



FILTRAGE DE KALMAN ÉTENDU APPLIQUÉ À LA MESURE DU NIVEAU DE LA MER À HAUTE FRÉQUENCE PAR RÉFLECTOMÉTRIE GNSS

Aurélien Pira, Alvaro Santamaría-Gómez, Guy Woppelmann

GNSS et positionnement - 16 octobre 2024

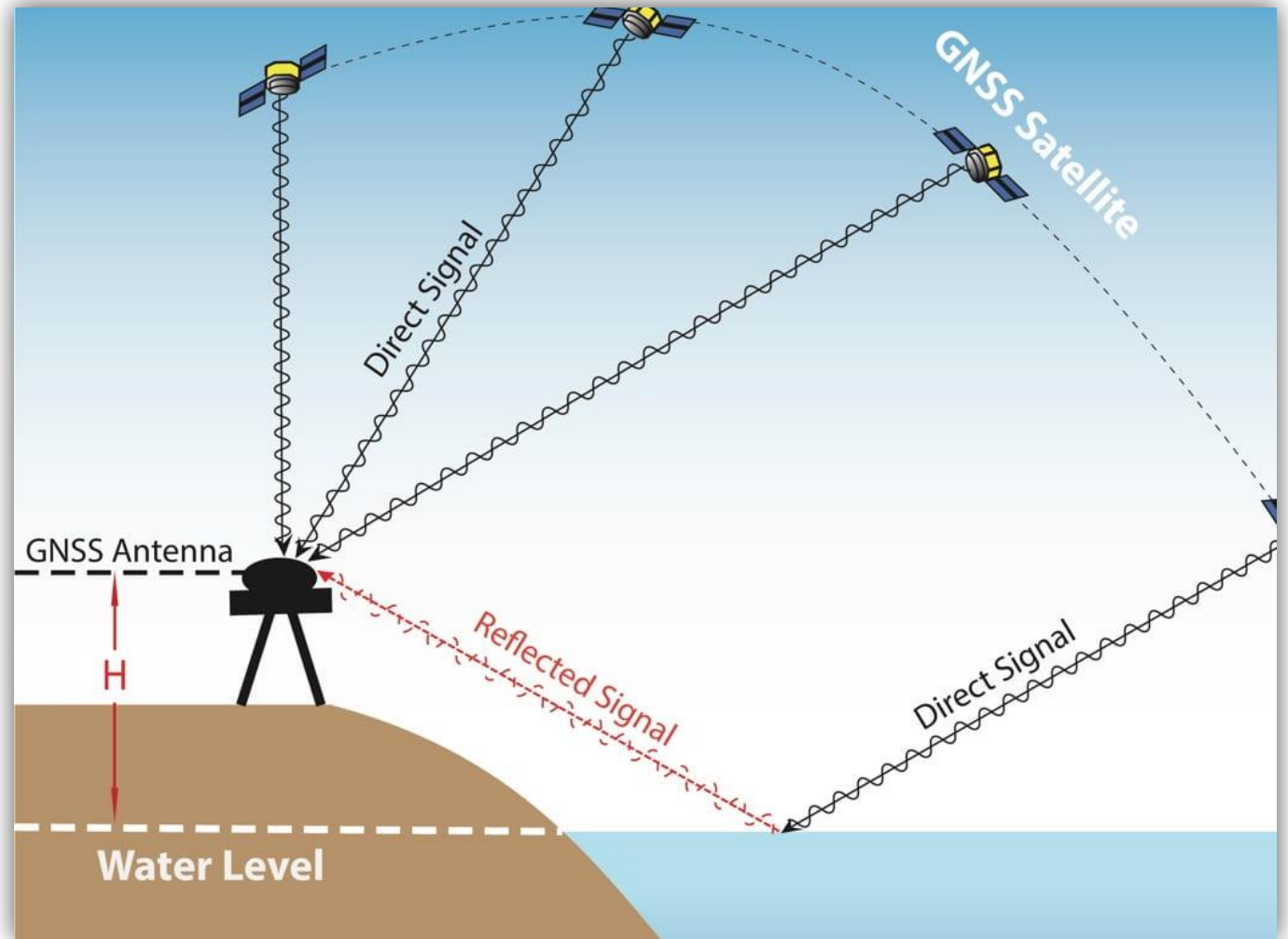


PRINCIPE DE BASE DE LA RÉFLECTOMÉTRIE GNSS

- **GNSS**

Global Navigation Satellite Systems

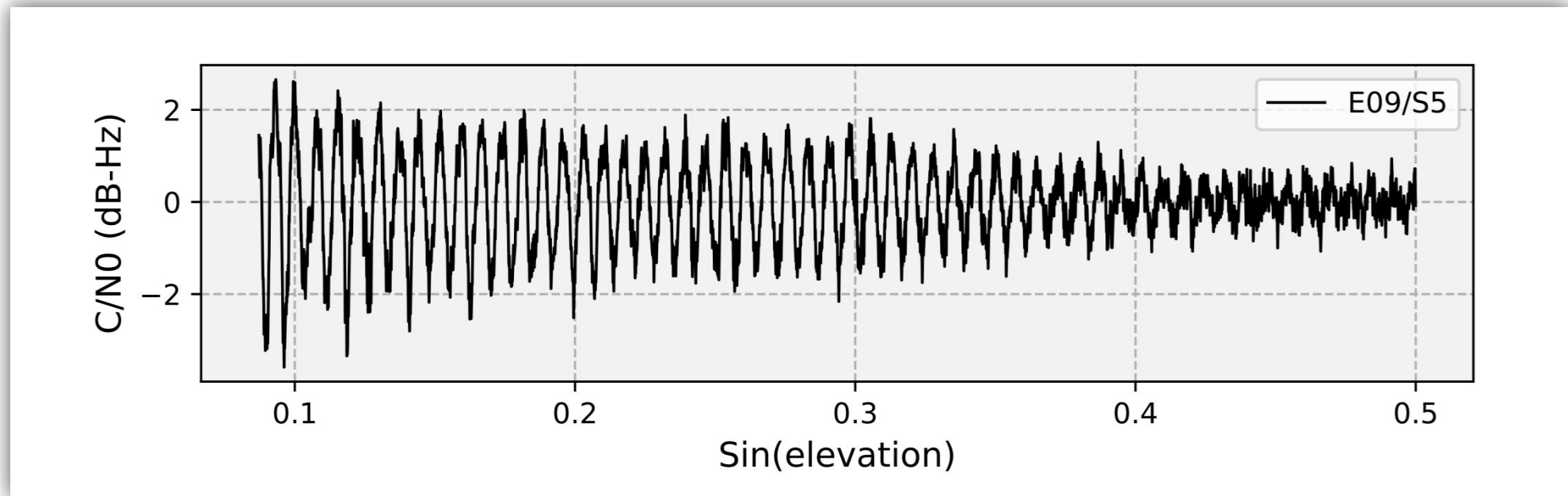
- La réflectométrie GNSS (GNSS-R) est une technique de mesure alternative aux méthodes marégraphiques traditionnelles qui exploite le bruit enregistré par les récepteurs GNSS.



Adapted from Peng *et al.*, 2019

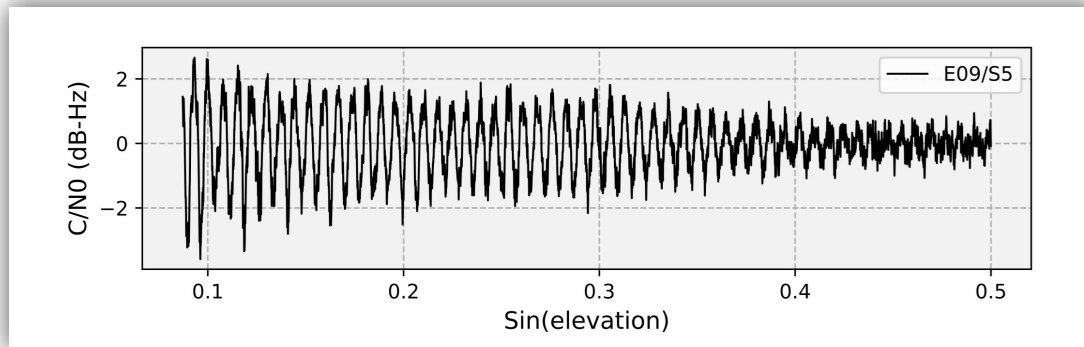
LE RATIO SIGNAL / BRUIT

- En raison du mouvement permanent des satellites autour de la Terre, le signal direct et le signal réfléchi arrivent alternativement en phase et en opposition de phase, créant une oscillation dans le signal résiduel.



DU SNR À LA HAUTEUR DE RÉFLEXION

- La distance verticale entre le centre de phase de l'antenne GNSS et la surface du réflecteur est donnée linéairement par la fréquence d'oscillation du SNR. (Larson *et al.*, 2013b; Löfgren *et al.*, 2014).
- La mesure du niveau de la mer par réflectométrie GNSS est basée sur l'estimation de la fréquence du SNR.



Hauteur du réflecteur :

$$Hr = \frac{f_o \cdot \lambda}{2}$$

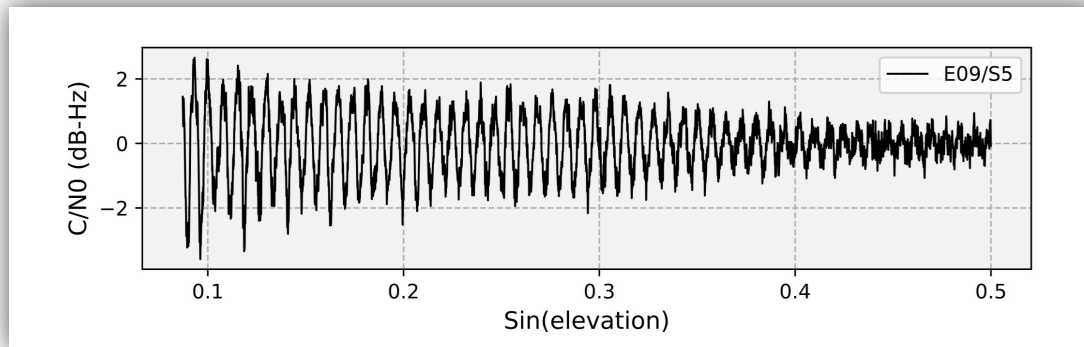
Modèle d'observation du signal SNR :

$$SNR = A \cdot \sin [2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot \sin(\varepsilon) + \varphi_0]$$

$$SNR = A_n \cdot \sin \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot hr}{\lambda_n} \cdot \sin(\varepsilon) + \varphi_{0n} \right]$$

DU SNR À LA HAUTEUR DE RÉFLEXION

- La distance verticale entre le centre de phase de l'antenne GNSS et la surface du réflecteur est donnée linéairement par la fréquence d'oscillation du SNR. (Larson *et al.*, 2013b; Löfgren *et al.*, 2014).
- La mesure du niveau de la mer par réflectométrie GNSS est basée sur l'estimation de la fréquence du SNR.



Hauteur du réflecteur :

$$Hr = \frac{f_o \cdot \lambda}{2}$$

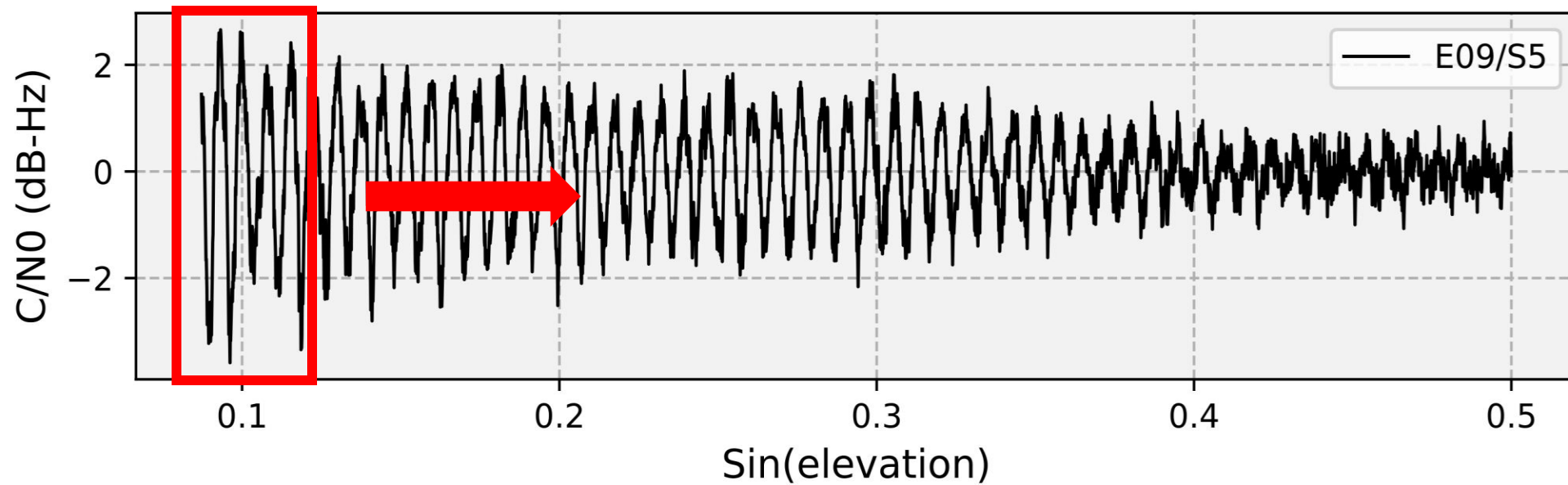
Modèle d'observation du signal SNR :

$$SNR = A \cdot \sin [2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot \sin(\varepsilon) + \varphi_0]$$

$$SNR = A_n \cdot \sin \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot hr}{\lambda_n} \cdot \sin(\varepsilon) + \varphi_{0n} \right]$$

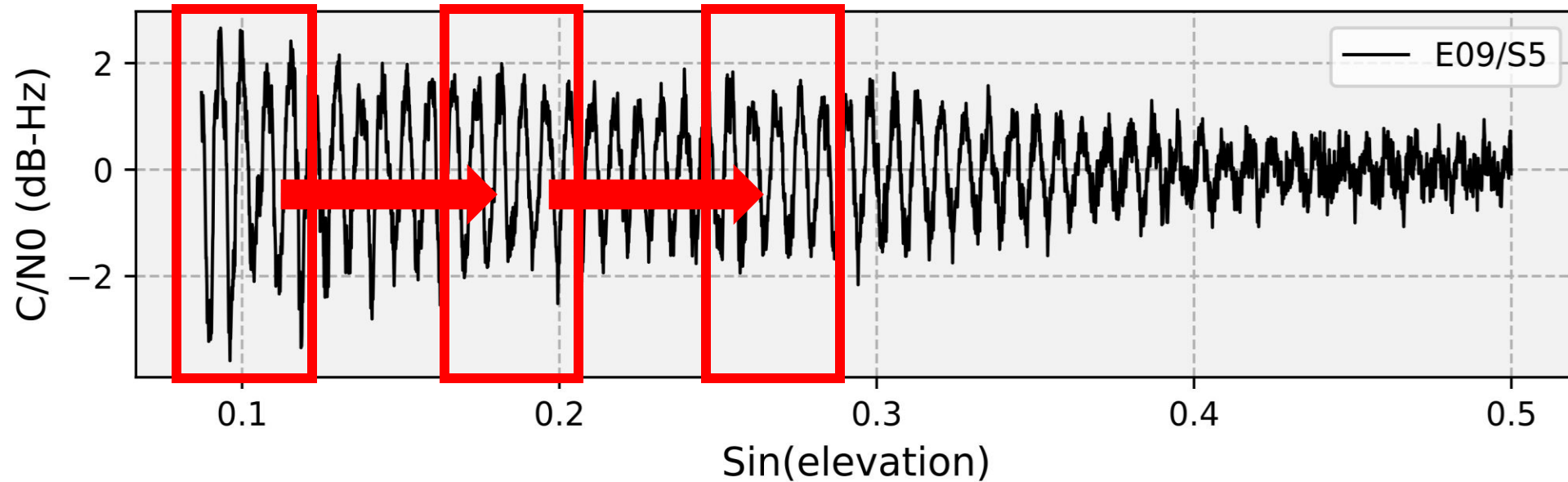
MÉTHODE SPECTRALE

- La méthode la plus utilisée pour la mesure du niveau de la mer par réflectométrie GNSS est basée sur l'analyse spectrale du SNR à l'aide d'un périodogramme de Lomb Scargle.



MÉTHODE SPECTRALE

- La méthode la plus utilisée pour la mesure du niveau de la mer par réflectométrie GNSS est basée sur l'analyse spectrale du SNR à l'aide d'un périodogramme de Lomb Scargle.





Source : www.cls.fr



Source : www.sonel.org

AVANTAGES



Limite les contraintes liées à l'installation de capteurs sous l'eau (marégraphe à pression), au contact (flotteur), ou au-dessus de la surface de la mer (acoustique et radar).



Permet l'utilisation des stations déjà existantes

PRINCIPALES LIMITES



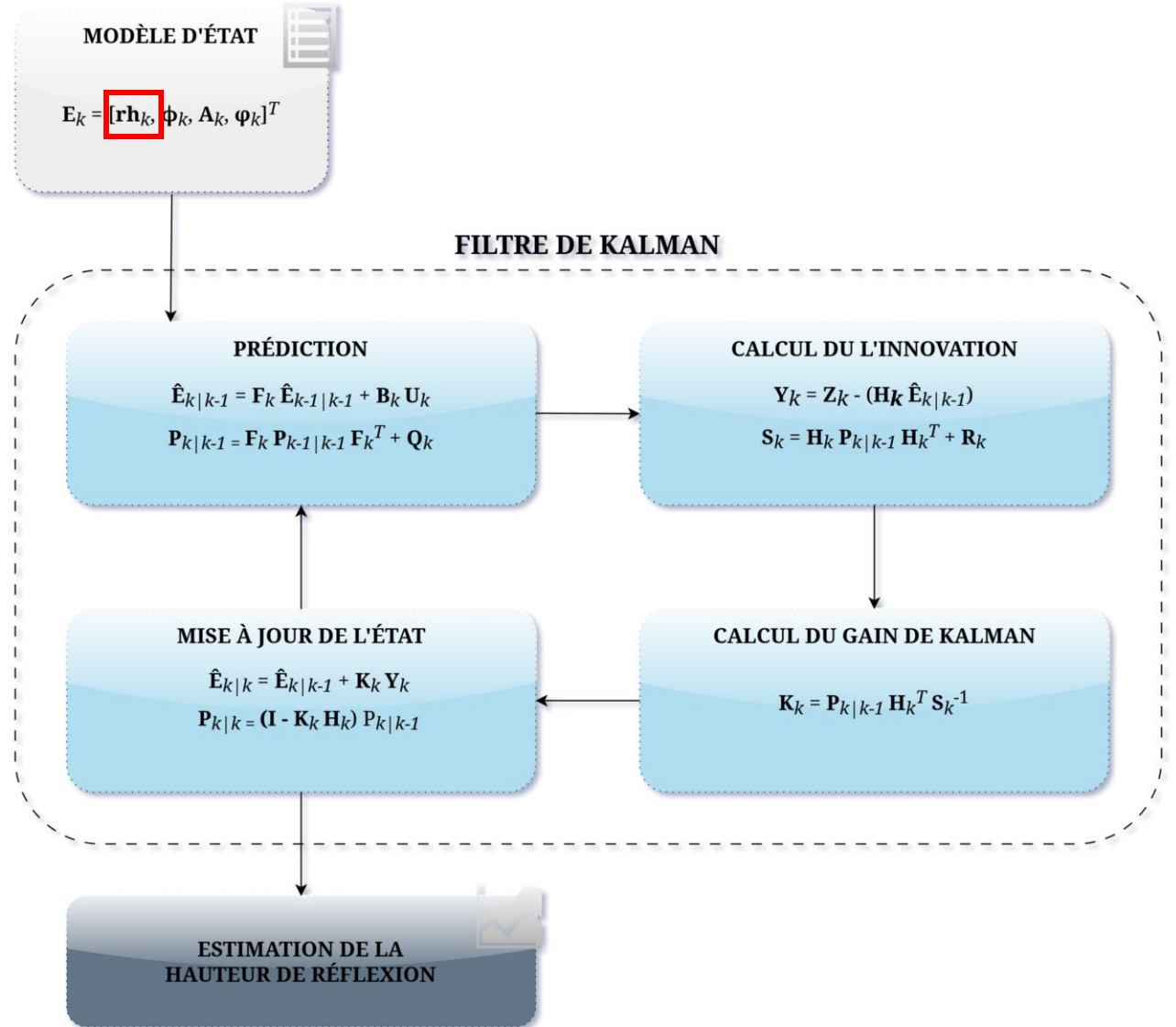
Lissage des valeurs dans le temps.
Perte d'accès à la haute fréquence.



Les méthodes spectrales utilisent les
meilleures portions des signaux. Pas
d'échantillonnage régulier des valeurs.

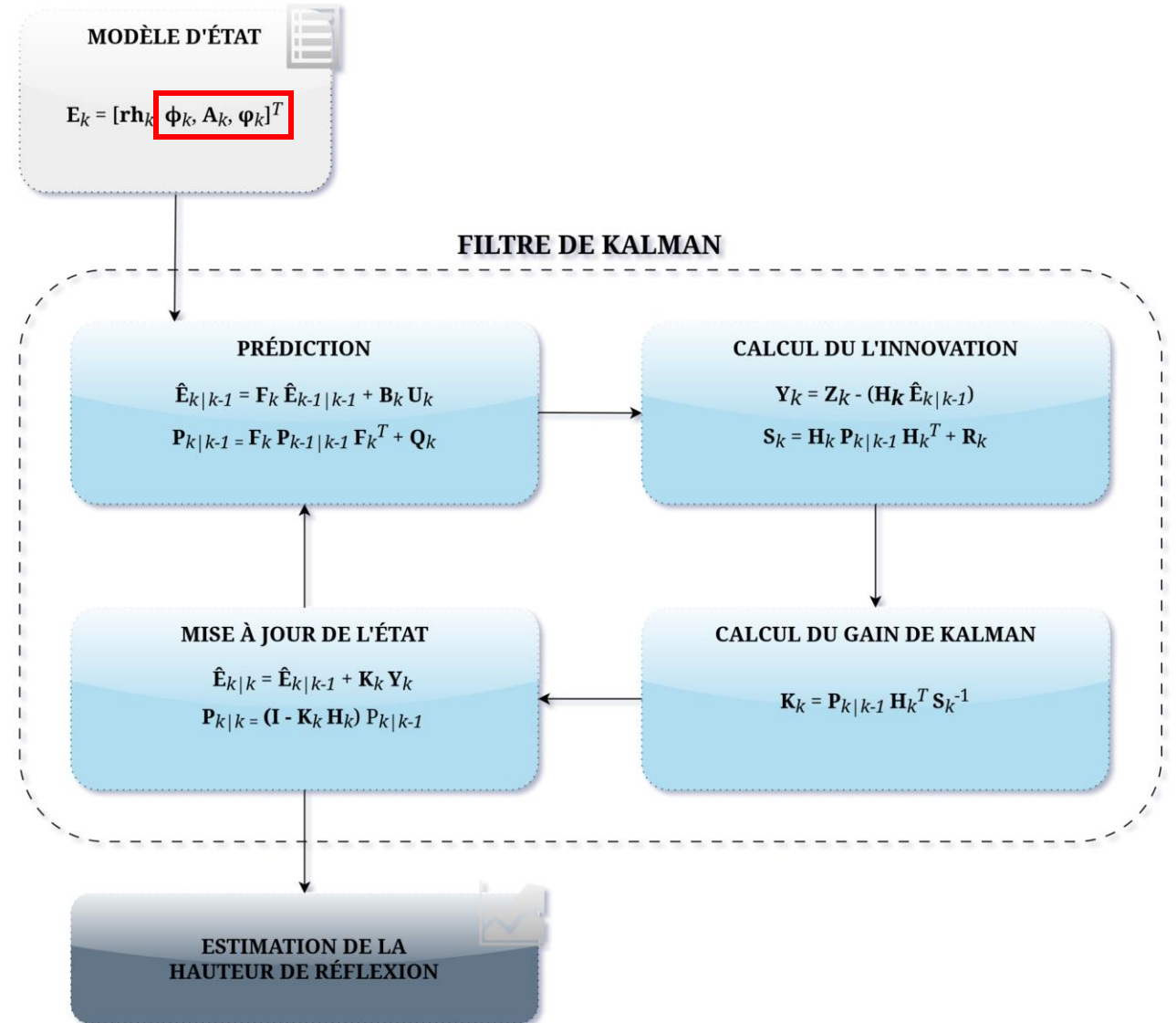
LE FILTRAGE DE KALMAN

- Estimation d'une hauteur de réflexion commune à tous les arcs SNR.



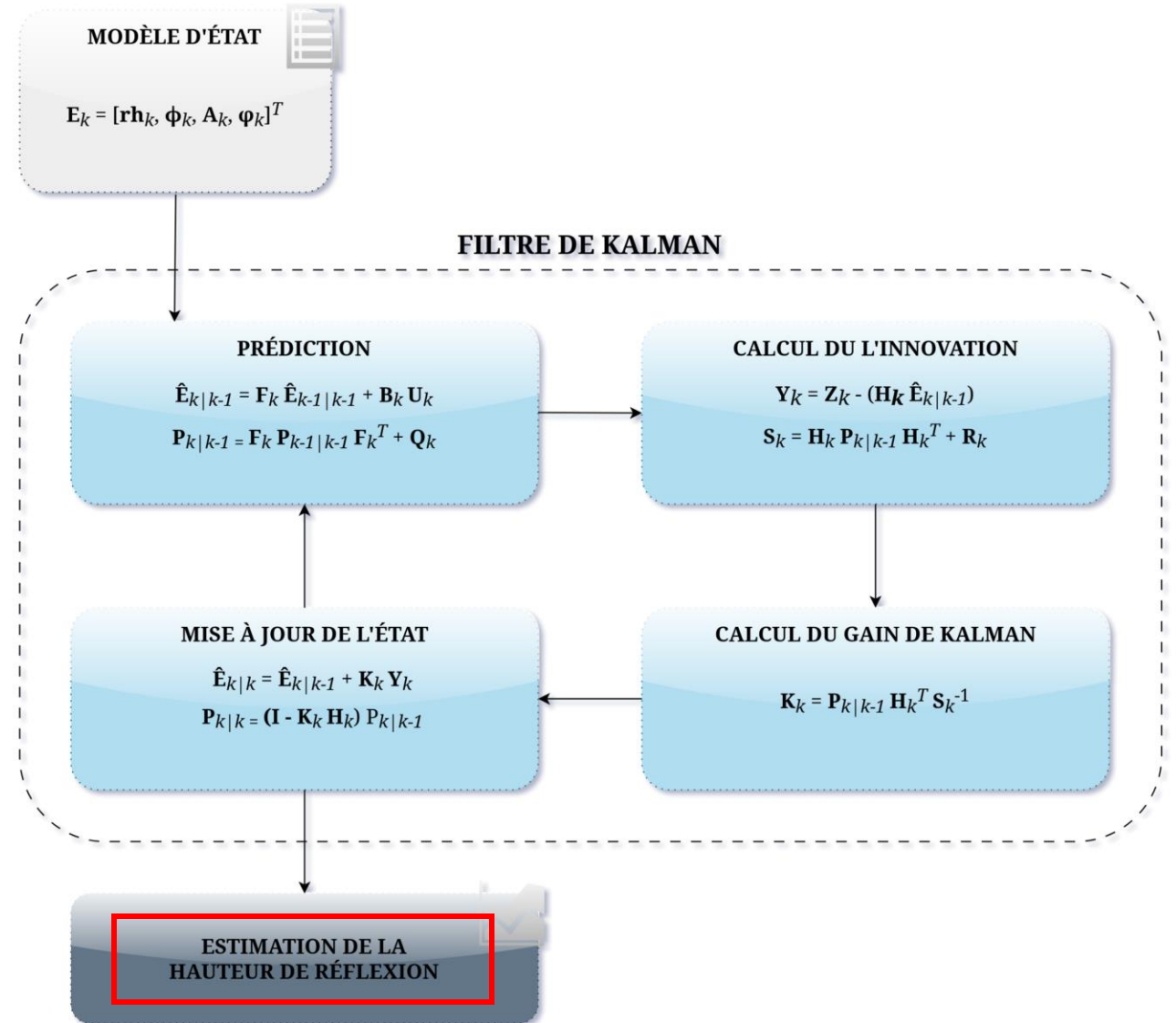
LE FILTRAGE DE KALMAN

- Estimation d'une hauteur de réflexion commune à tous les arcs SNR.
- Estimation de la phase instantanée, de l'amplitude et de la phase à l'origine indépendamment pour chaque arc SNR présent.



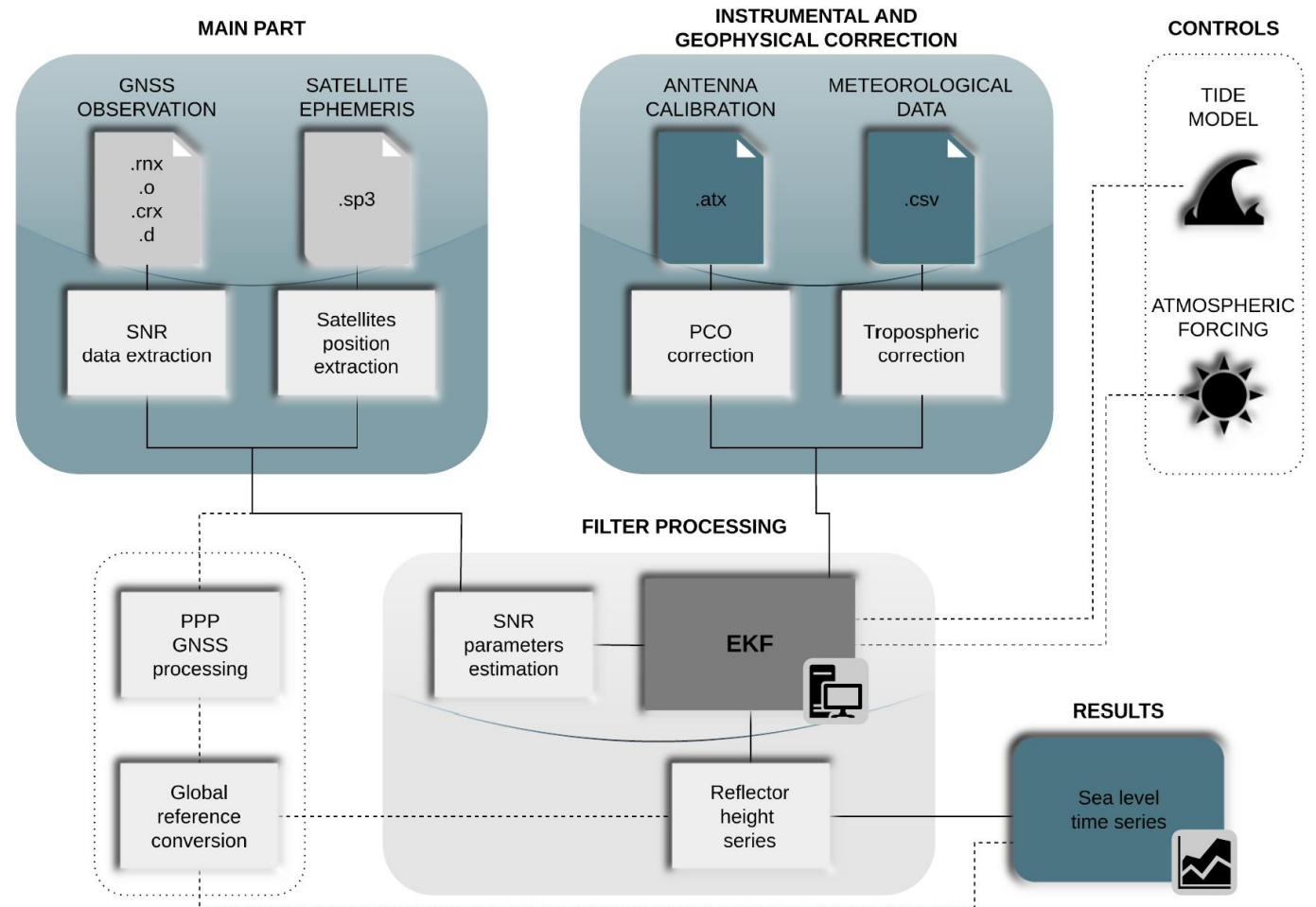
LE FILTRAGE DE KALMAN

- Estimation d'une hauteur de réflexion commune à tous les arcs SNR.
- Estimation de la phase instantanée, de l'amplitude et de la phase à l'origine indépendamment pour chaque arc SNR présent.
- Extraction de la hauteur de réflexion à chaque nouvelle donnée. Permet de conserver la fréquence d'échantillonnage du RINEX.



STRUCTURE DU FILTRE DE KALMAN

- **Bloc principal :**
Analyse des fichiers RINEX et interpolation des orbites.
- **Corrections instrumentales et géophysiques :**
Correction troposphérique
Correction PCO.
- **Contrôles externes :**
Paramètre de contrôle EKF.
Lecture de capteurs externes (pression atmosphérique, modèle de marée).
- **Traitement GNSS PPP :**
Alignement des séries temporelles dans une référence absolue.



APPORTS DU FILTRAGE KALMAN



Estimation d'une phase instantanée propre à chaque arc SNR.



Estimation d'une hauteur de réflecteur commune à tous les arcs SNR.



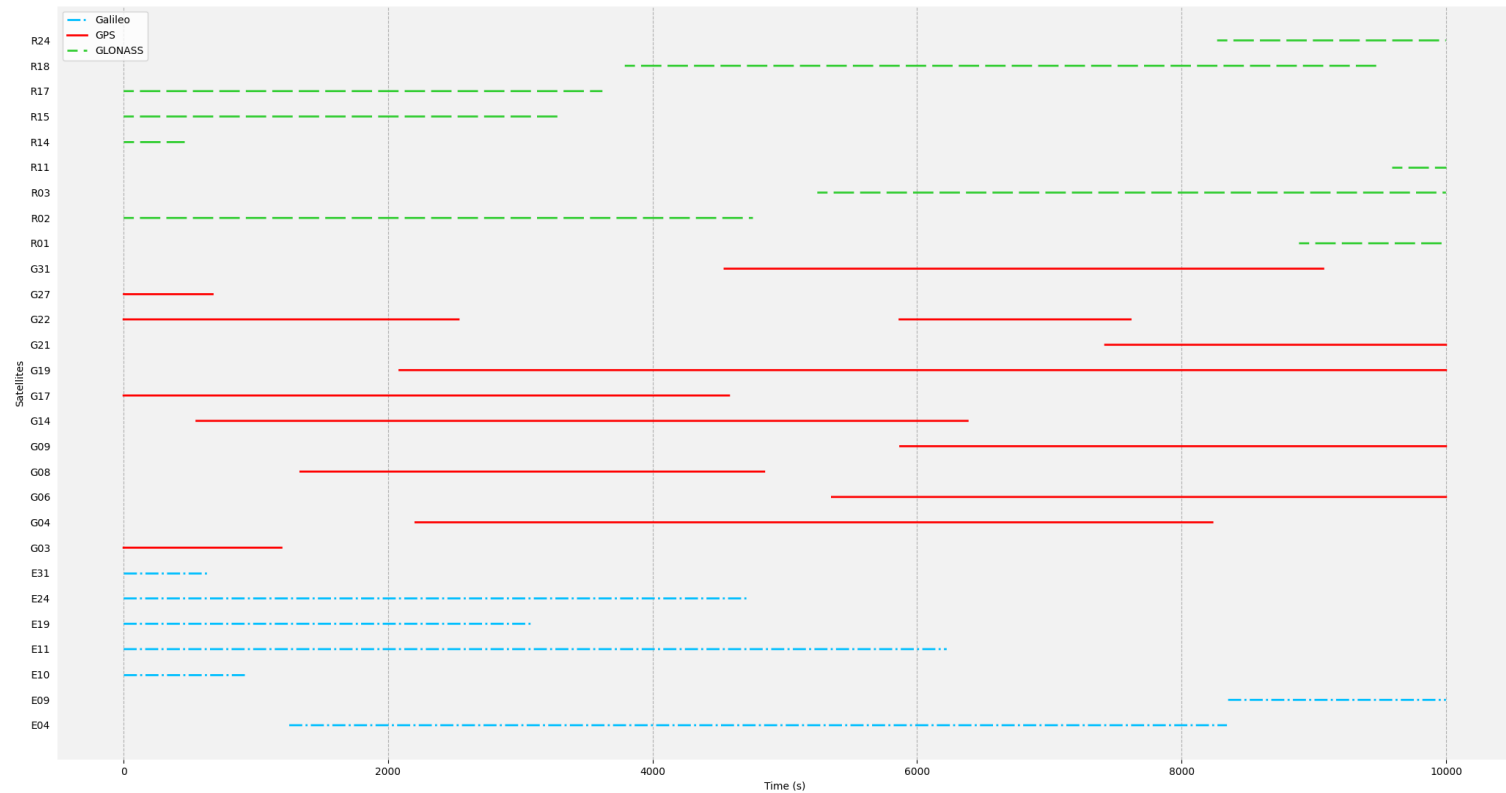
Intégration d'un modèle de marée pour aider les prédictions du filtre lorsque la couverture satellite est mauvaise.



Intégration des paramètres de contrôle issus de capteurs externes (pression atmosphérique, vitesse du vent).

MULTI CONSTELLATION

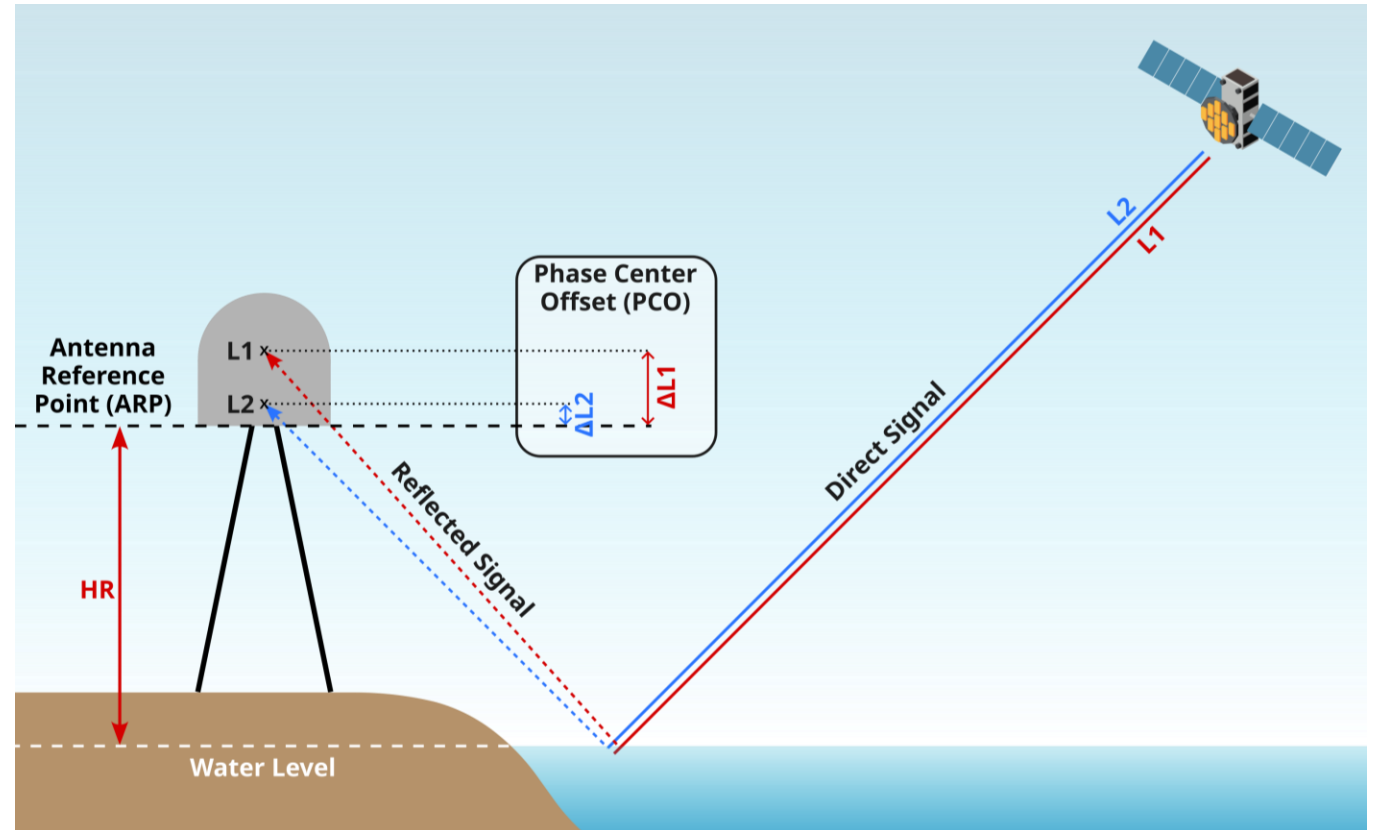
- Traitement des données avec toutes les constellations disponibles sur une station.
 - Permet la redondance afin d'assurer une estimation plus fiable.
 - Permet d'obtenir des séries continues.



Couverture satellite sur la station de ROSCOFF le 18 janvier 2023

CORRECTION PCO

- La correction PCO aide à corriger les erreurs causées par le décalage physique entre le point de référence de l'antenne (ARP) et le centre de phase spécifique de chaque porteur.
- Ce décalage est inhérent à la conception de l'antenne et varie en fonction de chaque modèle. Le filtrage de Kalman permet d'intégrer les valeurs de correction issues des fichiers de calibration d'antenne (ANTEX), améliorant ainsi la précision de la prédiction pour la phase totale du SNR.

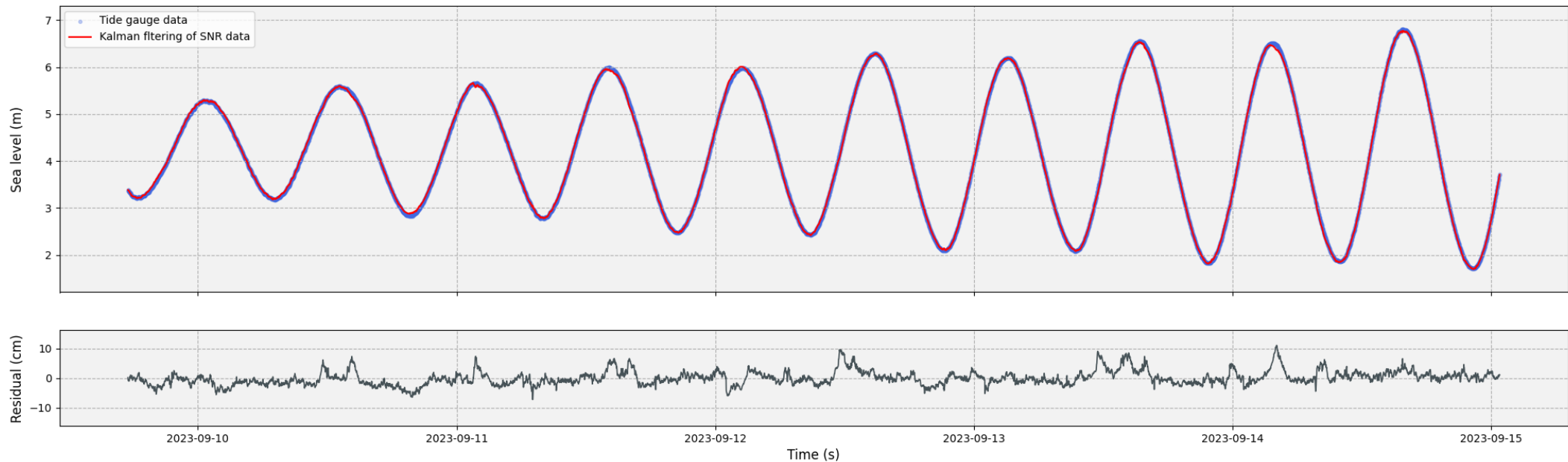


$$SNR = A_n \cdot \sin \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot hr}{\lambda_n} \cdot \sin(\epsilon) + \varphi_{0n} \right]$$

$$SNR = A_n \cdot \sin \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot (hr + \Delta_u)}{\lambda_n} \cdot \sin(\epsilon) + \varphi_{0n} \right]$$

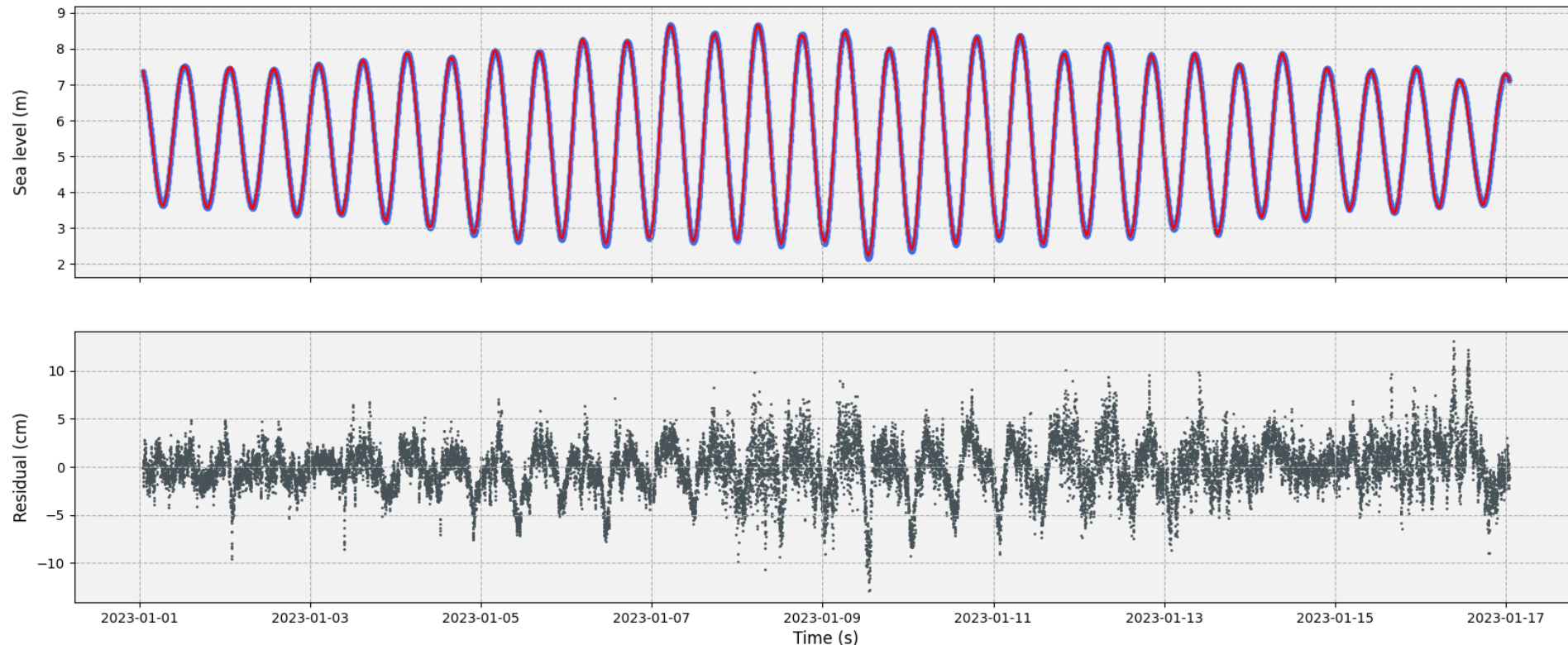
FILTRAGE DES DONNÉES SNR

- Associé à un modèle de marée, le filtrage de Kalman appliqué à l'estimation de la fréquence SNR permet d'obtenir une précision centimétrique avec une fréquence d'échantillonnage élevée.
- Erreur RMS de 2,3 cm par rapport aux données des marégraphes de BRÉST avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz.



FILTRAGE DES DONNÉES SNR

- Associé à un modèle de marée, le filtrage de Kalman appliqué à l'estimation de la fréquence SNR permet d'obtenir une précision centimétrique avec une fréquence d'échantillonnage élevée.
- Erreur RMS de 2,53 cm par rapport aux données des marégraphes de ROSCOFF.

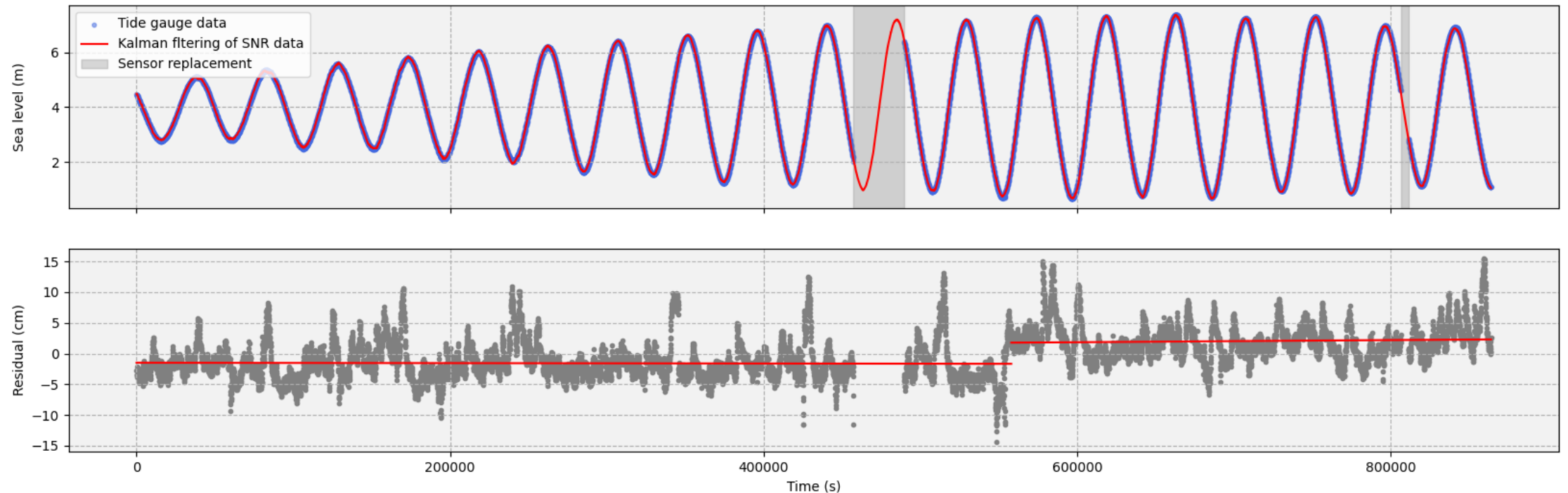


Haut : Niveau de la mer obtenu par filtrage de Kalman des données SNR à ROSCOFF entre le 01/01/2023 et le 17/01/2023.

Bas : Résidus obtenus par comparaison des résultats du filtrage de Kalman et du marégraphe radar.

FILTRAGE DES DONNÉES SNR

- La réflectométrie GNSS peut aider lors des phases d'étalonnage des capteurs radar ou acoustiques.
- Décalage de 3 cm observé à BREST après le remplacement du capteur en 2013
 - Anomalie révélée par Santamaría-Gómez et *al.*, 2015



PERSPECTIVES



Adapter l'algorithme aux différents environnements et aux différents paramètres des stations GNSS autour du globe.



Adapter l'algorithme à la lecture de trames de données en direct afin d'obtenir une lecture du niveau de la mer en temps réel.



Merci de votre attention
