

Réseaux de capteurs géophysiques à bas coût aux standards scientifiques

Du développement instrumental à l'exploitation des données.

M. VIDAL (Geoazur/OCA), F. BOURCIER (ITES/EOST), M. BES DE BERC (ITES/EOST),

L. ROLLAND (Geoazur/OCA), J.-P. MALET (ITES/EOST), A. CHAMBODUT (ITES/EOST)

Objectifs de l'atelier

Peux t'on proposer des solutions instrumentales aux standards scientifiques à bas-coût - géodésie, sismologie, météorologie ?

Pourquoi ?

- densifier les réseaux
- instrumenter des sites à forte dynamique et à probabilité de perte d'instruments
- réduire les coûts

Comment ?

- reverse engineering
- besoin de certaines communautés (RENAG, OMIV notamment)

Thèmes abordés lors de l'atelier

Capteurs GNSS low-cost

@RENAG, @OMIV - GéoAzur - M. Vidal et al.

Capteurs météorologiques low-cost

@OMIV - GéoAzur - M. Vidal et al.

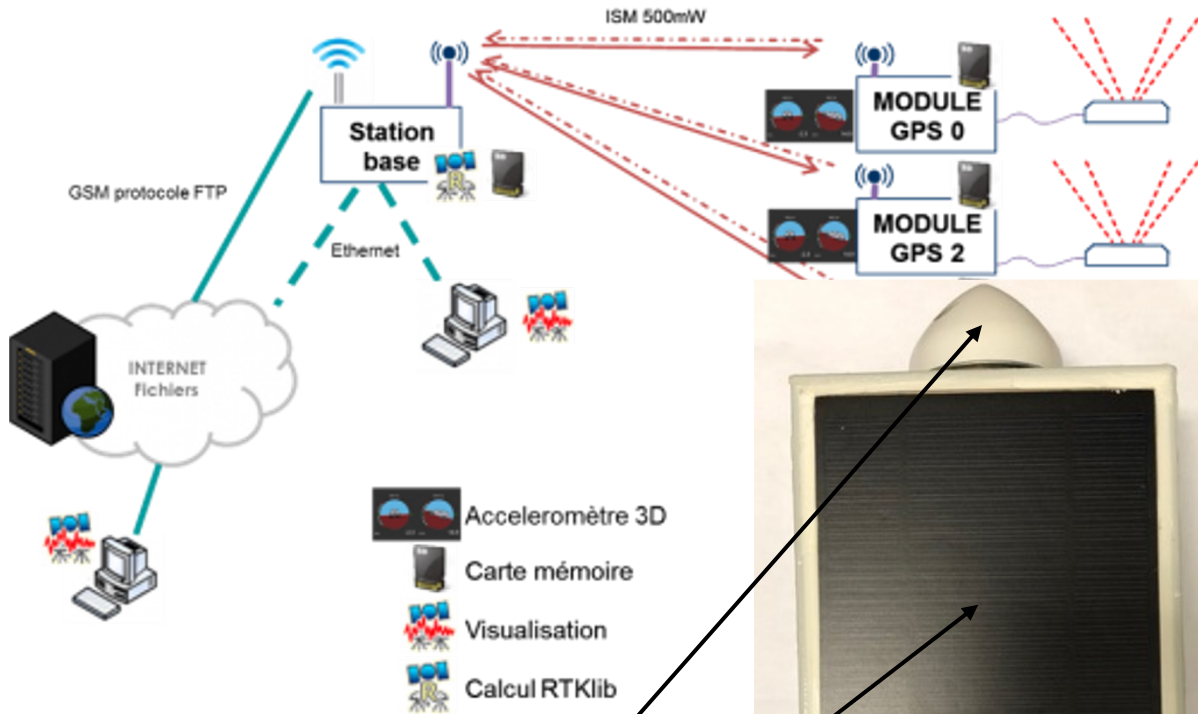
Vers des solutions intégrées multi-paramètres : Envirosiences

@OMIV, @RENAG, @RLBP - EOST et GéoAzur - F. Bourcier, M. Vidal et al.

Carte de numérisation sismologique low-cost

@OMIV, @RLBP - EOST et GéoAzur - F. Bourcier, M. Bès de Berc et al.

Description du matériel: Infrsurvey Geomon

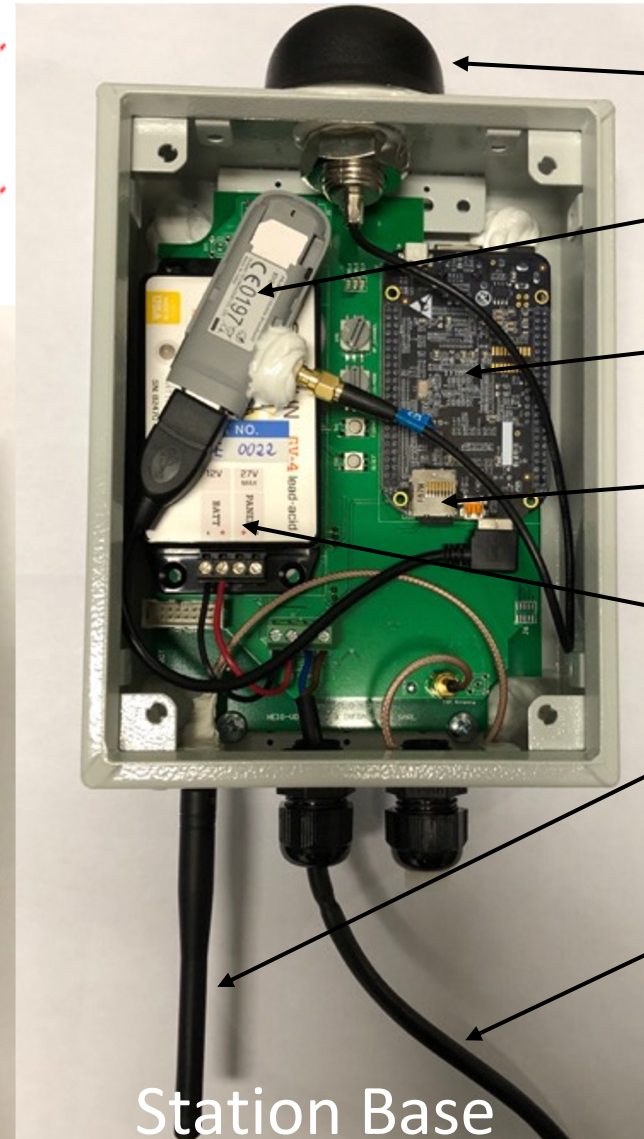


Antenne GNSS

Panneau Solaire

Transmission radio

Module GNSS



Station Base

Antenne 3G

Modem 3G

PC Calcul

Carte Sd

Régulateur 4A

Transmission radio

Alimentation Externe

EXCLUSIF

Installation sur site

Base et alimentation



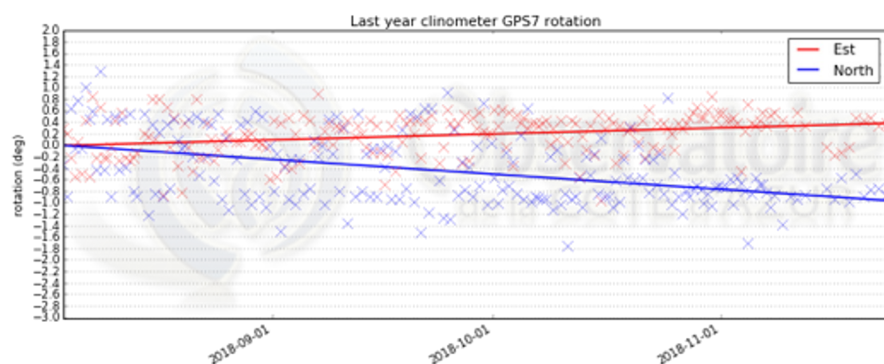
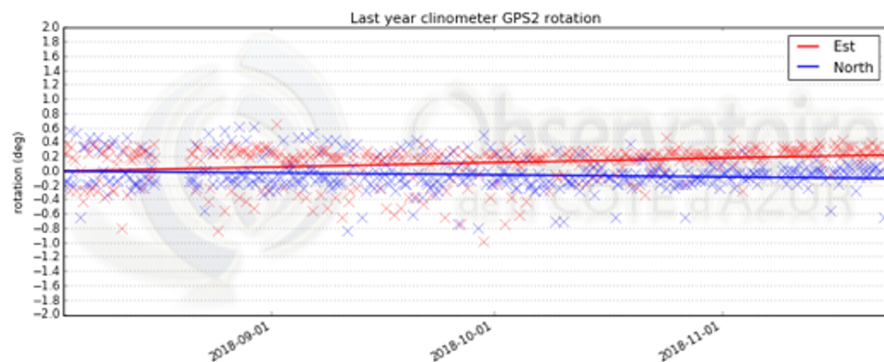
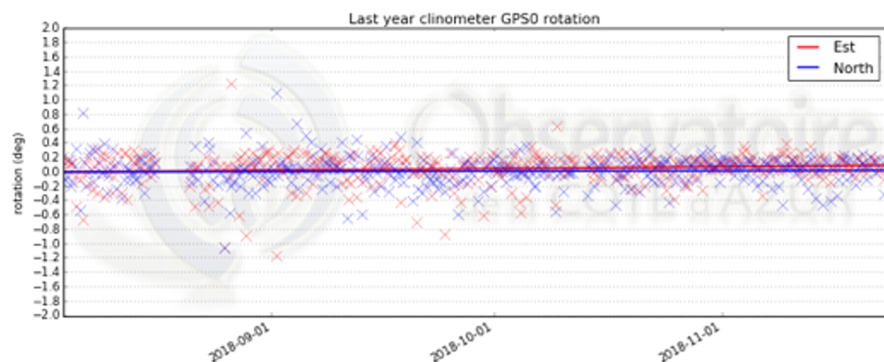
Module au sol



Module sur bâtiment

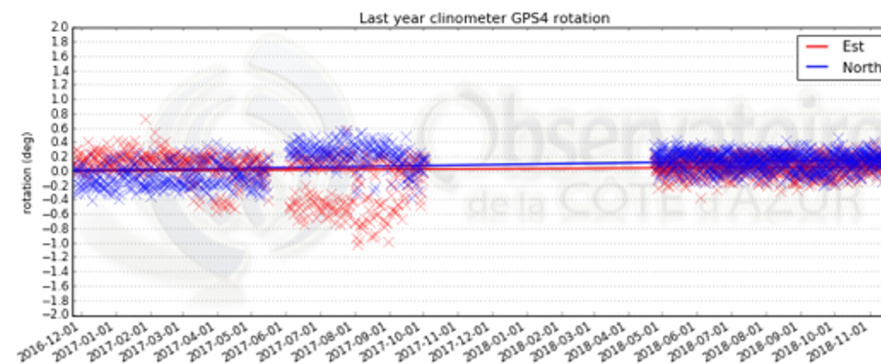
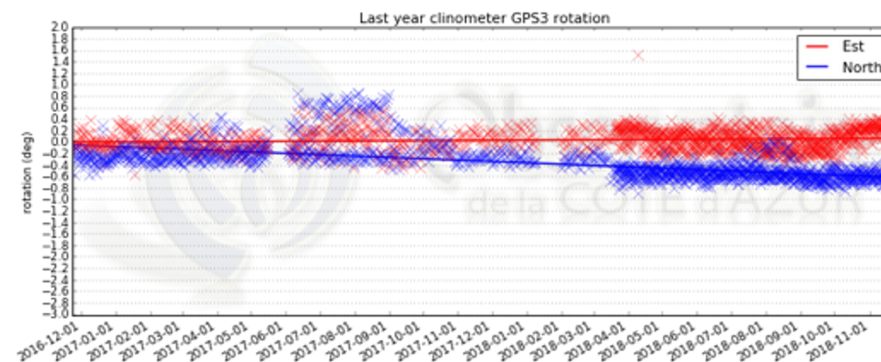
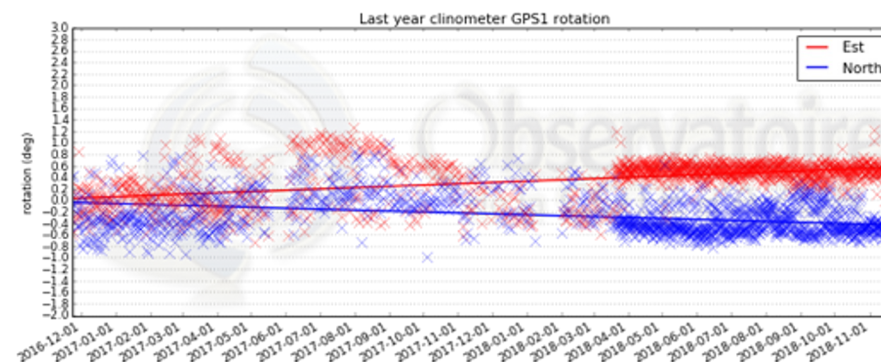


Traitement de l'accéléromètre en données inclinométriques

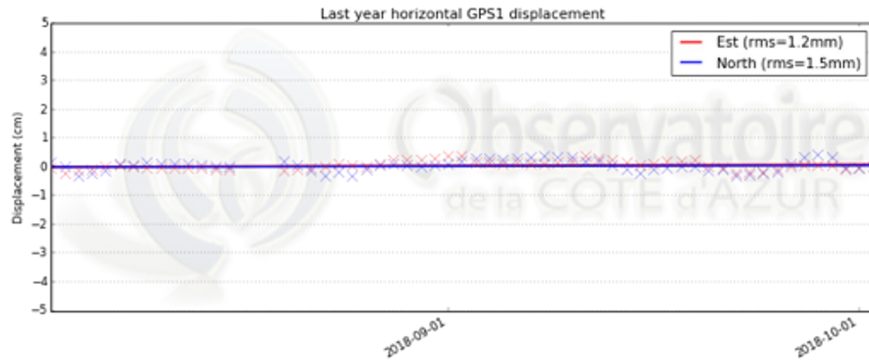


Les données d'inclinaison sont très bruitées et de mauvaises qualités.

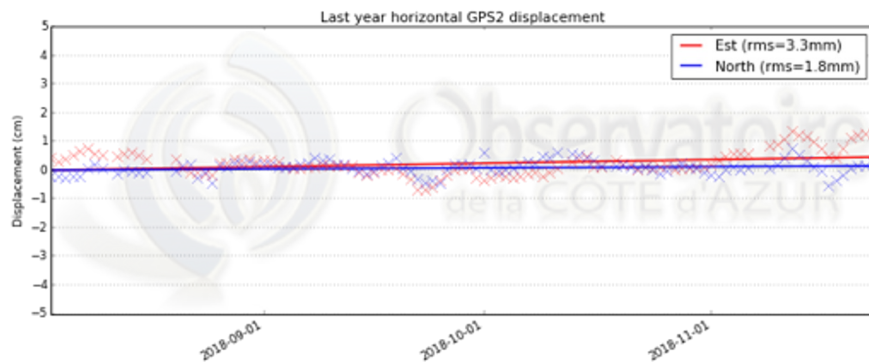
Cela devient exploitable sur le long terme avec une bonne alimentation



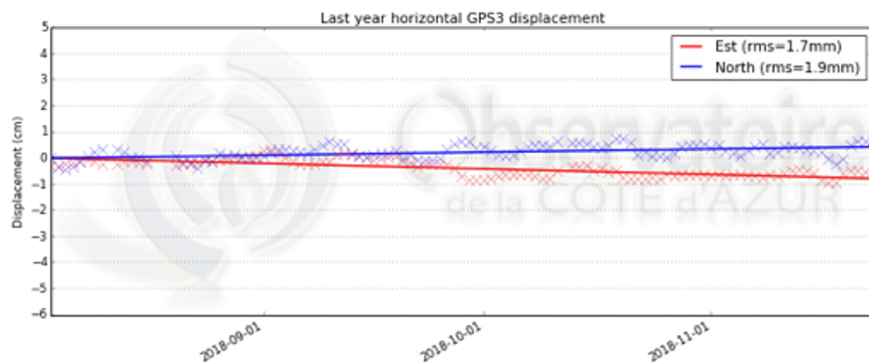
Traitement des données GNSS: Vence



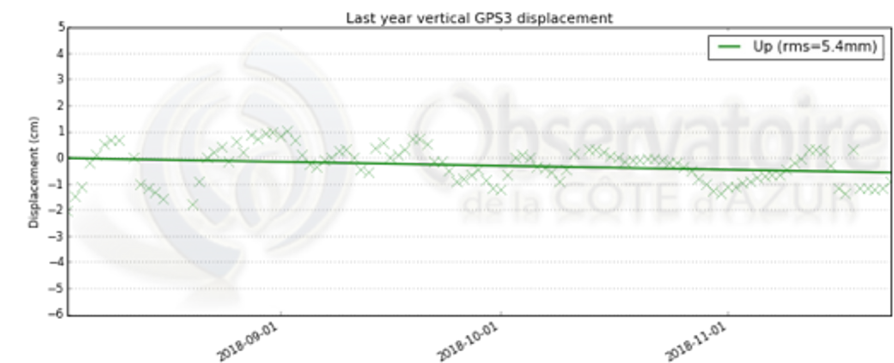
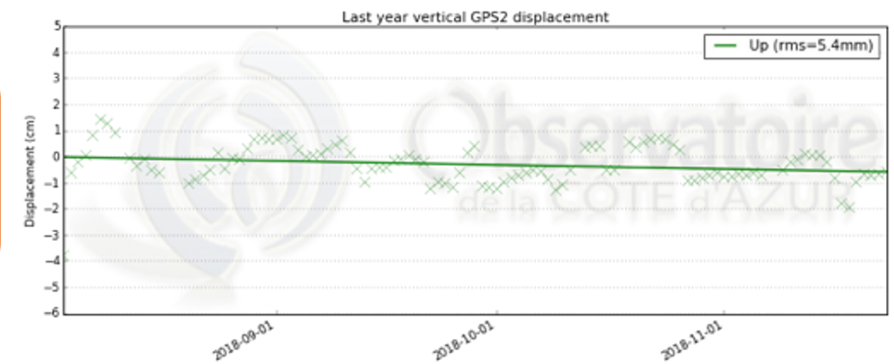
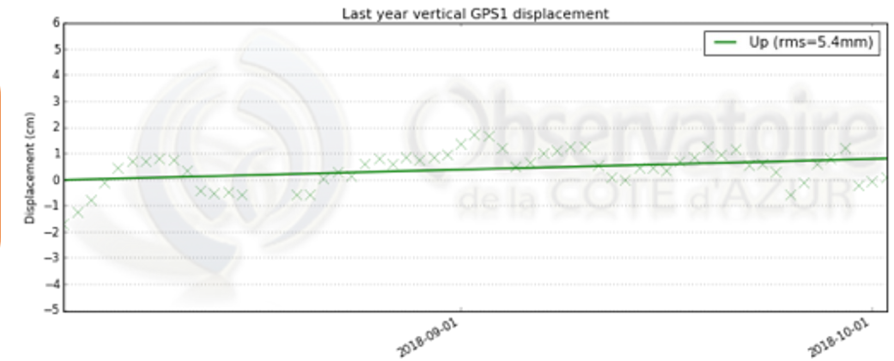
Stable, Arrêt de l'alimentation pour travaux



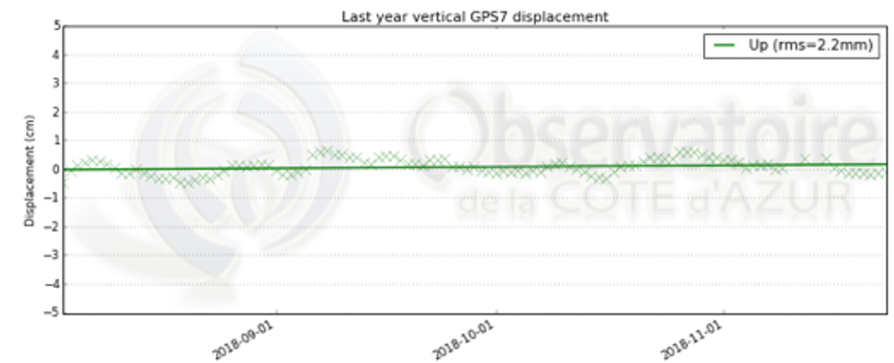
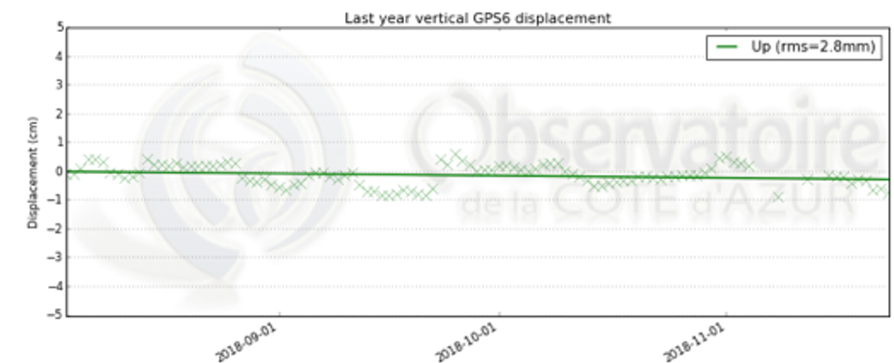
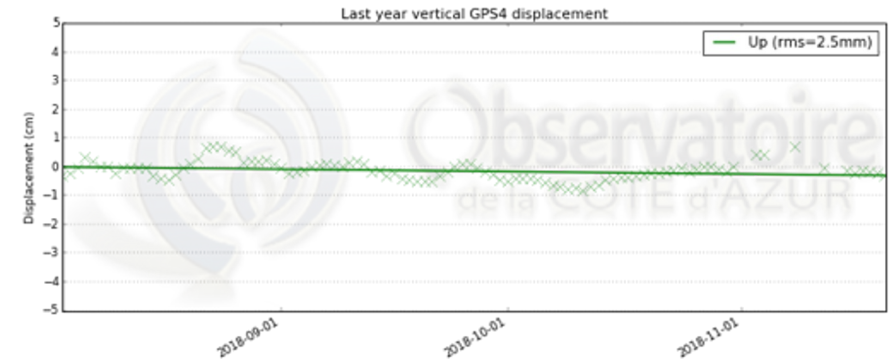
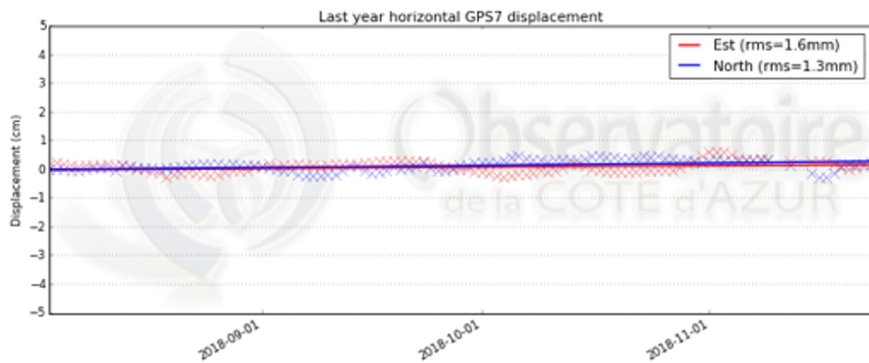
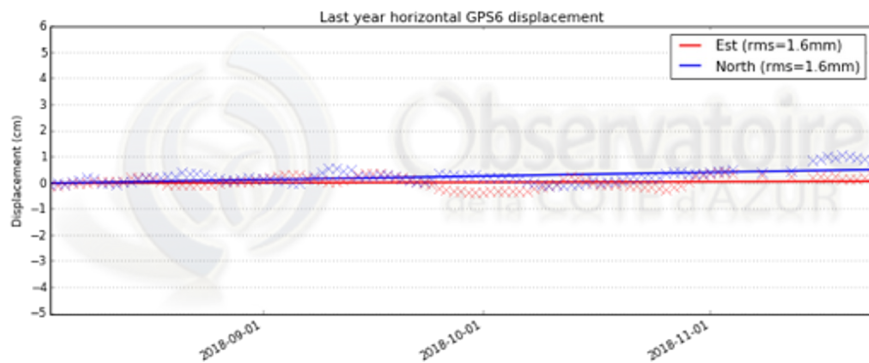
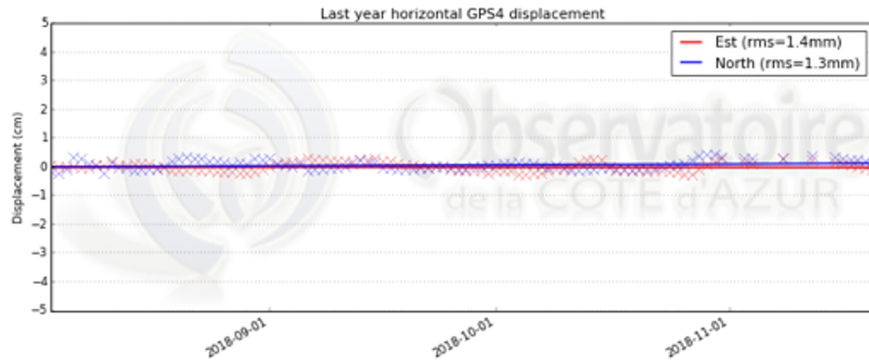
Signal de déplacement Est courant Novembre



Dérive stable Sud Sud-Est



Traitement des données GNSS: Ceriana

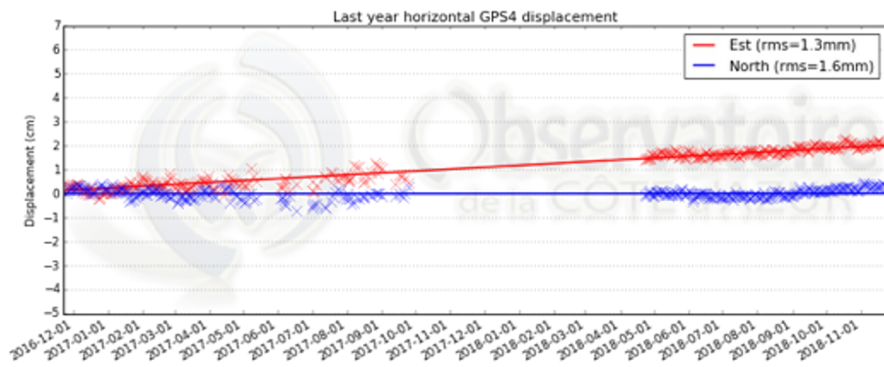
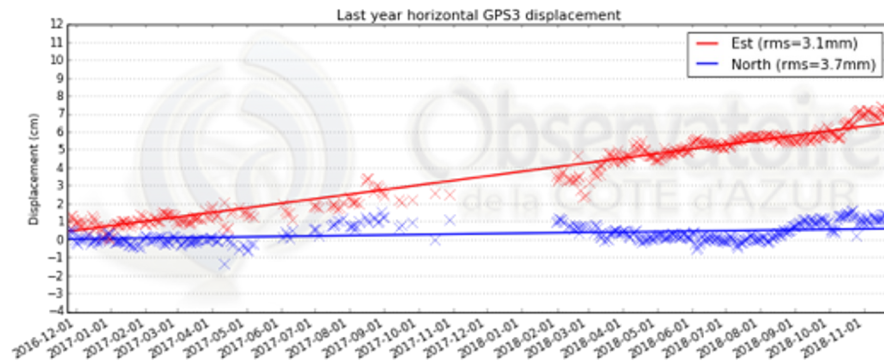
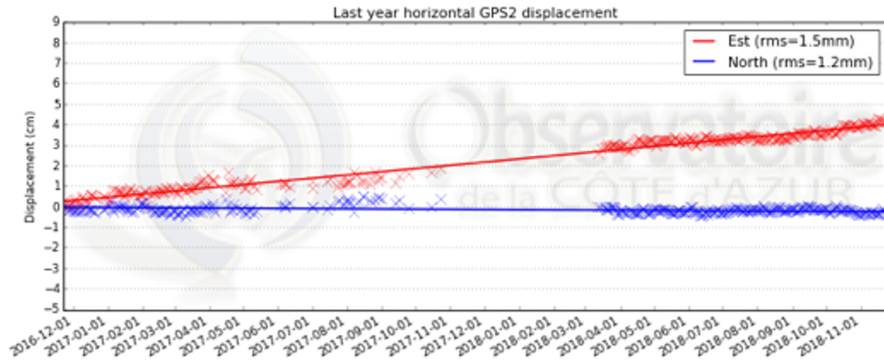


Stable, pas de signaux significatifs.

Problème d'alimentation en novembre.

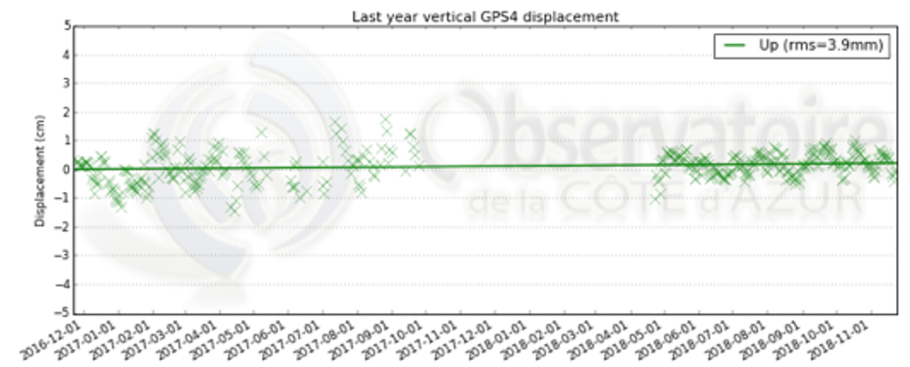
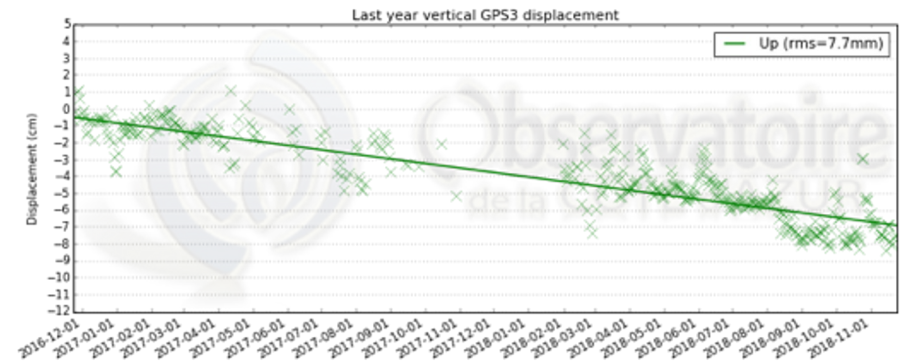
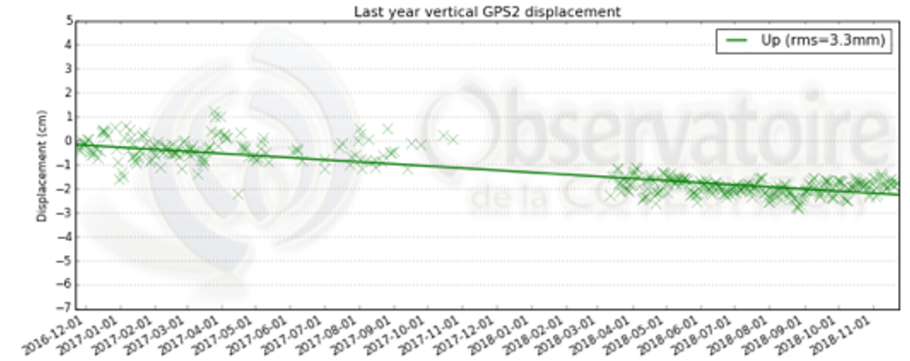
Configuration le 08/11/2018
2x60min/jours
->
1x90min/jours

Traitement des données GNSS: Turbie

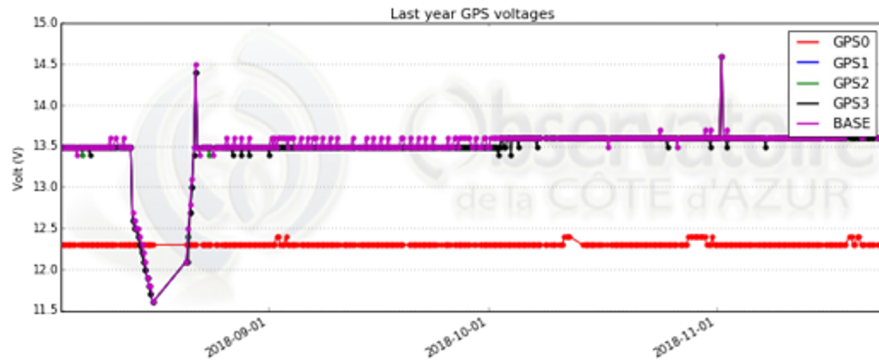


Sur le long terme, les déplacements lent et les phénomènes transitoires sont visibles.

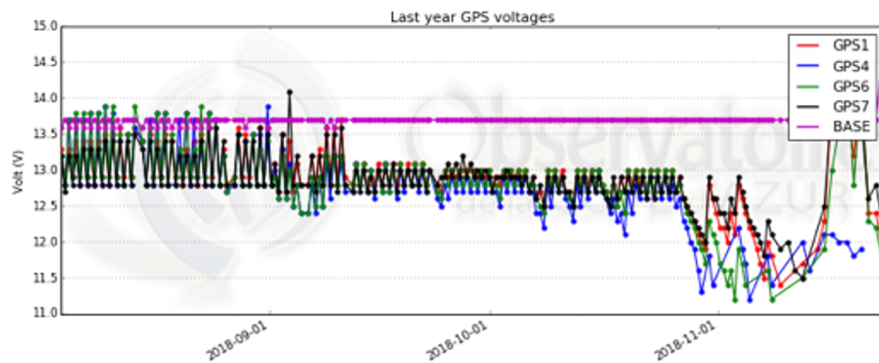
Le système est robuste avec une alimentation externe



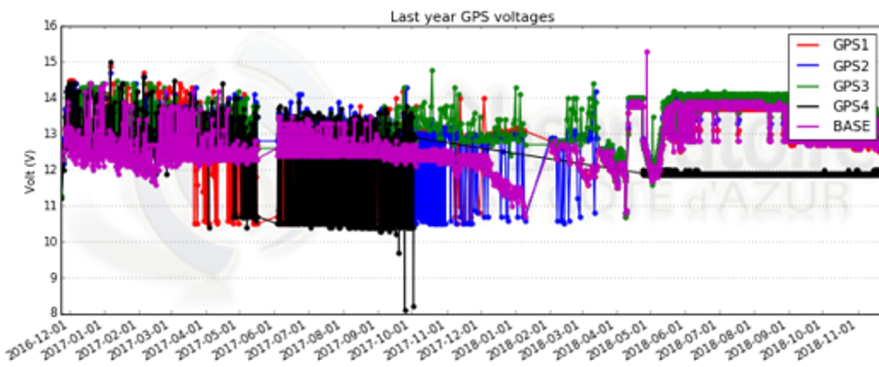
Impacte de l'alimentation sur les données



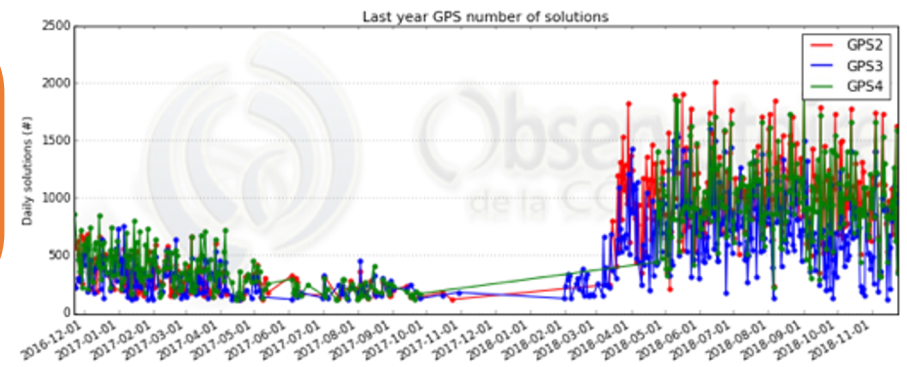
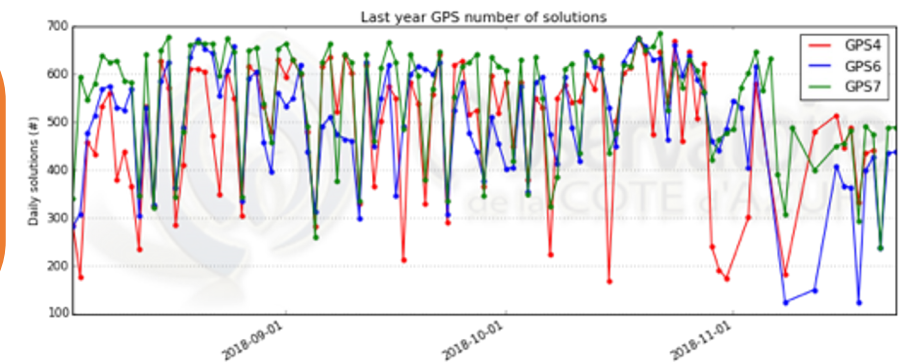
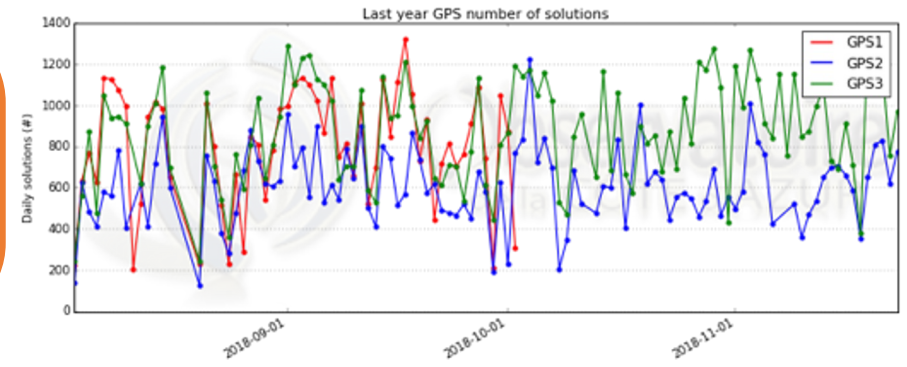
Vence:
Alimentation
externe



Ceriana:
Alimentation
solaire



Turbie:
Alimentation
Solaire puis
Externe



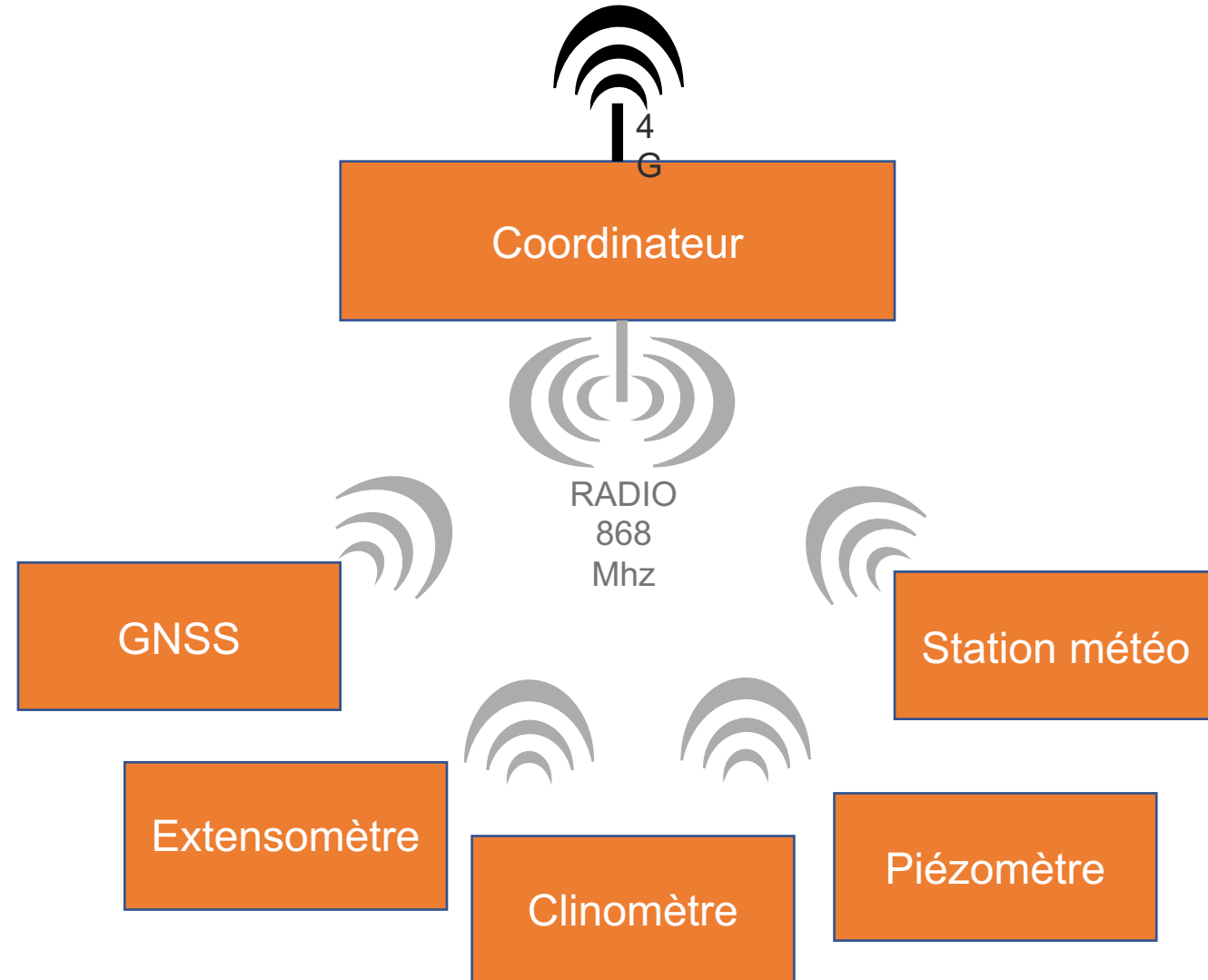
Fonctionnement du système GeoBalise développé à Geoazur:

Le coordinateur collecte et diffuse les données des différents capteurs :

- Les métadonnées (tension batteries, qualité de la donnée, qualité de transmission, etc...) sont collectées en temps réel dans une base de données
- Les données brutes des capteurs sont enregistrées dans des fichiers horaires et journaliers en local
- Les données et métadonnées sont synchronisées sur un serveur pour traitement, supervision affichage, etc...

Système de transmission unifié :

- Chaque module (capteur) communique par protocole radio vers le coordinateur : basse conso (>100mW), portée 4km
- Le coordinateur se connecte au serveur au travers d'un VPN par 4G, WiFi ou Ethernet



Monitoring temps-réel

LaClape geobalise system monitoring:

Vert = OK ; Orange = Anomalie ; Rouge = En retard

| COORDINATOR | | |
|-------------|------|------|
| RSSI | Volt | Temp |
| -89 | 14 | 28 |

| GNSS | | | | | |
|------|------|------|------|--------------------|----------------------|
| ID | RSSI | Volt | Temp | (SAT | PDOP |
| 1 | -72 | 13.4 | 6 | 22 | 1.5 2 min |
| 2 | -64 | 13.5 | 4 | 24 | 1.5 2 min |
| 3 | -89 | 13.4 | 6 | 24 | 1.5 |
| 4 | -65 | 13.4 | 6 | 23 | 1.4 |
| 5 | -81 | 13.2 | 6 | 20 | 1.6 |
| 6 | -92 | 13.2 | 6 | 22 | 1.7 |
| 7 | -90 | 13.3 | 5 | 24 | 1.5 |
| 8 | -78 | 13.3 | 6 | 19 | 1.8 10 min |
| 9 | -102 | 11.8 | 5 | 23 4 min | 1.4 5 min |

| EXTENSO | | | | |
|---------|-------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| ID | RSSI | Volt | Temp | NREC |
| 1 | -84 25216 min | 8.69 | 4 | 1 |
| 2 | -89 85 min | 8.8 | 4 | 1 |
| 3 | -99 8892 min | 5.12 28 min | 5 28 min | 1 28 min |

Dernière actualisation : 2023-11-03 13:20:06 UTC

Stations GNSS déployées sur les glissements de terrain OMIV:

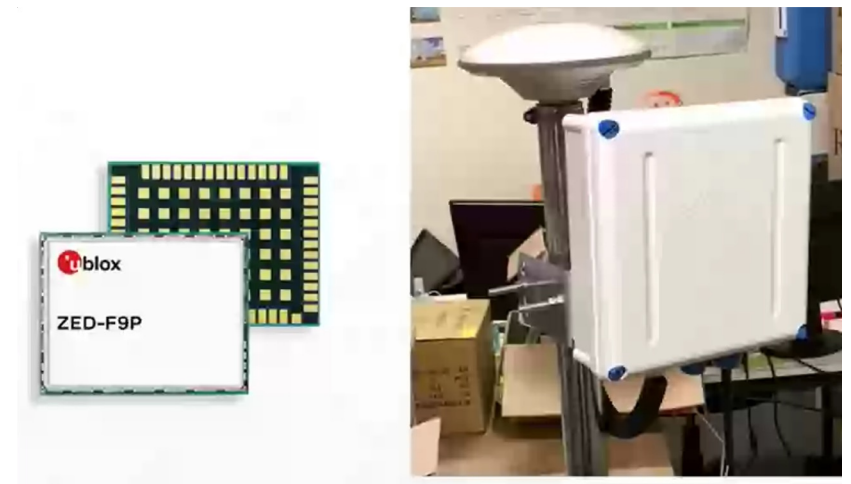
Récepteur GNSS mono-fréquence Ublox M8T:

- Multi-constellations : GPS, Glonass, Galileo
- Consommation : 0.22 W en continu
- Adapté à des lignes de base courte
- Optimisé pour des solutions journalières de positionnement



Récepteur GNSS bi-fréquence Ublox F9P:

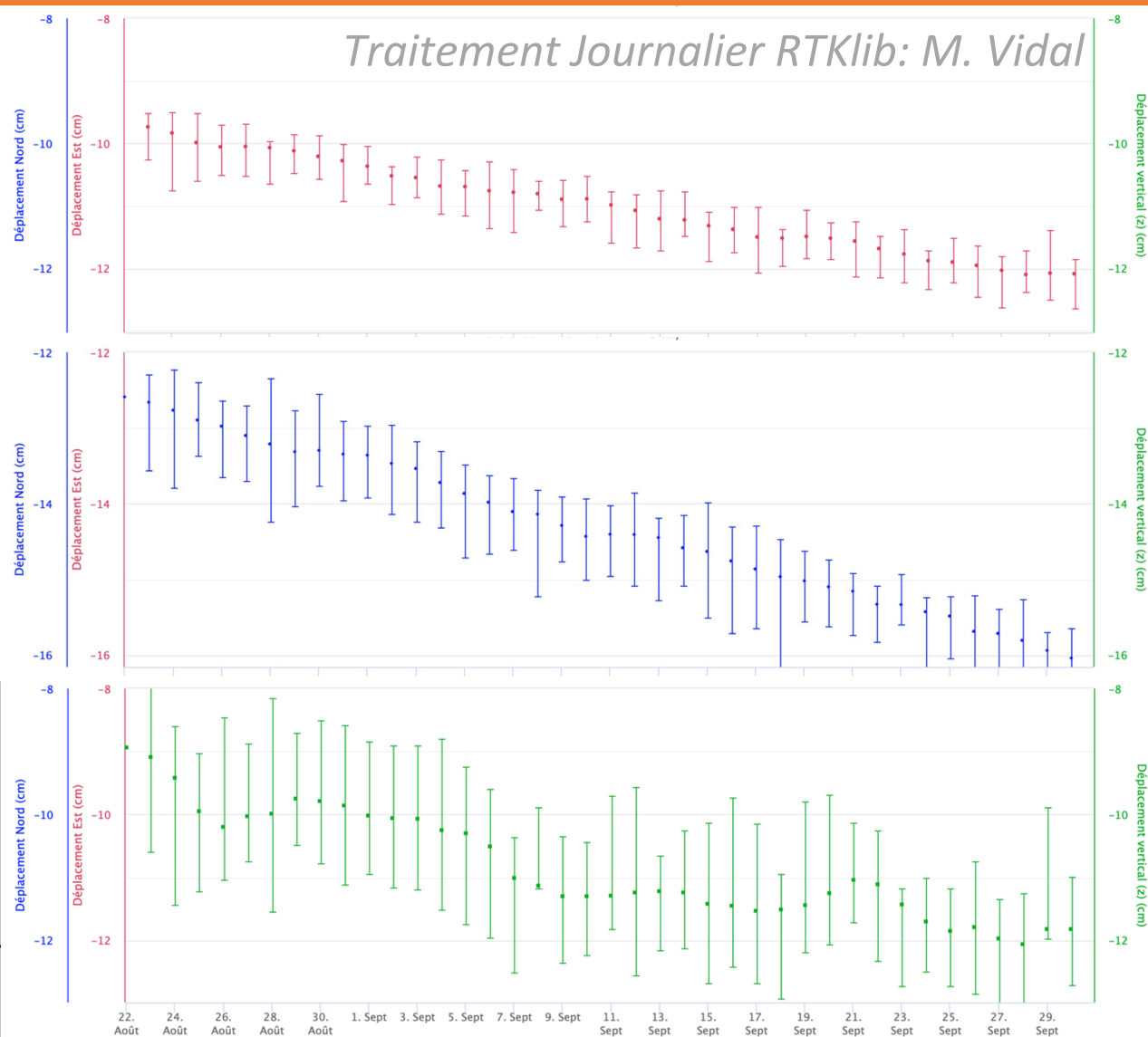
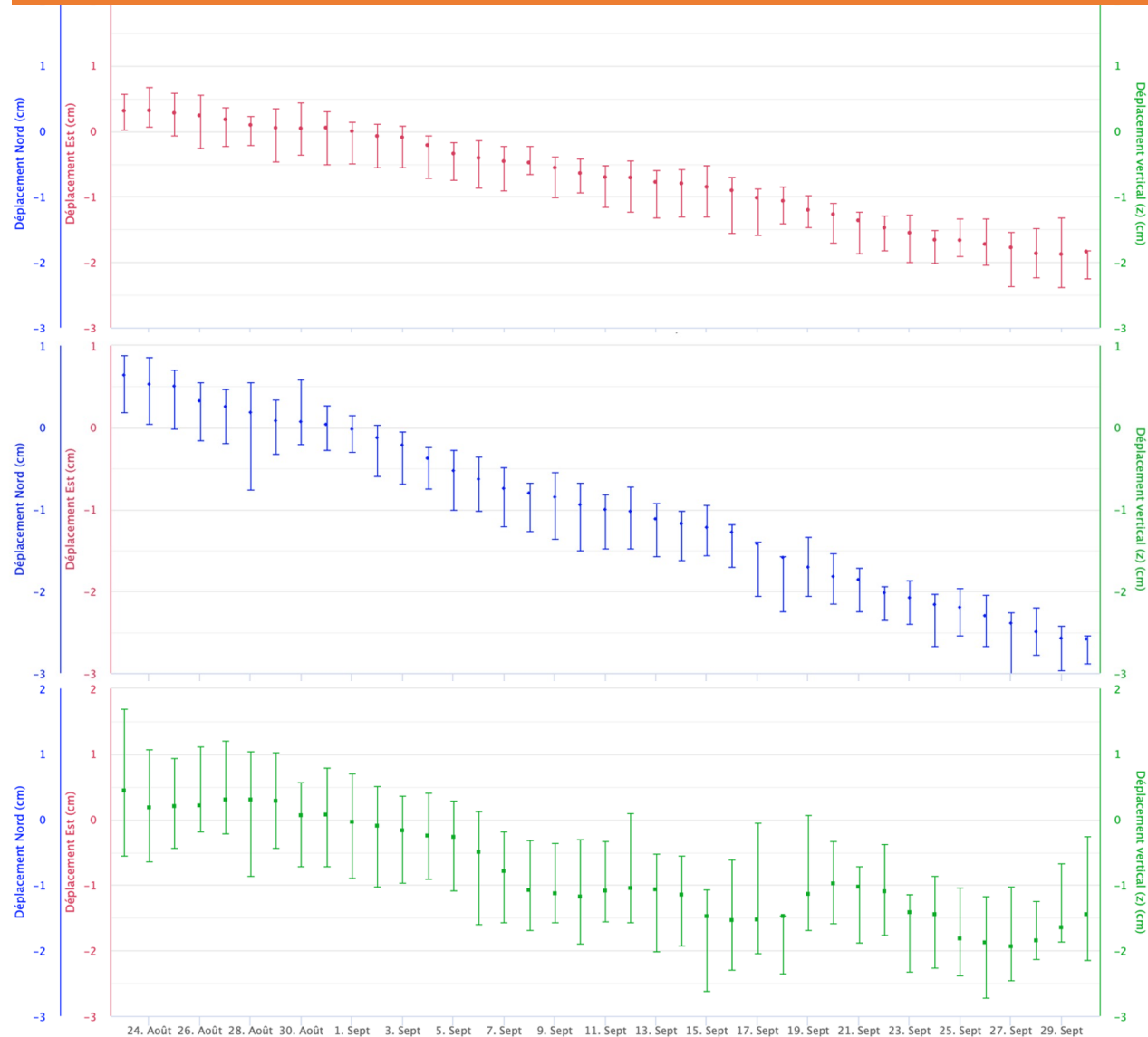
- Multi-constellations: GPS, Glonass, Galileo et Beidou
- Antenne avec fiche de calibration ANTEX
- Solution centimétrique en mode RTK
- Seulement la moitié des satellites GPS exploitables en bi-fréquence



GeoBalises co-localisé sur La Clapière (OMIV)

Bi-fréquences

Mono-fréquence



Conclusion sur les solutions RTKlib avec modules GeoBalise: Utilisations pour le suivi de Glissement de terrain (OMIV)

Traitement des données:

- Utilisation du logiciel libre RTKlib Demo5
- Ligne de base de 1.2km: station de référence CLAP RENAG/OMIV
- Traitement full GNSS (GPS, GLONASS et Galileo)
- Solution journalière: médiane des 8660 mesures

Estimation des erreurs (moyenne quadratique):

- 3D: 0.9cm (Bi-fréq) , 1.3cm (mono-fréq)
- 2D: 0.5cm (Bi-fréq) , 0.75cm (mono-fréq)

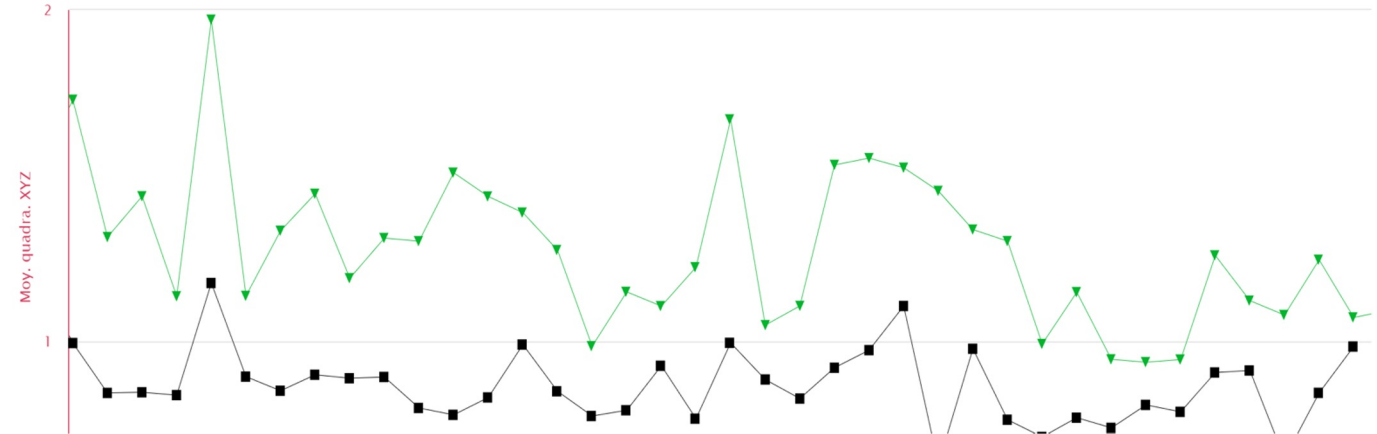
Conclusion:

Le système Geobalise mono-fréquence associé à une station de référence proche du glissement suffit amplement à caractériser des mouvements de ~5mm

Les récepteurs bi-fréquences permettent de s'affranchir de station de référence grâce au traitement PPP.

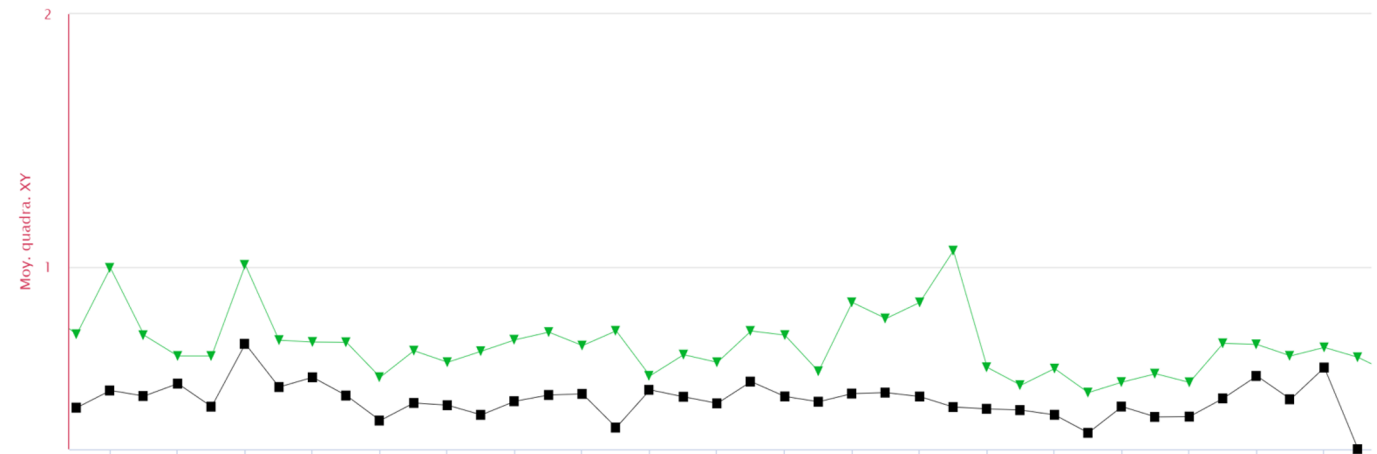
La Clapière – Moyenne quadratique des écarts interquartiles (XYZ)

$$SRGF_EI = SRGF_Q3 - SRGF_Q1 \quad || \quad SmoyQuadra = \sqrt{\text{carre}((SRGF_East_EI/2)) + \text{carre}((SRGF_North_EI/2)) + \text{carre}((SRGF_Up_EI/2))}$$



La Clapière – Moyenne quadratique des écarts interquartiles (XY)

$$SRGF_EI = SRGF_Q3 - SRGF_Q1 \quad || \quad SmoyQuadra = \sqrt{\text{carre}((SRGF_East_EI/2)) + \text{carre}((SRGF_North_EI/2))}$$



Jouvences

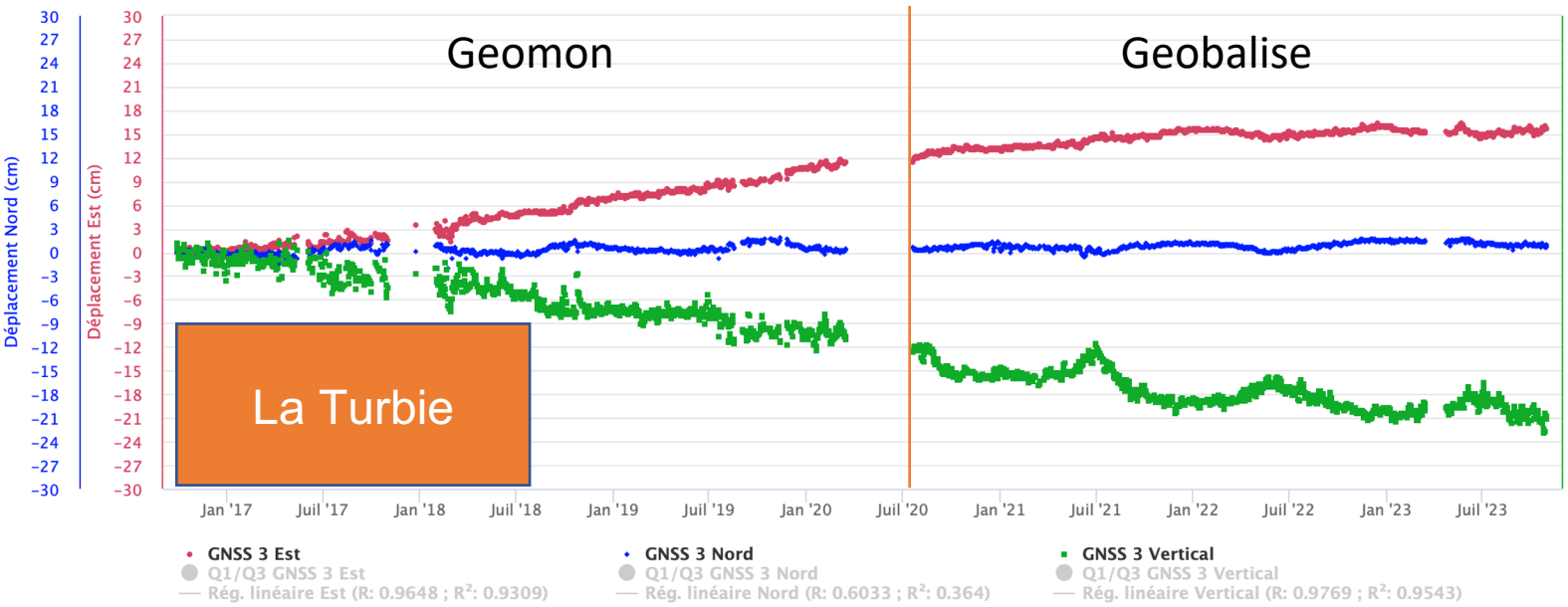
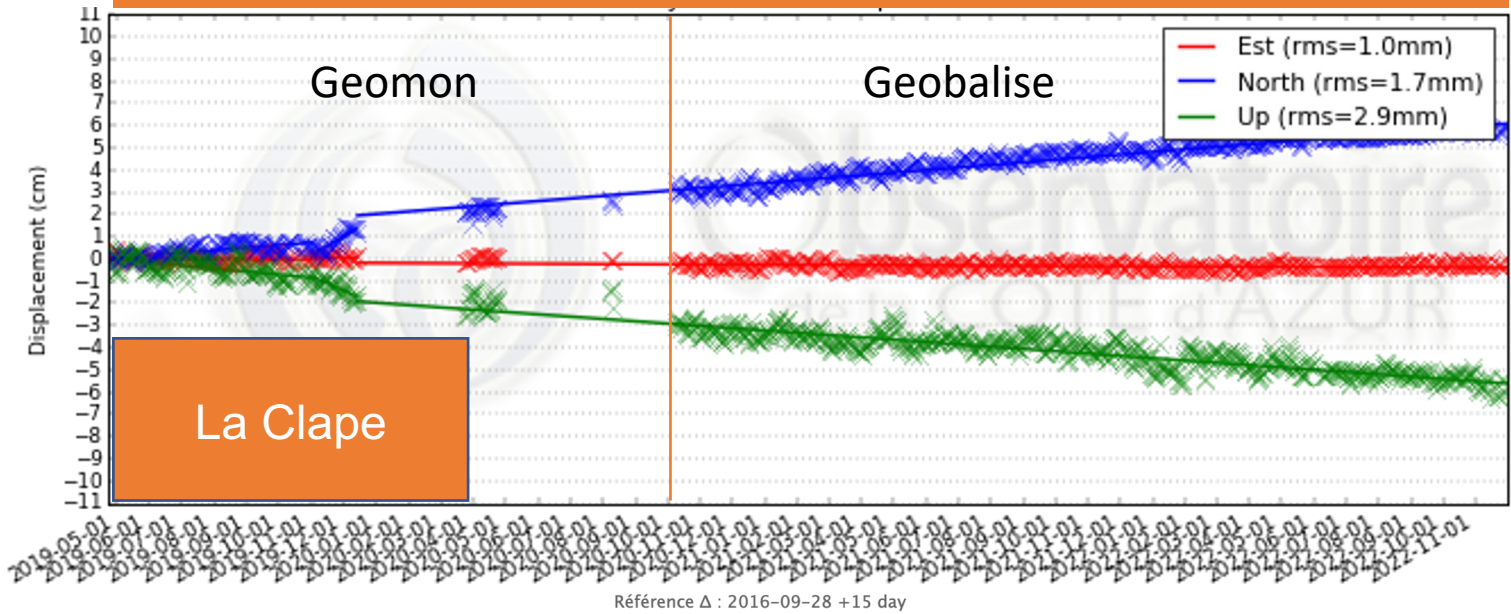


Tableau comparatif

Solutions
Bas-Cout
pour le suivi de
mouvement fort

| Modèle | Geomon | Geobalise M8T | Geobalise F9P |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|--|
| Signaux GNSS | GPS: L1C1 GLO: L1C1 | GPS: L1C1 GLO: L1C1 GAL: L1C1 | GPS: L1C1L2C2 GLO: L1C1L2C2 GAL: L1CAL7C7 BEI: L2C2L7C7 |
| Précision attendue | 1.5cm | 1.3cm | 1cm |
| Consommation | 0.36w | 0.22w | ~0.70w |
| Prix pour 6 modules + coordinateur | ~20k€ | ~10k€ | ~14k€ |





Instrumentation Géodésique



Antenne bas-coût GNSS

→ Antenne ArduSimple:

- AS-ANT2B 89€ -> Erreur du centre de phase: $\pm 3\text{mm}$
- AS-ANT2BCAL 149€ -> L1/L2/L5: calibration élévation uniquement:
- AS-ANT3BCAL 199€ -> Bande L6 inutile

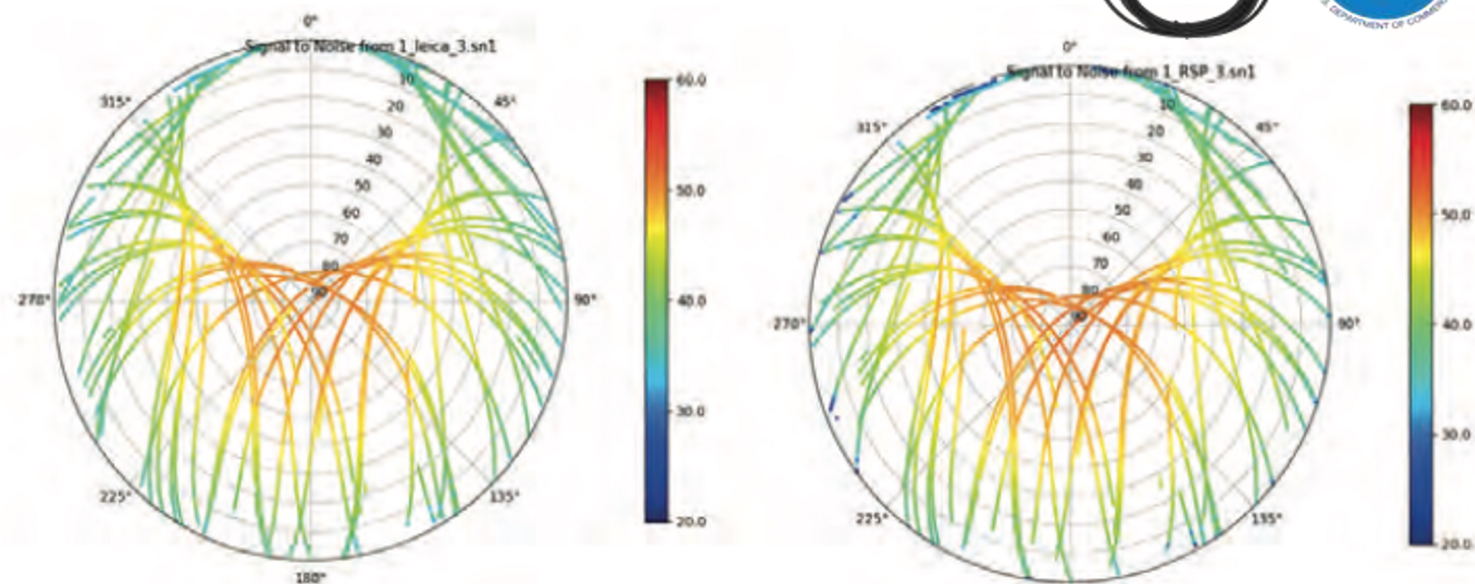
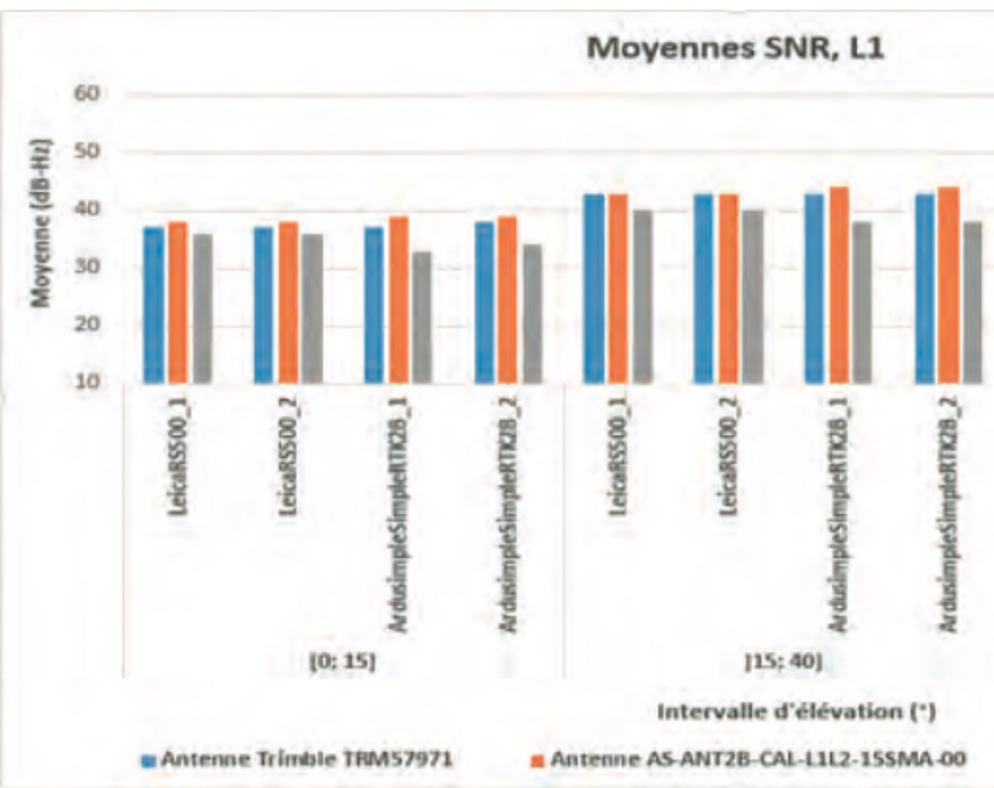


Figure 10. Cartes du ciel des valeurs de rapport signal à bruit obtenues sur la fréquence L1 GPS avec l'antenne Trimble Zephyr 2 et les récepteurs Leica GPS500 (à gauche) et ArduSimple SimpleRTK2B (à droite).

<https://www.aftopo.org/download.php?type=pdf&matricule=aHR0cHM6Ly93d3cuYWZ0b3BvLm9yZy93cC1jb250ZW50L3VwbG9hZHMvYXJ0aWNsZXMvcGRmLzQxNjcXMi5wZGY=>

Récepteurs bi-fréquences bas-coût

Puce UBLOX ZED-F9P:

Ardusimple simpleRTK2B à 172€

Caractéristiques Tech:

- 3 Flux séries: NMEA, RTCM, UBX
- RTK: Base ou Rover
- Consommation: 130mA@5v (0.65W)

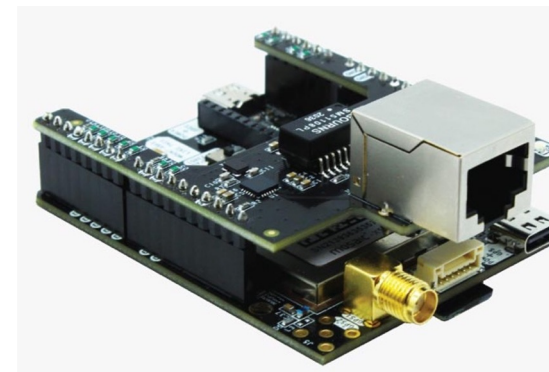


Puce SEPTENTRIO MOSAIC-X5:

Septentrio Mosaic-Go à 650€

Caractéristiques Tech:

- Mémoire: up to 128Go (SD)
- 4 Flux séries: NMEA, RTCM, SBF
- Flux connectés: TCP, Ntrip, FTPpush
- RTK: Base ou Rover
- Rinex: v3.4 short name
- Consommation: 235mA@5v (1.2W)



Récepteurs bi-fréquences bas-coût

Puce UBLOX ZED-F9P:

Signaux:

GPS: 4 C1C C2X L1C L2X -> Pas tous les satellites (C2vsP2)

GAL: 4 C1C C7Q L1C L7Q -> Pas E5a

GLO: 4 C1C C2C L1C L2C

BDS: 4 C2I C7I L2I L7I -> Pas tous les satellites (B2vsB3)

SBS: 2 C1C L1C -> Monofréquence



Puce SEPTENTRIO MOSAIC-X5:

Signaux:

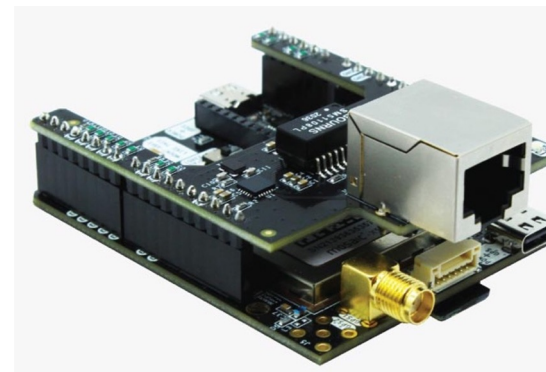
GPS: 9 C1C C1W C2L C2W C5Q L1C L2L L2W L5Q

GAL: 8 C1C C5Q C7Q C8Q L1C L5Q L7Q L8Q

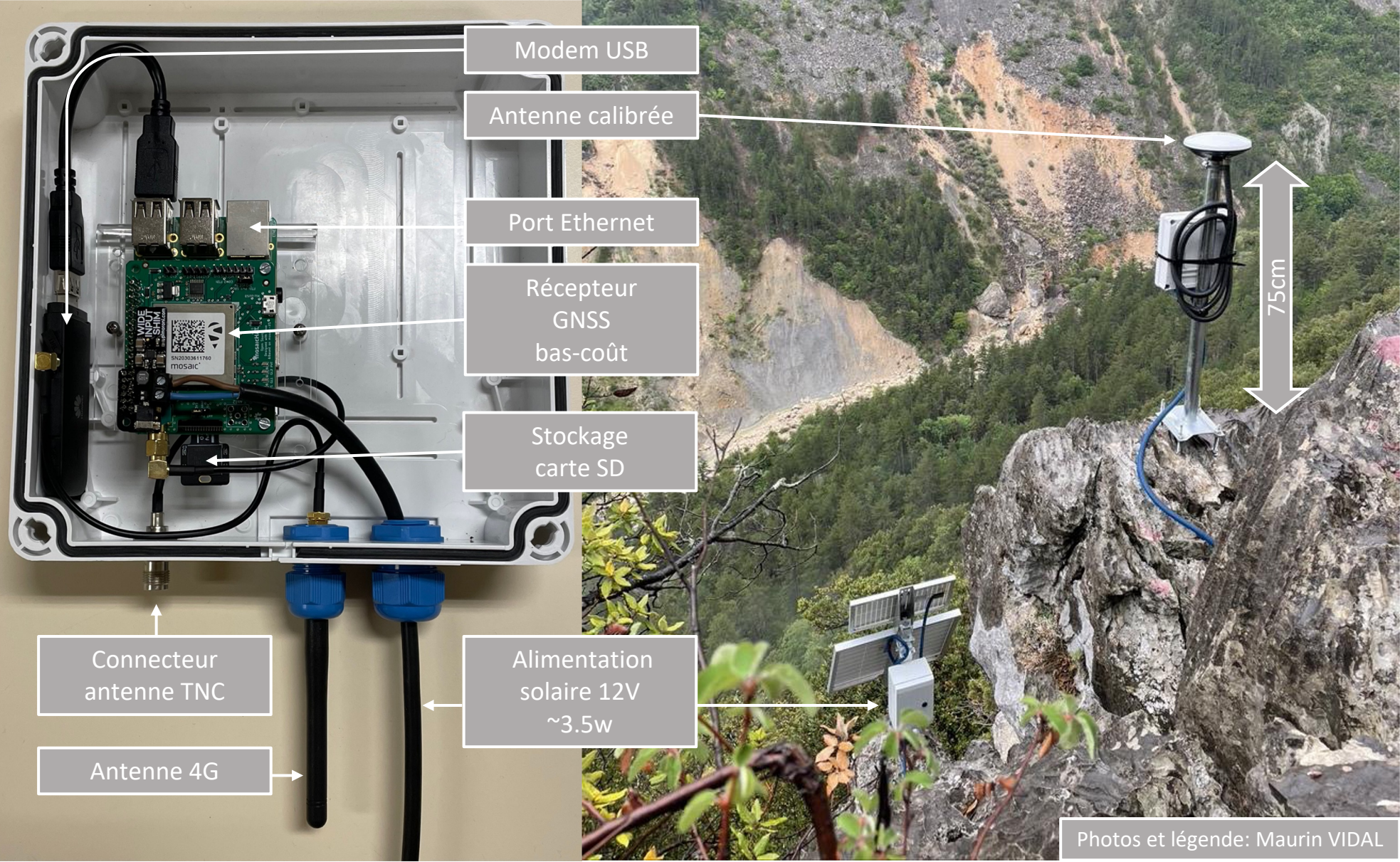
GLO: 8 C1C C2C C2P C3Q L1C L2C L2P L3Q

BDS: 10 C1P C2I C5P C6I C7I L1P L2I L5P L6I L7I

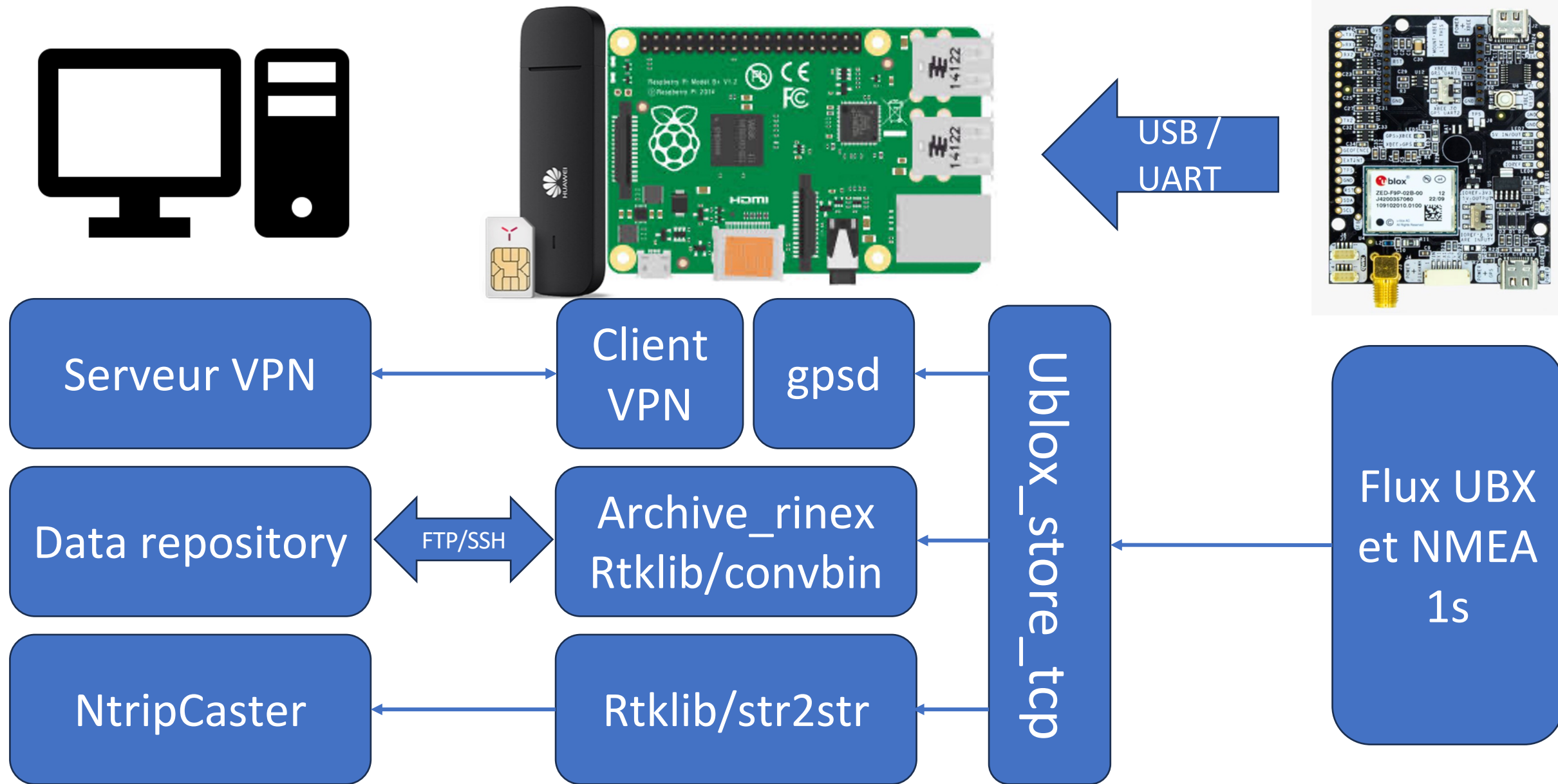
SBS: 4 C1C L1C C5I L5I



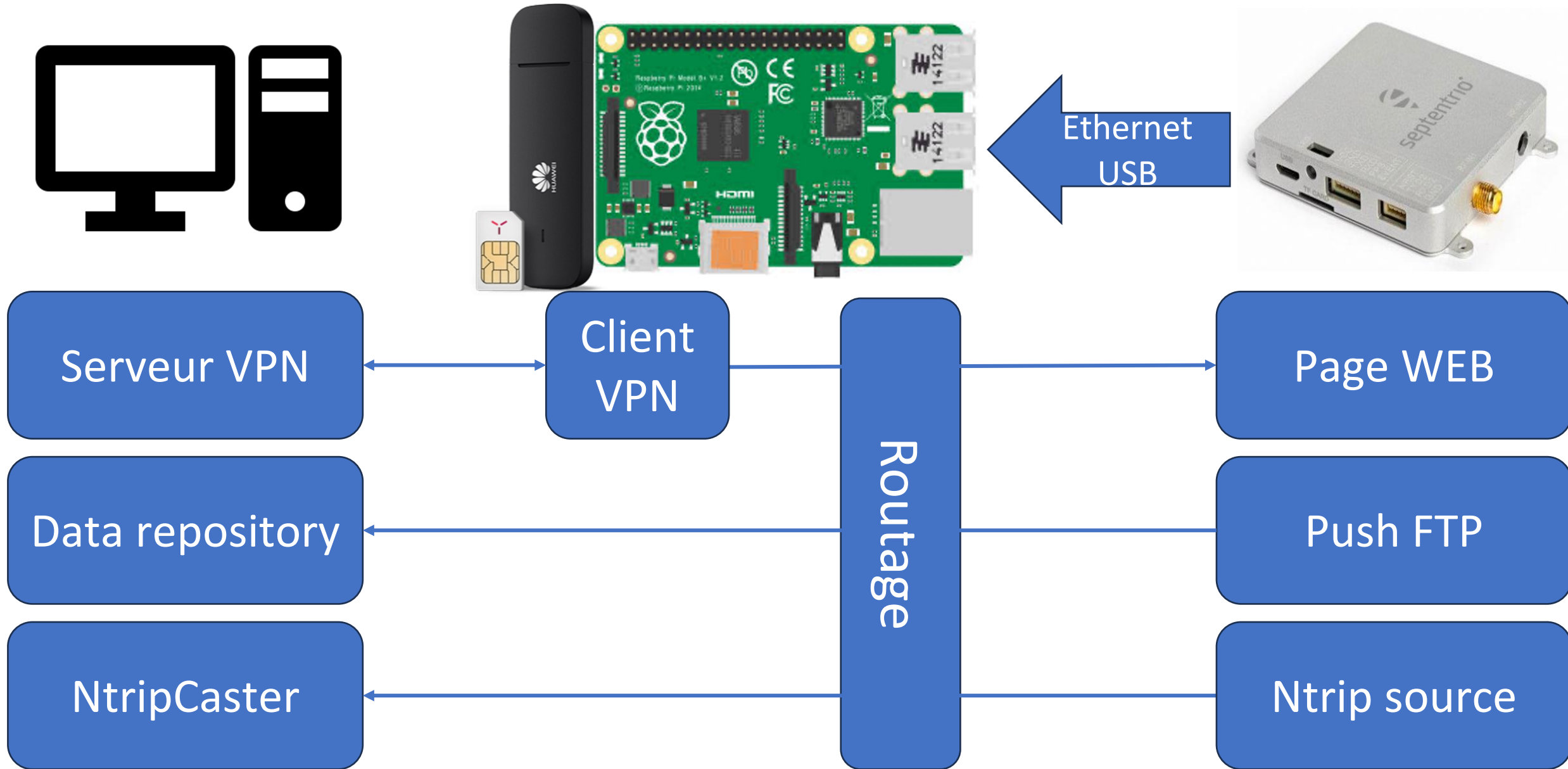
Intégration d'une stations bas-coût



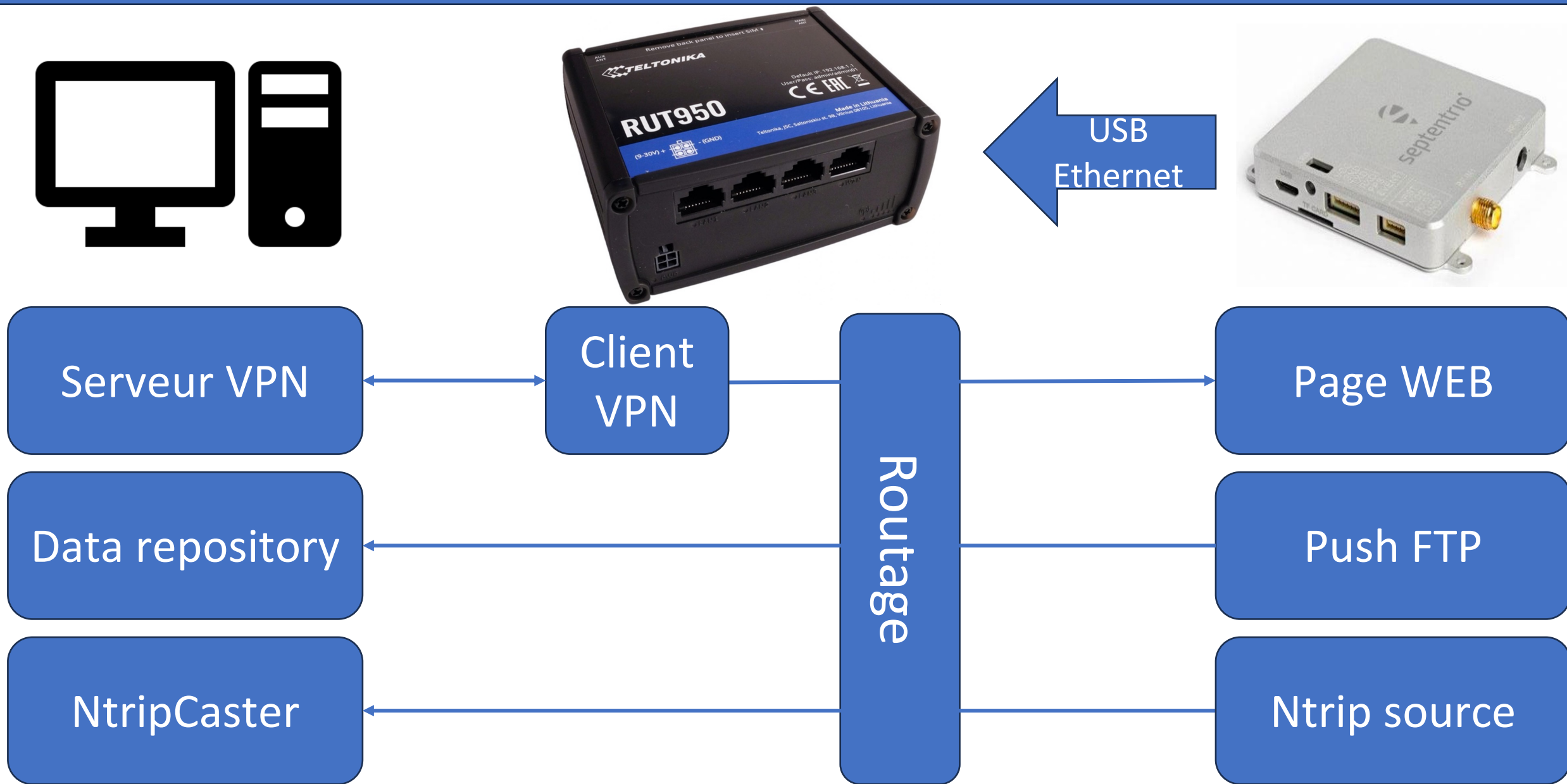
Développement logiciel d'une station bas-coût Ublox



Développement logiciel d'une station bas-coût Septentrio

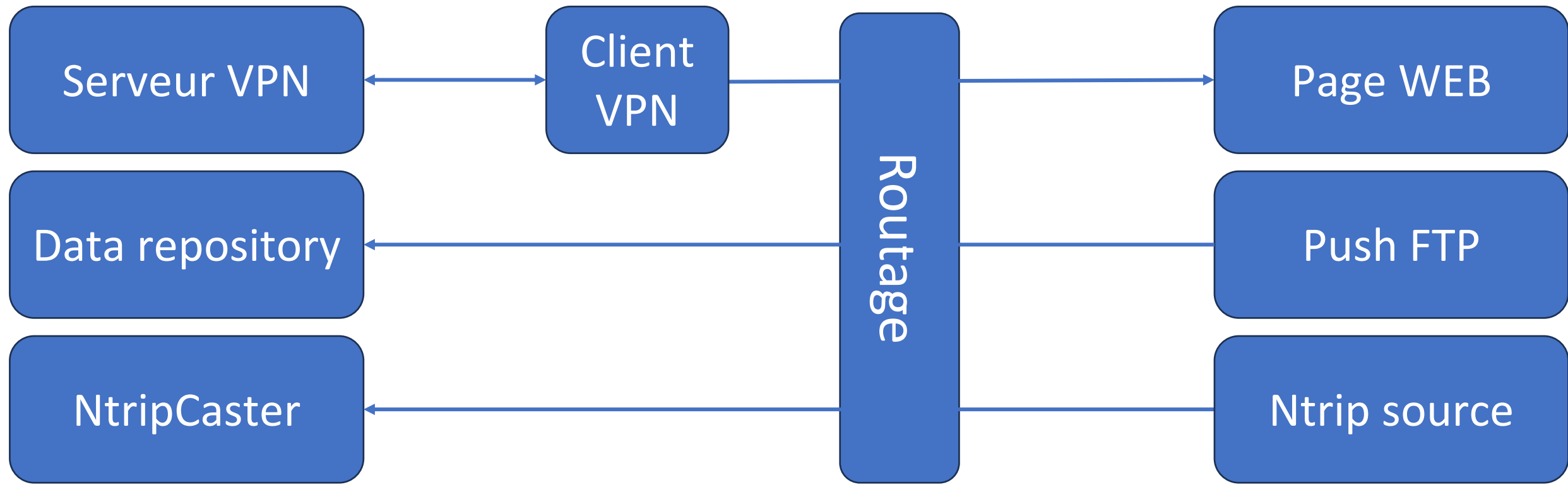
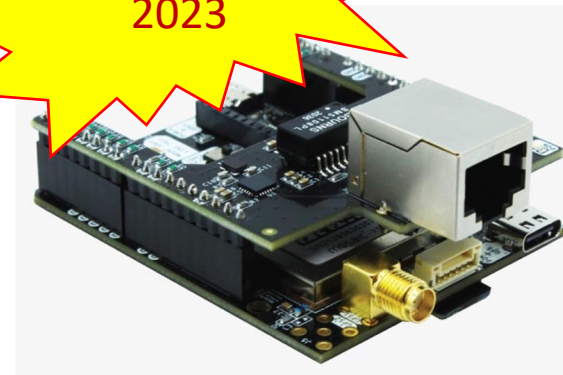
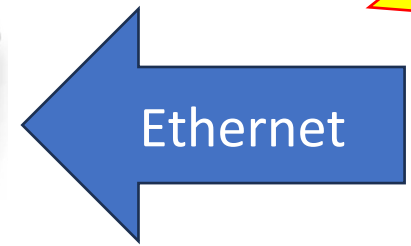


Développement d'un firmware Teltonika pour interfacier le Septentrio



Nouveaux récepteur ArduSimple RTK3B avec port Ethernet

New
2023



Données du récepteur Ublox F9P

Problèmes liés aux types de signaux enregistrés :

- GPS L2C uniquement:
 - Code civil envoyé par les satellites récent (Block 2 et 3)
 - Pseudodistance moins contrainte qu'avec L2W (P2)
 - 25 satellites sur 31 visibles le 23/03/2023 en bi-fréquences.
- Beidou B2I (L7) uniquement:
 - 9 satellites sur 27 visibles le 23/03/2023 en bi-fréquences.
- Galileo E5B (L7) uniquement:
 - Incompatibilité avec certains logiciels scientifiques.



Problèmes liés aux dates des observations:

- L'observation ne se fait pas à la seconde ronde (chaque X.000 sec)

```
> 2023 1 23 0 0 0.0097000 0 24
G23 37362789.208 2 196342853.514 1
...
E 9 27573902.412 4 144901744.067 3
> 2023 1 23 0 0 30.0097000 0 24
G23 37362440.767 2 196341020.357 1
...
E 9 27578600.390 4 144926443.441 4
> 2023 1 23 0 1 0.0098000 0 24
G23 37362093.132 2 196339191.757 1
```

Données du récepteur Ublox F9P

Solution:

- Tronquer les millisecondes:

```
#convbin -ti 30 -tt 0.025 -ro -TADJ=1.0 TEST_202201010000.ubx
```

- Remplacement des signaux C2X/L2X par C2W/L2W dans le header:

```
#sed 's/C2X/C2W/g;s/L2X/L2W/g' TEST_202201010000.obs >  
TEST00FRA_R_20220010000_01D_30S_MO.rnx
```



Données du récepteur Septentrio Mosaic-X5

Problème des données générés par le récepteur:

- Les fichiers sont nommés en Rinex3 short name (SEP21110.23o)
- Il manque l'INTERVAL dans le header du Rinex

Solution:

- Utiliser le logiciel gfzrnrx ou gml2rnrx.py
- ```
#gml2rnrx.py -fm keep sep21110.23o
```
- ```
#gfzrnrx -site SEP200FRA -finp sep21110.23o -fout ::RX3::
```



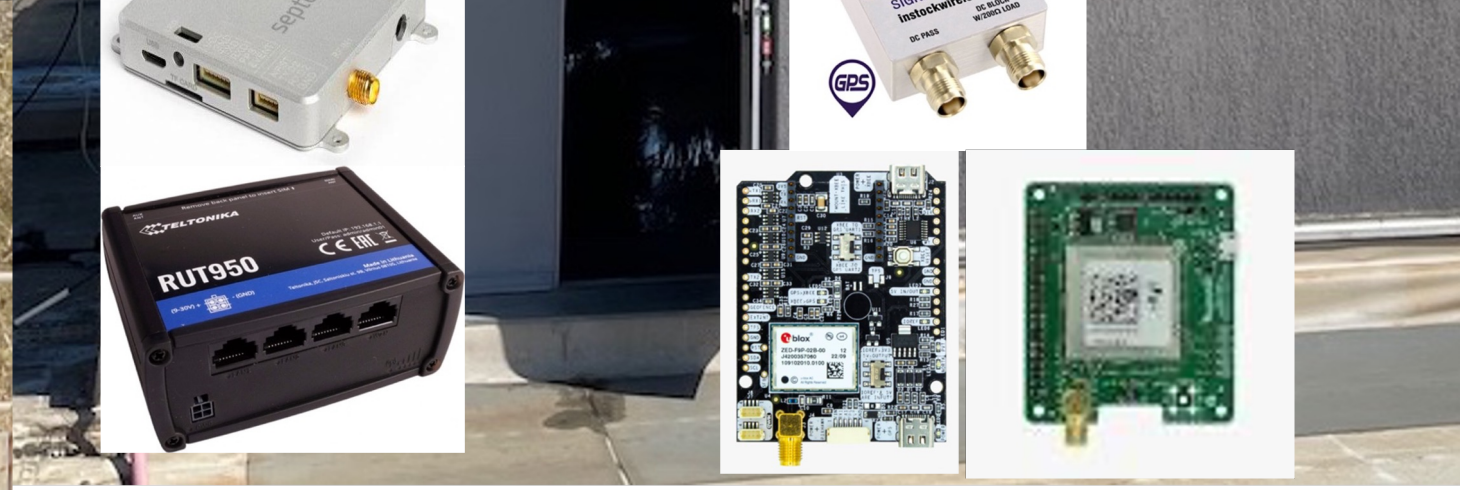
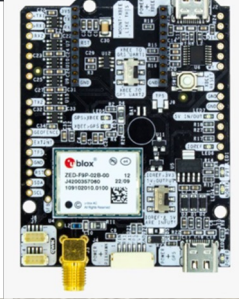
Plateformes instrumentales bas-coût colocalisé RENAG

CGRO

2020-11-25

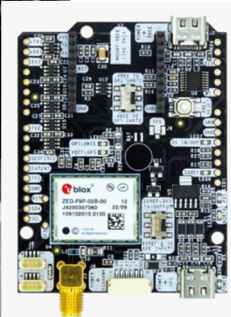
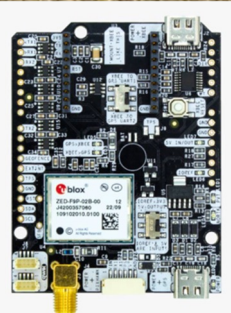
Phase2/3

2022-06-15 / 2023-03-23

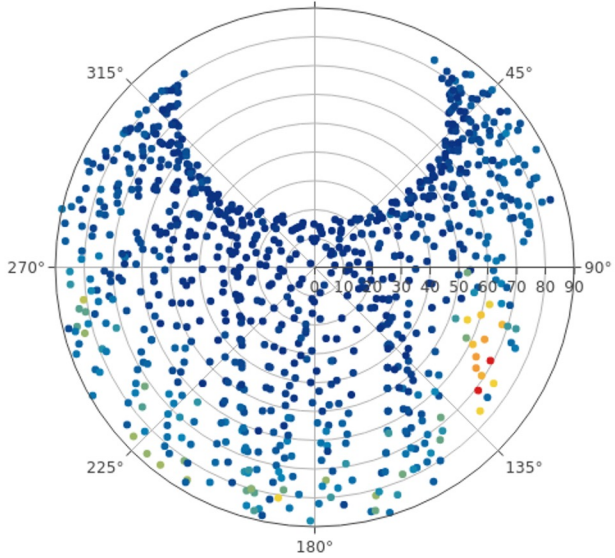


Phase1

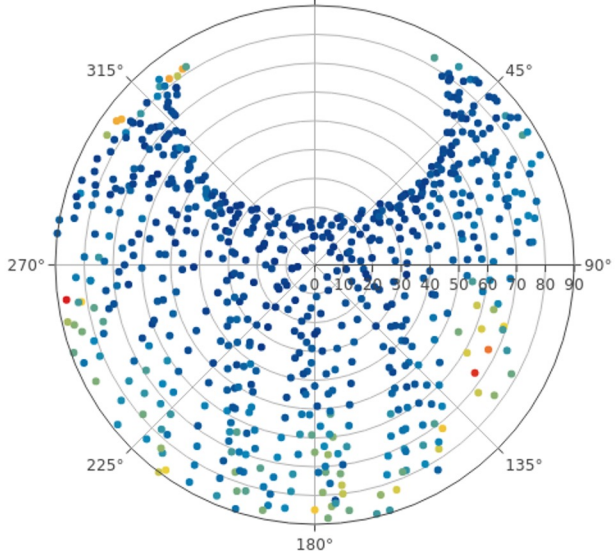
2021-11-09



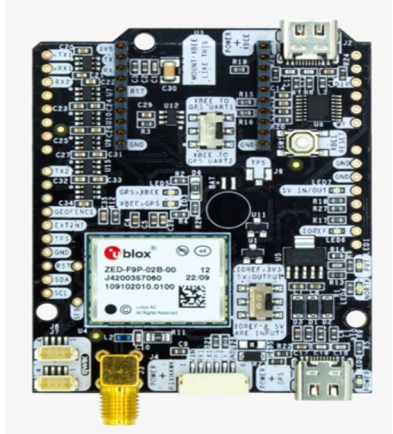
Site CGRO skyplot GPS L2 du 23/03/2023



Multi-trajets

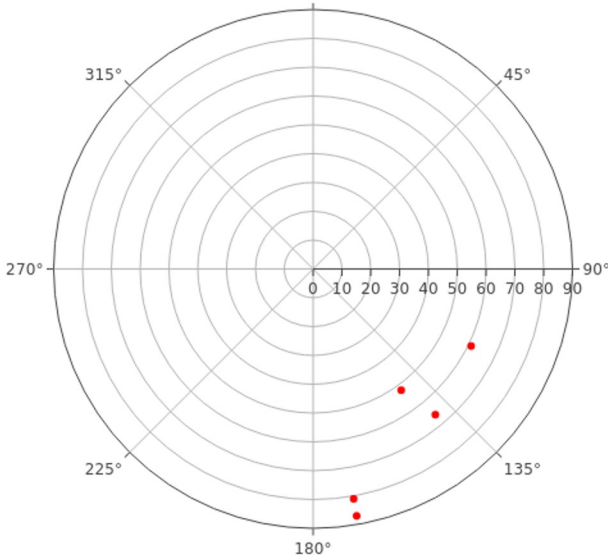


CGRO NetR9

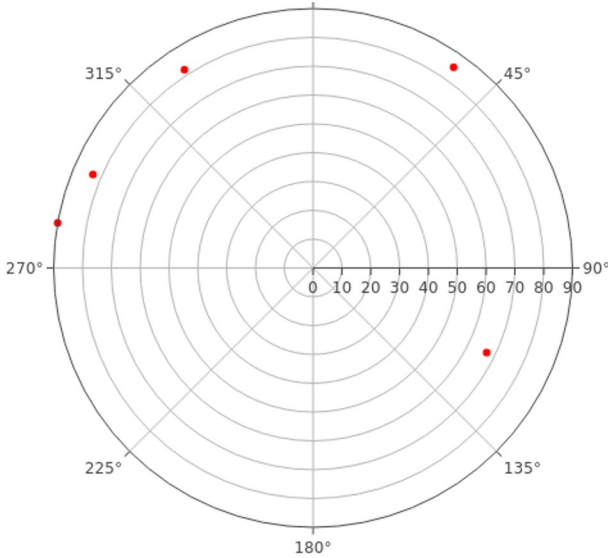


GPS0 F9P

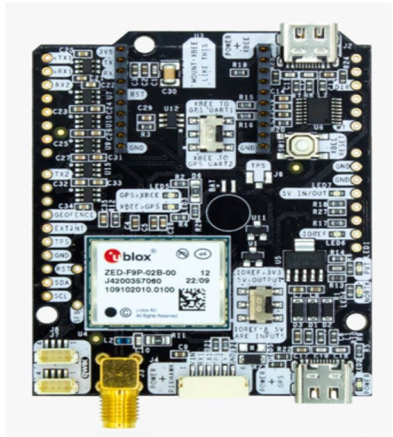
Site CGRO skyplot GPS L2 du 23/03/2023



Saut de cycles



CGRO NetR9



GPS0 F9P

Chaine de Traitement PPP GipsyX par X. Wanner (OMIV)

• PreProcess

- Ajouter UBX-F9P et SEPT-MX5 aux configs GipsyX [Oguntuase, 2020]¹ (goa-var/etc/GPS_Receiver_Types)
- Convertir L2X → L2W (gfzrnx) pour F9P (MX5 a déjà L2W)
- PreEdit: PreRange off (GipsyX)

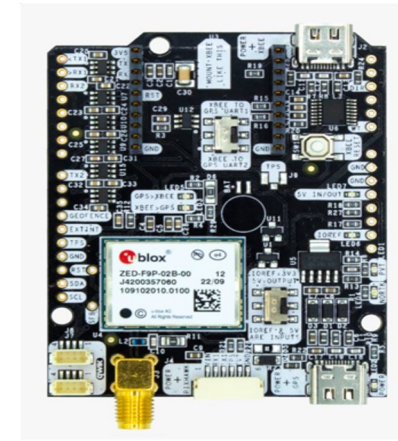
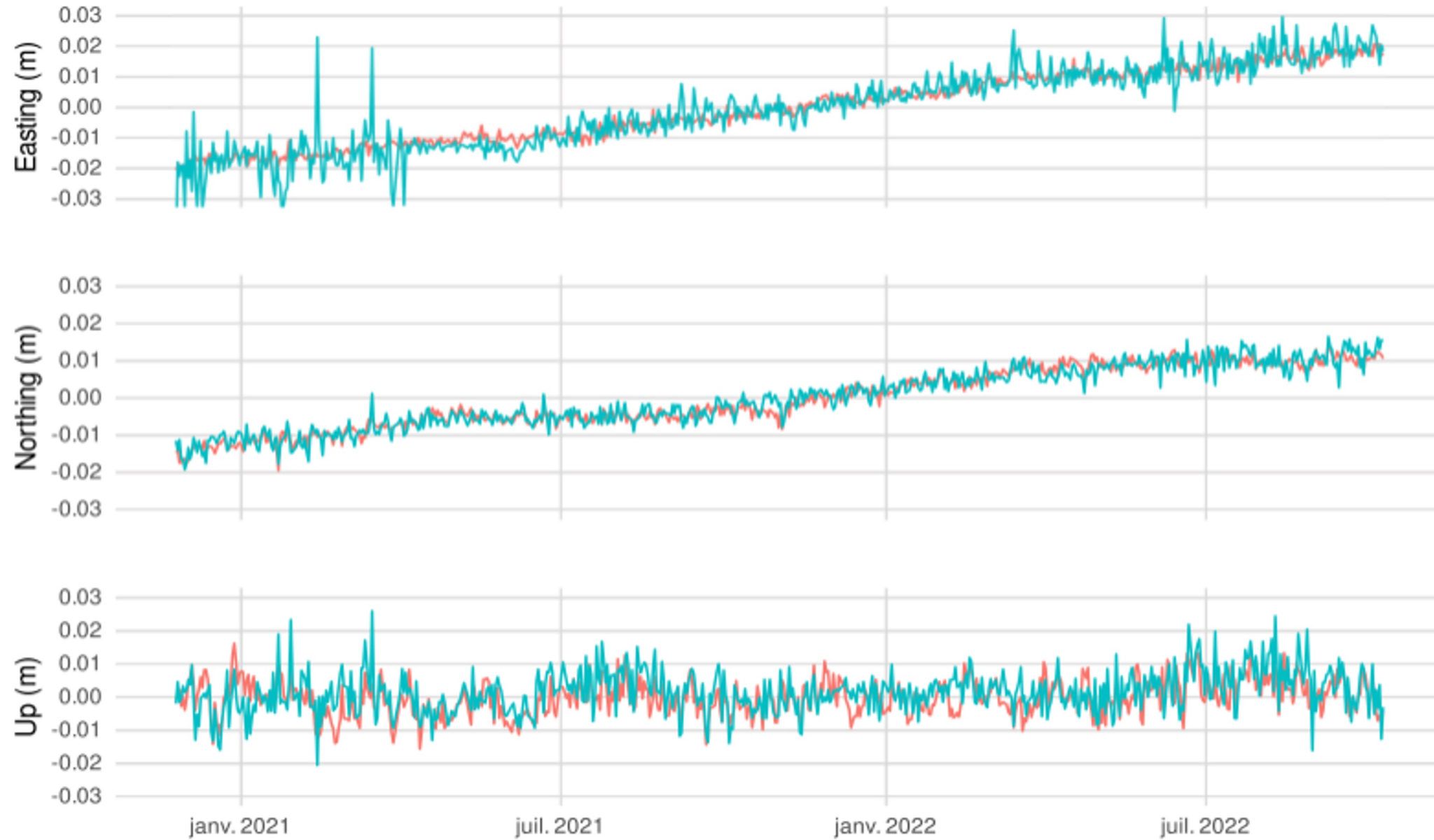
• Process

- IonoFree Combinaison :
 - C.* 2I_7I
 - E.* 1X_7X
 - G.* 1W_2W → ce qui pose problème lorsqu'il n'y a pas de W dans le Rinex (souvent X ou L)
- Products
 - MGEX
 - JPL Finals (GPS only)

- Modèle troposphérique
 - GMF
- Modèle Ionosphérique
 - 1st ordre : combinaison d'observation (cf ci-dessus)
 - 2nd ordre : IONEX (non pris en compte ici, pour précision <1mm)
- Ocean Tide Loading
 - FES2014
- Ambiguity Resolution
 - MGEX : Off
 - JPL : On
- Calibration antenne
 - ngs14.atx → pour pouvoir utiliser AS-ANTxB-CAL

¹. Oguntuase, J. O. (2020). Cost-Effective GNSS Hardware for High-Accuracy Surveys and Its Prospects for Post-Processed Kinematic (PPK) and Precise Point Positioning (PPP) Strategies.

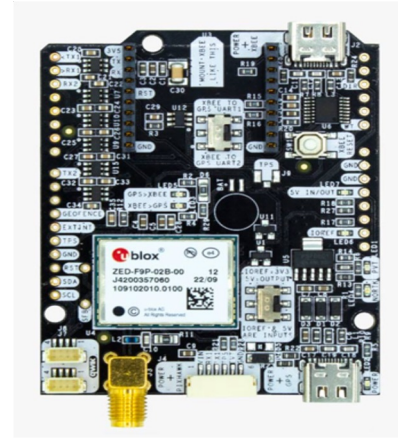
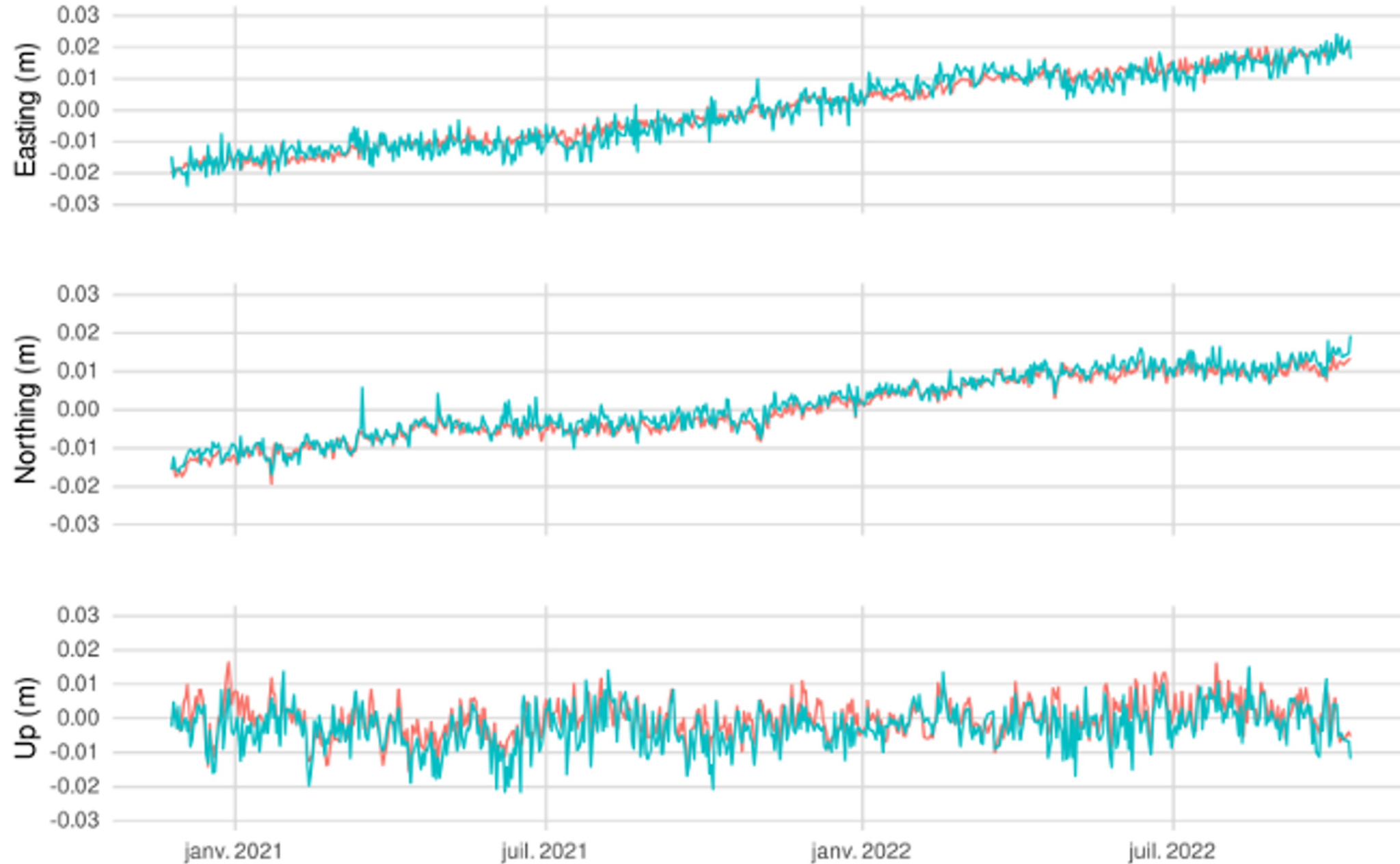
Solution CGRO NGL vs GPS0 : GipsyX GNSS ambiguïtés Flottantes



— NGL CGRO
— OMV GPS0



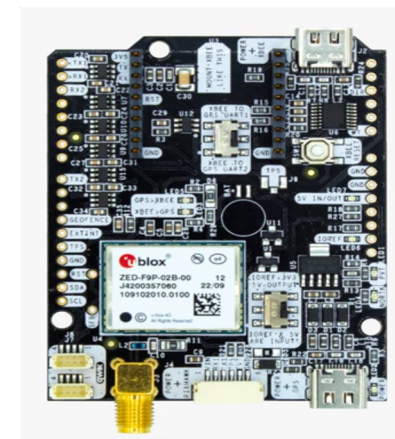
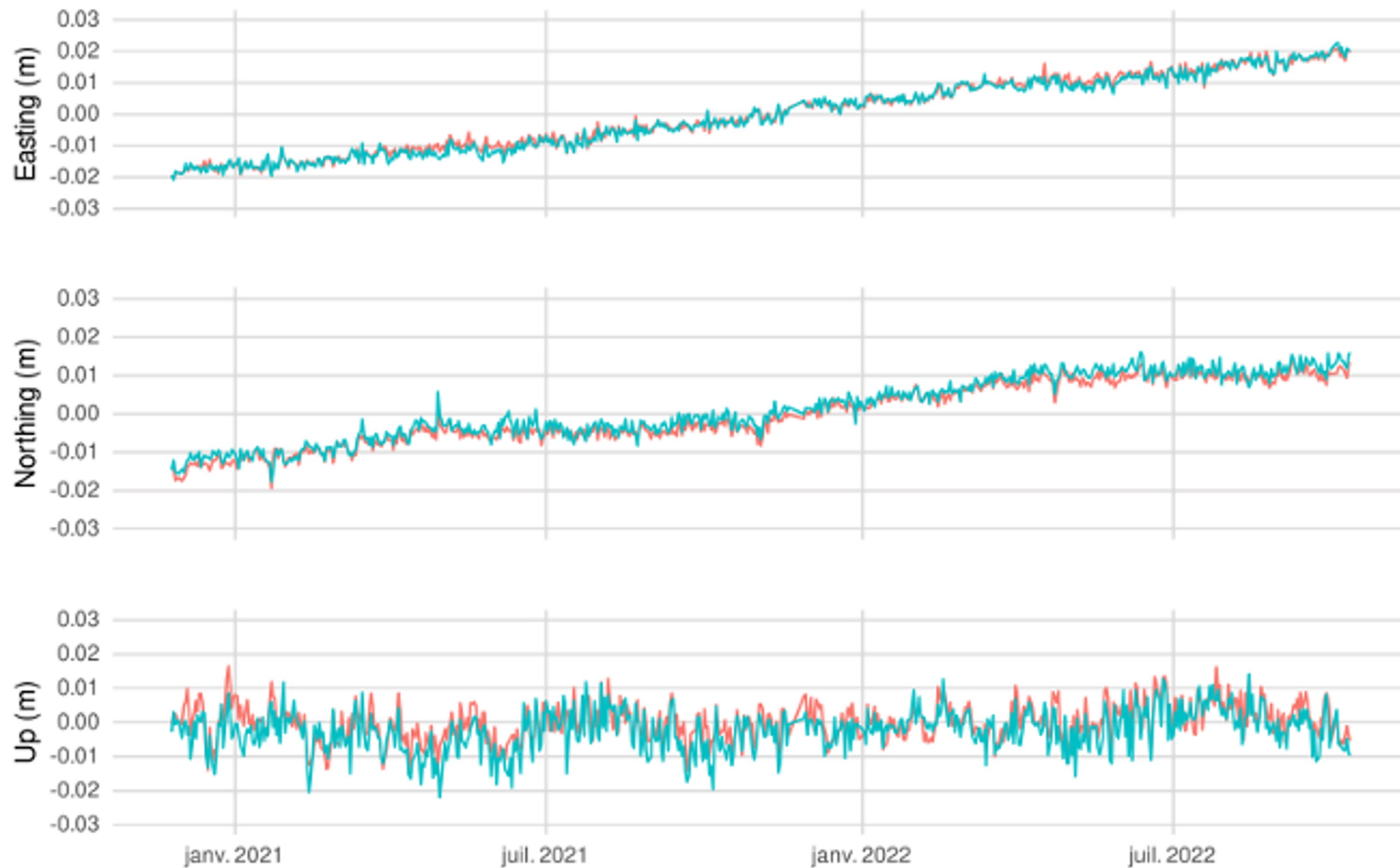
Solution CGRO NGL vs GPS0 : GipsyX GPS ambiguïtés flottantes



— NGL CGRO
— OMIV GPS0



Solution CGRO NGL vs GPS0 : GipsyX GPS ambiguïtés fixées



— NGL CGRO
— OMV GPS0



Résultat GPS0 GipsyX vs CGRO NGL

GPS0 vs CGRO (NGL)

Absolute comparison (IGS14)

| | mean [mm] | sd [mm] | rmse [mm] | sd_lm_ref [mm] | sd_lm_obs [mm] | slope_lm_ref [mm/yr] | slope_lm_obs [mm/yr] |
|------------------------|--------------|------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| MGEX w/o AR | -0.1 | 5.1 | 5.1 | 1.7 | 5 | 20.9 | 22.7 |
| | 0.2 | 2.2 | 2.2 | 2.1 | 2.4 | 14.4 | 14.4 |
| | 1.7 | 5.4 | 5.6 | 5.2 | 6.1 | 2.1 | 2.9 |
| GPS w/o AR | -0.3 | 2.9 | 2.9 | 1.6 | 3.5 | 20.9 | 20.3 |
| | 1.2 | 1.6 | 2 | 2.1 | 2.4 | 14.3 | 14.6 |
| | -2.5 | 4.2 | 4.9 | 5.3 | 5.9 | 2.3 | 2.5 |
| GPS w/ AR | -0.4 | 1.1 | 1.2 | 1.7 | 1.9 | 20.9 | 21.1 |
| | 1.3 | 1.1 | 1.7 | 2.1 | 2.3 | 14.2 | 14.5 |
| | -2.3 | 3.9 | 4.5 | 5.3 | 5.8 | 2.2 | 2.8 |

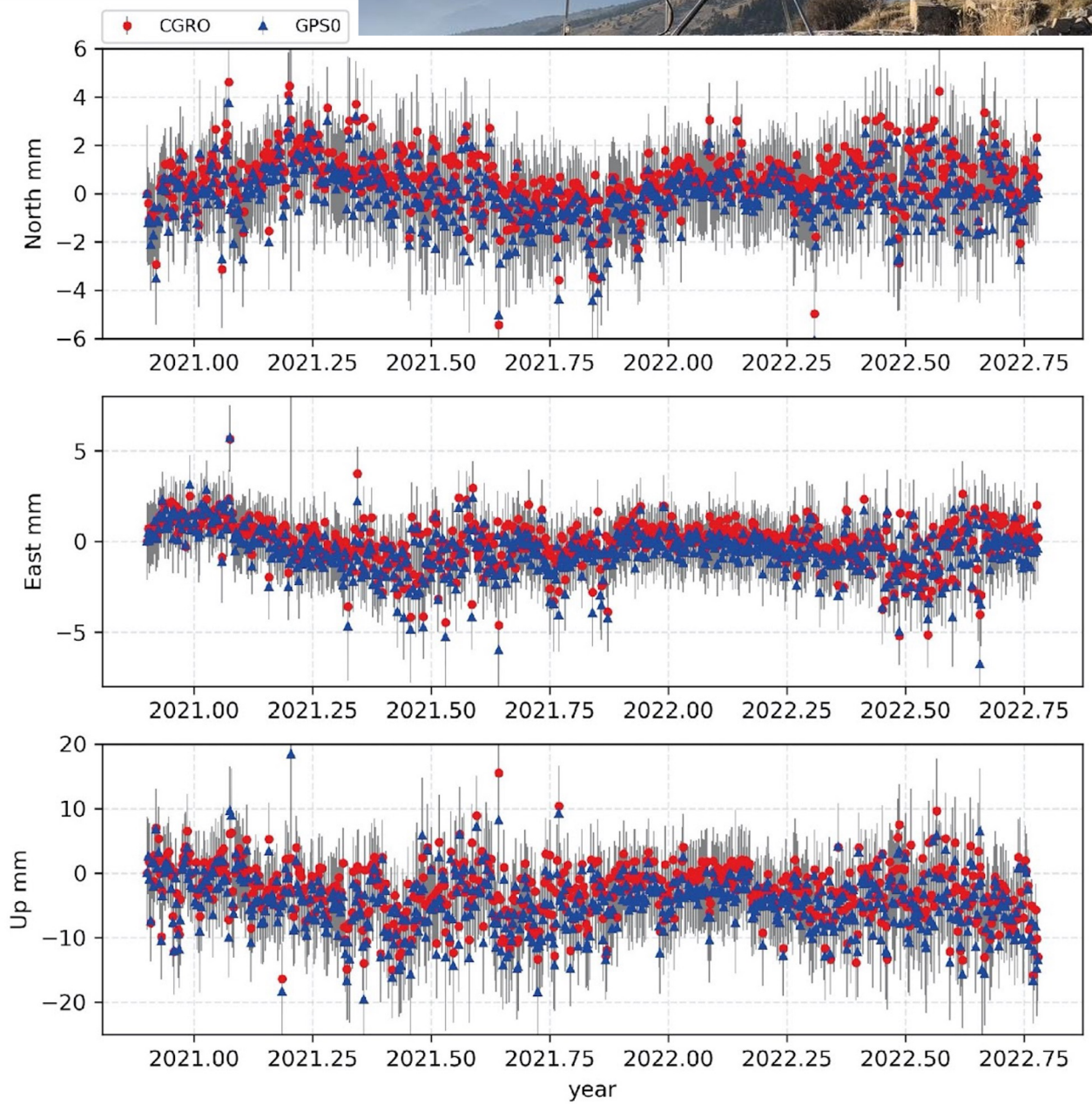
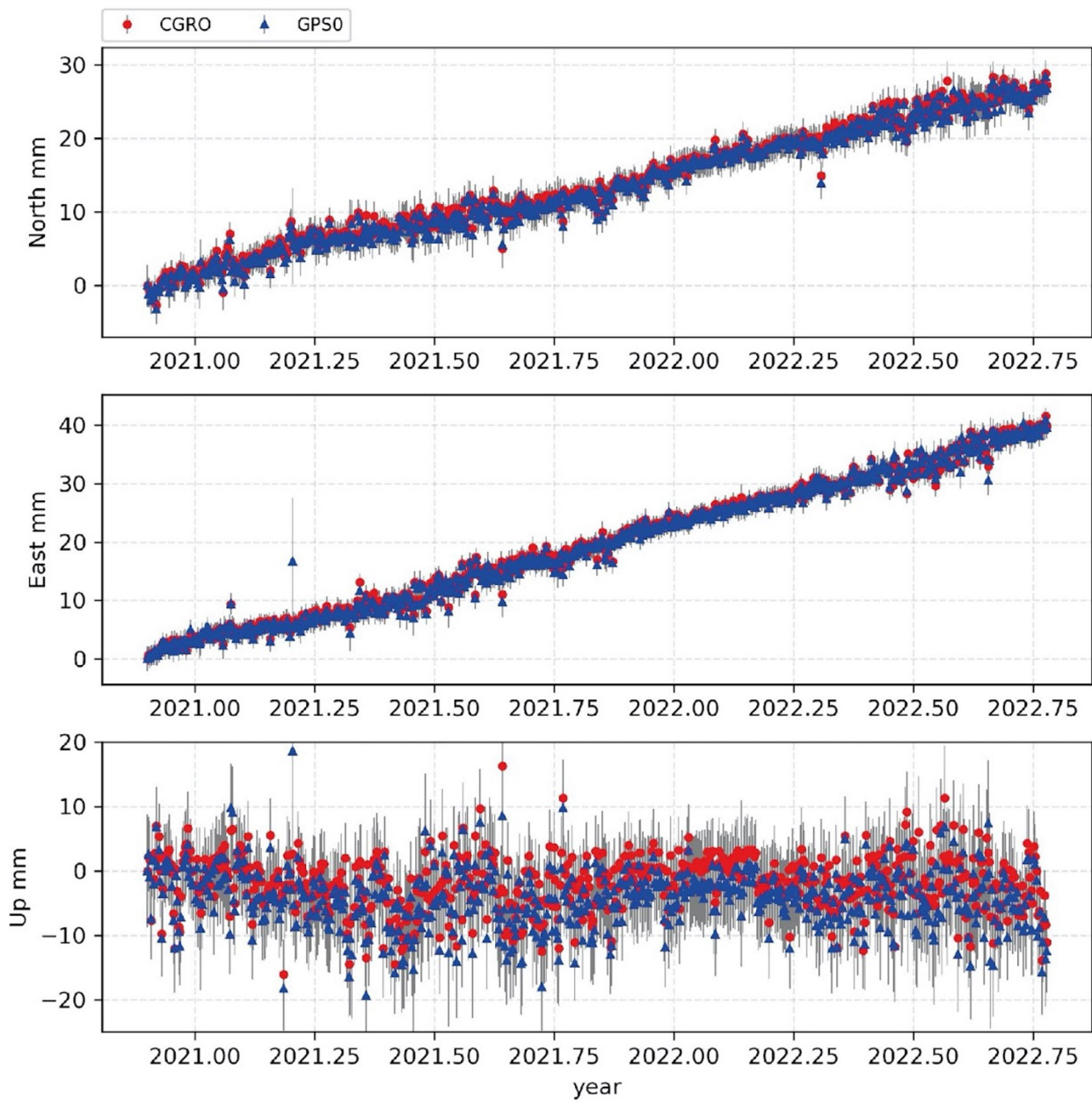
GPS0 et CGRO sont exactement les mêmes stations (utilisation d'un splitter)

On observe un biais plus important dans la solution GPS que dans la solution MGEX

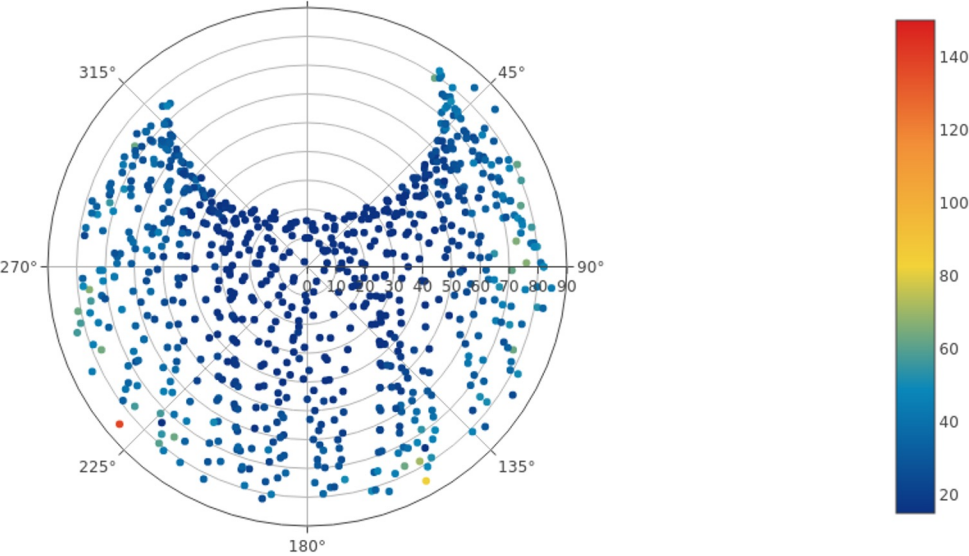
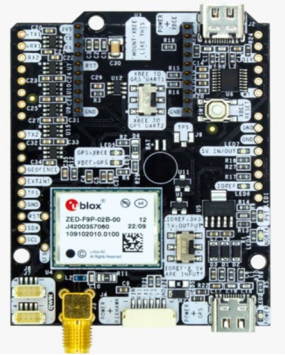
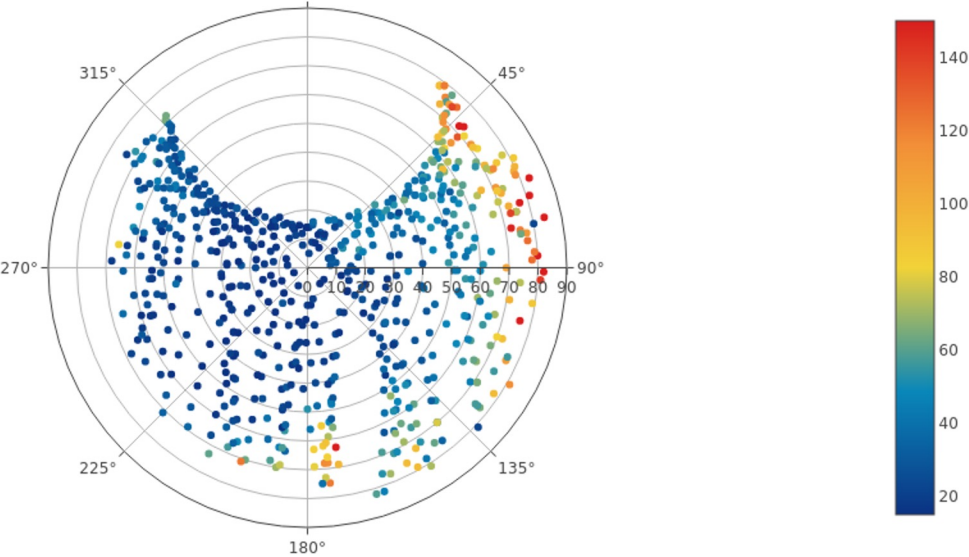
La précision plani est améliorée d'un facteur ~ 2.6 avec la solution GPS w/ AR

La précision alti est améliorée d'un facteur ~ 1.2 avec la solution GPS w/ AR

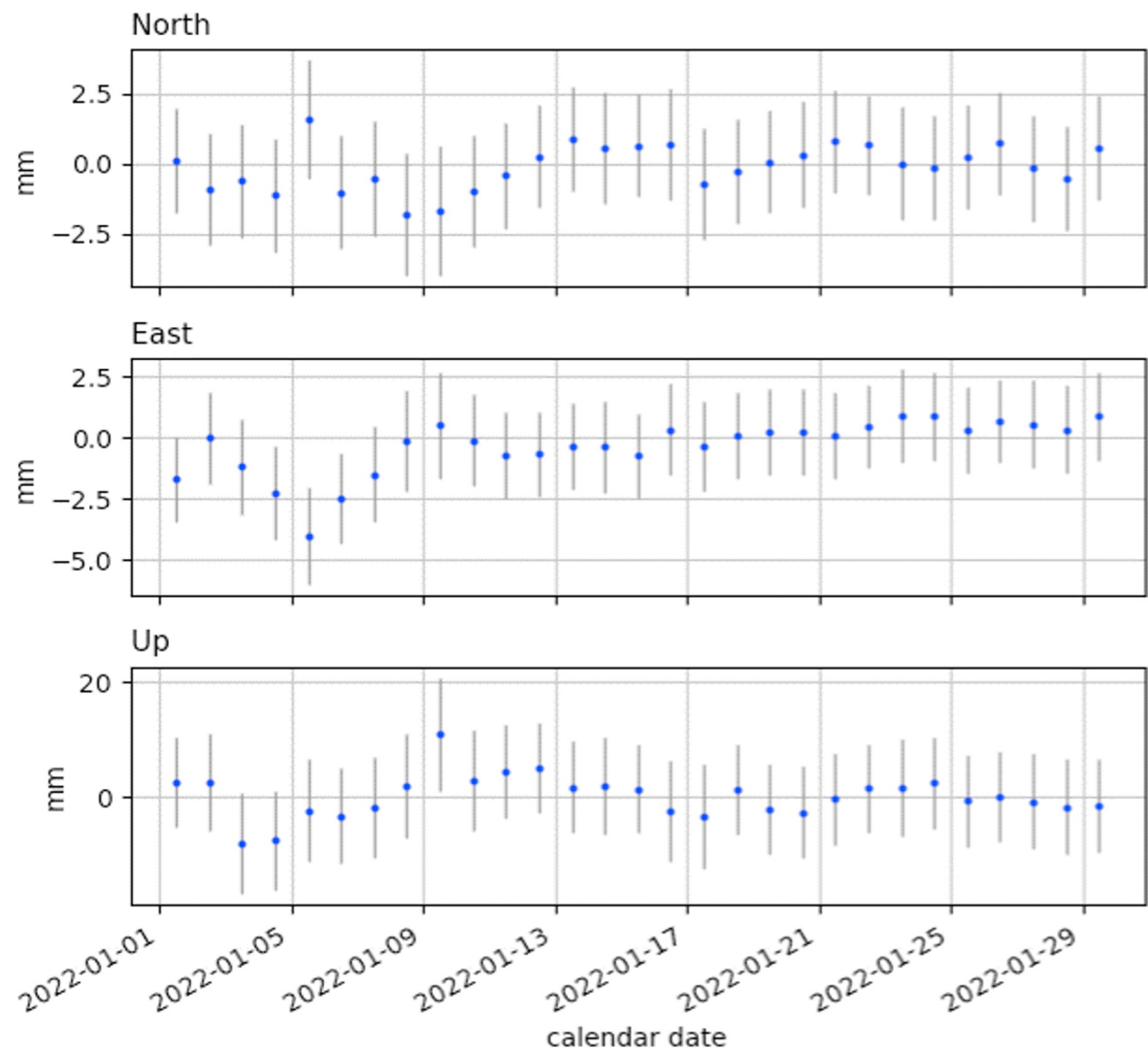
Solution CGRO vs GPS0 : GAMIT GPS (P. Jarrin)



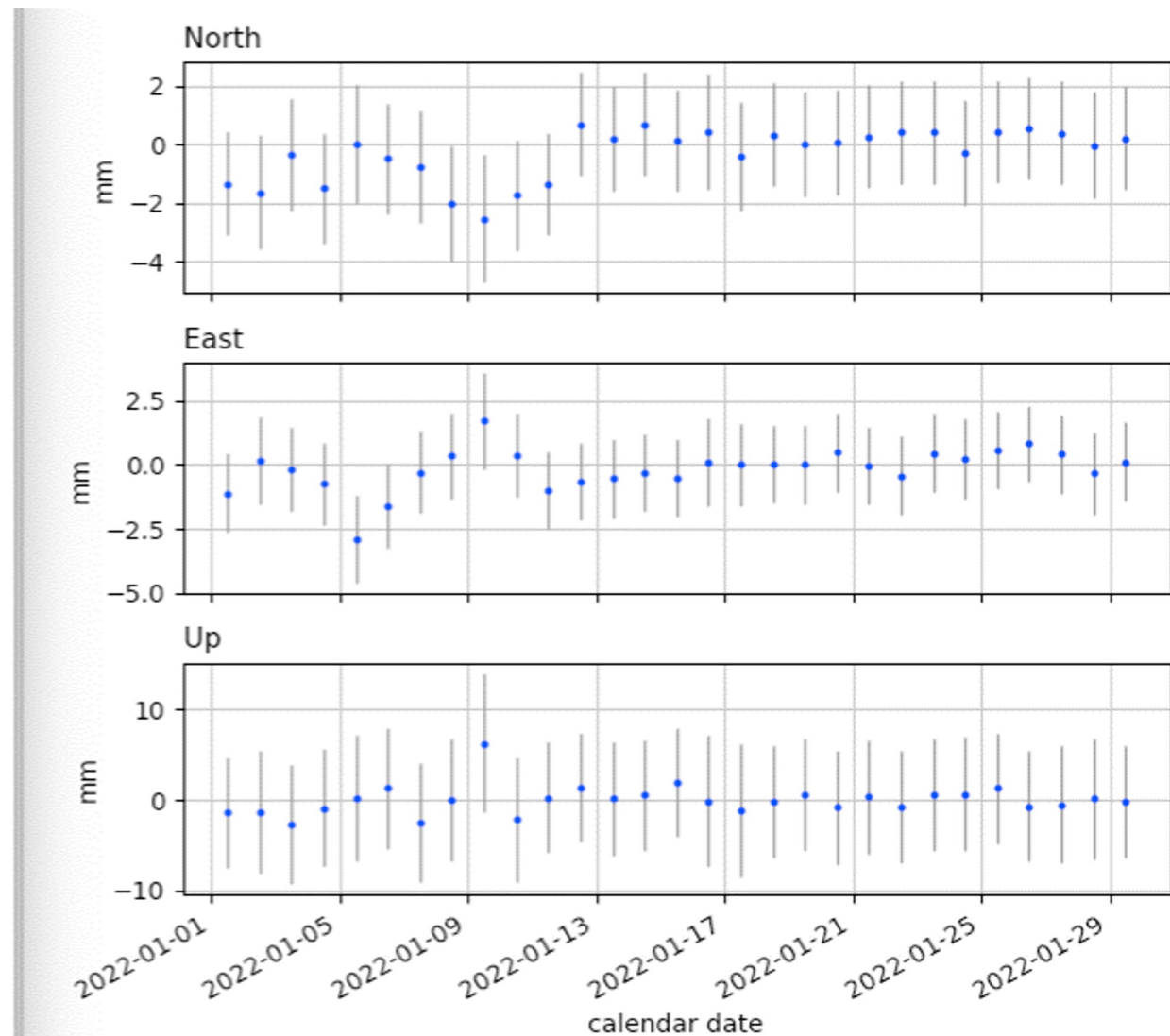
Site expérimentale SOPH phase1 : instruments distants



Solution phase1 SEPT vs SOPH : GAMIT GPS (JM. Nocquet)

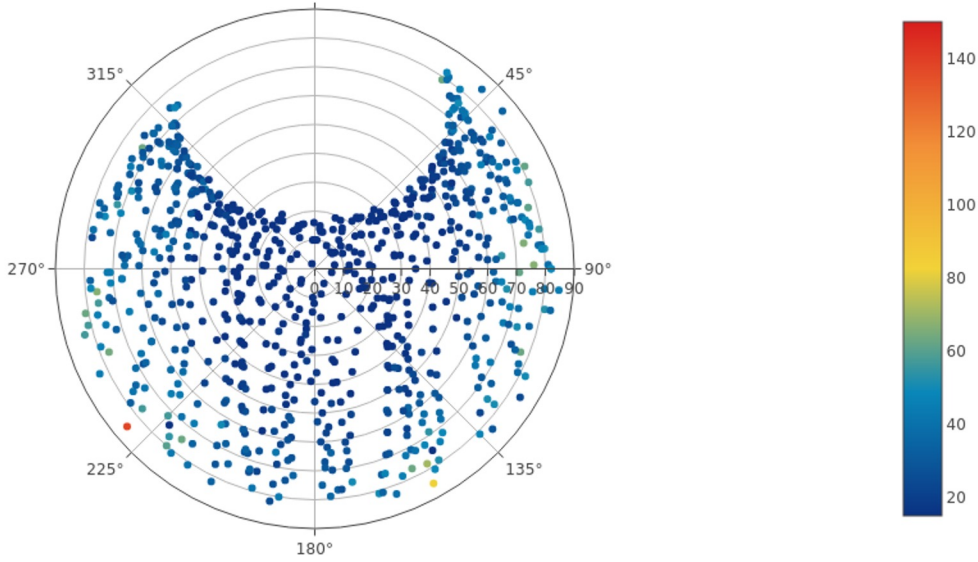


SEPT MX5 + TRM57971.00

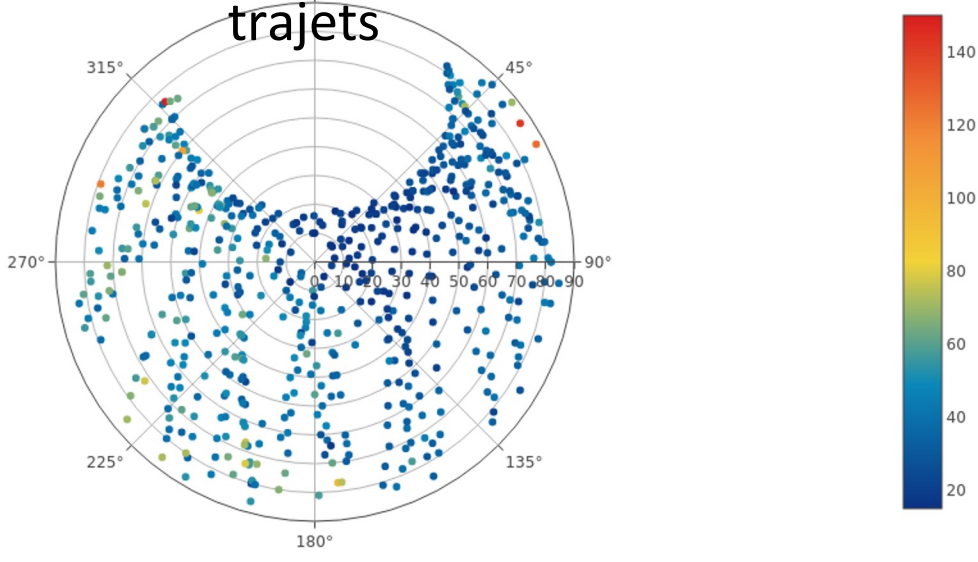


SOPH NetR9 + ASH701933A_M

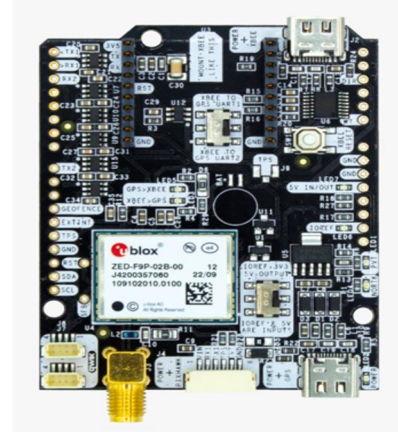
Site SOPH skyplot GPS L2 du 23/03/2023



Multi-trajets

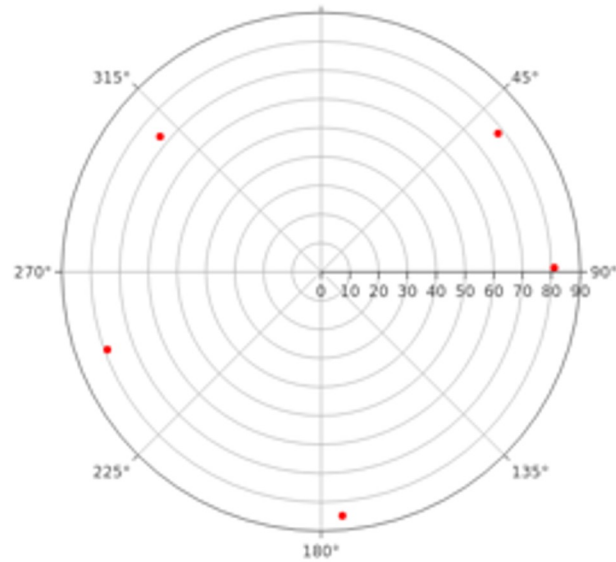


SOPH NetR9

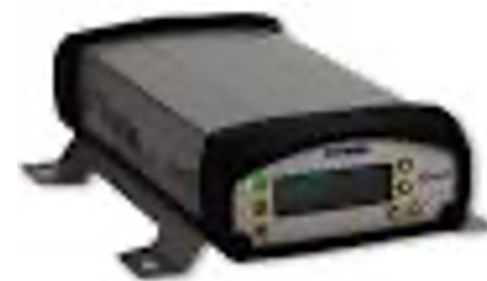
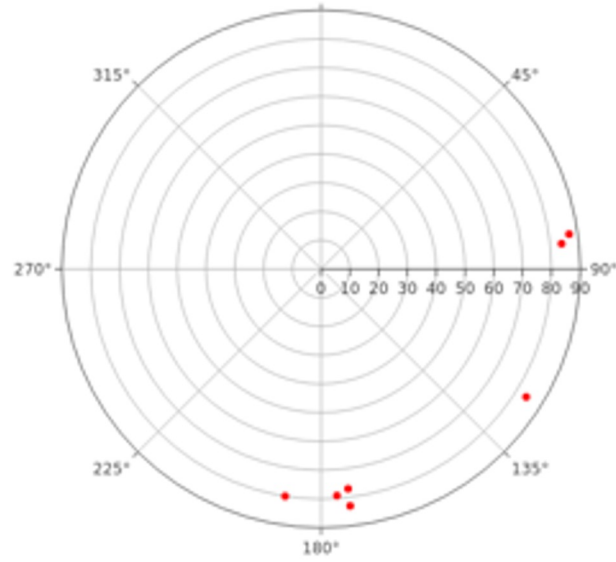


TEST F9P

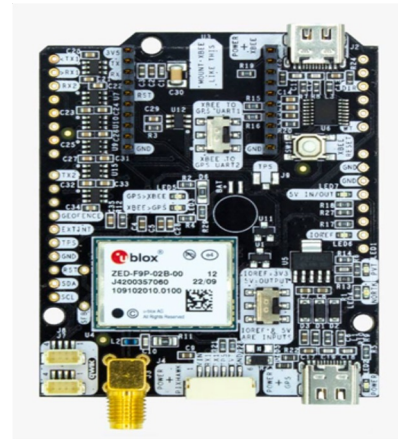
Site SOPH skyplot GPS L2 du 23/03/2023



Saut de cycles

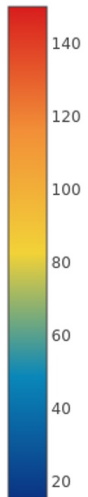
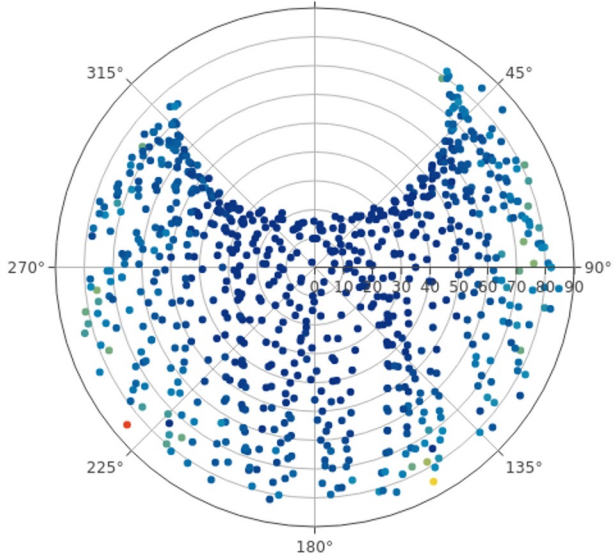


SOPH NetR9



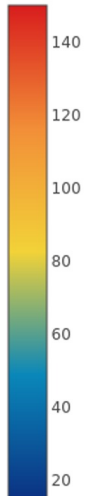
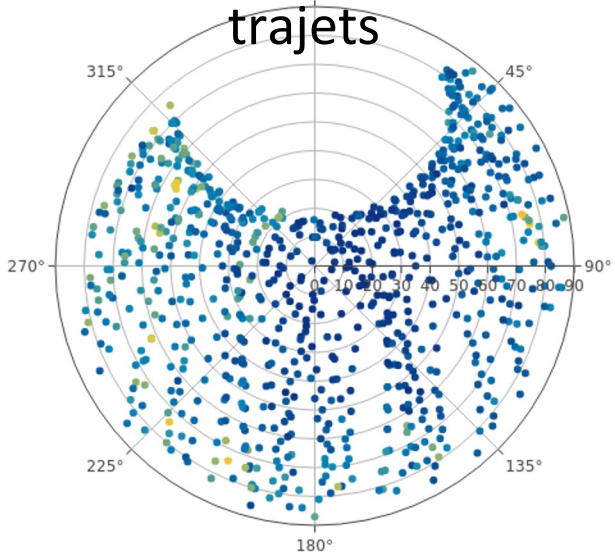
TEST F9P

Site SOPH skyplot GPS L2 du 23/03/2023



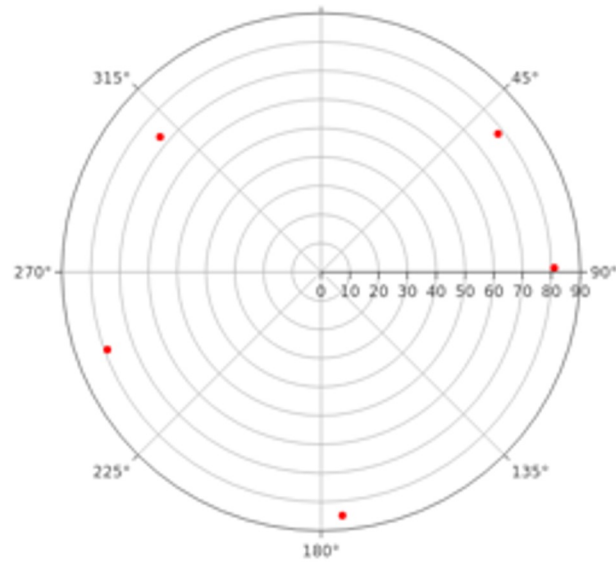
SOPH NetR9

Multi-trajets

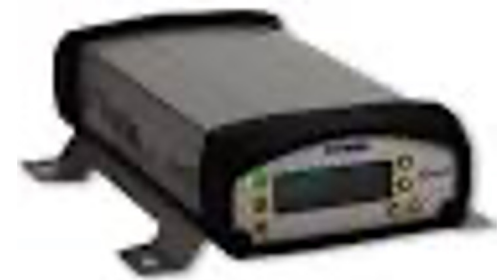
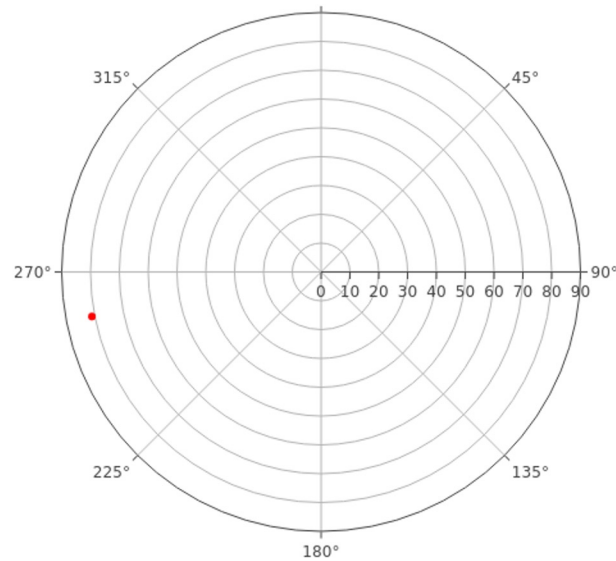


SEP2 MX5

Site CGRO skyplot GPS L2 du 23/03/2023



Saut de cycles

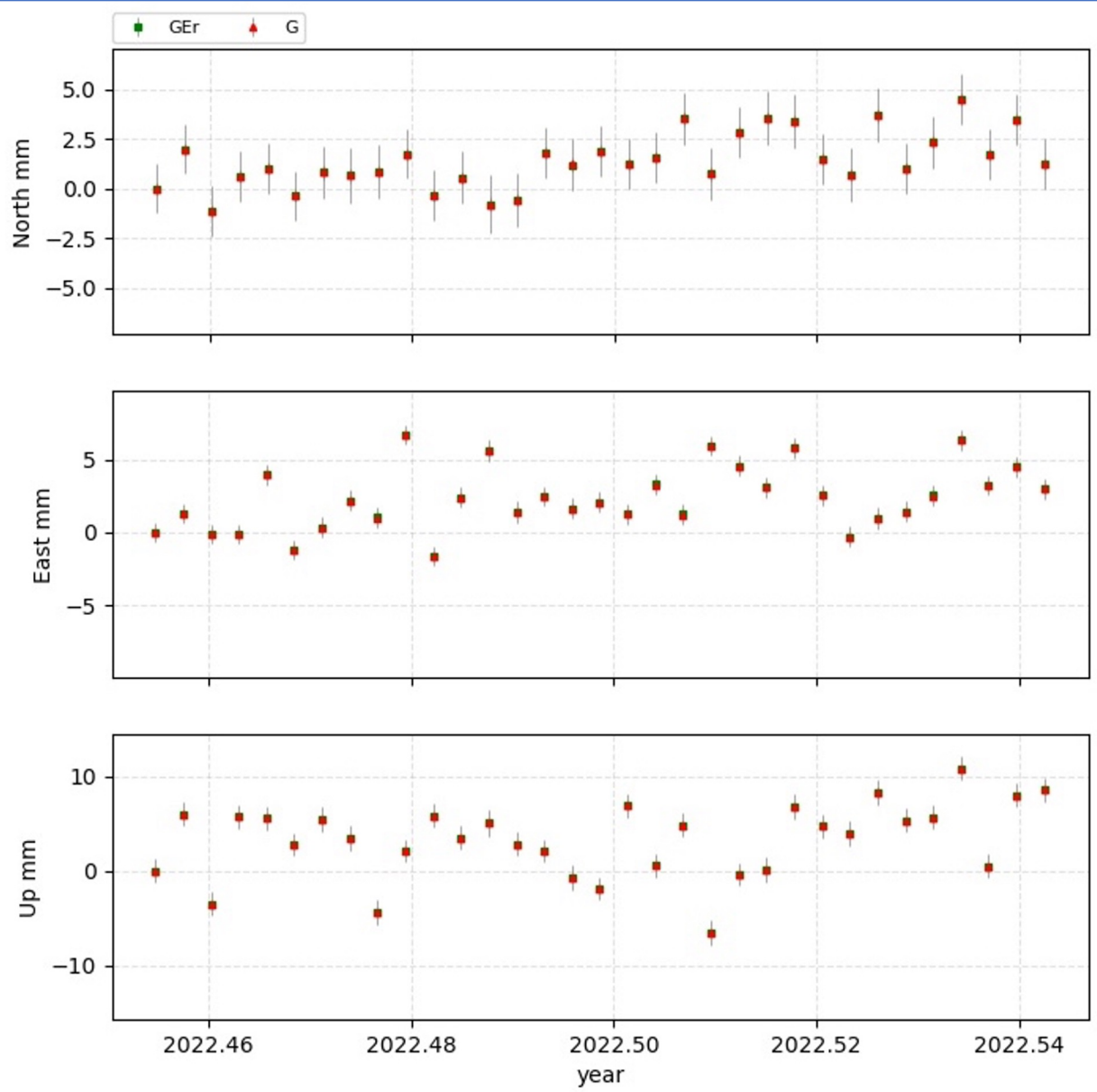


SOPH NetR9

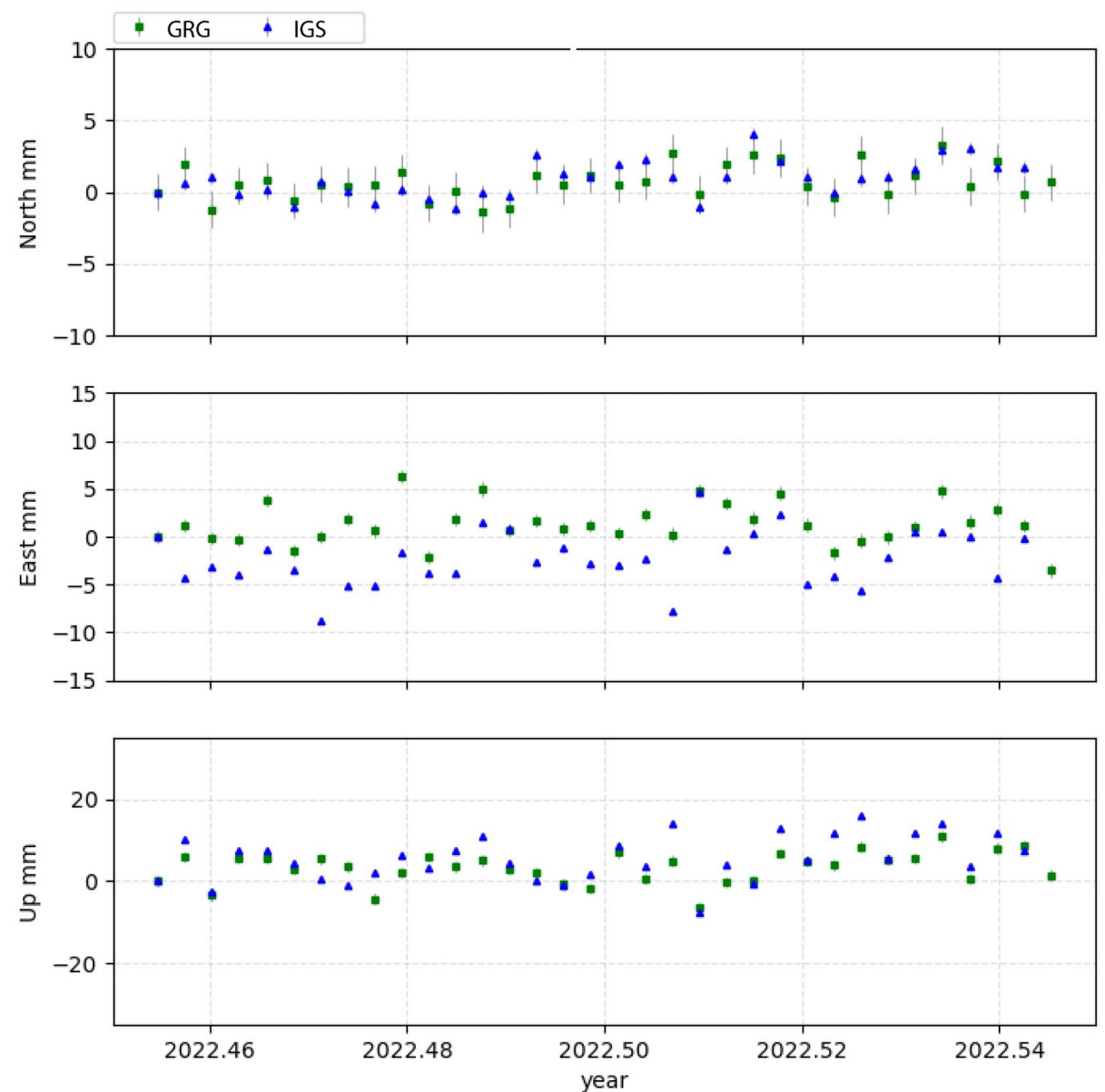


SEP2 MX5

Solution phase2 SEPT : GINS GNSS (P. Jarrin)

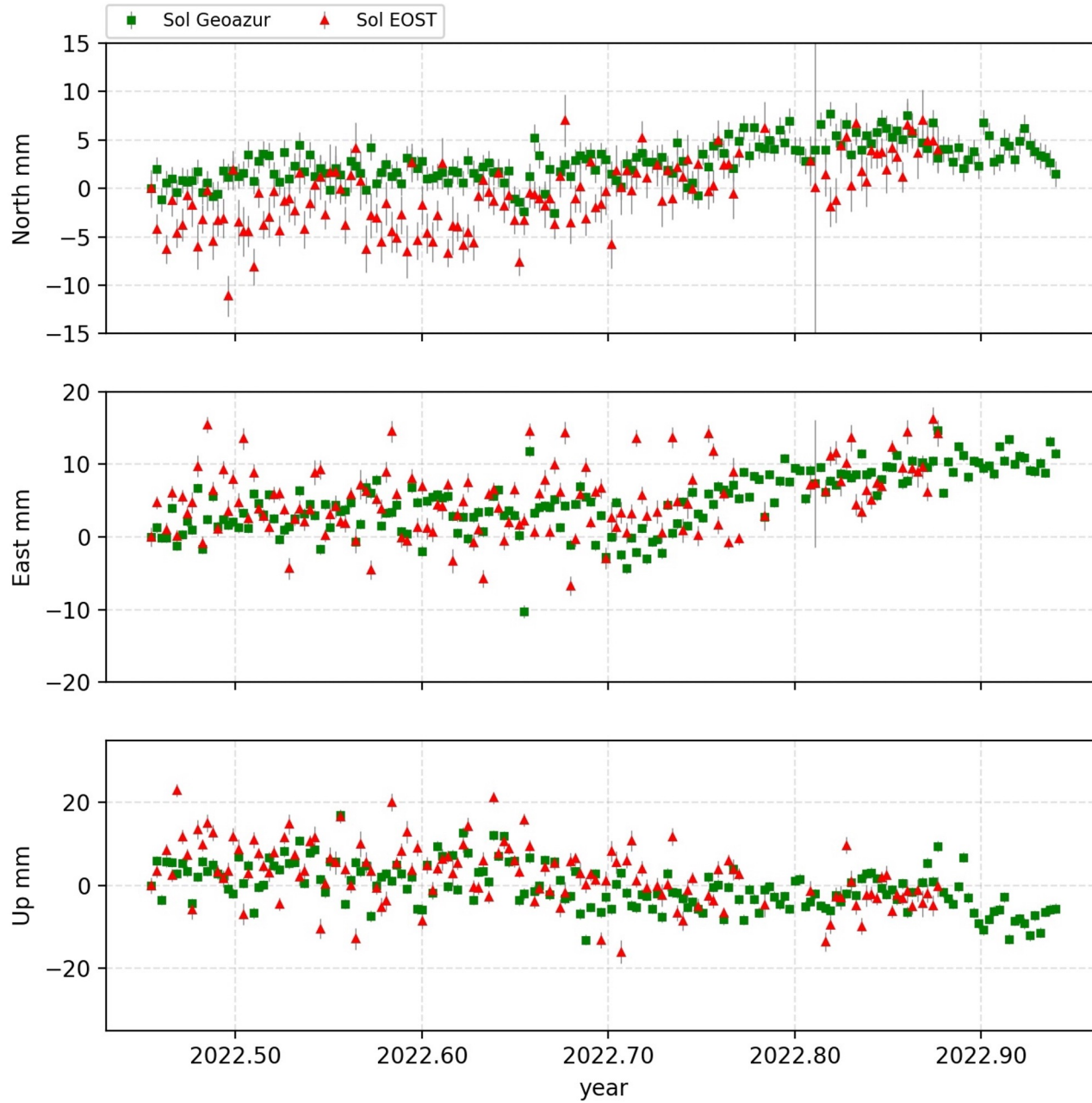


GNSS vs GPS ☐ Idem



GRG vs IGS ☐ Offset en Est

Solution phase2 SEPT : GINS vs GipsyX (GNSS)



- Le traitement GINS montre une solution moins bruitée par rapport à GipsyX
- Une fois de plus, il n'a pas été possible de traiter les données du récepteur Ublox en Galileo.

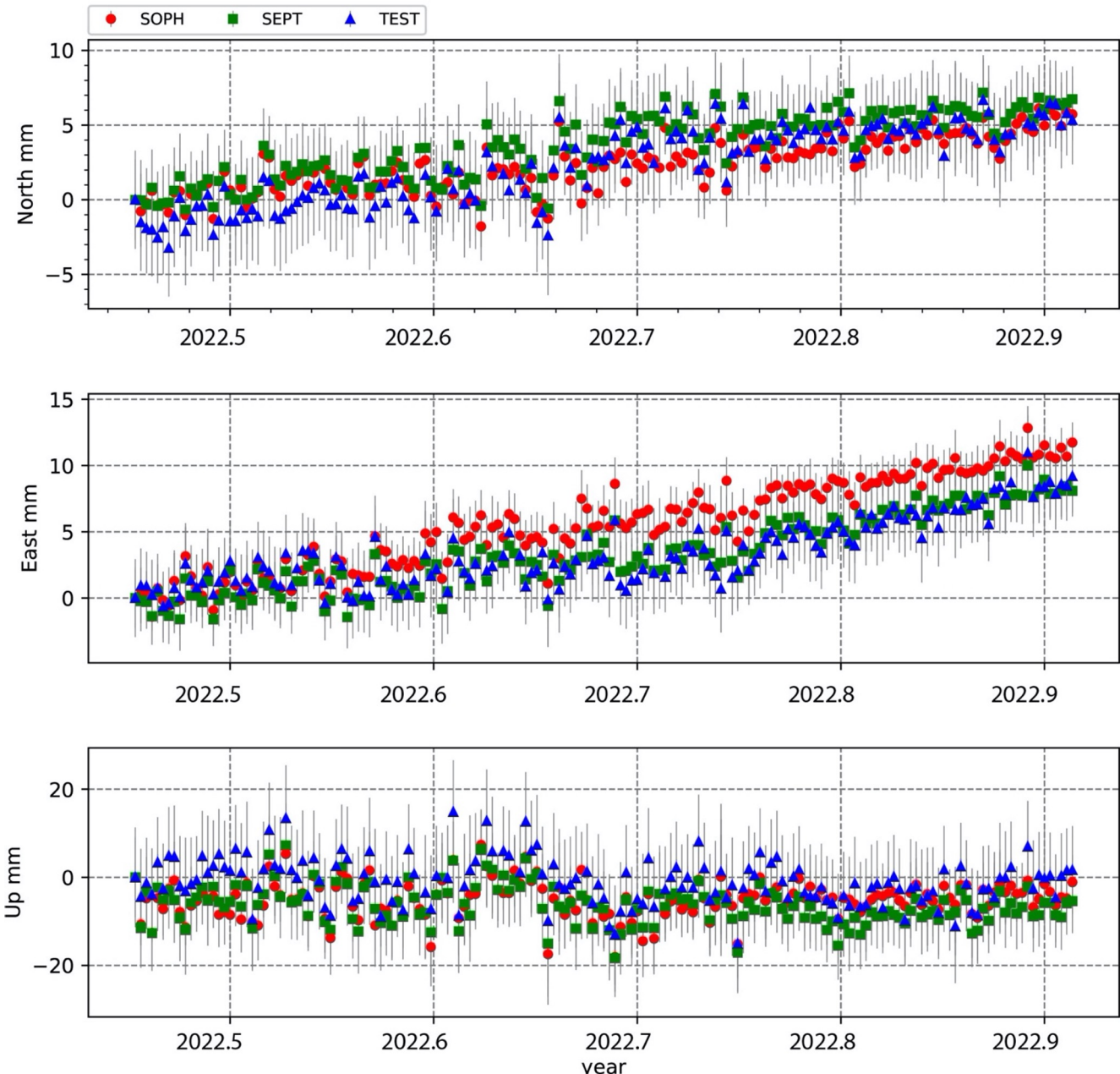
Solution phase2 SEPT / TEST / SOPH : GAMIT GPS (P. Jarrin)

Adaptation:

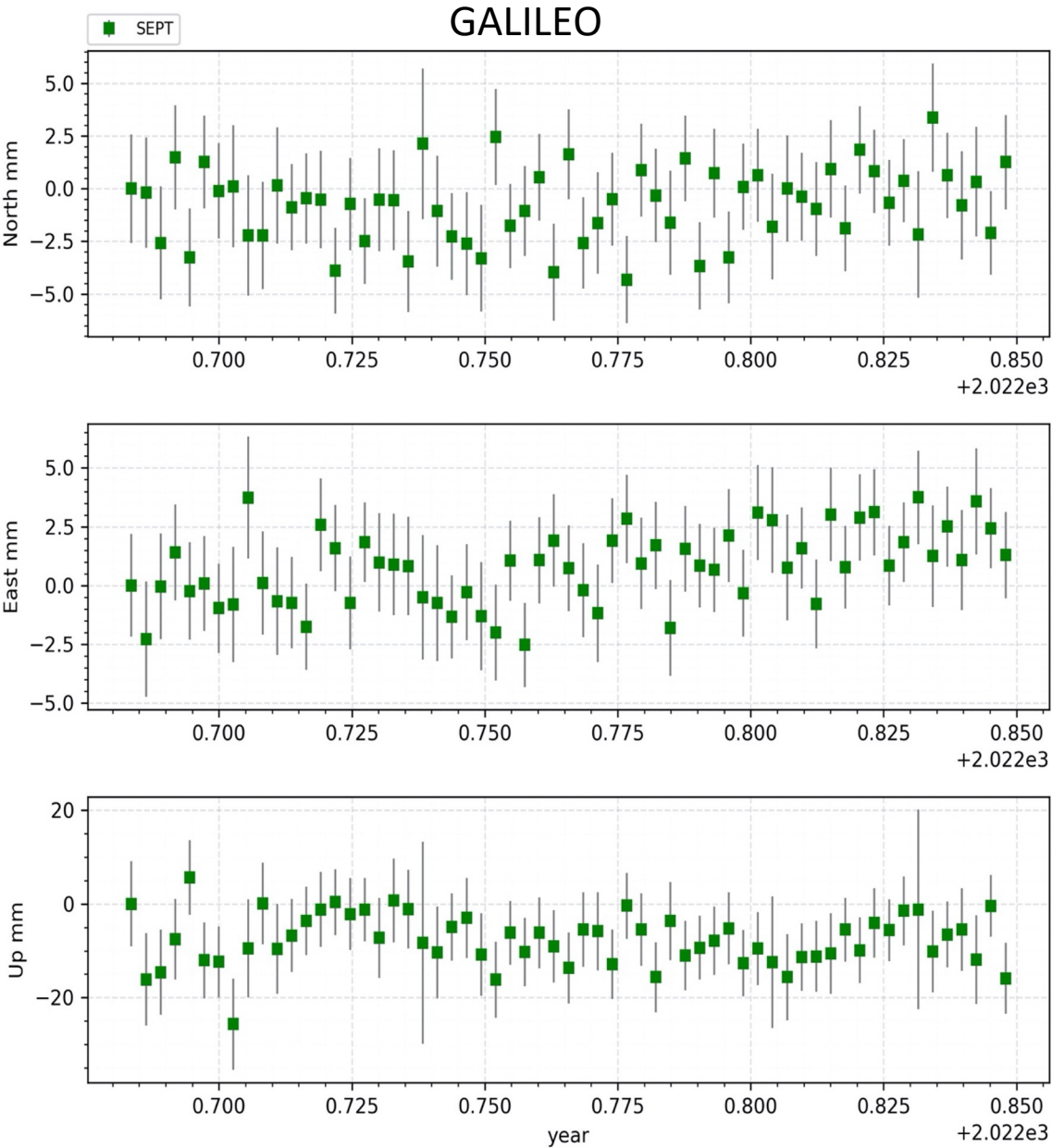
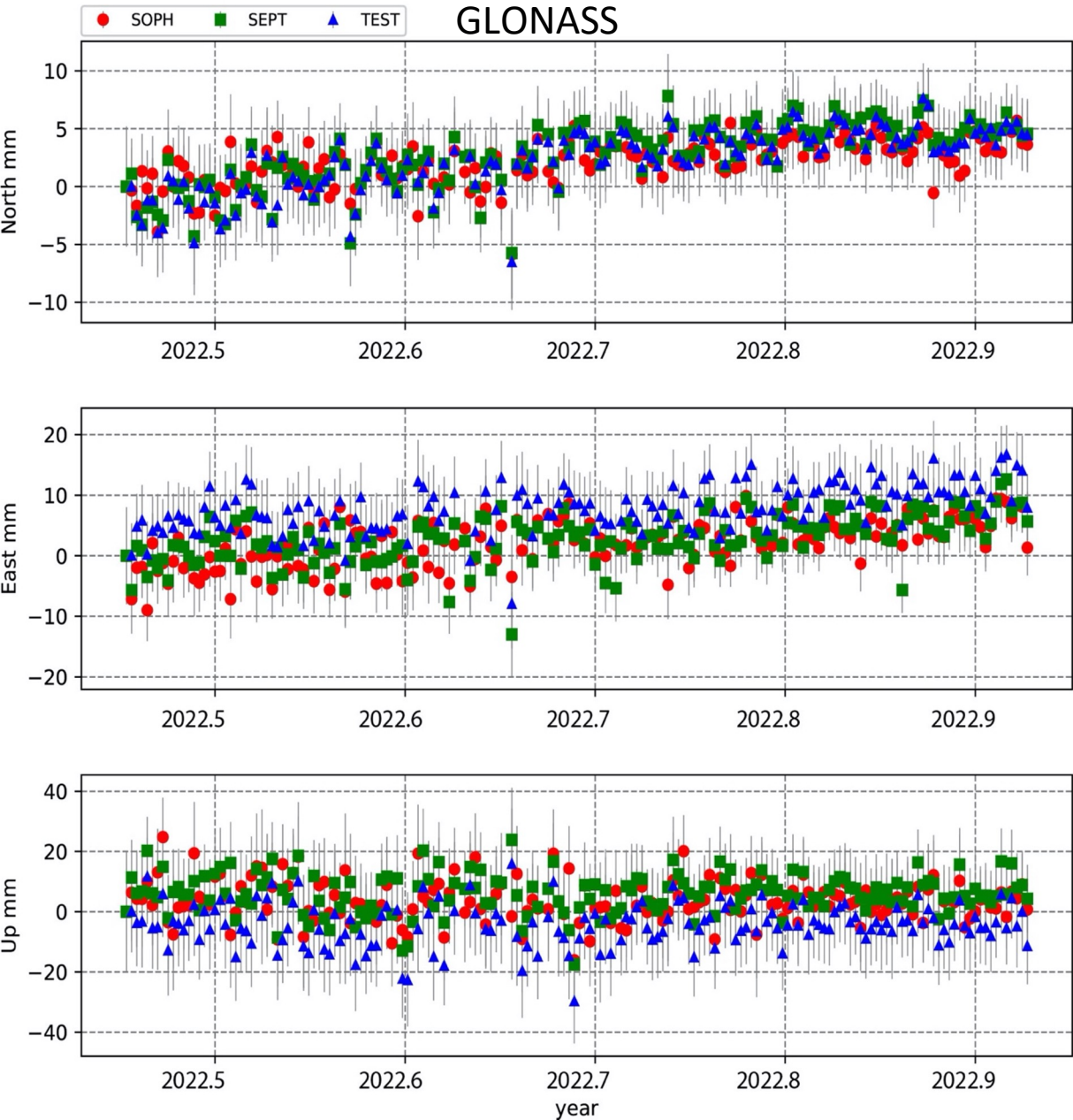
- Fiche de calibration Trimble Alloy pour TEST
- Fiche de calibration Septentrio PolaRx pour SEPT
- Tolérance d'horloge paramétré à 1s
- Fichier Antex NGS14.atx



| Répétabilité | Wrms_n | Wrms_e | Wrms_u |
|--------------|--------|--------|--------|
| SOPH | 3.4 | 1.8 | 4.1 |
| SEPT | 2.8 | 2.2 | 4.4 |
| TEST | 2.5 | 2.6 | 5.2 |



Solution phase2 SEPT / TEST / SOPH : GAMIT GLONASS GALILEO

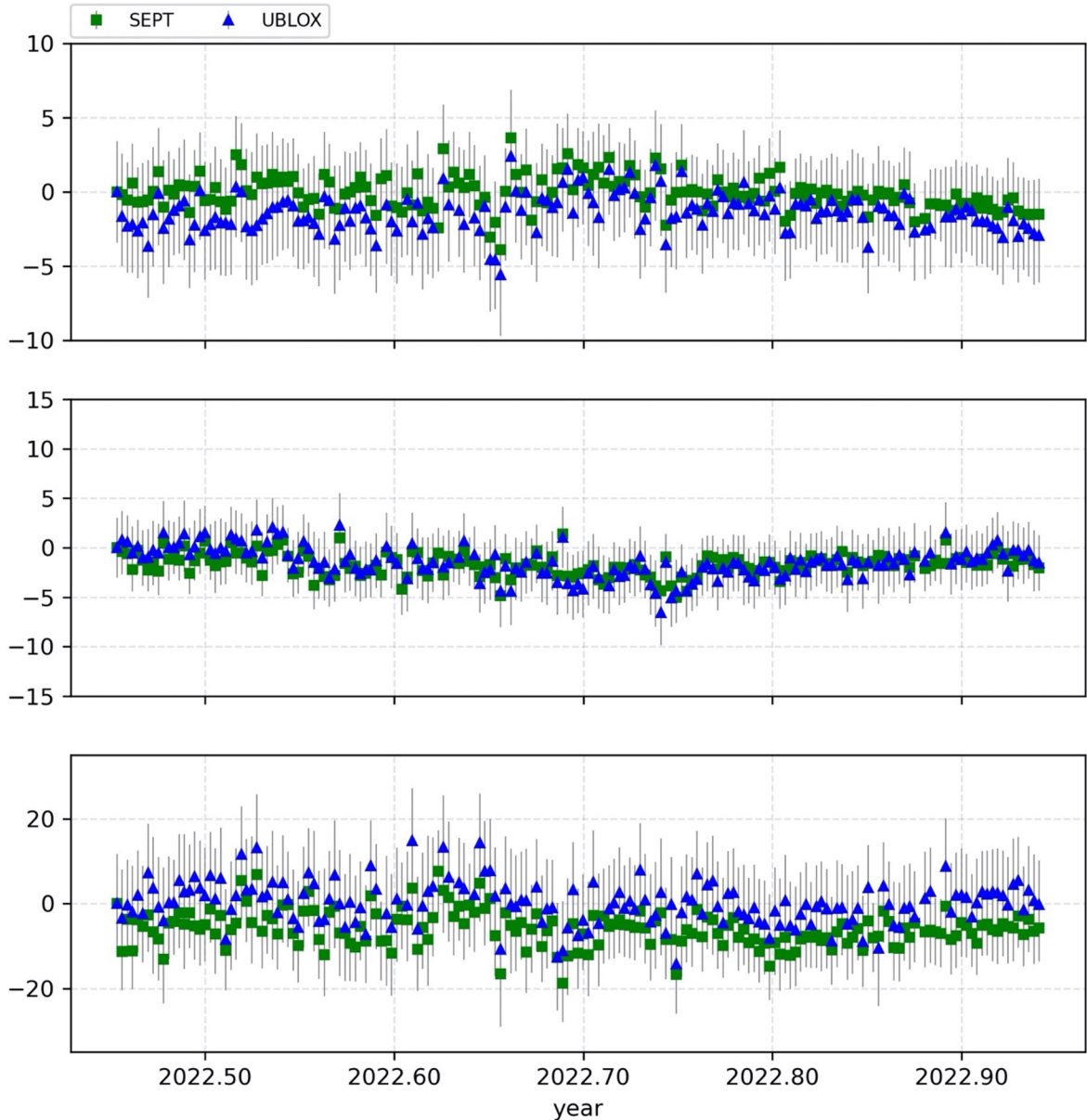


Résultats phase2 SEPT / TEST / SOPH : GAMIT GNSS

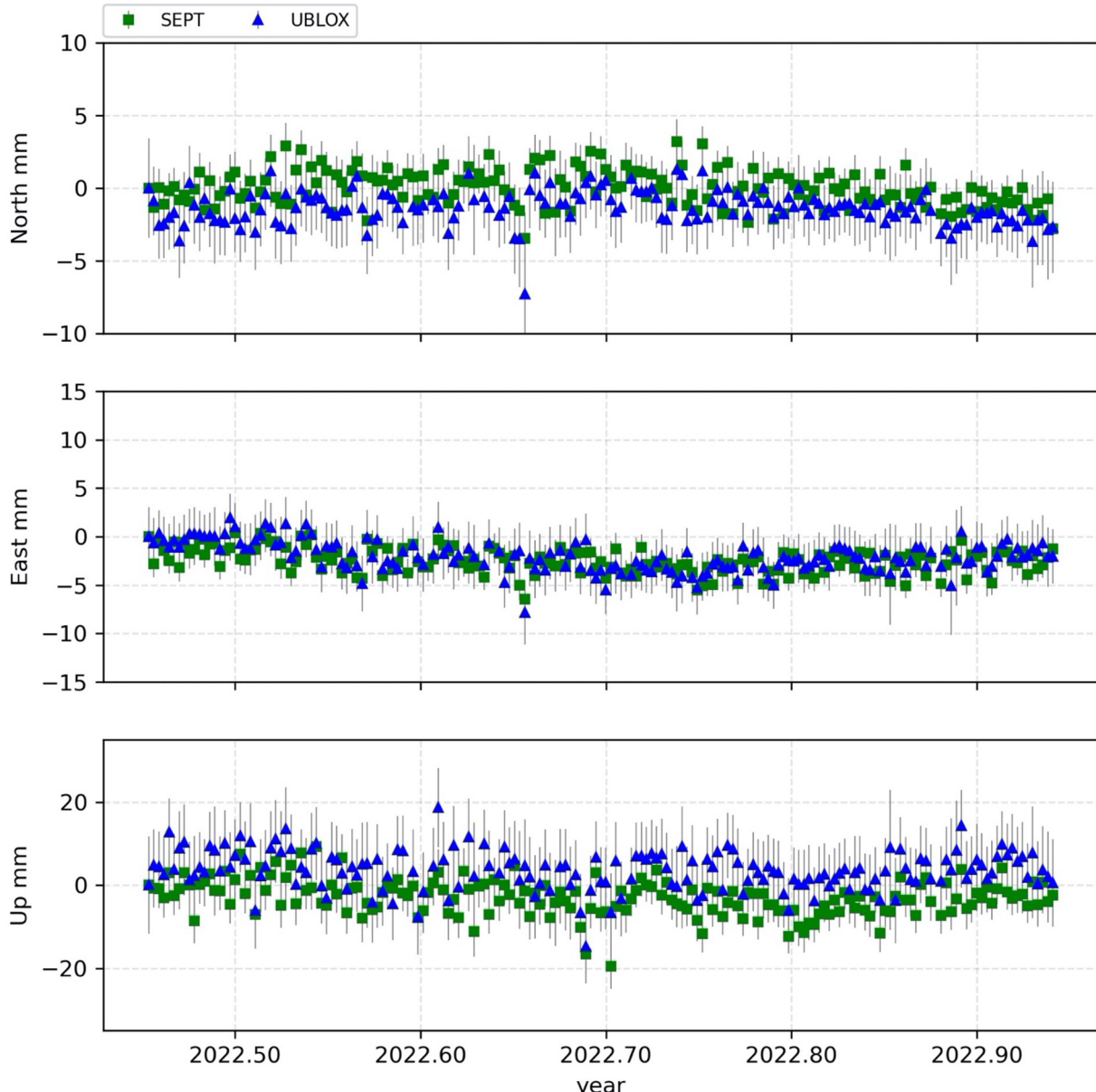
| Répétabilité | GPS Nord | GLO Nord | GAL Nord | GPS Est | GLO Est | GAL Est | GPS Up | GLO Up | GAL Up |
|--------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| SOPH | 3.4 | 3.9 | | 1.8 | 2.7 | | 4.1 | 6.6 | |
| SEPT | 2.8 | 3.9 | 1.6 | 2.2 | 2.0 | 1.7 | 4.4 | 6.8 | 5.5 |
| TEST | 2.5 | 3.9 | | 2.6 | 2.7 | | 5.2 | 7.0 | |

Solution phase2 SEPT / TEST : GAMIT GPS vs GNSS

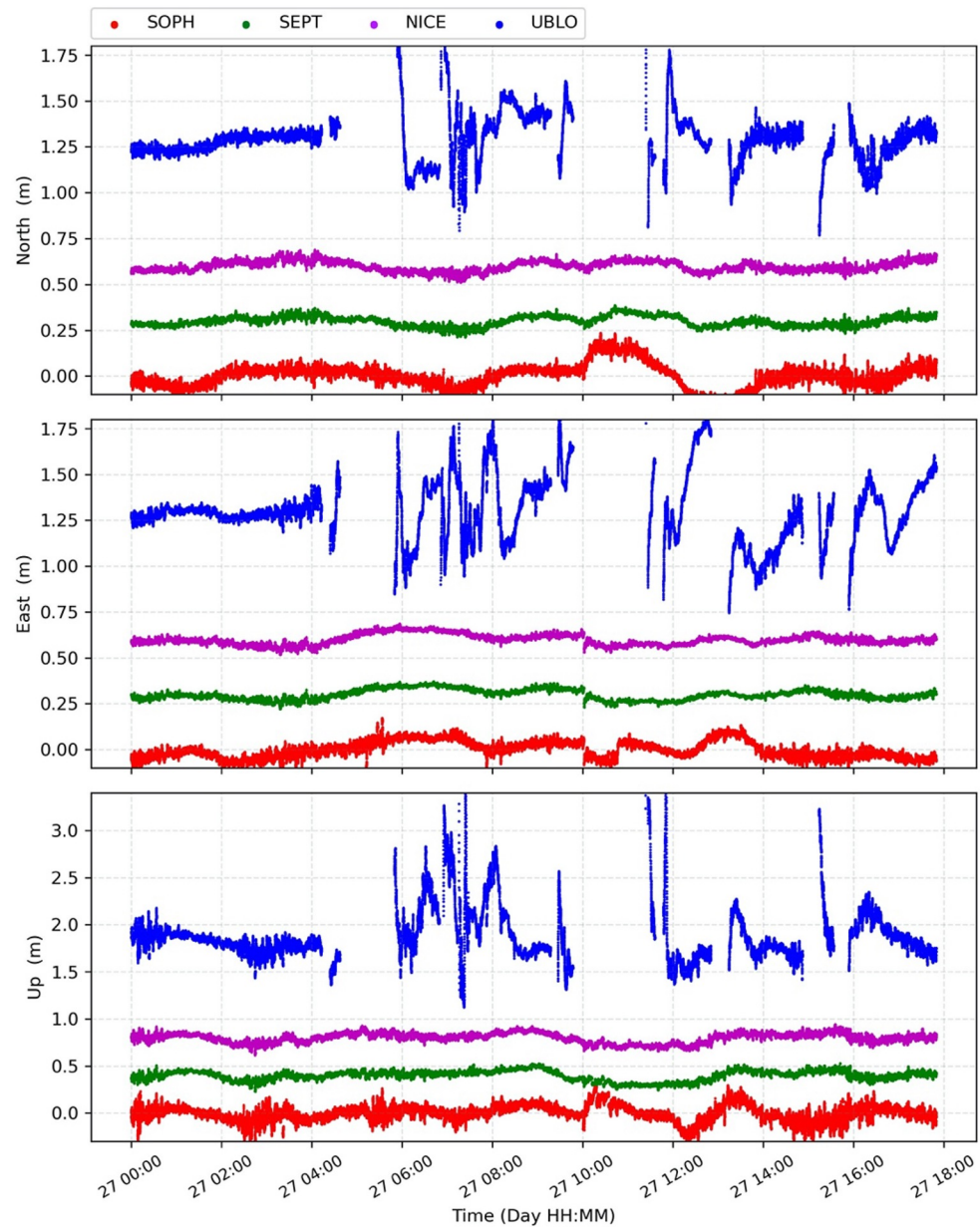
GPS



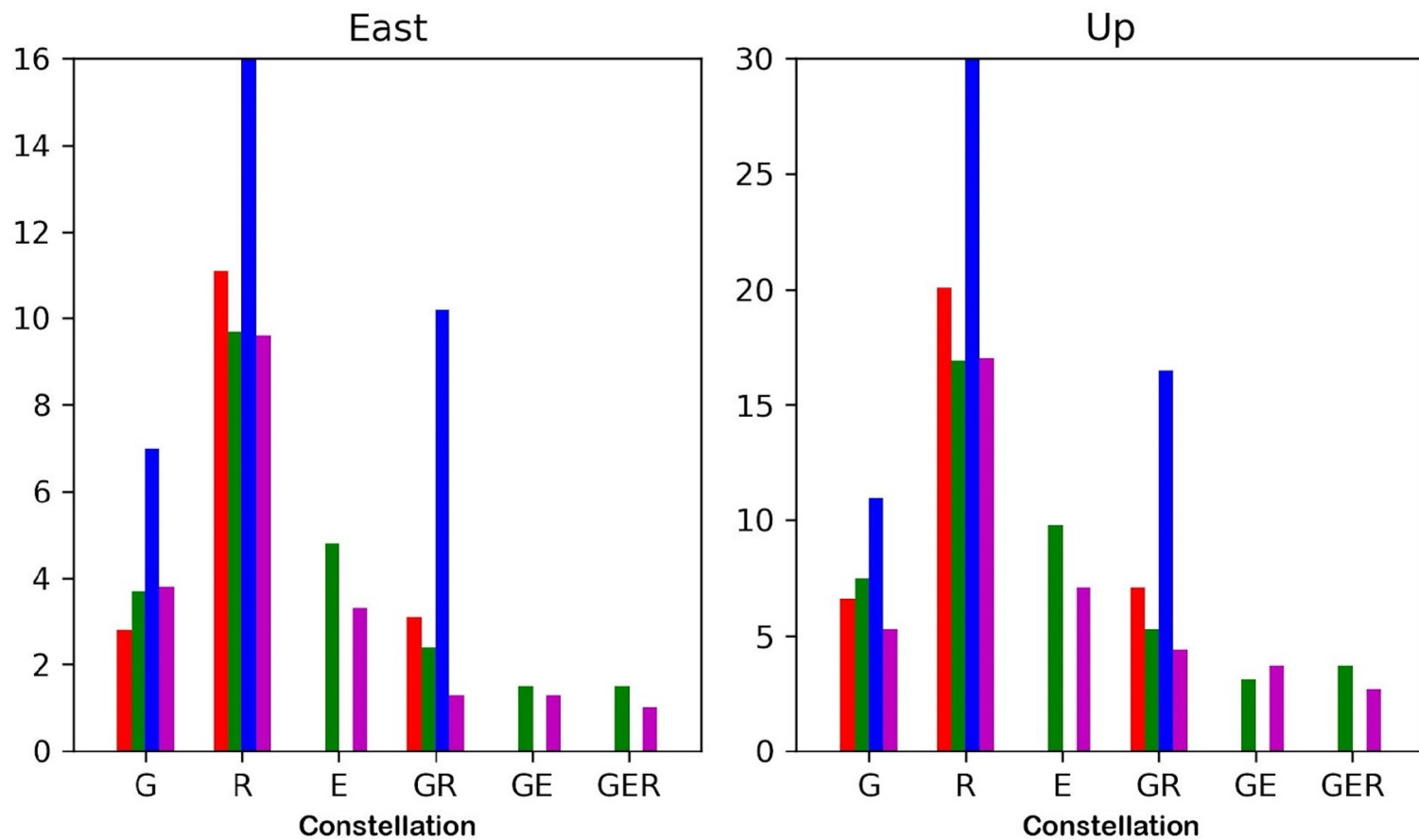
GNSS



Solution cinématique: GAMIT GNSS



Le récepteur Ublox montre de mauvais résultats en cinématique.
De manière générale GONASS n'apporte rien à la solution.
La combinaison GPS + Galileo est très performante.
Dommage que le traitement Galiléo ne soit pas possible sur le F9P.



Résultats : conclusions GAMIT

- Les fiches de calibration récepteur ne peuvent pas être modifiés (fichier binaire)
- La solution Galileo donne d'excellents résultats en planimétrie
- Les solutions Glonass sont de mauvaises qualités.
- La combinaison GNSS n'apporte rien.
- Le couple Septentrio/AS-ANT2B-CAL montre des résultats exemplaires
- Le récepteur Ublox F9P s'en sort très bien avec des solutions scientifiquement exploitables

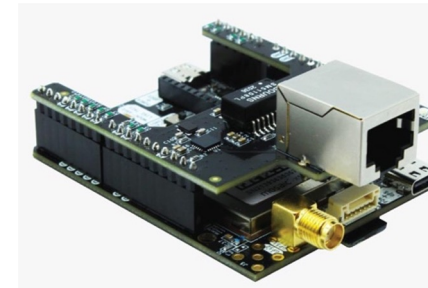
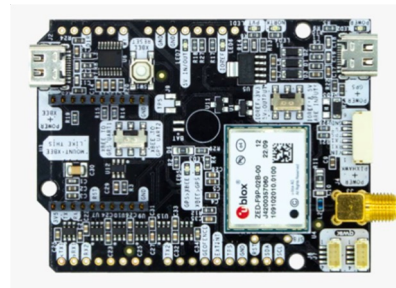
Conclusion générales

- Le Récepteur Septentrio Mosais-X5 a toutes les qualités requises pour une station Géodésique pour le prix d'une option chez Trimble.
Reste à savoir si il est assez robuste sur le long terme.
- Le Récepteur Ublox F9P a nécessité beaucoup de développements pour l'exploitation des donnés, mais le jeu en vaut la chandelle.
Il est très largement répandu du fait de son prix dérisoire sur le réseau Centipede et dans le cadre du projet Envirosciences pyrénées.
- L'antenne ArduSimple AS-RTK2BCAL est vraiment moins chère qu'une antenne géodésique classique et donne de très bons résultats.
Reste à savoir si son centre de phase est bien identique d'une antenne à l'autre.
- Pour le moment, le GNSS n'apporte rien en traitement statique, mais de récents résultats montrent qu'il est très intéressant en cinématique.
- Le traitement Galileo est prometteur, une combinaison GPS+GAL devrait en théorie améliorer les solutions.
Cela pourrait être très utile pour le Ublox qui a un nombre de satellites GPS réduit.
Mais seul GipsyX a été capable de traiter les données Galileo du récepteur F9P.

Tableau comparatif

Station Géodésique
Bas-Coût

| Modèle | Ublox F9P | Septentrio Mosaic X5 | Trimble Alloy |
|----------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| Antenne | AS-ANT2BCAL | AS-ANT2BCAL | Zephyr Geodetic 3 |
| Constellations | GREB | GREB | GREB |
| Consommation | 2w | 2w | ~4w |
| Prix | ~500€ | ~1000€ | ~12k€ (tarif INSU) |



Plateforme instrumentale météorologique

Davis Instruments Vantage Pro II (VP2)

- **VP2A** : double auget jamais entretenu/calibré
- **VP2B** : double auget régulièrement calibré
- **VP2C** : mono-auget

Lufft WS700

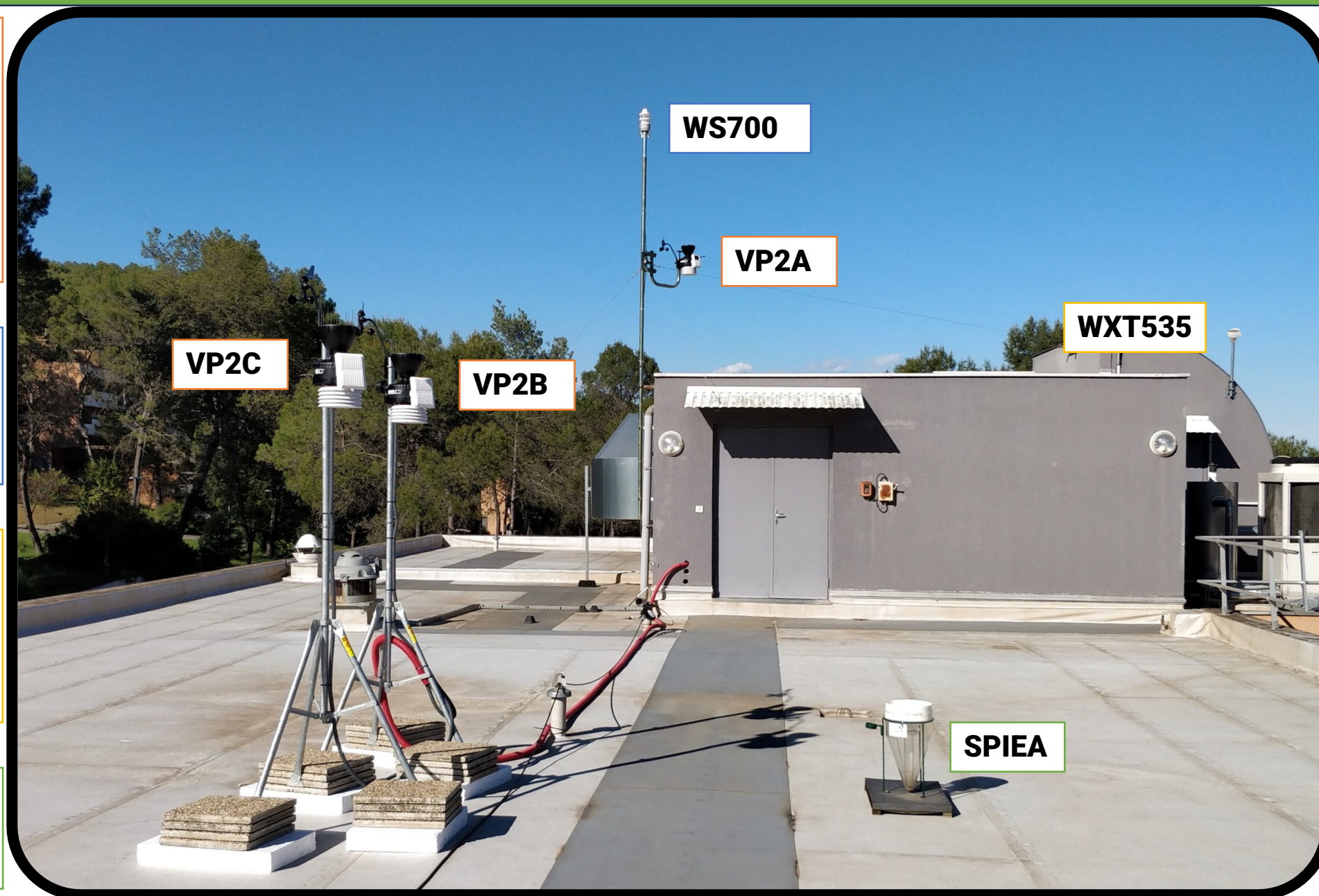
- Radar Doppler 24 GHz
- Taille et vitesse des hydrométéores

Vaisala WXT535

- Système acoustique (impact)
- Taille et vitesse des hydrométéores

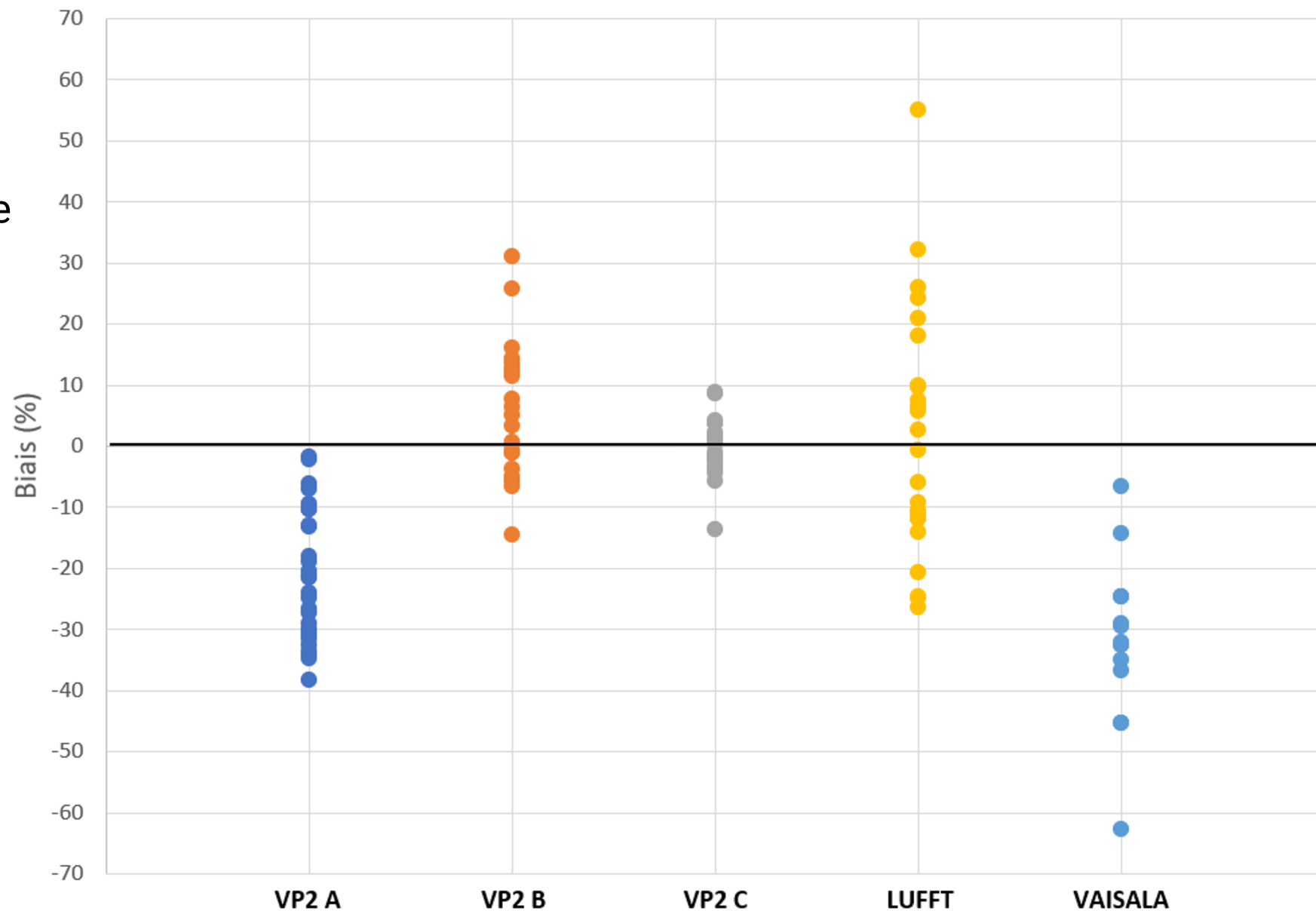
Pluviomètre SPIEA

- Manuel à lecture directe
- Homologué Météo-France



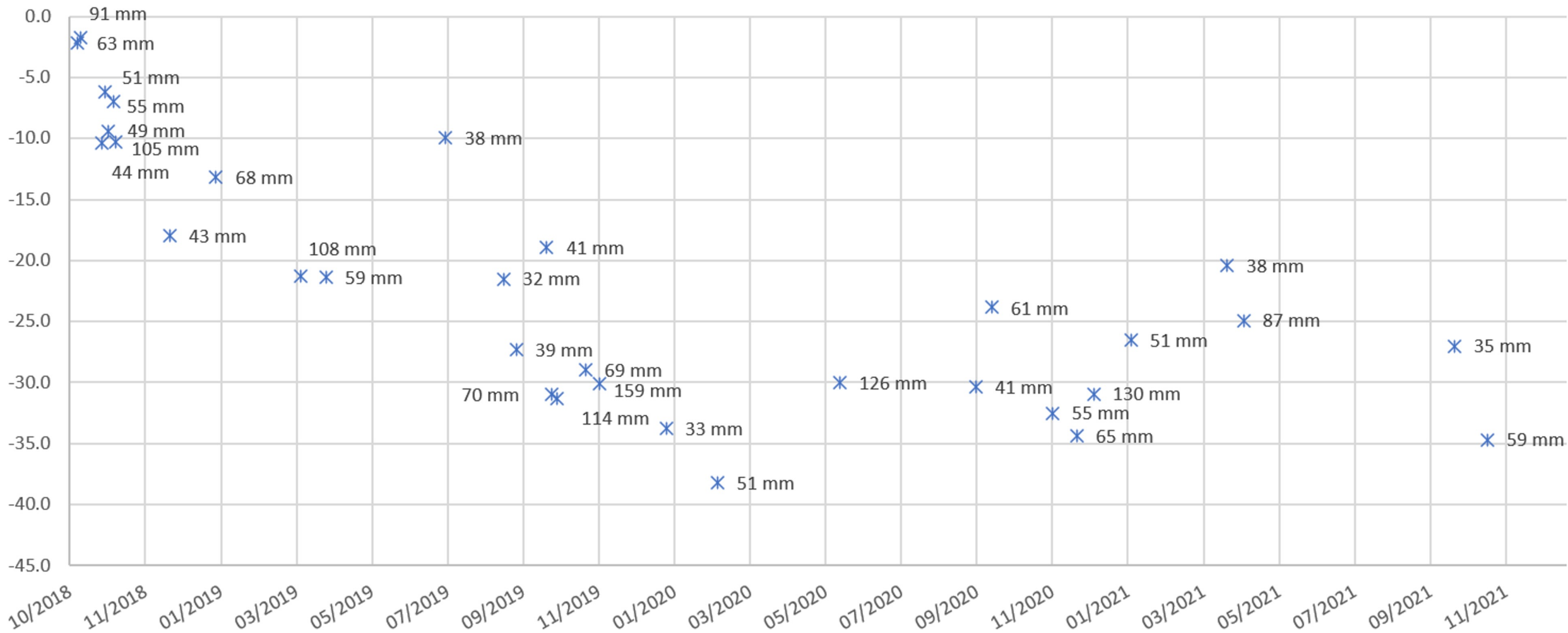
Biais de mesures vs pluviomètre manuel homologué Meteo-france

Biais de chaque pluviomètre par rapport au pluviomètre de référence SPIEA sur les épisodes de plus de 30 mm de la période 2018-2021

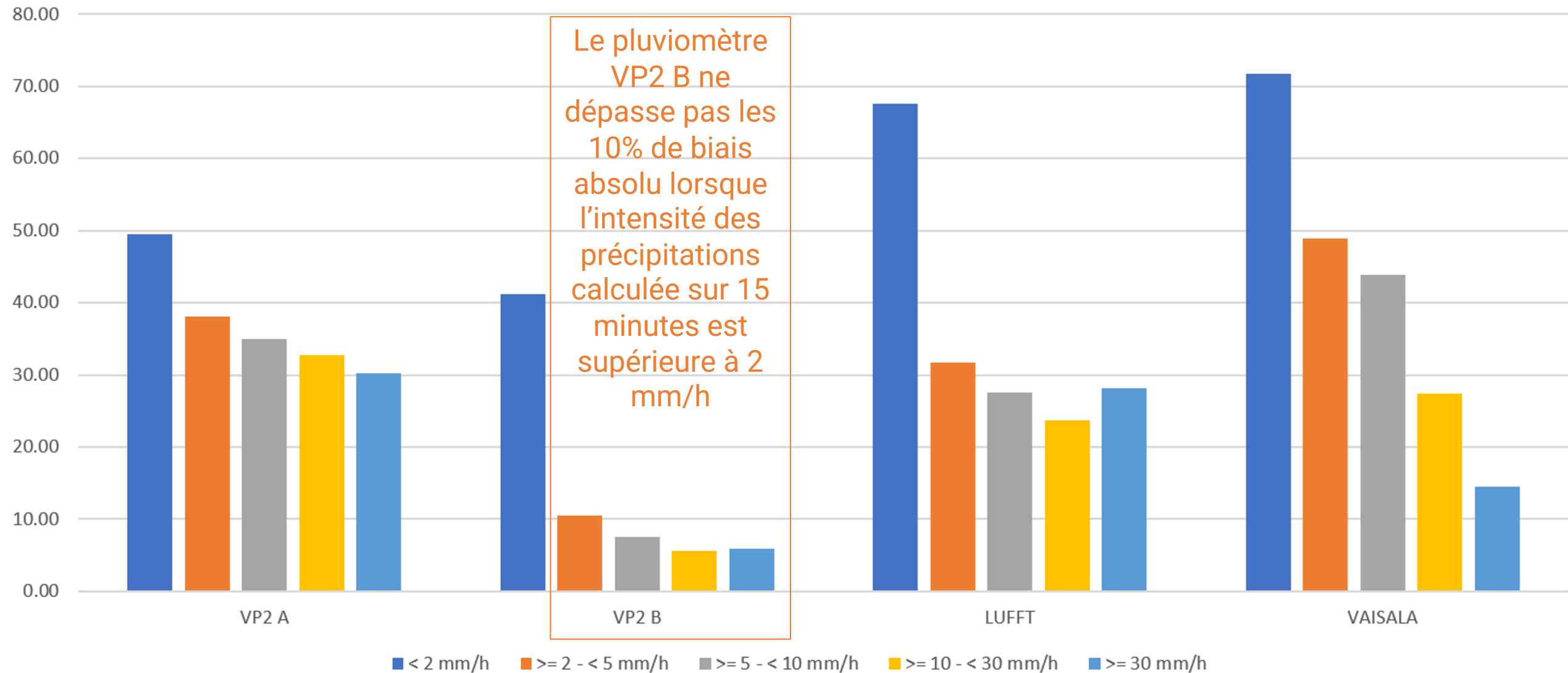


Dérive de mesure dans le temps

Biais (%) du pluviomètre **VP2 A** par rapport au pluviomètre manuel SPIEA, au fil du temps. On remarque deux phases : pendant un an et demi environ, le pluviomètre se dé-calibre petit à petit et a tendance à toujours plus sous-estimer. Puis il se stabilise avec une sous-estimation qui varie entre 20 et 40%. Les étiquettes indiquent la quantité recueillie par le pluviomètre SPIEA.



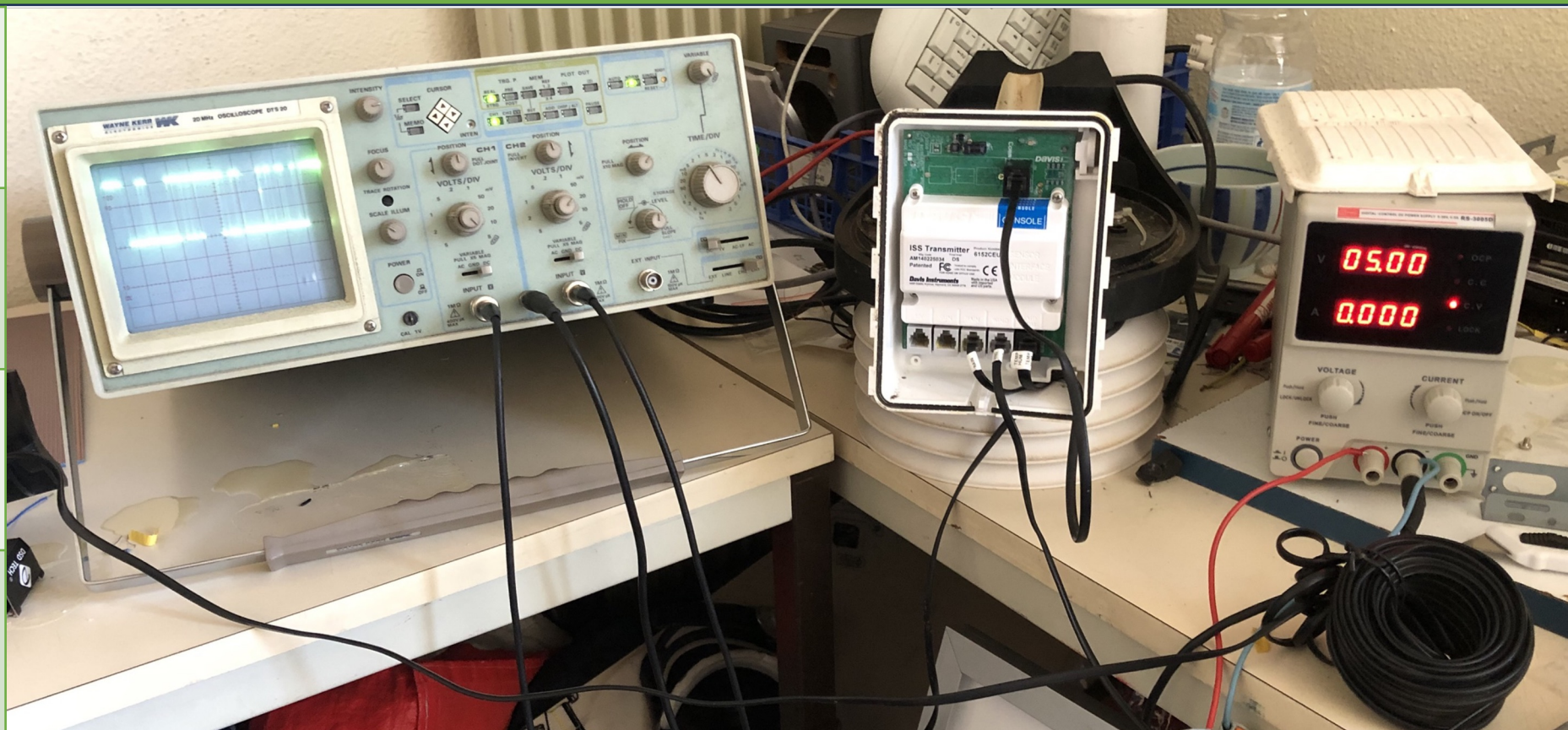
Influence de l'intensité des précipitations sur la mesure



biais absolu (%) de chaque pluviomètre en comparaison au pluviomètre VP2 C.
Intensité calculée sur un pas de temps de 15 minutes

Davis vintage pro 2 ISS câblé rétro-ingénierie

| | |
|-------|---------------------|
| Jaune | GND |
| Vert | TTL (3v) |
| Rouge | TTL symétrique (3v) |
| Noir | VCC (3.3v ou 5v) |



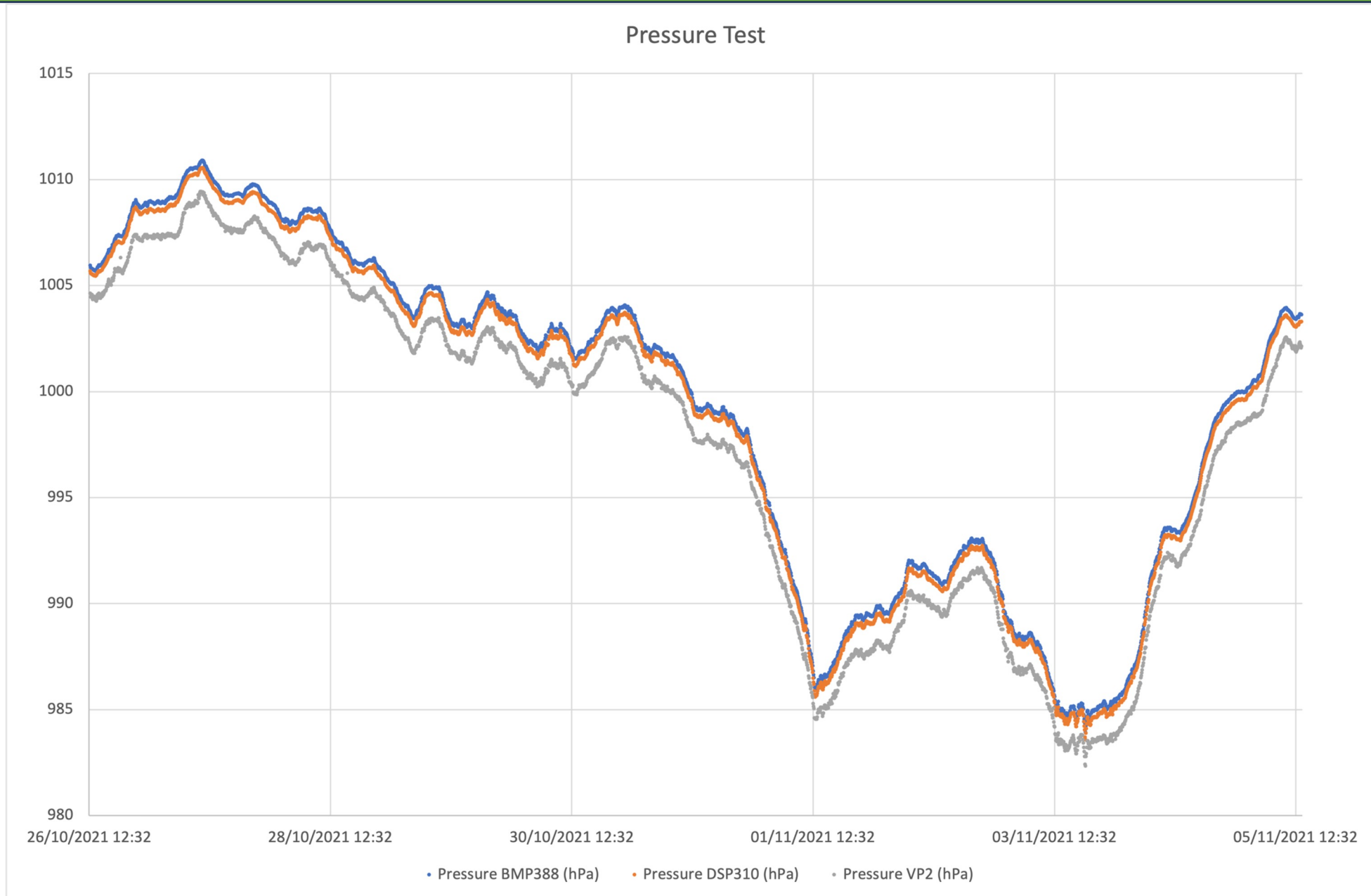
- L'étude avec oscilloscope nous apprend que la suite de capteurs communique toutes les 2.5 sec avec un signal symétrique 3v type RS422.
- Cette communication peut être utilisée de manière non symétrique type UART à 4800baud.
- Les trames ont été décodées pour collecter les informations.
- Le capteur de pression atmosphérique est dans la console.

Test de capteur de pression atmosphérique

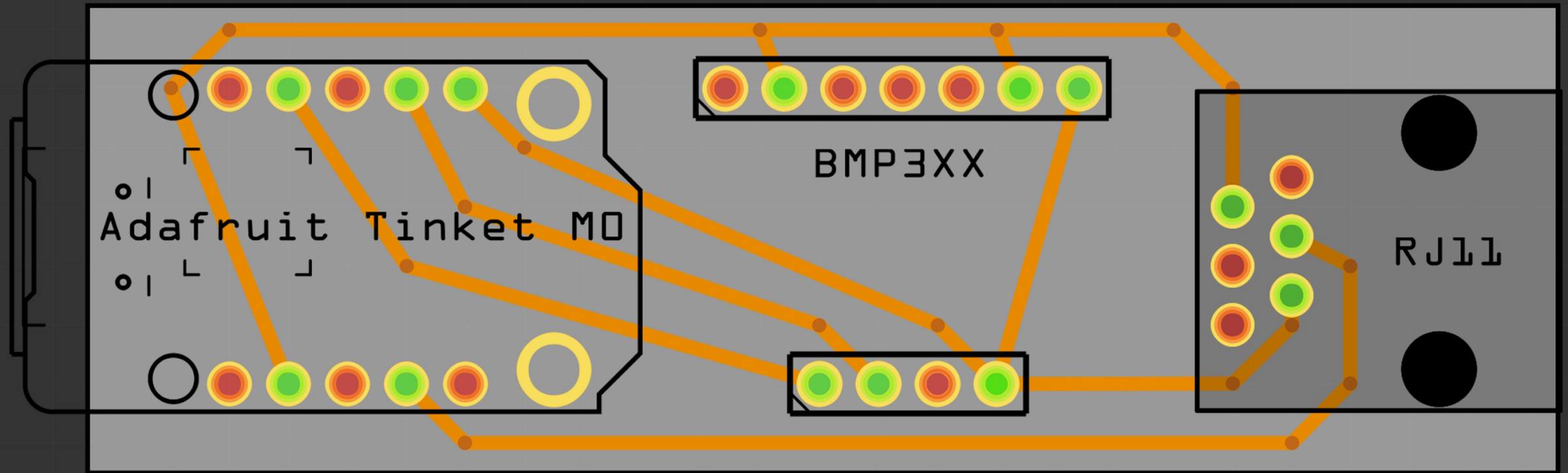
Comparaison des capteurs:

- Bosh BMP388
- Infineon DSP310
- VP2:

La précision absolue (0.5hpa) et la stabilité (0.33hpa/an) du Bosh BMP388 est supérieur au capteur utilisé dans la VP2.



Davis vintage pro 2 ISS câblée intégration



fritzing

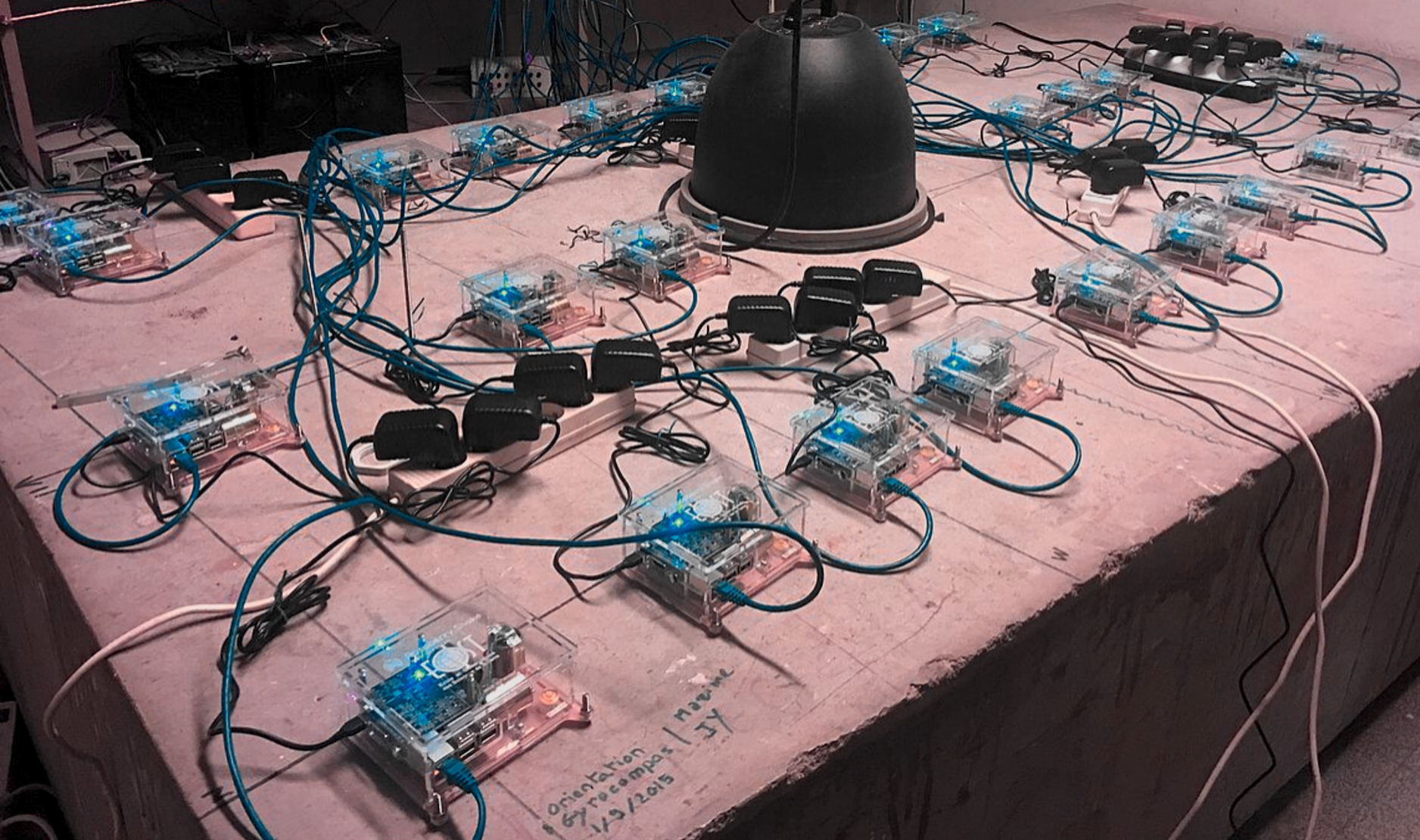
- Voici un PCB permettant d'interfacer le capteur de pression et la suite de capteur VP2 sur un microcontrôleur Adafruit Trinket M0.
- Système est programmé pour envoyer une trame csv toutes les minutes via le port USB.

Tableau comparatif

Station
météorologique
Bas-Coût

| Modèle | Davis ISS câblée | Davis Vantage pro 2 | Vaisala WXT536 | Luft WS600 |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Mesures | Temp, RH, vent, pluie | Temp, RH, vent, pluie, baro | Temp, RH, vent, pluie, baro | Temp, RH, vent, pluie, baro |
| Pluviomètre Anémomètre | Mono-auget Coupelles, girouette | Mono-auget Coupelles, girouette | Impact piezo Ultrasonique | Radar doppler Ultrasonique |
| Enregistrement Liaison | Non UART | Oui USB, RS232 | Non SDI12, RS232, Modbus | Non SDI12, RS232, Modbus |
| Prix | 500€ | 950€ | 2400€ | 2500€ |





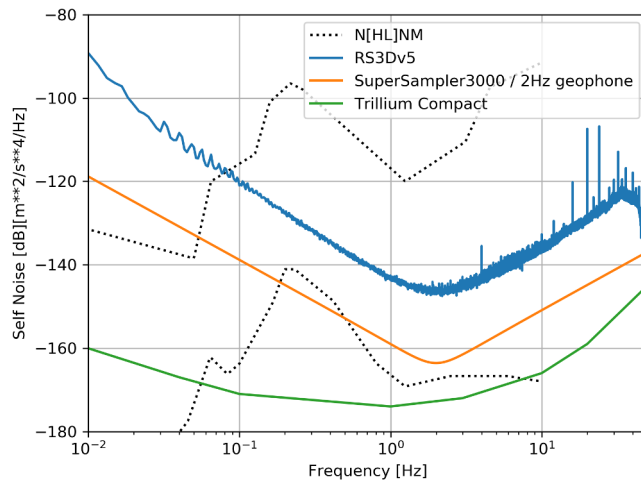
Développement d'une carte de numérisation
sismologique

Une carte de numérisation sismologique low-cost : cahier des charges

Cedarnet



Comparison of low-cost seismometers self-noise



Cahier des charges

| | |
|--|--|
| Alimentation 5V | Disposer de deux entrées TOR |
| Carte tropicalisée et fonctionnant entre -40 et +70°C | Intégrer sur le MCU une cascade de filtre dont les coefficients seront choisis |
| Format Raspberry Pi | Le MCU devra intégrer 3 SPI, 4 UART, 512ko flash, 256ko RAM |
| Connecteur RJ45 pour les entrée analogiques | Intégrer une convertisseur USB vers UART |
| 3 ADC différentielles, Résolution > 24 bits | Le flux des données sortant des cascades de filtres devra être "streamé" sur l'un des ports UART |
| Fréquence échantillonnage > 10 kHz | Chaque bloc de données devra être timestampé. |
| Dynamique utile > 2.5Vpp | Un deuxième port UART doit permettre la config des étages de numérisation et de filtrage. |
| Dynamique globale > 20Vpp | |
| Impédance d'entrée > 200kOhms | |
| Filtre passe-bas de 1KHz | |
| Base de temps de 1us sur toute la plage de température | |
| Pas de saut en cas de resynchronisation temporelle | |
| Numériser, à haut SNR, des capteurs passifs et actifs (géophones et capteurs large bande) | |

Une carte de numérisation sismologique low-cost : cahier des charges

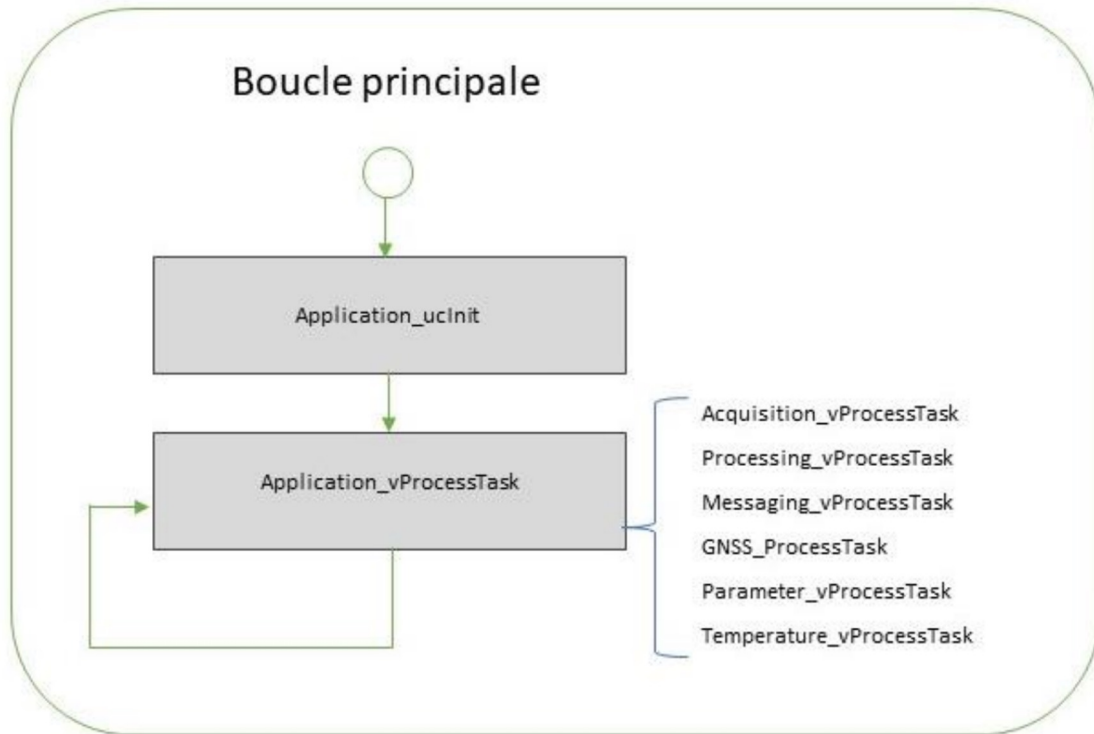
Coût final

| |
|--|
| Estimation du coût global : ~250 euros |
| 3 * ADC MAX11270 : 14 euros |
| 1 * MCU STM32H743 : 20 euros |
| Composants divers : 150 euros |
| Fabrication : 50 euros |

Caractéristique de la carte

| | |
|--|---|
| Alimentation 5V | 2 entrées TOR pour recevoir le PPS |
| Carte tropicalisée et fonctionnant entre -40 et +70°C | Cascade de filtre et de décimation dont les coefficients sont chargés dans les configurations à chaque démarrage (jusqu'à 220 coefficients) |
| Format Raspberry Pi | 3 SPI pour le lien entre les ADC et le MCU 5 UART pour la configuration, le NMEA et les sorties sismo |
| Connecteur RJ45 pour les entrée analogiques | 3 des UART sont assignés aux flux de sortie |
| 3 ADC différentielles, Résolution = 24 bits | Timestampage depuis le 01/01/1970 |
| Fréquence échantillonnage = 16 kHz | Configuration du gain d'entrée de *1 à *128 |
| Dynamique utile = 3.2Vpp | Possibilité d'appliquer un retard manuel au timestamp |
| Dynamique global = 20Vpp | |
| Impédance d'entrée = 300kOhms | |
| Filtre passe-bas de 1KHz | |
| Base de temps de 1us sur toute la plage de température | |
| Synchronisation temporelle adaptative | |
| Numériser, à haut SNR, des capteurs passifs et actifs (géophones et capteurs large bande) | |

Caractéristiques de la carte : architecture logicielle

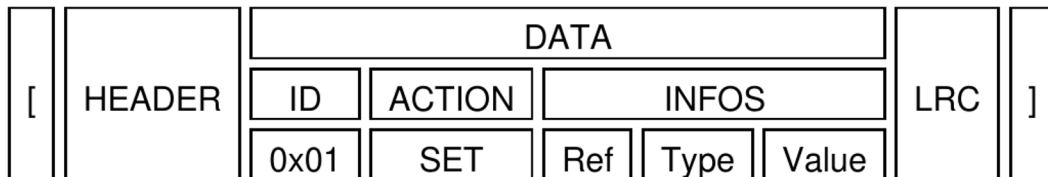


Boucle principale + Interruption pour la gestion du temps réel

- Tâches :
 - Acquisition :
 - Configuration des ADC
 - Démarrage des mesures
 - Transfert des données du buffer vers la tâche processing
 - Processing :
 - Configuration des FIR
 - Décimation et filtrage des données
 - Transfert vers la tâche Messaging
 - Messaging :
 - Envoi des données
 - Réception des configurations de l'utilisateur
 - GNSS :
 - Analyse des données NMEA reçu.
 - Température :
 - Relève la température toutes les 10 secondes
- Interruption :
 - Timer 4 : Mesure de température et perte de réception des données NMEA
 - SPI : Communication entre le buffer et les ADC
 - EXTI5 : Interruption à chaque signal PPS
 - Timer : Base de temps.

Caractéristique de la carte : détail de la messagerie

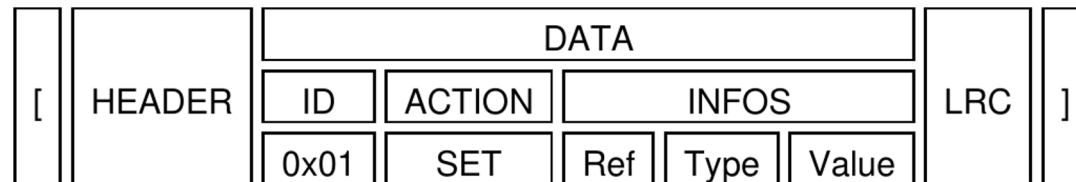
| Type de trame | Valeur | Direction | Description |
|---------------|--------|-----------------|--|
| - | 0 | - | Réservé |
| TRADE | 4 | Bidirectionnel | Contient les échanges dits « métier » |
| ACK | 5 | Bidirectionnel | Accusé de réception des trames « TRADE » |
| STREAM | 6 | Unidirectionnel | Permet de diffuser un flux de données |



| Champs | Taille (octets) | Type | Description |
|-------------|-----------------|-------|--|
| Flag | 1 | UINT8 | Réservé (0x00) |
| FrameType | 1 | UINT8 | Type de trame de la trame acquittée. |
| FrameNumber | 1 | UINT8 | Numéro de la trame |
| Return | 1 | UINT8 | <p>0 : La trame « TRADE » avec le numéro « FrameNumber » a été correctement reçue et traitée par le serveur ou la balise.</p> <p>1 - 255 : Code d'erreur pour définir les non-acquittements</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 : Erreur nombre de filtre • 2 : Erreur ordre d'un filtre • 3 : Erreur de décimation • 4 : Erreur sur l'index du filtre • 10 : Erreur sur l'index de la voie Adc • 11 : Erreur sur le paramètre Enable • 12 : Erreur sur le paramètre PGA • 13 : Erreur sur le paramètre DGA • 14 : Erreur sur le paramètre Enable Buffer • 255 : Référence inconnue |

Caractéristique de la carte : détail de la messagerie PARAM

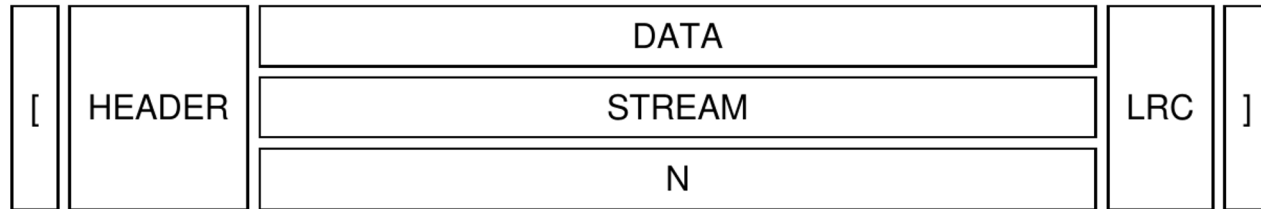
| Champ | Taille (octets) | Type | Description |
|-------------|------------------------------------|--------------|--|
| ChannelID | 1 | UINT8 | Numéro de la voie de mesure sélectionnée : <ul style="list-style-type: none"> 0 = ADC 1 1 = ADC 2 2 = ADC 3 |
| Activation | 1 | UINT8 | Activation de la voie de mesure : <ul style="list-style-type: none"> 0 = Désactivée (défaut). 1 = Activée |
| PGA/ Bypass | 1 | UINT8 | Configuration de l'amplificateur à gain programmable (PGA) : <ul style="list-style-type: none"> 0 = Mode bypass activé 1 = x 1 2 = x 2 3 = x 4 4 = x 8 5 = x 16 6 = x 32 7 = x 64 8 = x 128 |
| DGA | 1 | UINT8 | Configuration du gain numérique : <ul style="list-style-type: none"> 0 = x 1 (désactivé) 1 = x 2 2 = x 4 3 = x 8 |
| FilterCount | 1 | UINT8 | Nombre d'étages de filtrage à appliquer (défini le nombre de filtres dans le tableau suivant). (Valeurs autorisées : 0 à 8). <u>Attention</u> : mettre un FilterCount à 0 désactive la voie de mesure ! |
| FilterArray | FilterCount x sizeof(FilterConfig) | FilterConfig | Tableau de définition des étages de filtrage (objets de type FilterConfig). Ils seront appliqués selon leur position dans ce tableau (index 0 en premier, index 1 ensuite, etc). |



| Nom | Réf. | Type | Description |
|---------------|------|----------|-------------------------------------|
| - | 0x00 | - | Réservé |
| ChannelConfig | 0x01 | Struct8 | Voir 3.2.1 pour détails du contenu. |
| SysDatetime | 0x04 | Uint64_t | Voir 3.2.2 pour détail du contenu |
| Reset | 0x14 | void | |

| Champs | Tailles (octets) | Type | Description |
|---------------------------|------------------|--------|---|
| Number of taps | 1 | UINT8 | Nombre de coefficients. (Valeurs autorisées : 1 à 220). |
| Taps | N x 4 | FLOAT | Tableau contenant les coefficients (float) du filtre FIR. |
| Decimation ^(*) | 1 | UINT8 | Valeur de la décimation à appliquer en sortie de filtre : <ul style="list-style-type: none"> 0 = décimation de 1. 1 = décimation de 1. 2 = décimation de 2. ... 255 = valeur maximale. |
| Delay | 4 | UINT32 | Retard à appliquer au timestamp, exprimé en ns. |

Caractéristique de la carte : détail de la messagerie STREAM



| Champ | Tailles (octets) | Type | Description |
|------------------------|------------------|--------|---|
| Reserved | 1 | UINT8 | |
| ChannelID | 1 | UINT8 | Numéro de la voie de mesure. |
| Timestamp | 8 | UINT64 | Timestamp du 1 ^{er} échantillon, en nombre de μ s depuis le 01/01/1970 à 00h00. |
| Sampling Frequency | 2 | UINT16 | Fréquence d'échantillonnage en Hz en sortie de filtrage |
| Time Correction | 4 | UINT32 | Correction de la datation appliquée au Timestamp (μ s). |
| Temperature | 1 | INT8 | Température de la carte, en °C (entier 8 bits signé). |
| Conversion coefficient | 4 | FLOAT | Coefficient de conversion : <ul style="list-style-type: none"> Gain carte * DGA * PGA * VREF / 2^{23} Avec VREF = 3V et gain carte = 2.37 |
| Synchronisation | 1 | UINT8 | <ul style="list-style-type: none"> Bit 0 : Synchronisation Gnss <ul style="list-style-type: none"> 0 = Pas de réception NMEA. 1 = Réception NMEA. Bit 1 : Synchronisation PPS. <ul style="list-style-type: none"> 0 = Pas de réception PPS. 1 = Réception PPS. Bits 2 – 7 : Réservés. |
| SampleCount | 2 | UINT16 | Nombre d'échantillons contenus dans le tableau SampleArray. |
| SampleArray | SampleCount x 4 | FLOAT | Tableau de points de la voie. |

