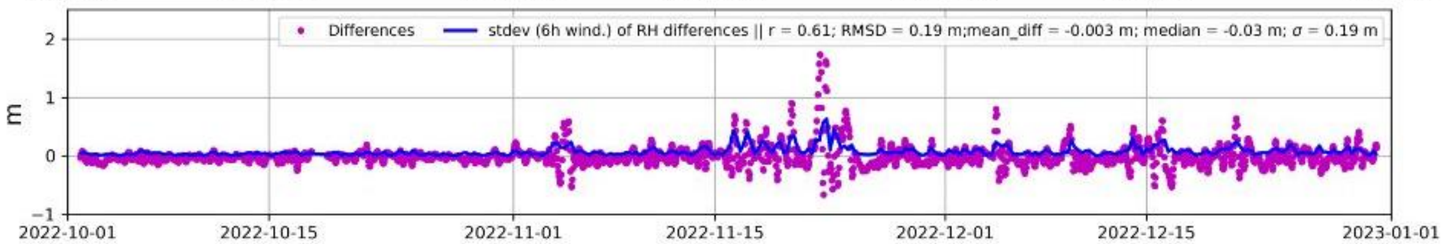


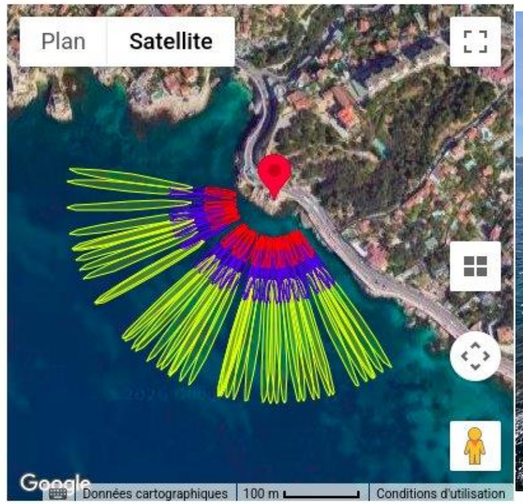
Sensibilité à l'état de mer:

- La forte dispersion localisée des différences observées est associée à des hauteurs significatives de vagues élevées au cours de la période considérée.

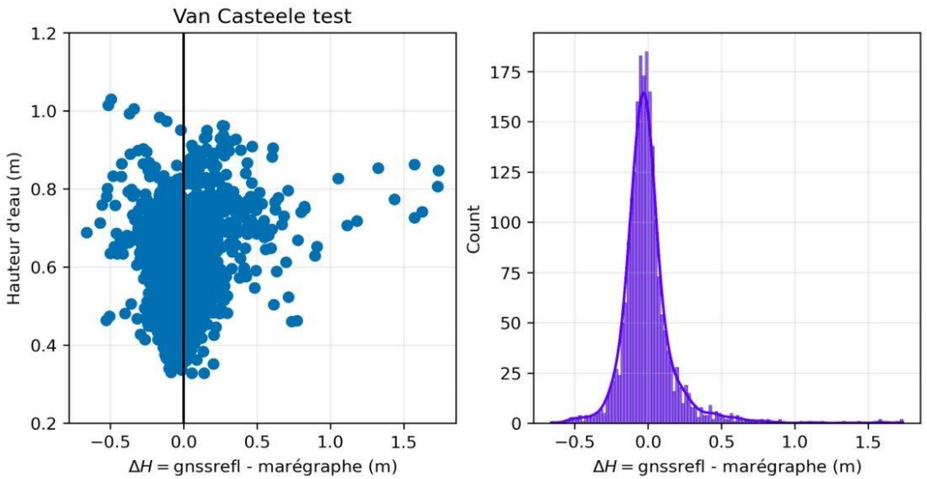
Application à la station de marégraphe de Marseille







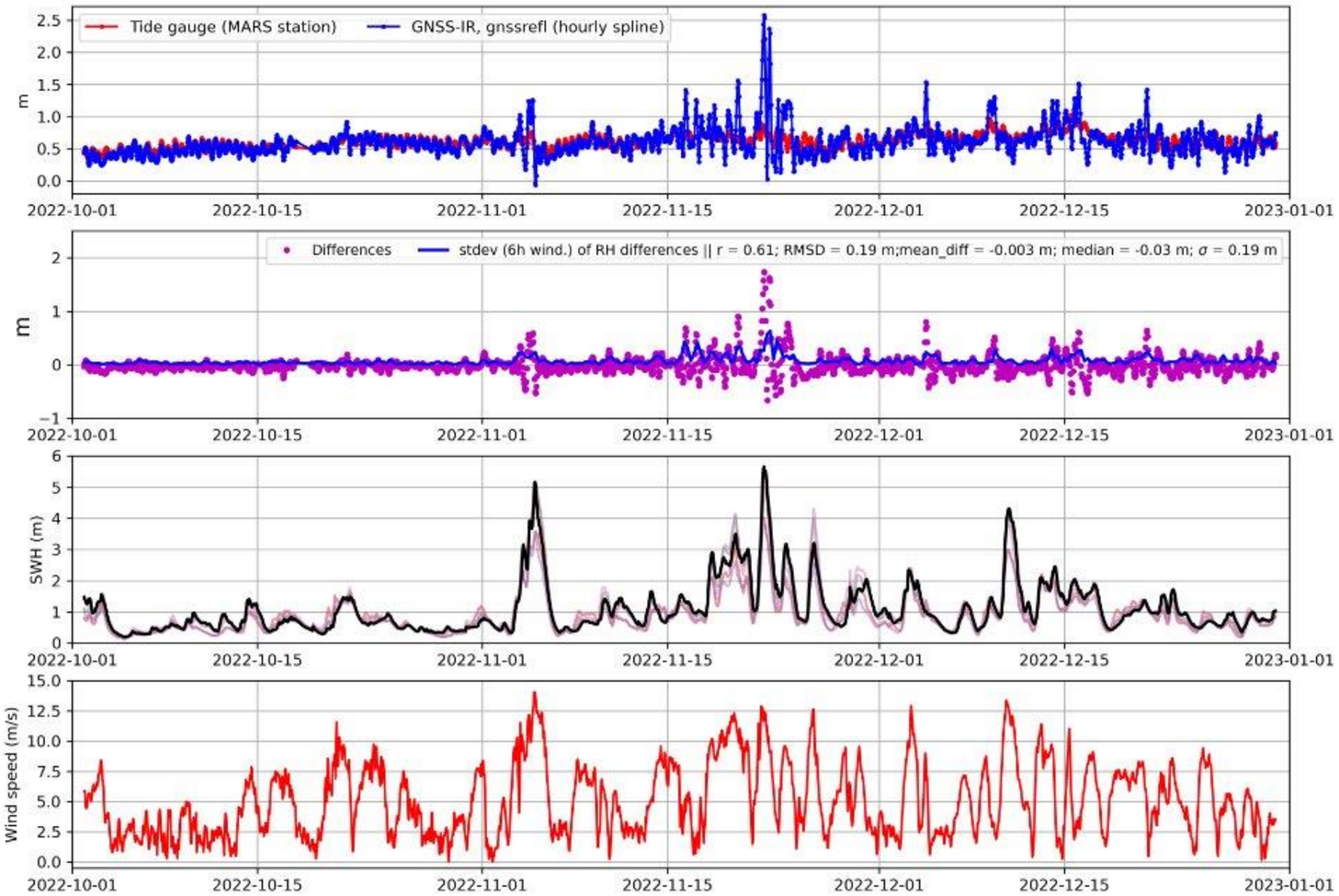


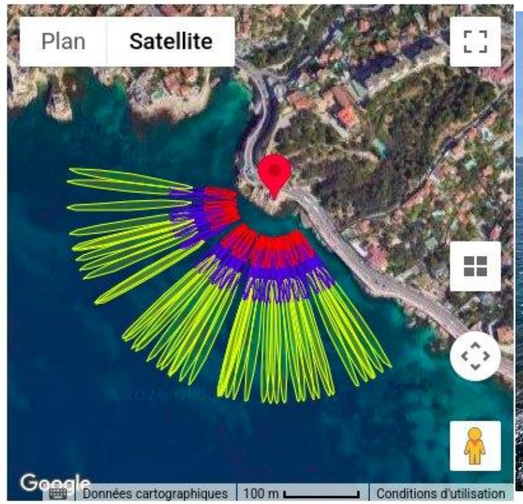


Station à faible marnage, moins de 50 cm :

- Bonne concordance entre les séries (**r = 0,61**), associée à de larges pics de différences localisées allant jusqu'à **2,5 m**.
- Une différence moyenne de **–0,3 cm** avec une dispersion des différence de l'ordre de **19 cm** (**RMSE = 19 cm**).

Application à la station de marégraphe de Marseille







- Une forte sensibilité à l'état de mer par la méthode fréquentielle GNSS-IR est observée.

Conclusion et perspectives

La réflectométrie interférométrique GNSS est une technique très prometteuse pour la mesure et la surveillance du niveau marin:

- Nombreux réseaux d'antennes GNSS disponibles à proximité des littoraux - Peut coûteuse et facile à déployer.

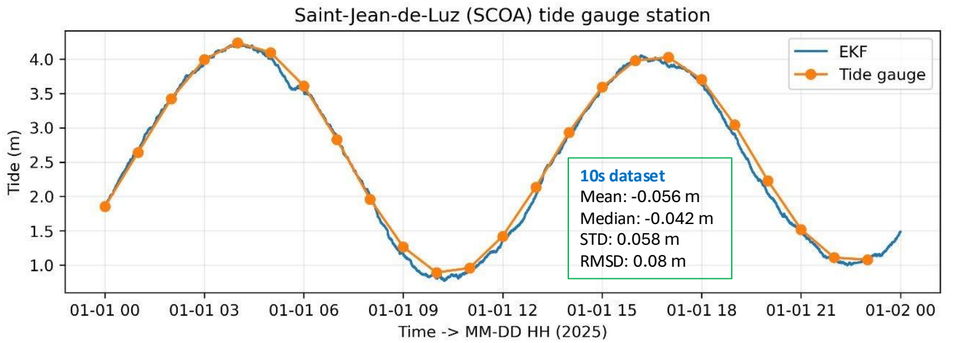
La méthode fréquentielle GNSS-IR permet l'estimation du niveau marin avec une RMSE de ~ **10**-30cm par rapport au marégraphe de référence.

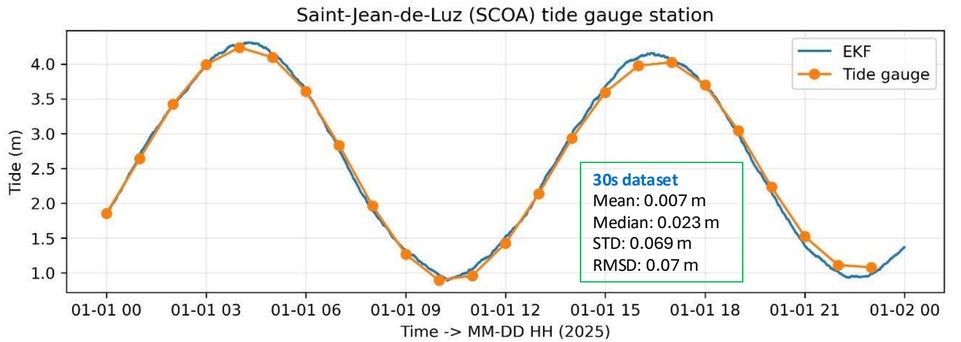
Les larges différences observées sont probablement dues:

- Exploitation non exhaustive des propriétés du SNR: seule la fréquence est utilisé.
- Influence du marnage du site considéré: la RMSE devient grande à faible marnage.

Le développement de la méthode inverse par modélisation du SNR permet:

- Exploitation plus exhaustive du SNR (ex. Purnell et 2021; Pira et al., 2025)
- Amélioration de la précision de la mesure du niveau marin (ex. Pira et al., 2025)
- Estimation plus résolue dans le temps et possibilité d'estimer les paramètres d'état de mer.
- Prévision par filtre de Kalman si peu de satellites visibles.





Travaux en cours ...

La méthode inverse GNSS-IR avec filtre de Kalman étendu permet d'estimer le niveau marin avec une RMSE moins de 10 cm, montrant une faible dispersion par rapport au marégraphe de référence (méthode en cours de développement à ENSTA/RINGOS)

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

SHOM

AGENCE
INNOVATION
DÉFENSE

Lab-STICC

ENSTA
IP PARIS

Merci pour votre attention!

PARTENAIRE
SCIENCE COMES TO TOWN
Financé par l'Union européenne

MARINE NATIONALE
400 ANS