

Projet Guerlédan 2024-2025

Instrumentation géodésique du lac de Guerlédan, vers la validation des données d'altimétrie satellitaire

Présenté par

BEAU Clémentine, BEDART Scott, BESNARD Zoé, HENNEUSE Lola,
MONOURY--HOMET Kim, RIDEL Siméon

Encadré par

CHUPIN Clémence, BOSSER Pierre, ENET Séverine

Sommaire

1. Mesures in-situ

- A. Capteurs de pression
- B. Bouées GNSS
- C. Altimètre sonar
- D. Réflectométrie
- E. Marégraphe EPONIM

2. Résultats obtenus

- A. Semaine 1 – Octobre 2024
- B. Semaine 2 – Février 2025

3. Validation des données satellitaires

2. Mesures *in-situ*

Une combinaison de mesures *in-situ*

Bouée GNSS



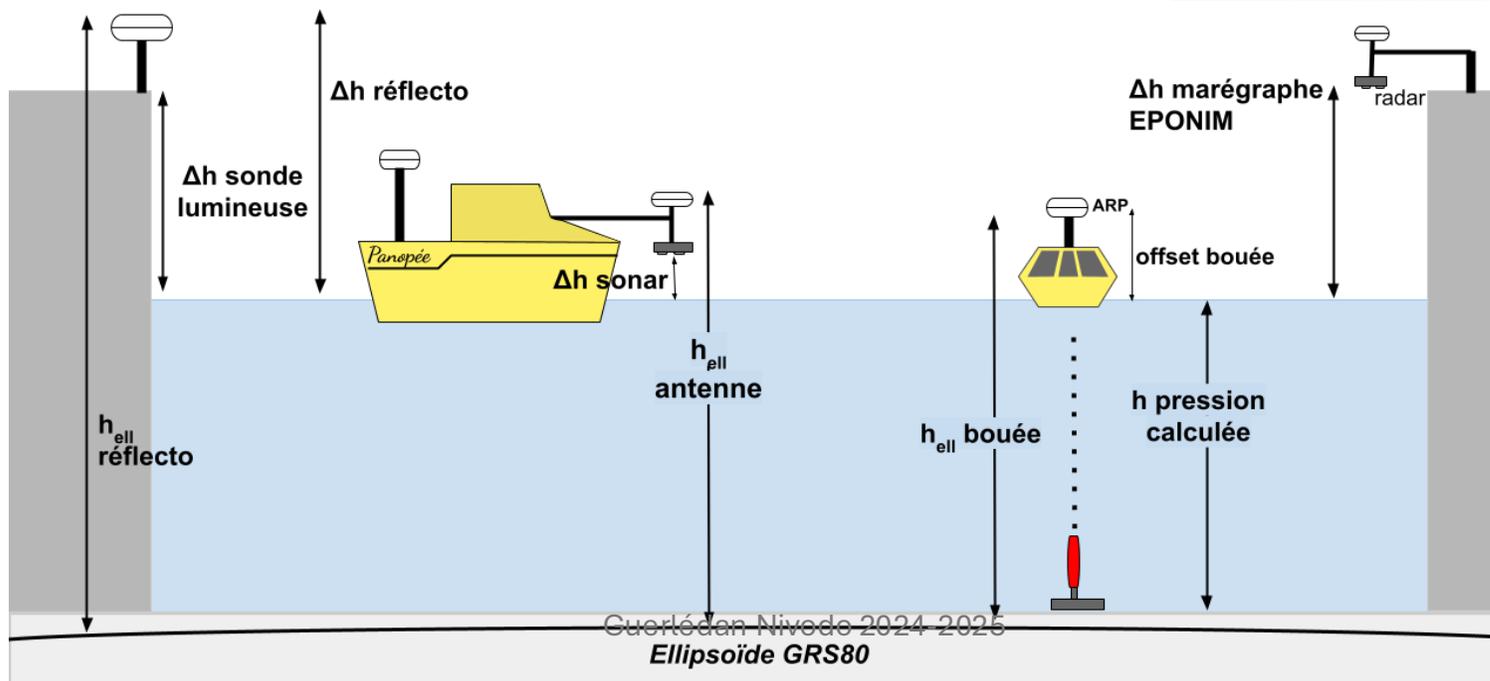
Altimètre



Réflectométrie

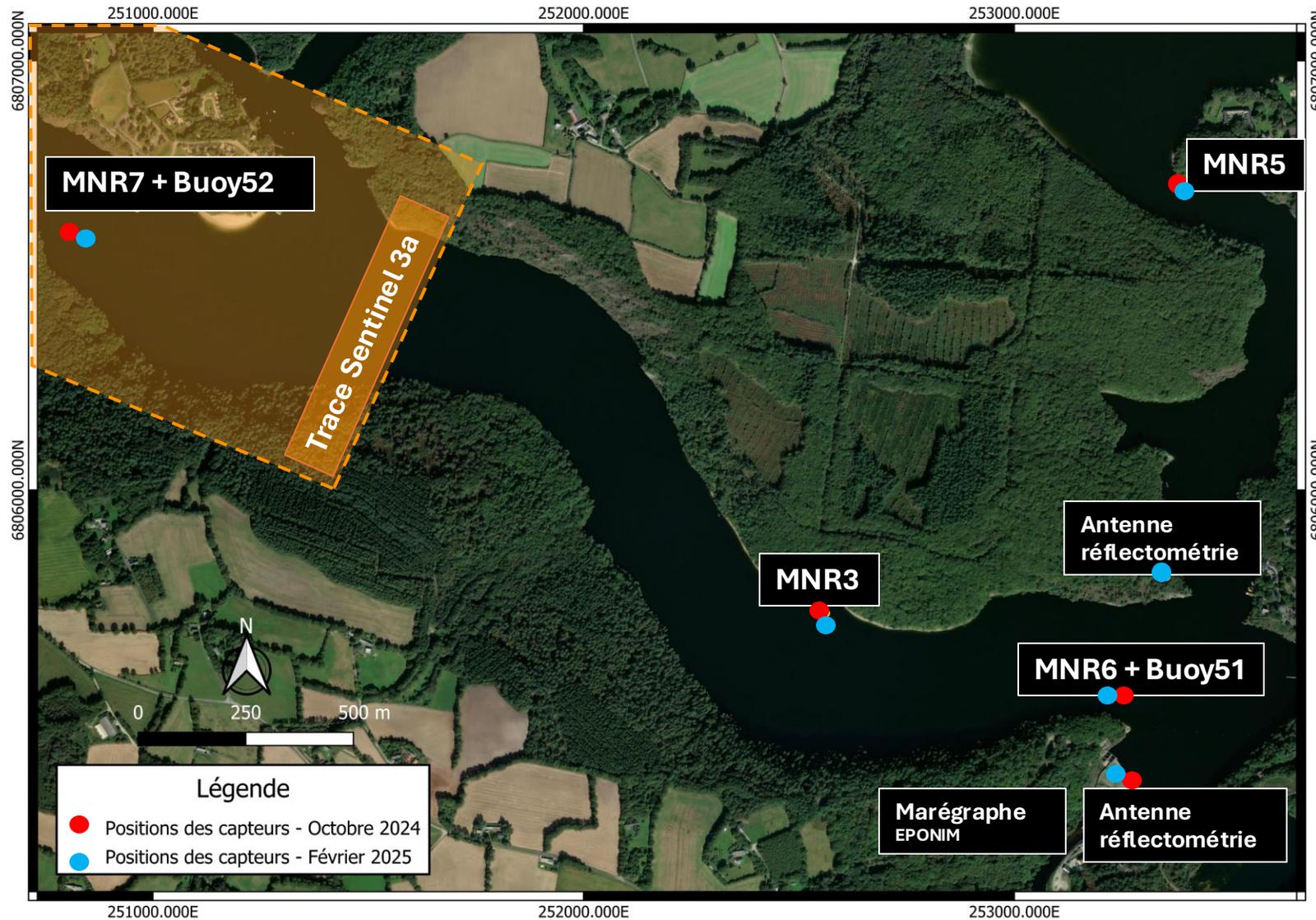


Capteur de pression



Marégraphe
(EPONIM)

Une couverture globale du lac



+ Trace SWOT sur l'ensemble du lac

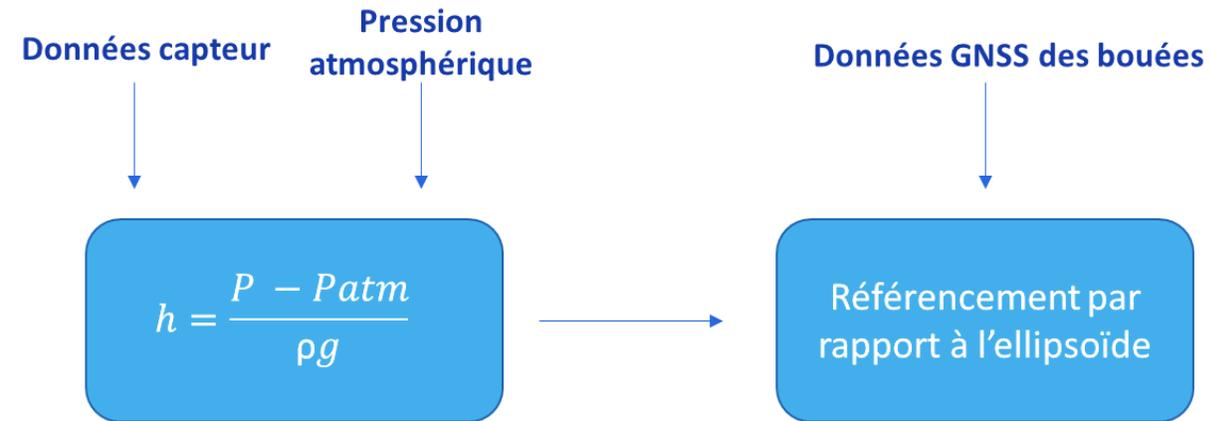
Capteurs de pression



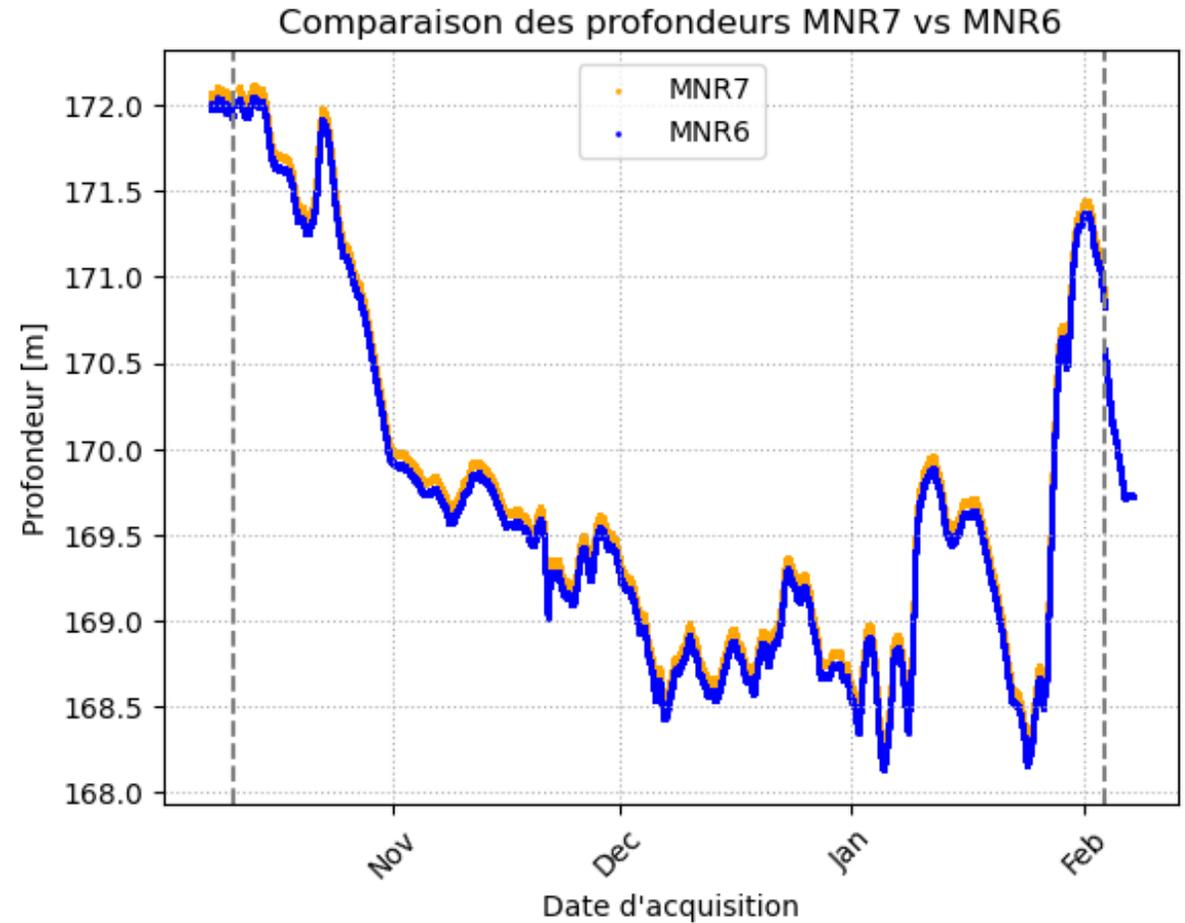
- ❖ **Technologie** : capteur piézo-résistif
- ❖ **Dimension** : $l = 210\text{mm}$, $D = 25\text{mm}$
- ❖ **Installation** : sur le passage du satellite Sentinel3-A, zones de bathymétrie et forçages météo différents
- ❖ **Incertitude sur la mesure (m)** : 200 Pa (2.5 mm) - 5000 Pa (5 cm) [10]
- ❖ **Type d'acquisition** : statique d'octobre à février
- ❖ **Nombre de systèmes déployés** : 4

- ❖ Déploiement du système pour des mesures long terme
- ❖ Mise en référence verticale => bouées GNSS

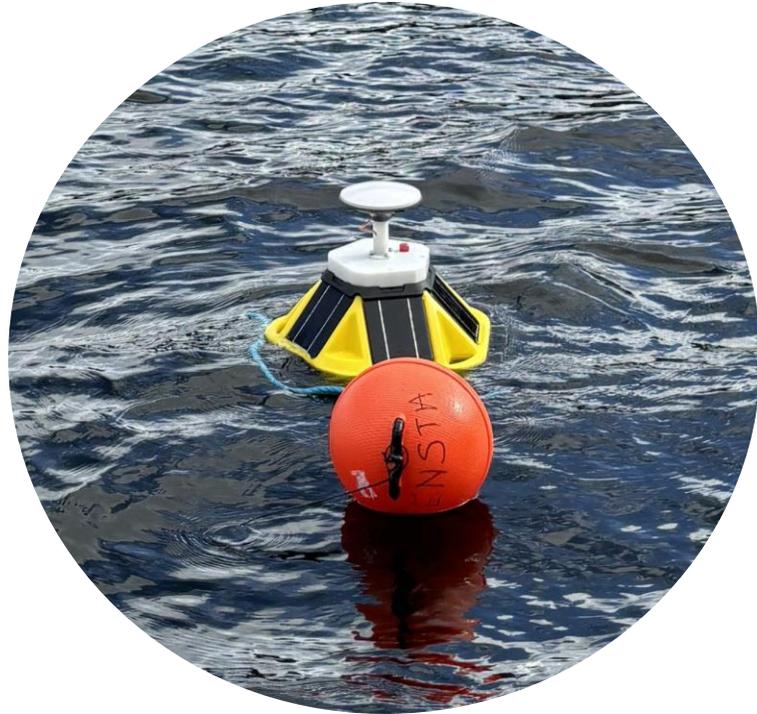
Capteurs de pression



- ❖ Cohérence des données avec les données de turbinage et des marégraphes EDF et du SHOM
- ❖ Ecart de 7 cm entre les deux capteurs
- ❖ Données de référence



Bouées GNSS



- ❖ **Technologie** : GNSS
- ❖ **Dimension (l x h)** : 42 cm x 31 cm
- ❖ **Installation** : mouillage couplé aux capteurs de pression
- ❖ **Incertitude sur la mesure (m)** : positionnement GNSS (3cm) et tirant d'air (1 cm)
- ❖ **Type d'acquisition** : statique
- ❖ **Nombre de système déployé** : 2

- ❖ Déploiement du système sur les 2 semaines de manipulation
- ❖ Comparaison des données acquises avec les données des capteurs de pression pour la mise en référence verticale

Altimètre Sonar

→ **Objectif** : Mettre en œuvre un système qui permet de récupérer des données de niveau d'eau sur une grande surface



❖ **Type d'acquisition** : lignes de levé / statique

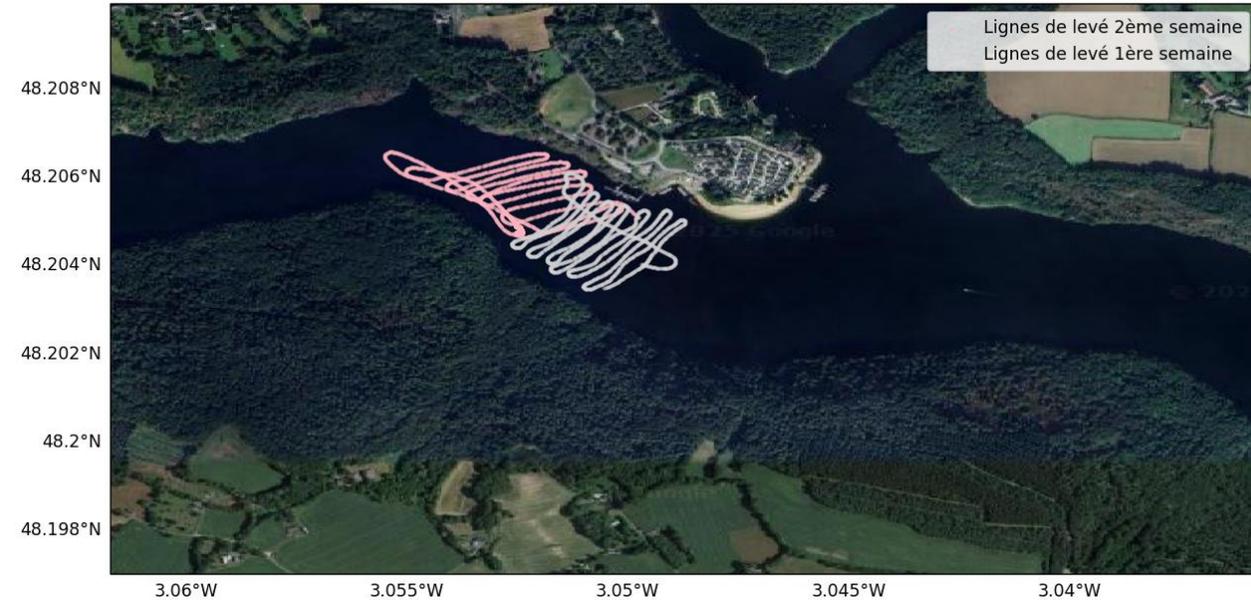
❖ **Installation** :

1^{ère} semaine : sur le côté de Panopée + antenne de Panopée

2^{ème} semaine : à l'avant de Panopée, et sur un ponton

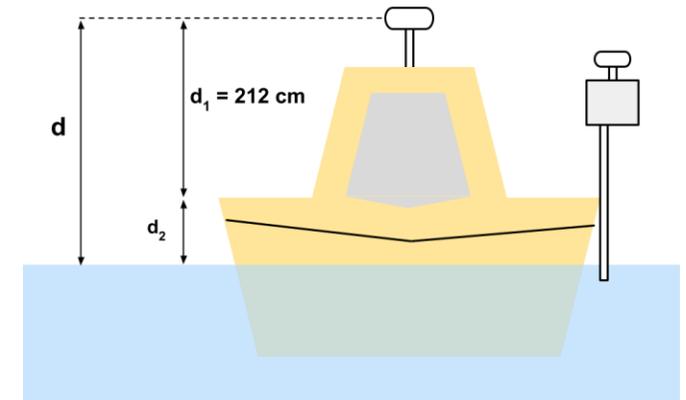
❖ **Incertitude sur la mesure (m)** : 2-3 cm

Lignes de levé de l'altimètre



$$d_{\text{théorique}} = d_1 + d_{2 \text{ théorique}} = d_1 + 7 = 219 \text{ cm}$$

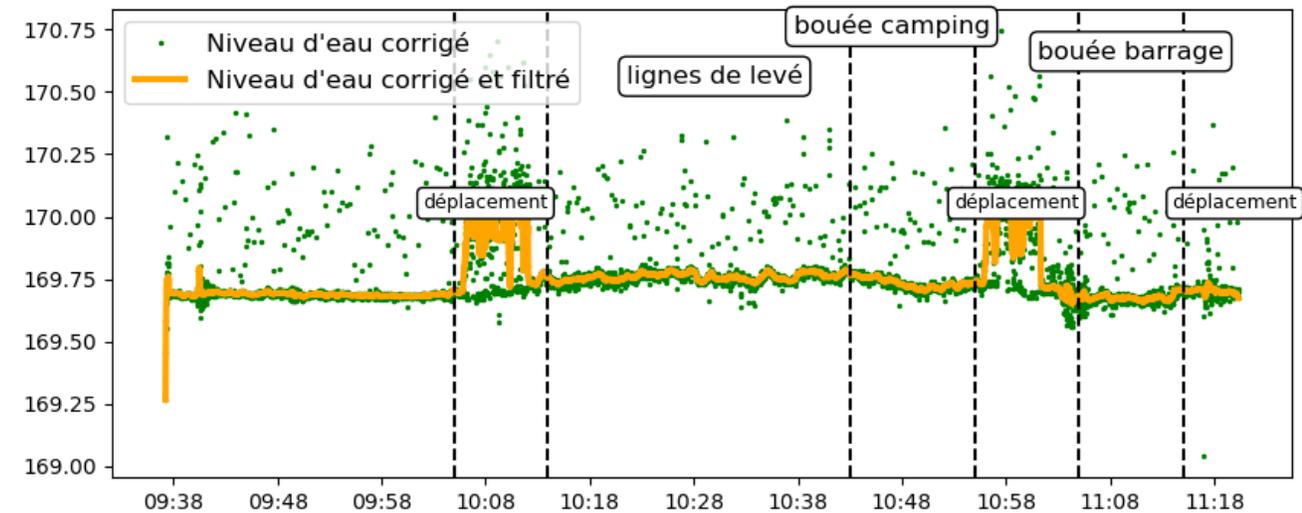
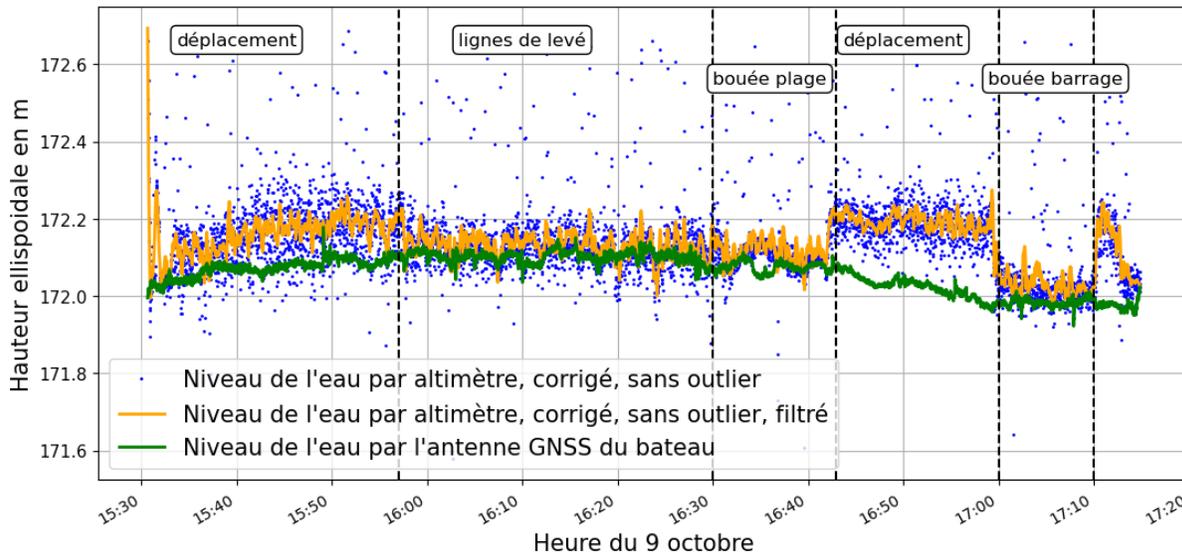
$$d_{\text{pratique}} = d_1 + d_{2 \text{ pratique}} = d_1 + (-67.5 + 77.5) = 222 \text{ cm}$$



→ Comparaison avec SWOT

Altimètre Sonar

Résultats obtenus lors des levés altimétriques lors de la 1^{ère} et 2^{ème} semaine

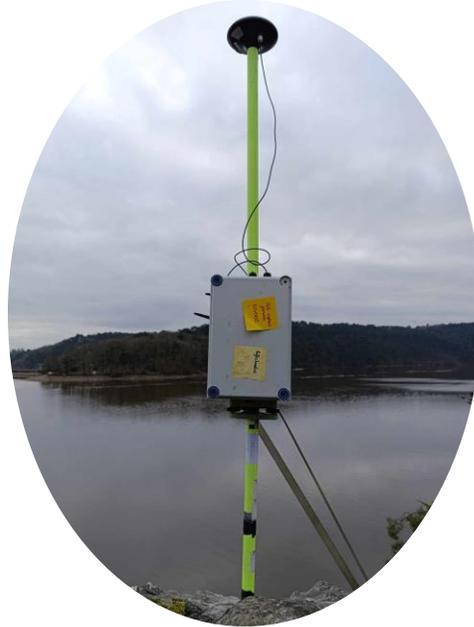


→ Vérification des valeurs obtenues avec les bouées

- ❖ Sensible à la **vitesse** de déplacement du bateau
- ❖ **Corrections météorologiques** non négligeables (pouvant aller jusqu'à 3 cm le 6 février)
- ❖ Système relativement efficace

Optimal à l'avant du bateau

Réflexométrie



Configuration d'installation lors de la semaine 1 (à gauche) et 2 (à droite)

- ❖ **Technologie** : onde GNSS
- ❖ **Dimension** : hauteur de l'antenne ($\sim 1,5$ m)
- ❖ **Installation** : sur le barrage (octobre) / sur la falaise (février) / station de base
- ❖ **Incertitude (m)** : logiciel GNSSrefl ^[5] (10 cm) et positionnement (3 cm)
- ❖ **Type d'acquisition** : statique

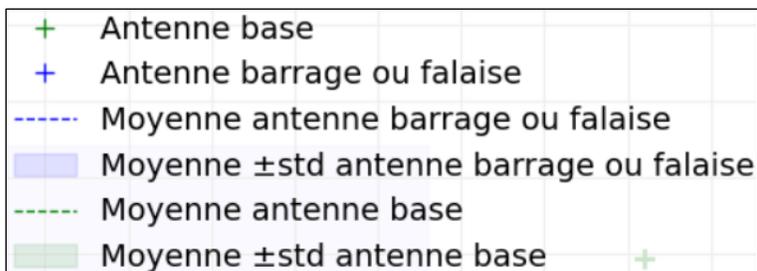
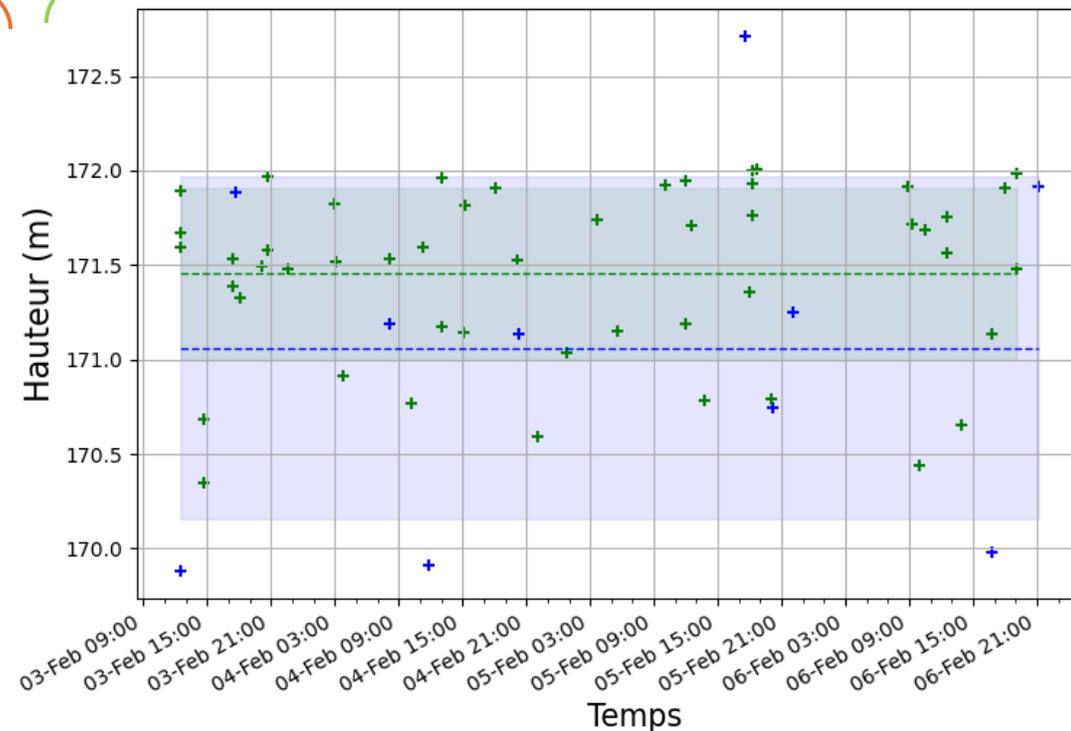
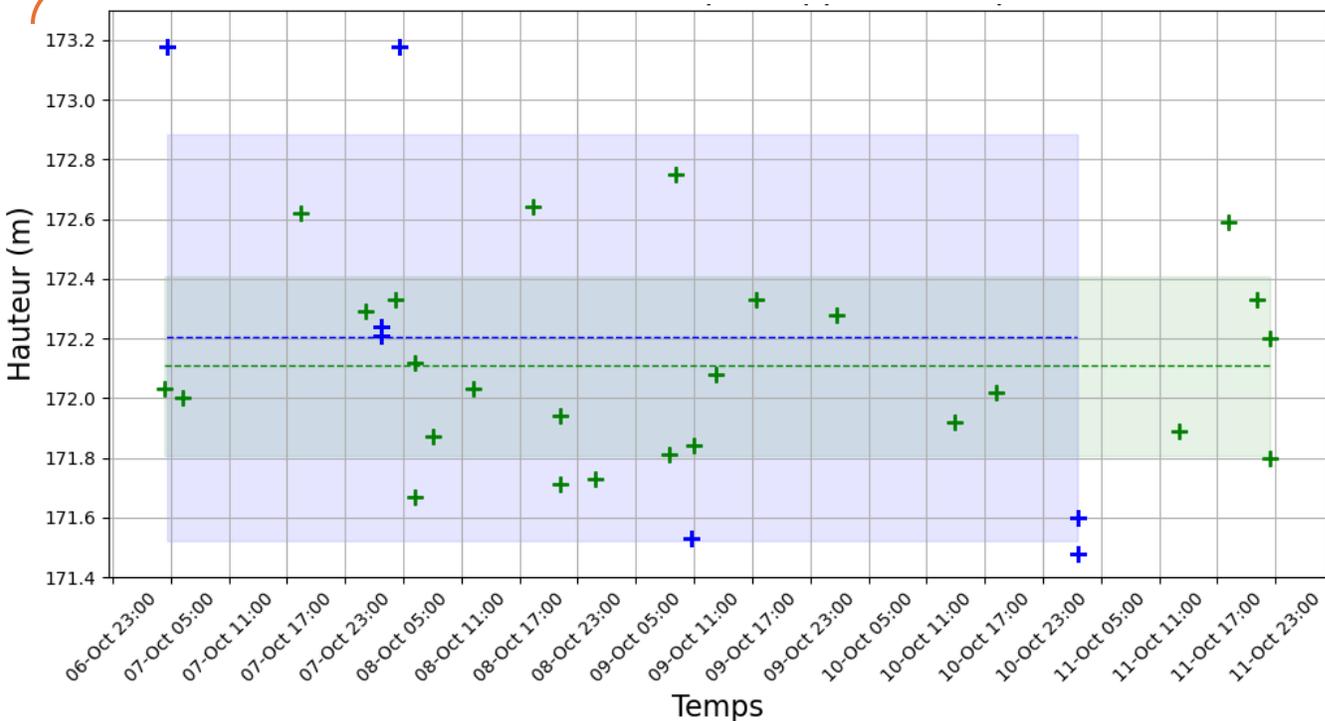
- ❖ Déploiement du système sur les 2 semaines de manipulation
- ❖ Développement & mise en œuvre de ce système (méthode en développement ^[6])

Réflexométrie

Evolution de la hauteur d'eau par rapport à l'ellipsoïde GRS 80 lors des 2 semaines

Semaine 1

Semaine 2



- ❖ Amélioration notable: plus de points acquis pendant la deuxième semaine.
- ❖ Ecart conséquent entre les deux antennes dans les deux cas.
- ❖ Méthode adaptée sur du long terme [6]

Marégraphe autonome EPONIM (Shom)



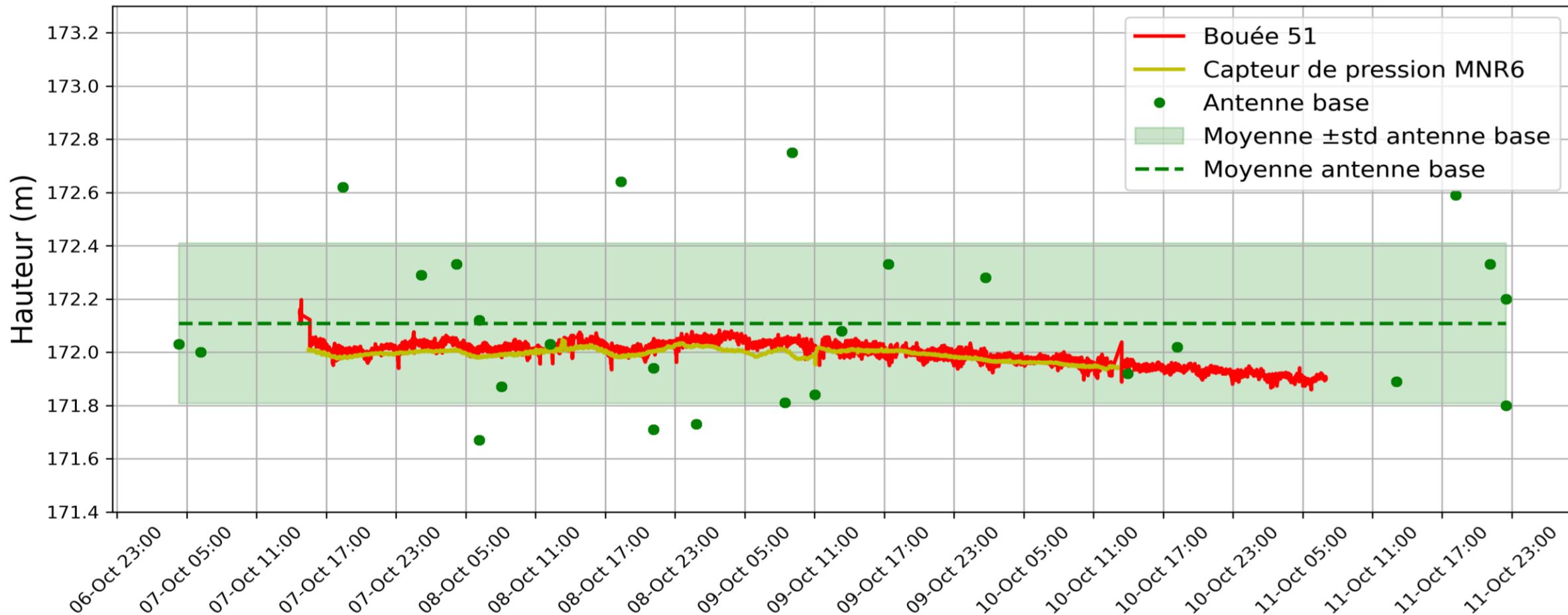
- ❖ **Technologie** : onde radar
- ❖ **Dimension (de l'ensemble)** : L x l x H en cm : 45 x 45 x 135
- ❖ **Installation** : sur le barrage
- ❖ **Incertitude sur la mesure (m)** : Calcul interne ($\sim 0,2$ cm), Nivellement ($\sim 0,3$ cm)
- ❖ **Type d'acquisition** : statique

- ❖ Déploiement du système uniquement la 2^{ème} semaine
- ❖ Enregistrement des données depuis début février
- ❖ Déploiement du système afin de servir de référence pour la comparaison des données globale

3. Résultats

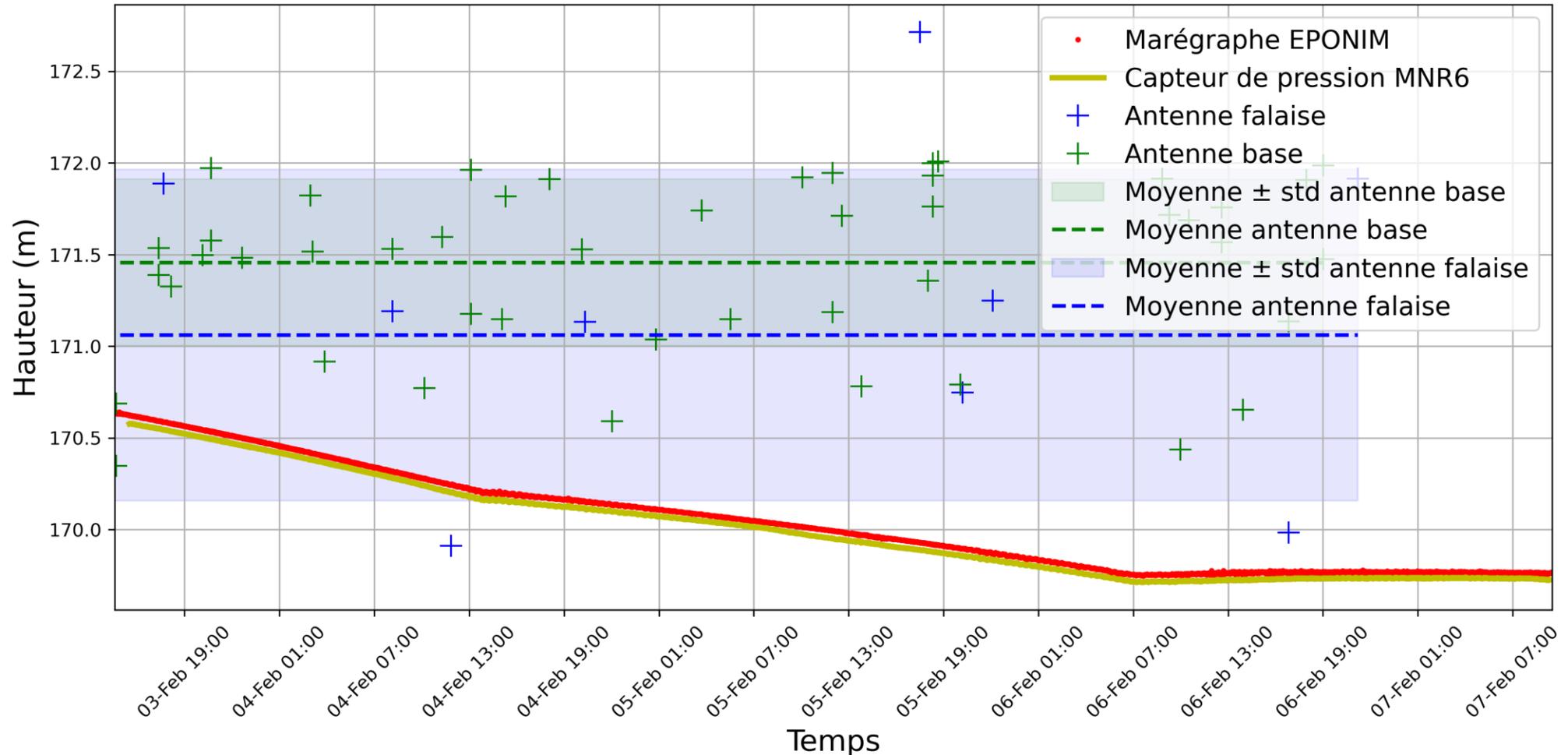
Semaine 1 – Octobre 2024

Evolution de la hauteur ellipsoïdale du lac enregistrée par la bouée, l'antenne de réflectométrie et le capteur de pression



Semaine 2 – Février 2025

Evolution de la hauteur ellipsoïdale du lac enregistrée par les antennes de réflectométrie, EPONIM et le capteur de pression



4. Validation de données satellitaires

Les systèmes satellitaires étudiés

S.W.O.T

- ❖ **Missions** : Mesures globales des hauteurs d'eau (océans & réseaux hydrologiques)
- ❖ **Domaine** : Observations de la Terre
- ❖ **Agences** : CNES (FR), NASA (E-U), CSA (CAN), UKSA (GB)
- ❖ **Date de lancement** : Décembre 2022
- ❖ **Statut** : en exploitation
- ❖ **Chiffres clés (source: CNES)** : 100 x 100 m de surface de chaque plan d'eau cartographié



Sentinel-3a

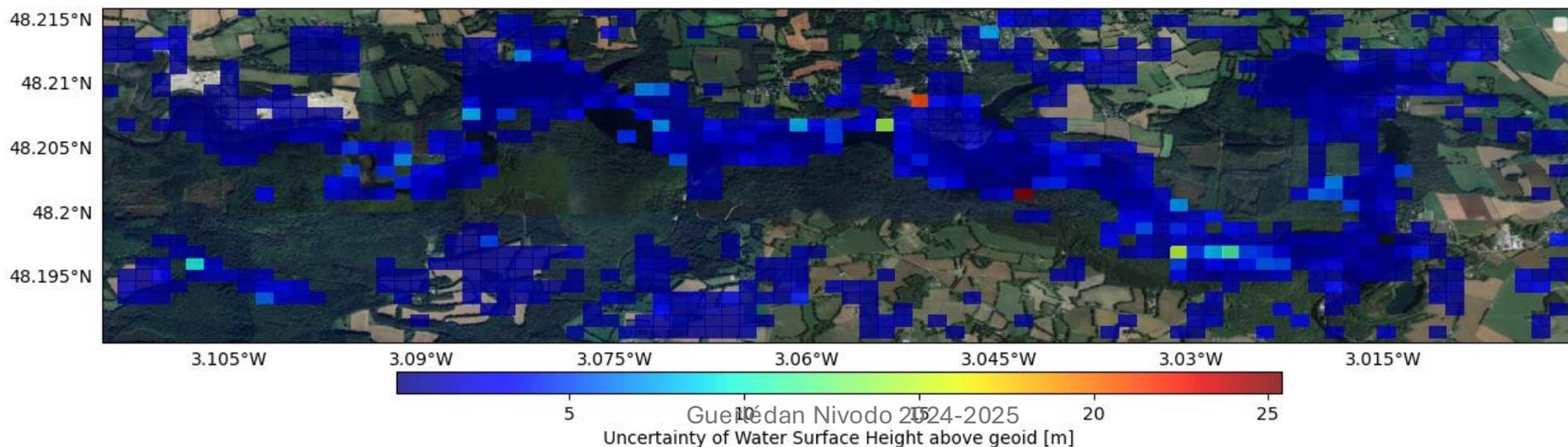
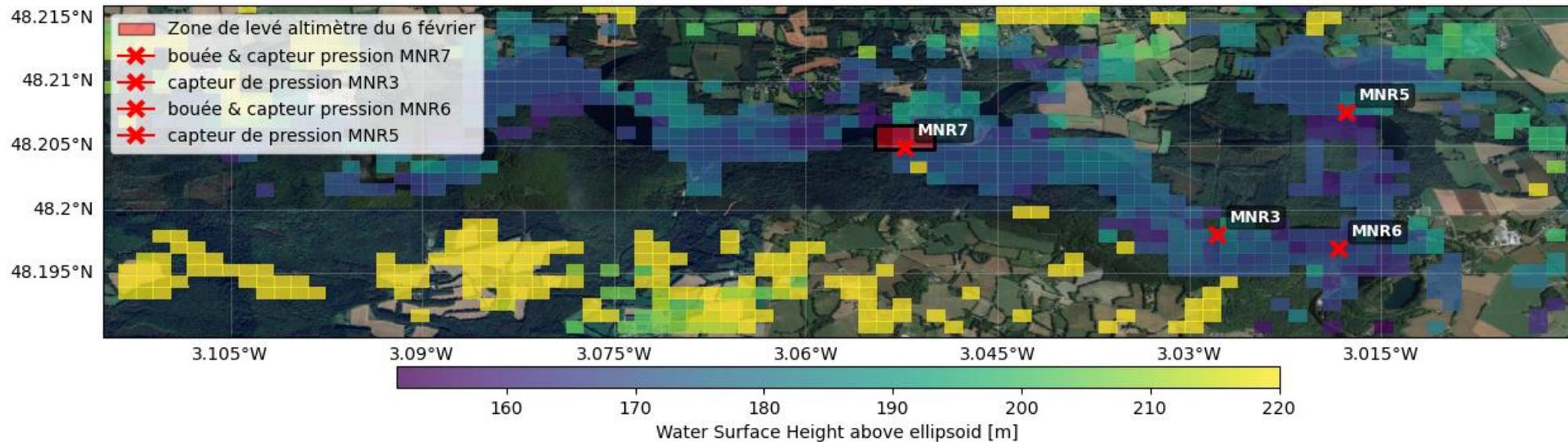
- ❖ **Missions** : Mesures d'une grande diversité sur les océans et continents
- ❖ **Domaine** : Observations de la Terre
- ❖ **Agence** : ESA (U.E)
- ❖ **Date de lancement** : Février 2016
- ❖ **Statut** : en exploitation
- ❖ **Chiffres clés** : résolution verticale 3 cm

Photos : CNRS Le Journal

Couverture spatiale de SWOT sur le lac

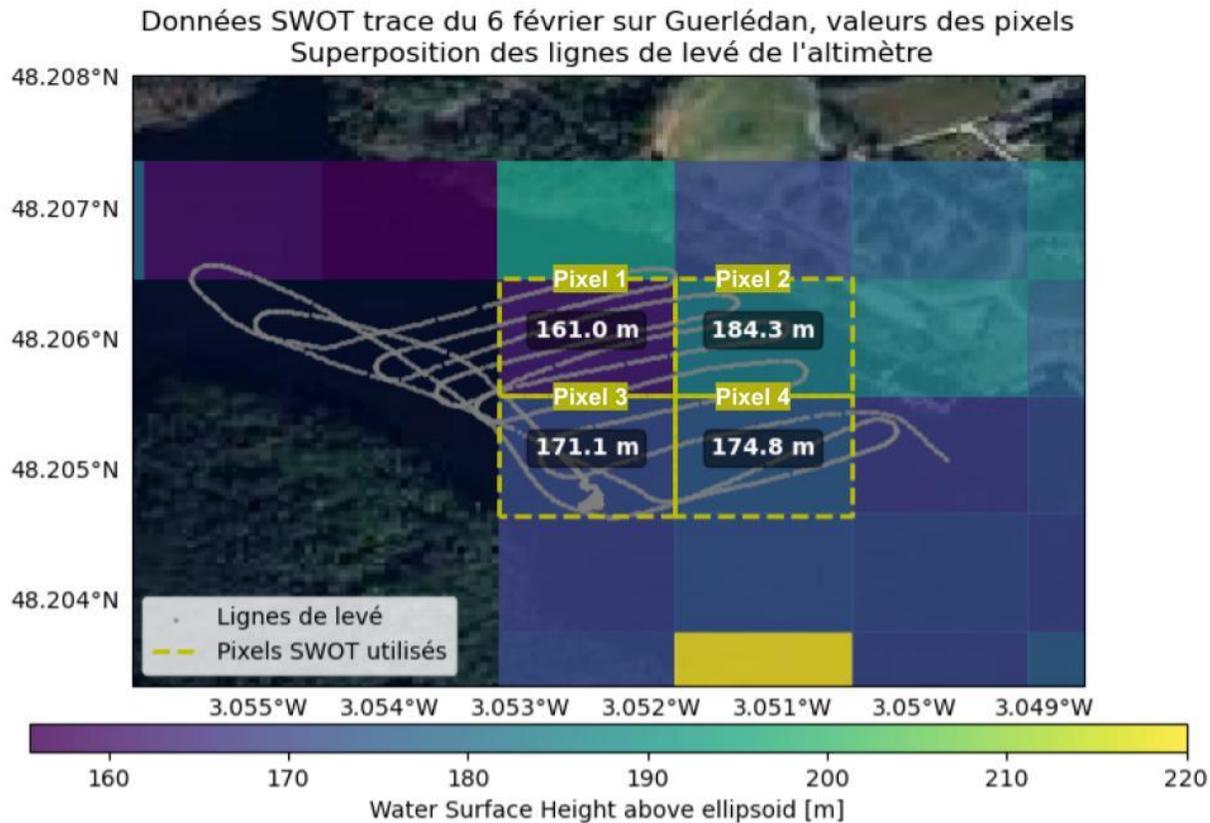
Résolution
100m*100m

Données SWOT pour la trace du 6 février



SWOT ET L'ALTIMÈTRE

Trace du 6 février



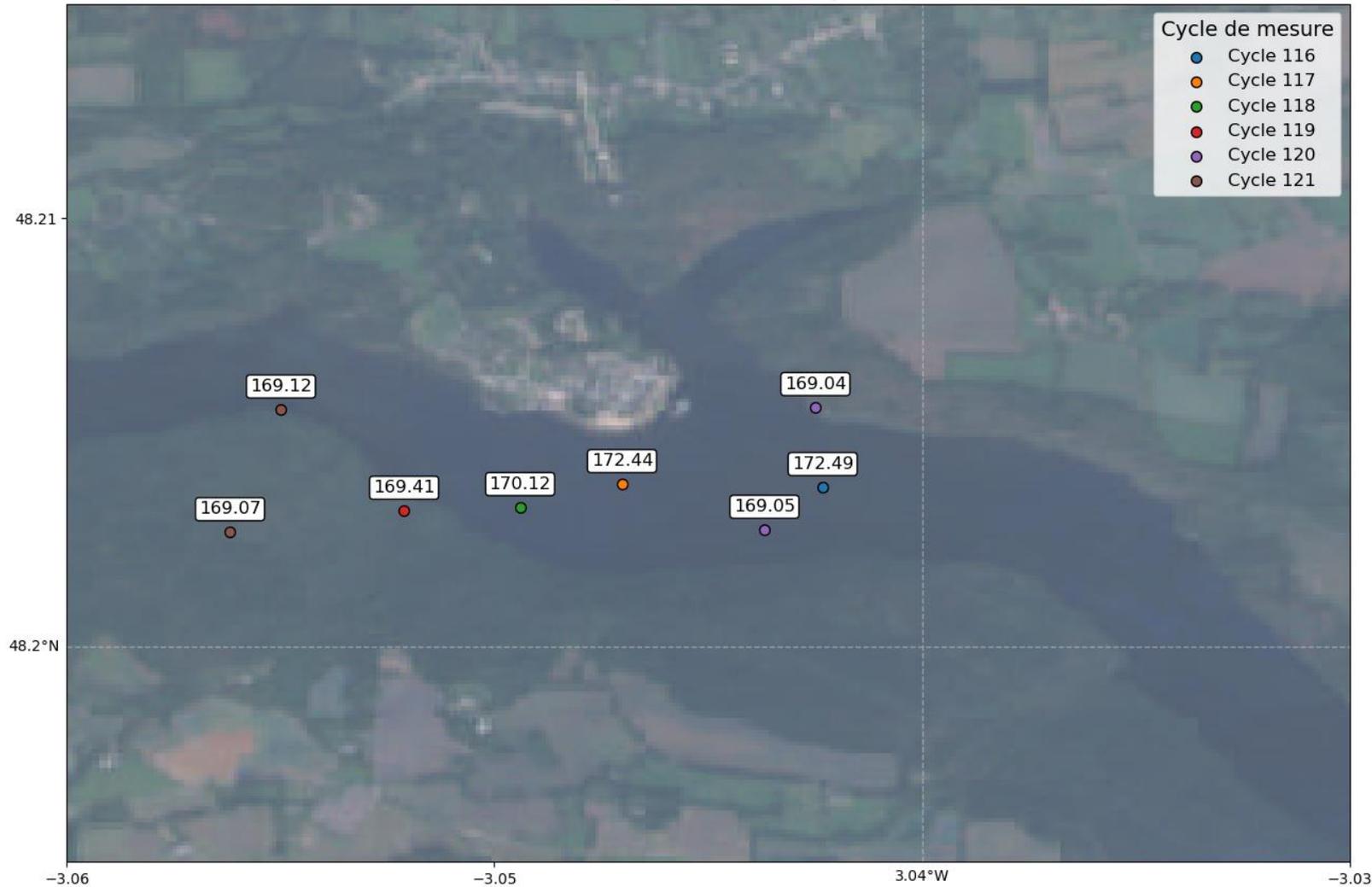
	Pixel 1	Pixel 2	Pixel 3	Pixel 4
Valeur d'altimétrie SWOT (m)	161	184,3	171,1	174,8
Moyenne altimètre (m)	169,76	169,76	169,74	169,75
Erreur calculée (m)	-8,76	14,54	1,36	5,05
Incertitude SWOT (m)	2,339	1,124	2,786	1,413
Sources d'incertitudes SWOT	1,2,3 et 4	1,2,4 et 5	2 et 4	2 et 4

Sources d'incertitudes :

1. Classification terre/eau
2. Géolocalisation de la donnée
3. Pas assez de valeurs
4. Eau sombre/signal radar réduit
5. Perturbations atmosphériques

Couverture spatiale de Sentinel-3a sur le lac

Hauteur d'eau ellipsoïdale mesurée par Sentinel-3A



Cycle 116 : septembre
Cycle 117 : octobre
Cycle 119 : novembre
Cycle 120 : décembre
Cycle 121 : janvier

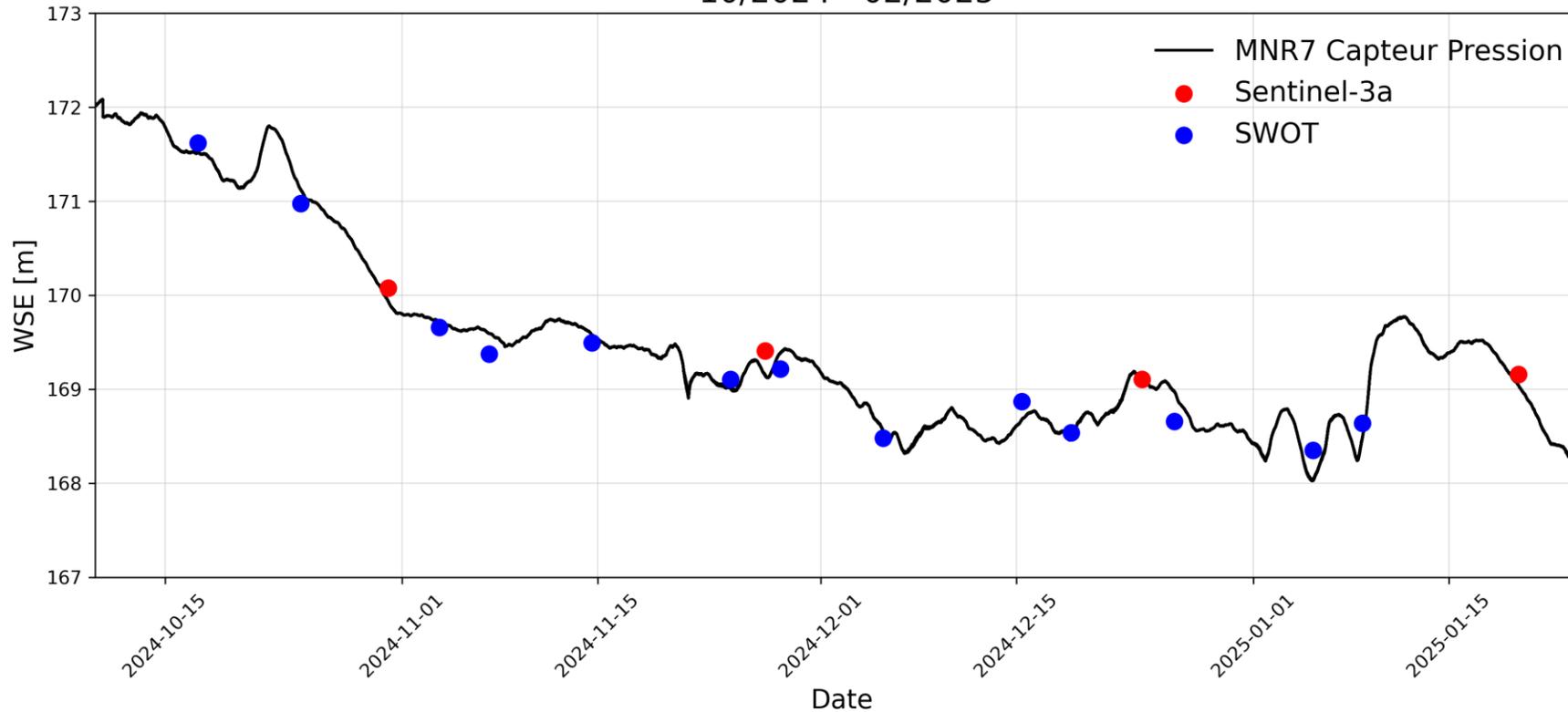
Corrections apportées à la donnée :

1. Correction Instrumentale
2. Correction Doppler
3. Correction ionosphérique
4. Correction troposphérique [12]

Valeurs médianes

Validation des données satellitaires – pressiomètres

Hauteur ellipsoïdale de la surface du lac
10/2024 - 02/2025



Comparaison des hauteurs d'eau mesurées par **MNR6** et **MNR7** aux données **satellitaires**

Capteurs comparés	Différence moyenne (m)	Ecart type des différences (m)	Nombre de valeurs
Swot/MNR7	-0.23	0.17	16
Sentinel/MNR7	-0.06	0.12	6
Swot/MNR6	-0.11	0.18	16
Sentinel/MNR6	0.01	0.12	6

Conclusion

- Des **capteurs fonctionnels et cohérents** qui se complètent : en embarqué, au fond de l'eau, sur l'eau, sur des structures au bord du lac
- Observations des **limites des capteurs**, de leurs **incertitudes** → mise en avant de mesures de référence avec les capteurs de pression
- Comparaisons **spatiales**, et **temporelles** des données de **SWOT et Sentinel 3a** à partir des données de l'altimètre sonar et des capteurs de pression
- **Pistes d'améliorations/ travail supplémentaire :**
 - => **Rendre les résultats obtenus par l'altimètre indépendants de la vitesse du bateau**
 - => **Reprendre les paramètres du logiciel de traitement de réflectométrie**
 - => **Comparaison SWOT sur davantage de pixels et pour plus d'une trace**
 - => **Davantage de capteurs sur la trace de Sentinel**

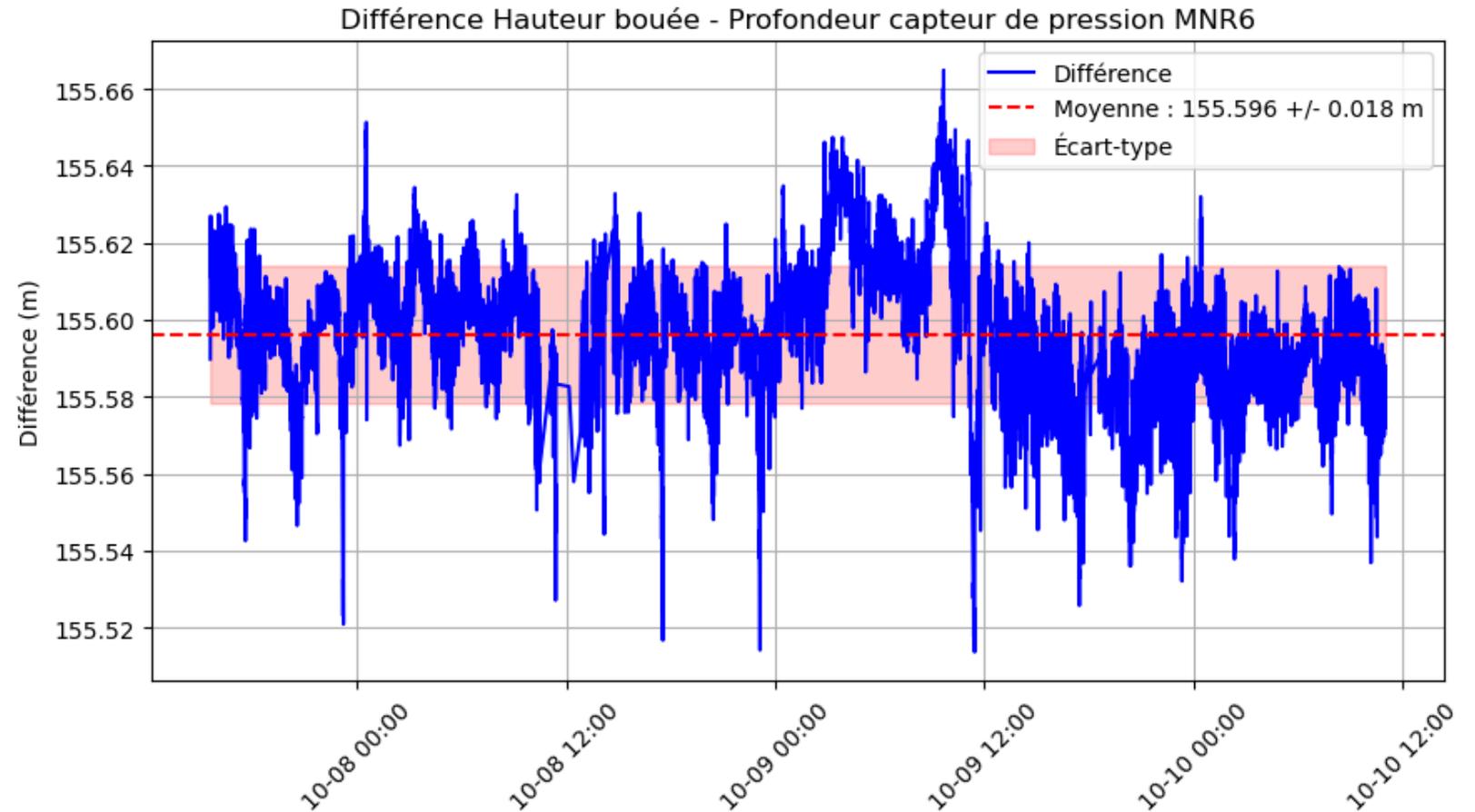
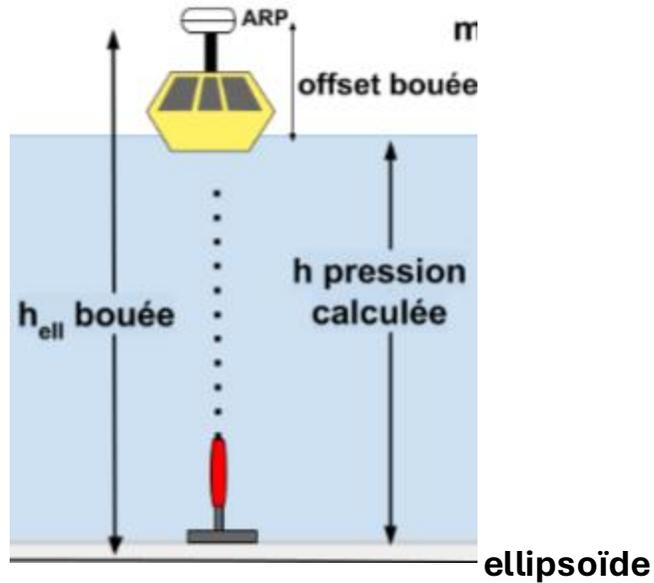
Bibliographie

- 1 - M. de Montigny. Cours de physique, vitesse du son dans l'air, université d'alberta.
- 2 - ECMWF. Ecmwf website.
- 3 - C. B. Enet. Instrumentation géodésique pour le suivi du niveau d'eau : vers la validation des données d'altimétrie spatiale. https://outlook.office.com/groups/ensta-bretagne.org/Projet_Nivodo_Guerledan_2023/files.
- 4 - U.-D. Ko. Computing the use frequency instability of grace satellites.
- 5 - K. M. Larson and G.-I. community.gnssrefl. 2024.
- 6 - K. Larson, J. Löfgren, and R. Haas. Coastal sea level measurements using a single gnss receiver. Advances in Space Research, 2013.
- 7 - E. K. Mahdi. Variation of the speed of sound in monoatomic gases with altitude and humidity.2024.
- 8 - NASA. Synthetic aperture radar (sar).
- 9 - S. B. T. Raj. Acoustic thermometry based on accurate measurements of speed of sound in air.2021.
- 10 - RBR Ltd. RBRsolo3Datasheet, 2024. Accessed: 2025-02-28.
- 11 - Scipy. Apply a savitzky-golay filter to an array.
- 12 - D. Yu, Tao ; Jiu. An improvement on ocog algorithm in satellite radar altimeter.

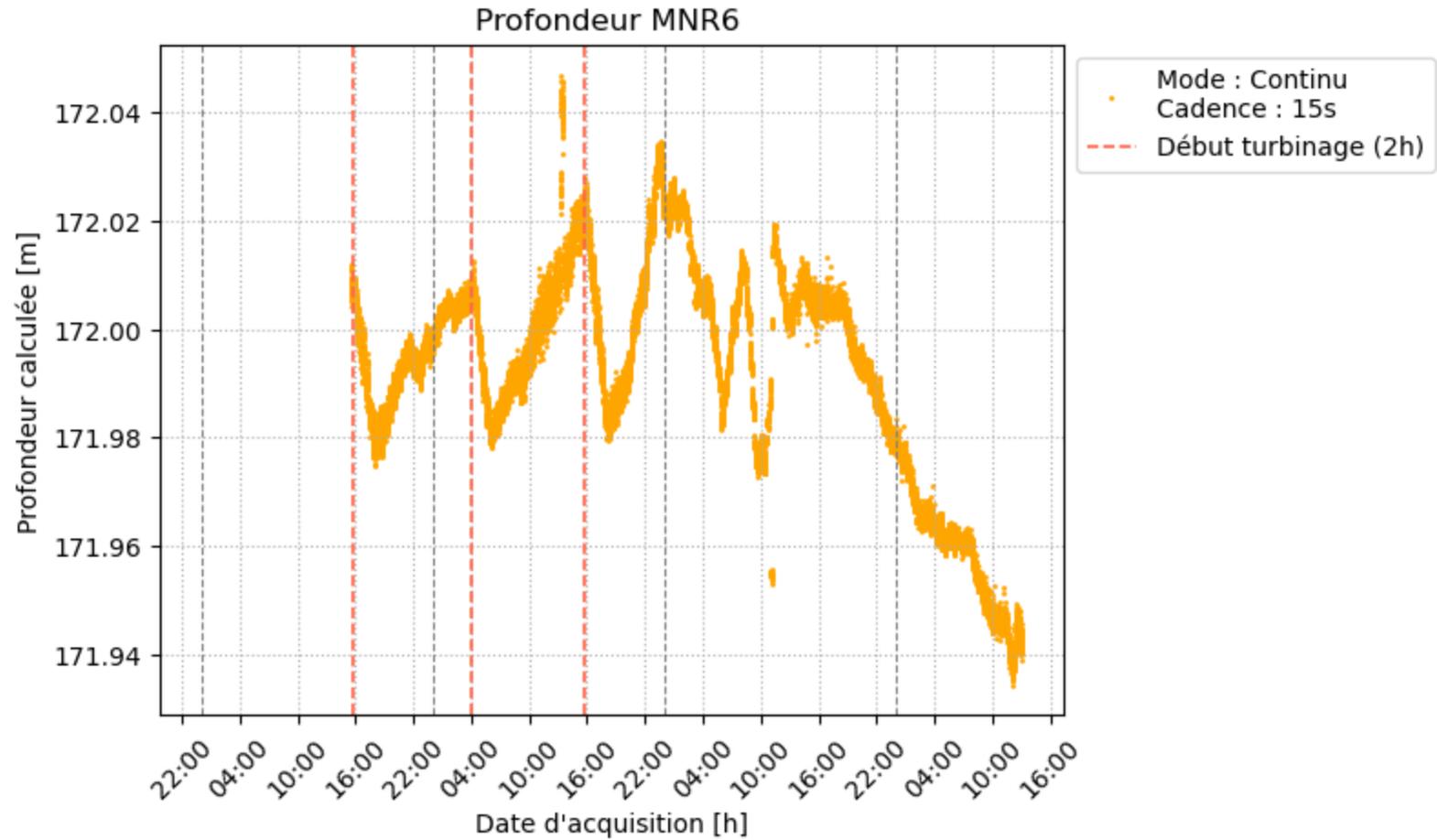
Merci pour votre attention.

Annexes

Référencement capteurs de pression



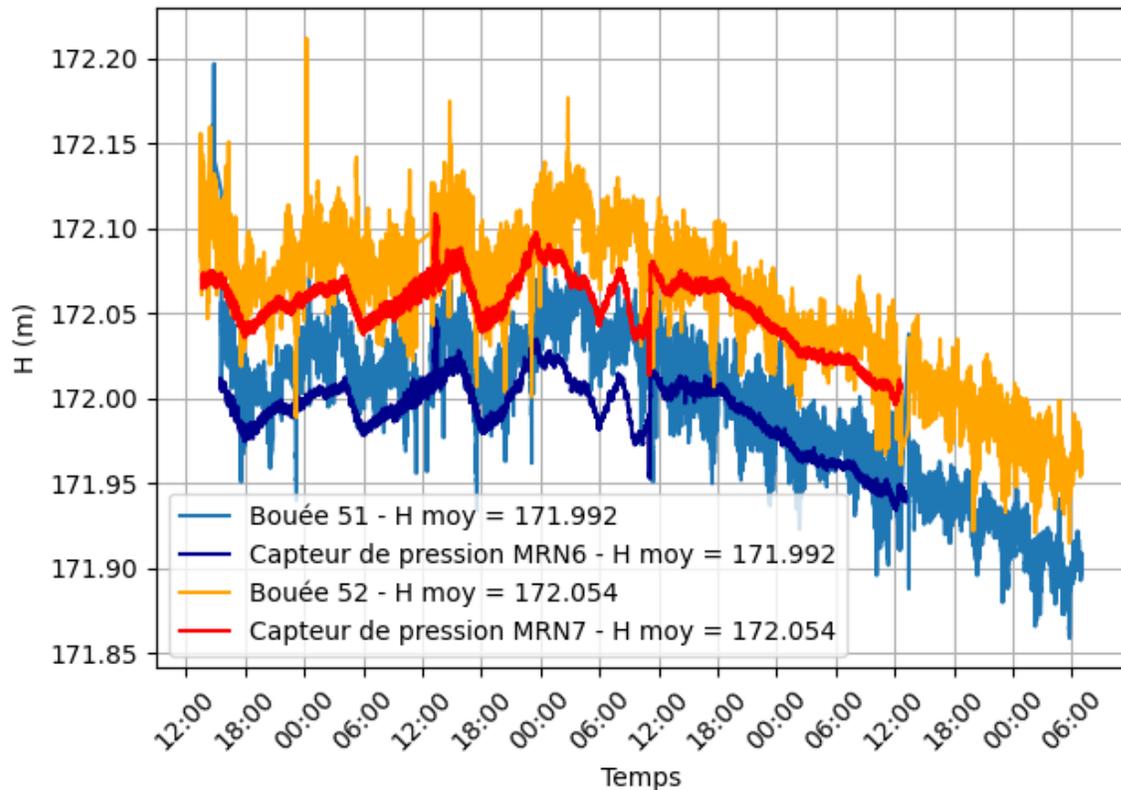
Cohérence capteurs de pression octobre



Bouées GNSS & Capteurs de pression

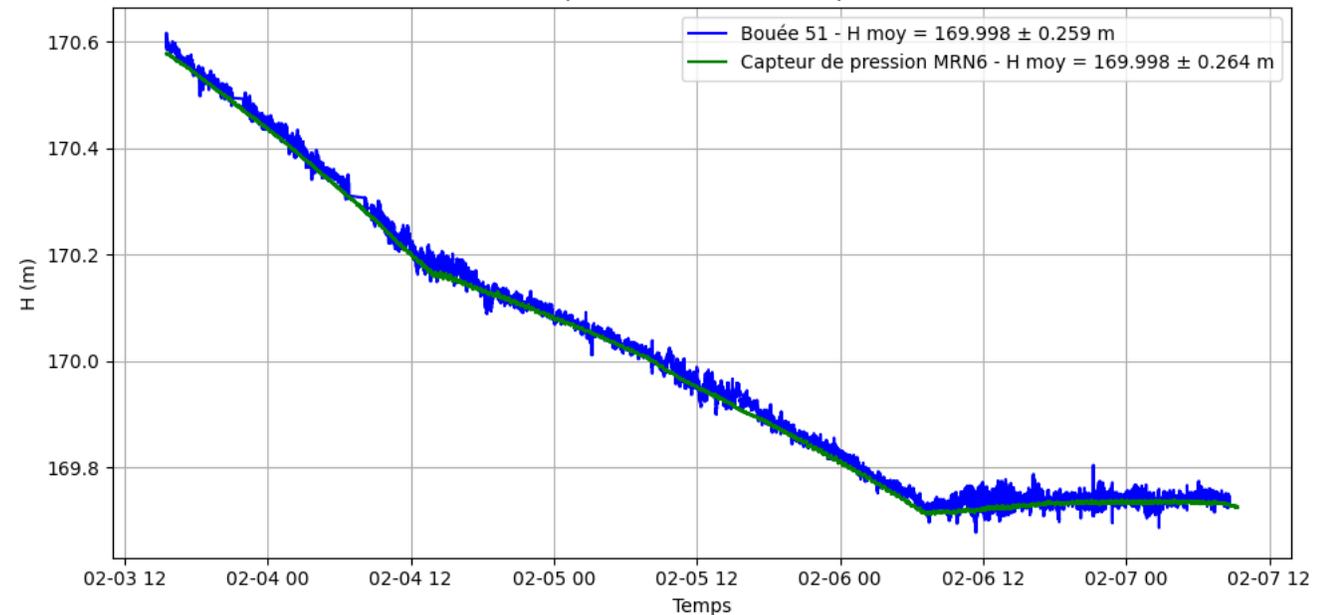
1^{ère} semaine d'acquisition

Hauteur ellipsoïdale filtrée des bouées et capteurs de pression associés

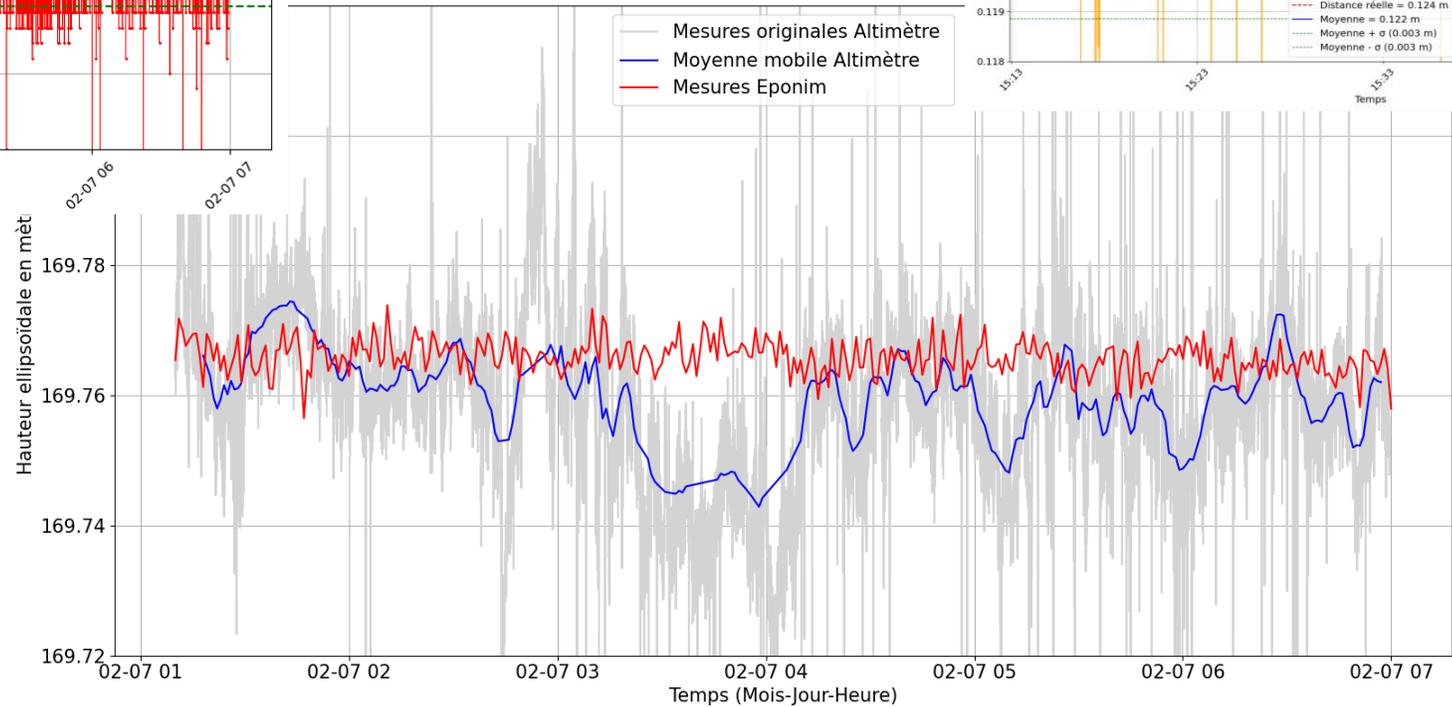
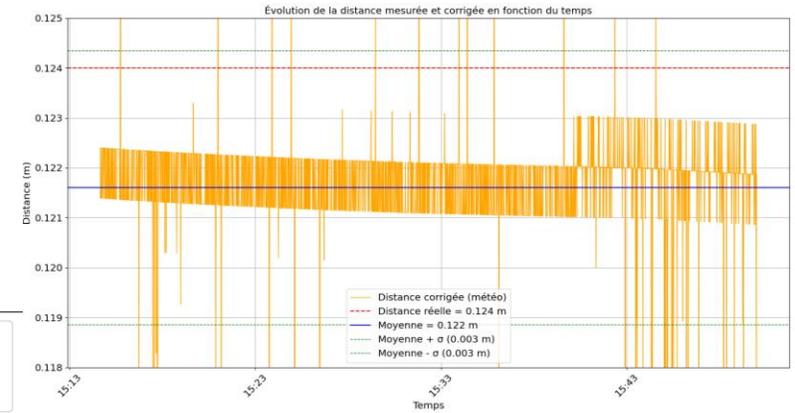
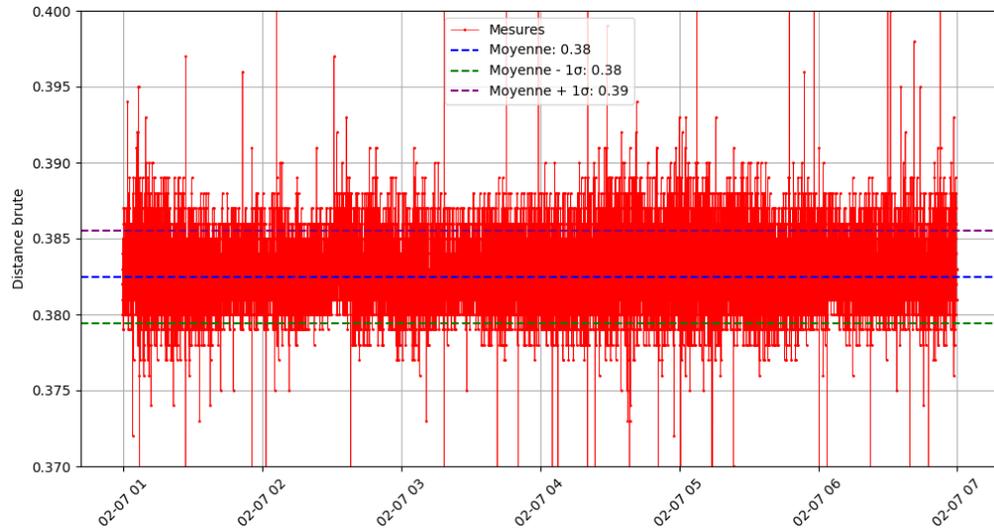


2^{ème} semaine d'acquisition

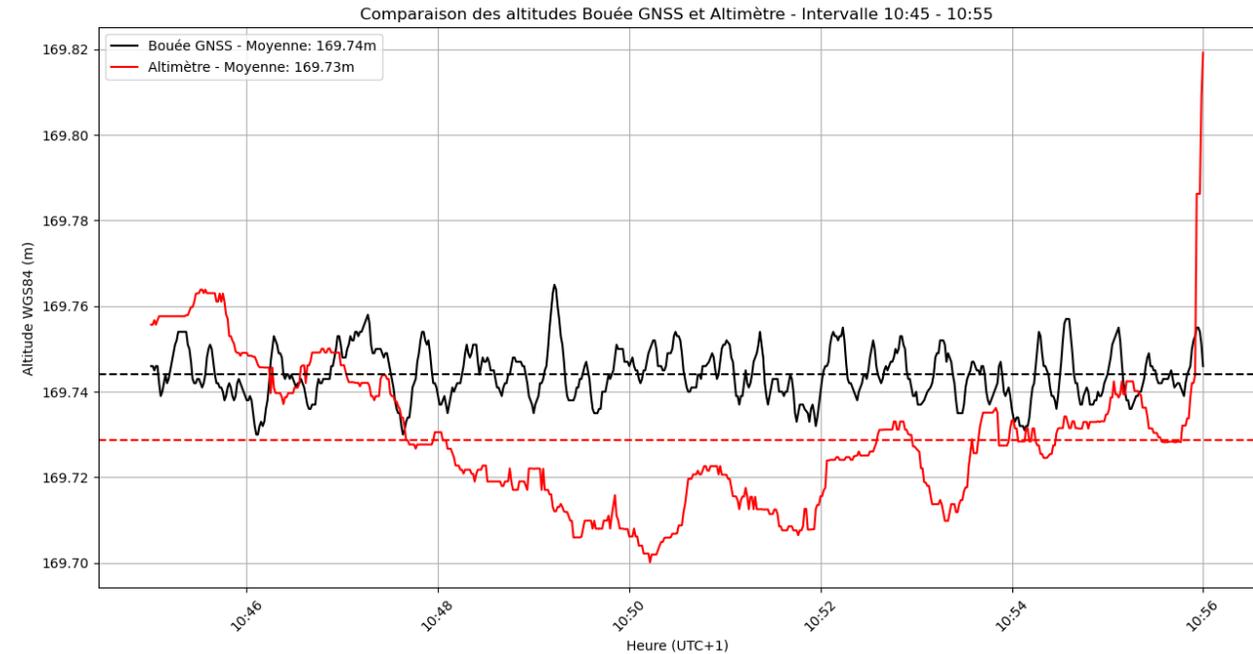
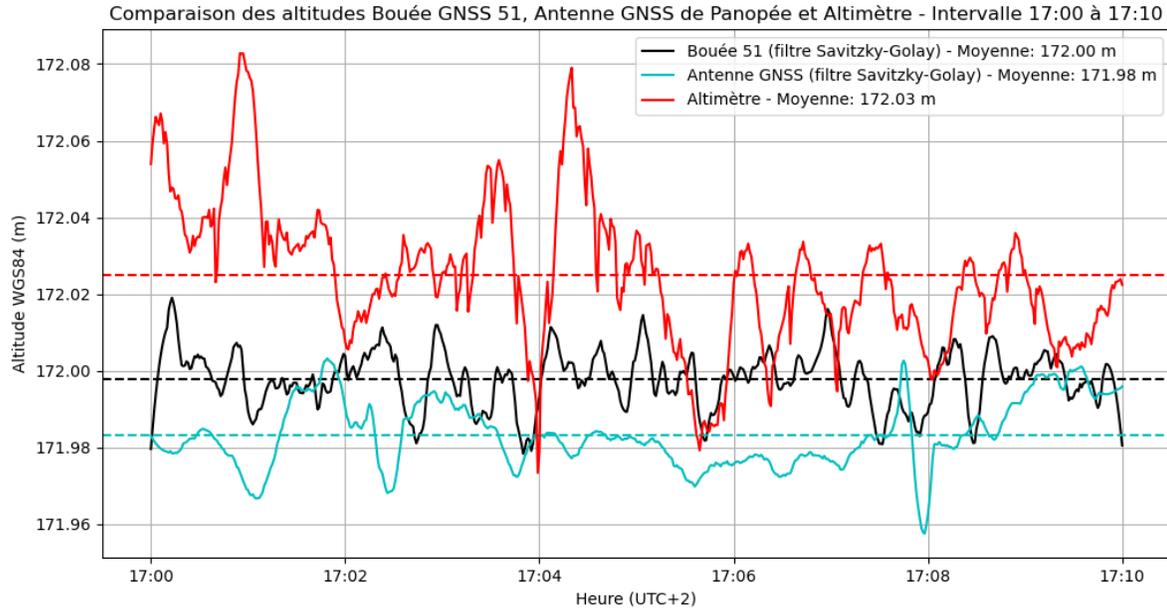
Hauteur ellipsoïdale Bouée 51 et Capteur MRN6



Altimètre Acoustique



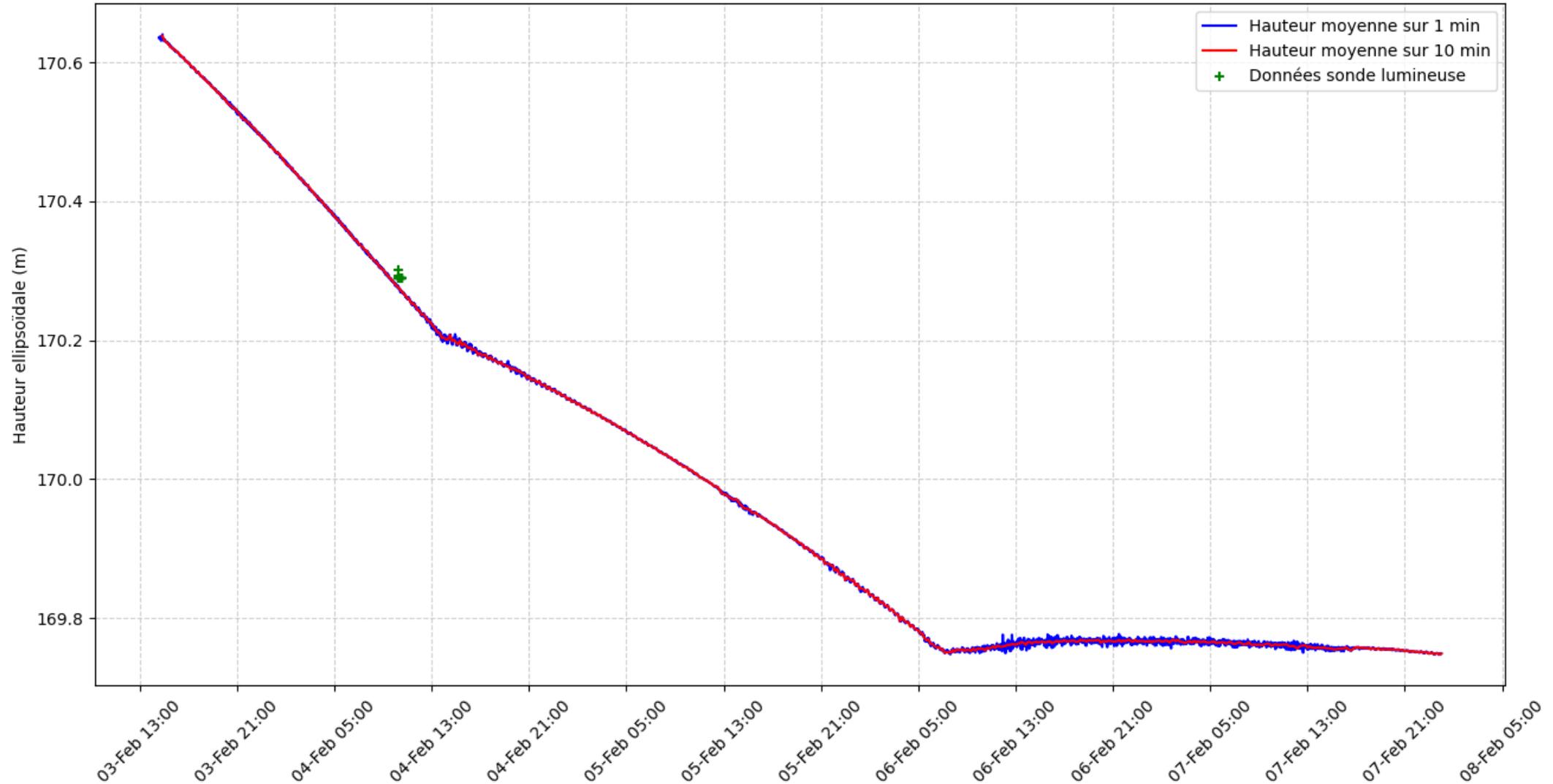
Altimètre Acoustique Comparaison Bouées



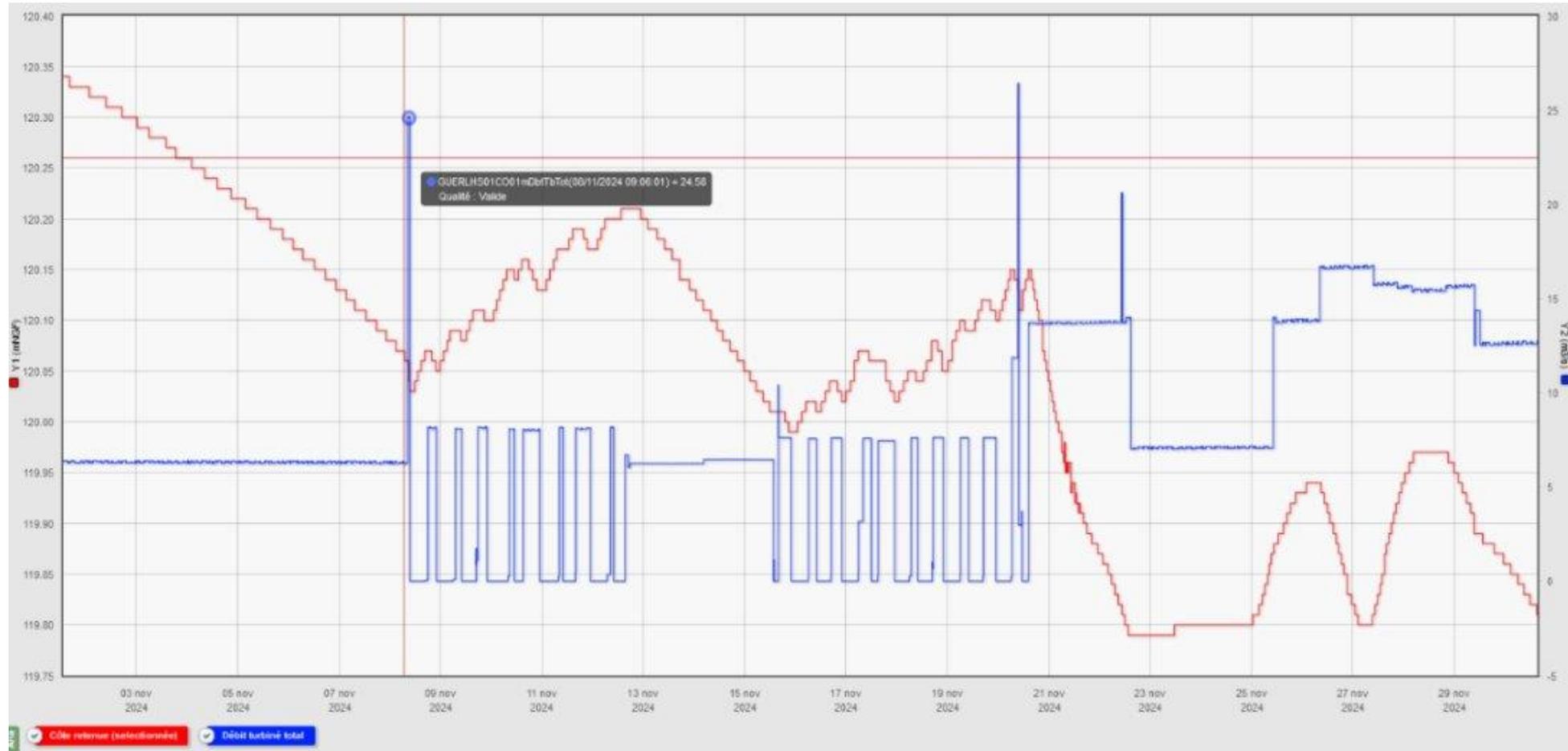
Ecart moyen entre les différents capteurs - Semaine 1	
Intervalle 16:30 - 16:43	
Bouée 52 - GNSS	0.004 m
Bouée 52 - Altimètre	-0.037 m
GNSS - Altimètre	-0.042 m
Intervalle 17:00 - 17:10	
Bouée 51 - GNSS	0.014 m
Bouée 51 - Altimètre	-0.027 m
GNSS - Altimètre	-0.042 m

Marégraphe portable EPONIM (SHOM)

Évolution du niveau du lac enregistré par le marégraphe EPONIM du 03/02/2025 au 07/02/2025

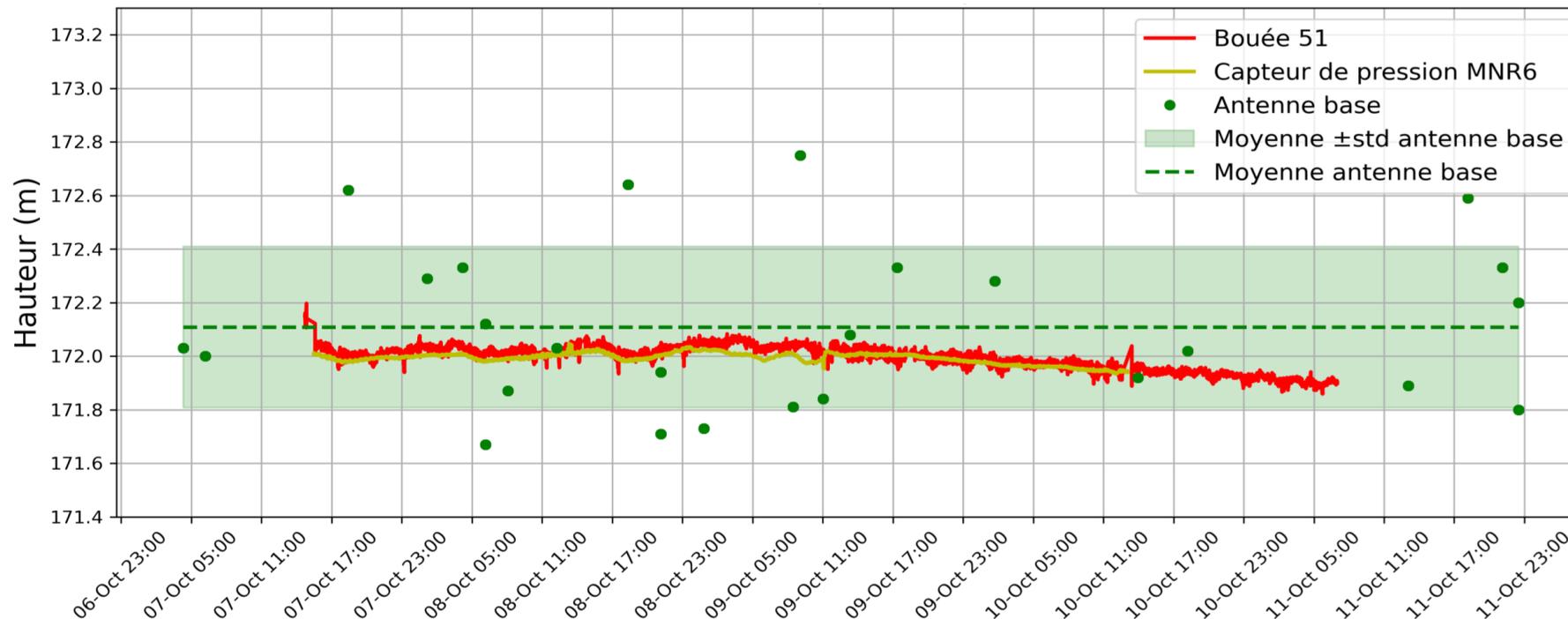


Données de turbinage / Marégraphe de EDF



Semaine 1 – Octobre 2024

Evolution de la hauteur ellipsoïdale du lac enregistrée par la bouée, l'antenne de réflectométrie et le capteur de pression

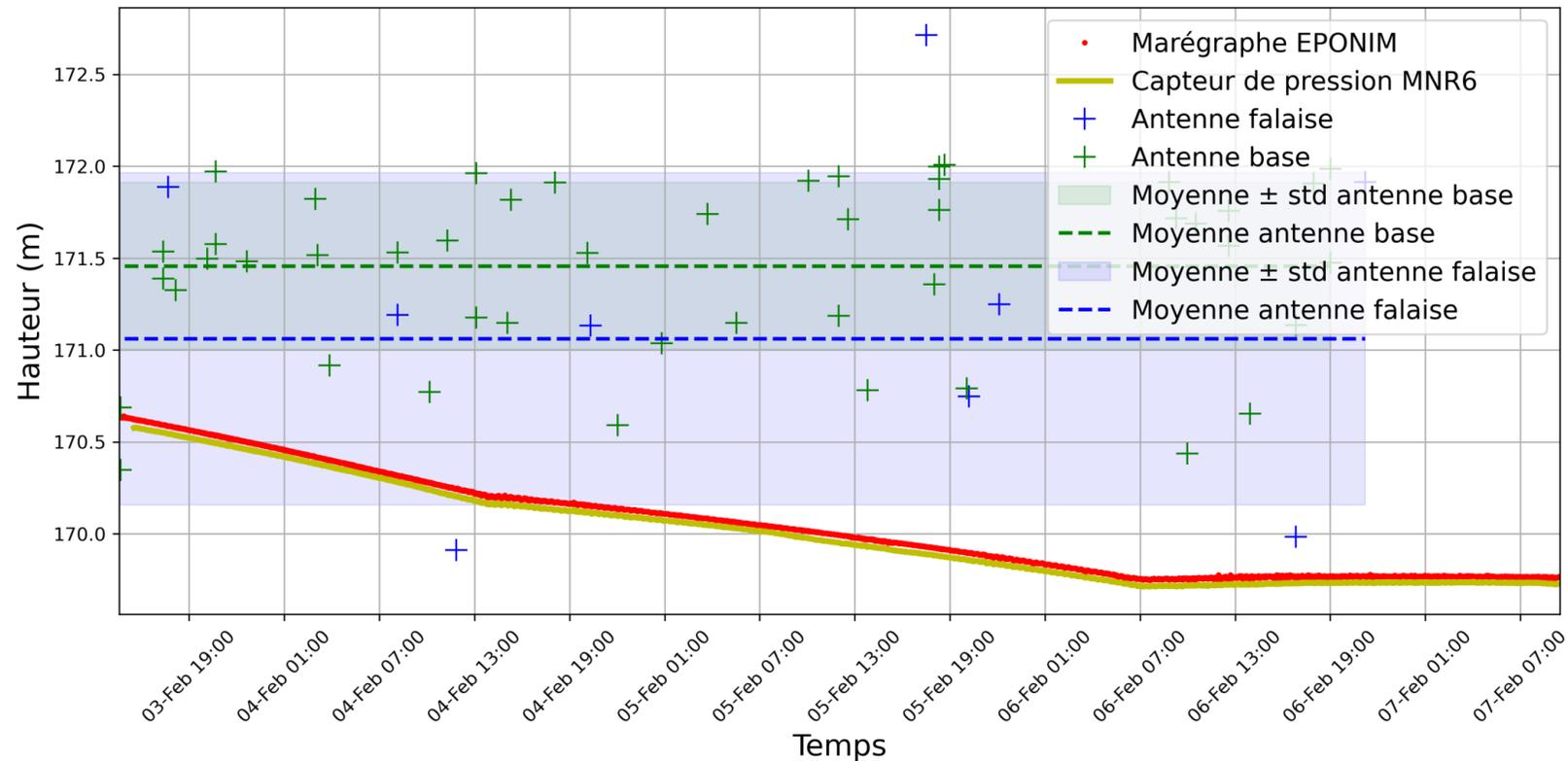


Statistiques	Reflecto Base - Bouée 51	Reflecto Base - Pression MRN6
Différences point par point		
Moyenne des différences [m]	-0.098	-0.102
Écart-type des différences [m]	0.336	0.328
Différences avec la moyenne de l'antenne Reflecto Base		
Moyenne des différences [m]	-0.116	-0.116
Écart-type des différences [m]	0.045	0.020

Statistiques	Bouée 51 - Capteur MRN6
Moyenne des différences [m]	0.0188
Écart-type des différences [m]	0.018
Différence minimale [m]	-0.063
Différence maximale [m]	0.088

Semaine 2 – Février 2025

Evolution de la hauteur ellipsoïdale du lac enregistrée par les antennes de réflectométrie, EPONIM et le capteur de pression



Statistique	Marégraphe - Antenne		Marégraphe - Pression MNR6
	Falaise	BS	
Différence moyenne [m]	-0.987	-1.383	0.038
Écart-type [m]	0.269	0.269	0.004

Incertitudes des capteurs

