

Études des systèmes GNSS des smartphones

Noë Charlier

Professeurs: C. Delacour, M. Petitcuenot

Classe préparatoire aux grandes écoles

PT

Lycée Paul Constans



TIPE - 2022, 2023 - N°52340

Introduction

Besoin grandissant de solution GNSS :

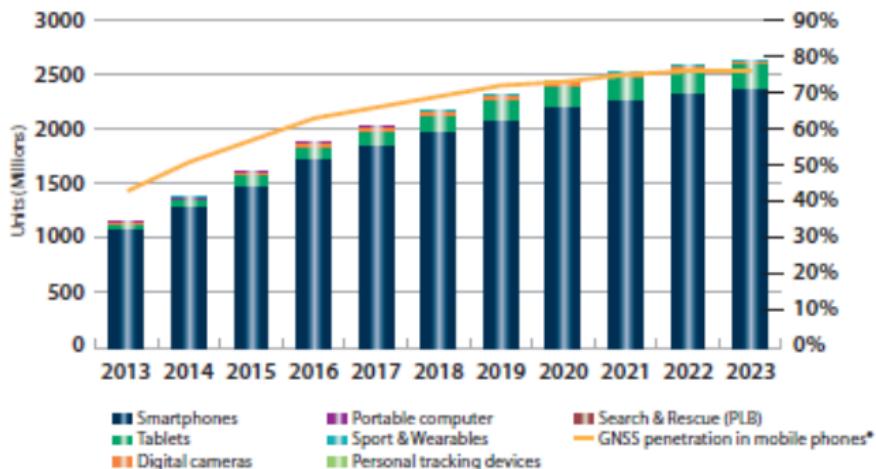


Figure 1 – Appareils GNSS par plate-forme. [3]

Définition GNSS

GNSS : *Global Navigation Satellite System* (Système de navigation par satellite global)

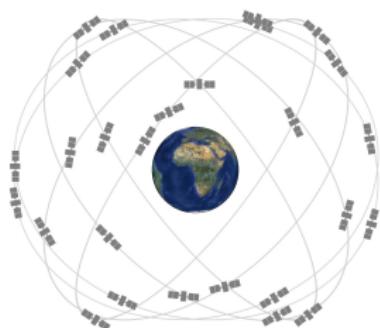
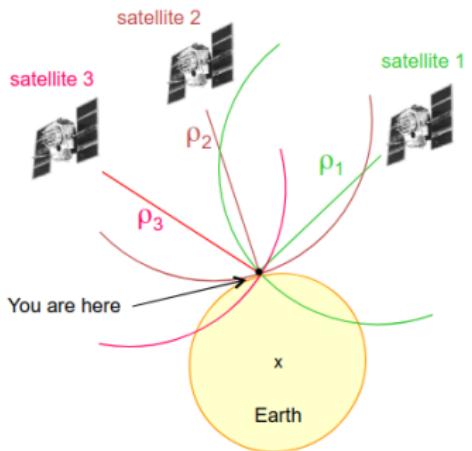


Figure 2 – Système de navigation par satellite global. [5]

Fonctionnement du GPS



Une sphère de rayon $\rho_1 = (\Delta t_1 \cdot c)$
3 satellites, intersection des 3 sphères.

Et donc $\rho_s^s =$

$$\sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$$

Avec :

- X^s, Y^s, Z^s : coordonnées du satellite s ;
- X_r, Y_r, Z_r : coordonnées du récepteur.

**Figure 3 – Fonctionnement du GPS.
[1]**

Sources d'incertitude

- Les horloges des satellites et des récepteurs ne sont pas synchronisés.
 (δt) (Exemple Annexe 6)
- Réfraction lors de la propagation dans l'atmosphère :
- ① Troposphérique (T_r^s)
② Ionosphérique (dépend de la densité ionique) (I_r^s)

Modèle plus complet :

$$R_r^s = \rho_r^s + c\delta t + T_r^s + I_r^s + \dots \quad (1)$$

Précision des orbites

Les systèmes GNSS sont basés sur des orbites prédictives émises par les satellites.

Ces **éphémérides** doivent donc être très précises.

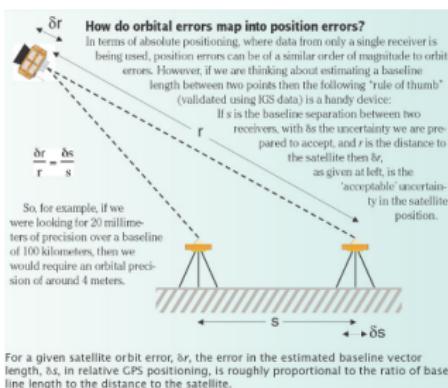


Figure 4 – Précision des orbites. [1]

Il existe aussi des services qui recalculent les éphémérides apostérieurement. (eg. IGN)

Multipath et dilution

Le **multipath** (multi-trajet) : le signal émis par le satellite est réfléchi avant d'atteindre le récepteur. (cf. Figure 5)

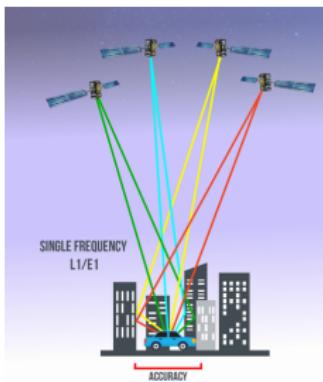


Figure 5 – Multipath [2]

La **dilution** (GDOP) : la géométrie des satellites influe sur la précision. (cf. Figure 6)

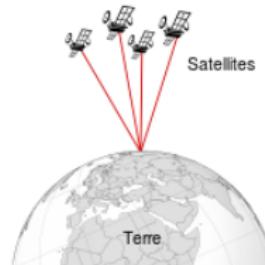


Figure 6 – Coef. de dilution élevée [2]

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 L'ionosphère
- 3 Exp. Ionosphérique
- 4 Multipath
- 5 Exp. Multipath
- 6 Corrections
- 7 Dilution géométrique
- 8 Conclusion

Problématique

Comment peut-on réduire l'impact de l'urbanisation sur les systèmes GNSS pour améliorer la précision de la géolocalisation par satellite ?

Objectifs

- ① Étude du GPS, fonctionnement rapide
- ② Impact de l'ionosphère et des corrections possibles
- ③ Étude du multipath, dilution géométrique, GPS à doubles fréquences, et C/N0
- ④ Comparaison Ville / campagne de la précision.
- ⑤ Ouverture, solution possible (SBAS (systèmes d'optimisation de la précision par satellite), DGNSS (GNSS Différentiel), etc.)

Définition

L'ionosphère : Située entre **60 et 1000 km** d'altitude.

Constituée de particules chargées électriquement, les ions, en mouvement.

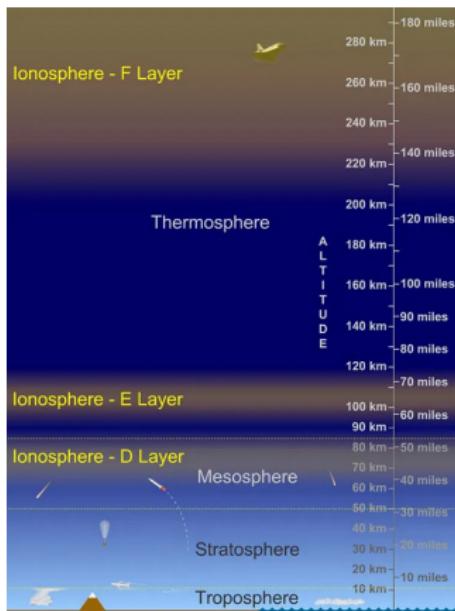


Figure 7 – Régions de l'ionosphère [9]

Impact sur la propagation

Impact sur la propagation :

- **Propagation directe - Sans**
interaction avec l'ionosphère.
- **Propagation réfractée - Avec**
interaction avec l'ionosphère.

Indice :

$$n = 1 - \frac{f_p^2}{2f^2} < 1$$

(Voir annexe 2)

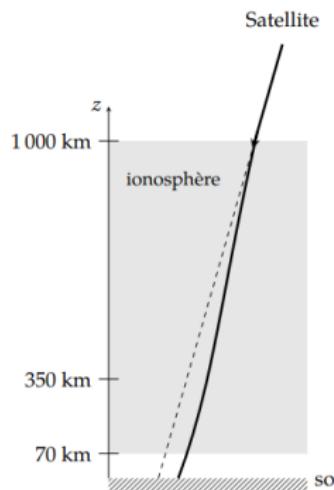
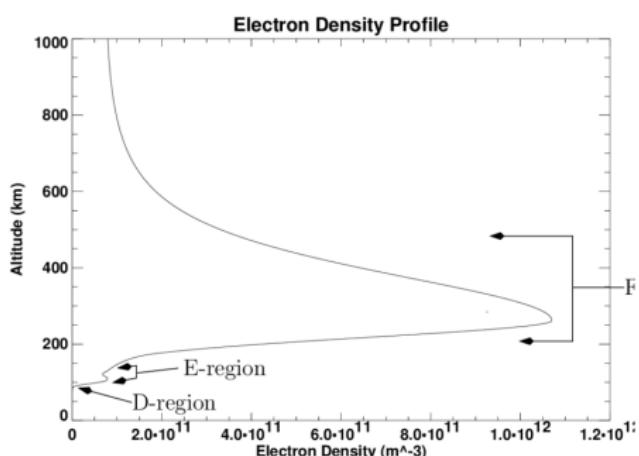


Figure 8 – Propagation directe et réfractée [6]

Quelle erreur ?



Milieu Linéaire, Isotrope, transparent, inhomogène

Retard ionosphérique :

$$\tau = \frac{1}{c} \int_0^{H_0} \left(\frac{c}{v_g} - 1 \right) dz$$

Erreur de distance :

$$L = \frac{a}{f_1^2} C_{ET} \text{ avec } C_{ET} = \int_0^{H_0} n_e dz$$

(Contenu Électronique Total)

A un TEC de $1.5 \cdot 10^{17} m^{-2}$,

$$L = 220m$$

Figure 9 – Profil ionosphérique [4]

On a besoin de la **phase** et de la **pseudorange** sur deux fréquences.

(Voir Annexe 2)

GPS à doubles fréquences

Afin de calculer le TEC, un récepteur Dual-Band (L1, L5) est nécessaire :

Désormais disponible dans les smartphones (depuis 2018) :

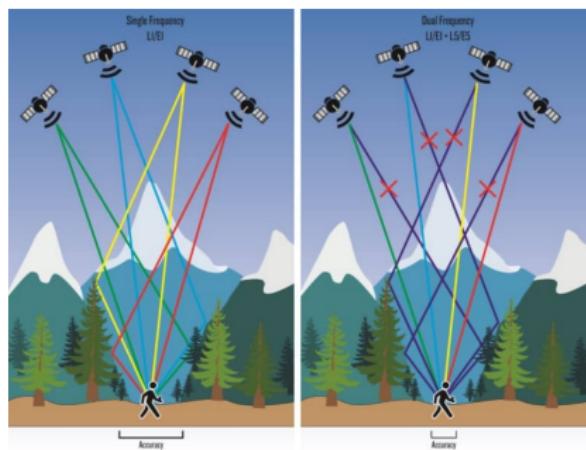


Figure 10 – Image : Garmin



Figure 11 – Broadcom BCM47755,
Broadcom Inc.

Expérimentations ionosphérique

Préambule

Méthode d'évaluation : Le retard s'évalue grâce à un même signal sur deux fréquences.

Le signal GPS :

- **Pseudorange** - La pseudorange (distance) s'évalue à l'aide d'une fonction de corrélation.
- **Phase** - La phase s'évalue sur le nombre de phases depuis le début d'acquisition.

(Voir Annexe 3)

Il est possible de connaître l'état de l'ionosphère (indice K_p).

Protocole expérimental

- Récupération des données brute sur Xiaomi Mi 8 avec *GNSS Logger de Google*.
- Calcul du délai ionosphérique avec *Python* (Voir Annexe 7).



**Figure 12 – GNSS
Logger de Google**



Figure 13 – Protocole expérimental

Contexte

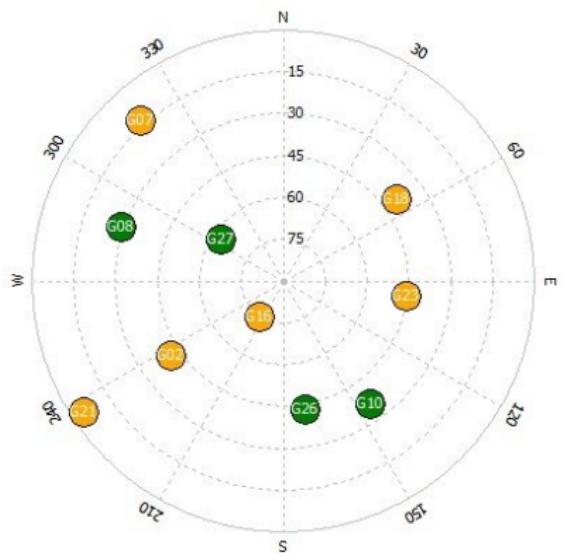


Figure 14 – Carte du ciel



Figure 15 – Image de la session 1,
Nord sur la gauche

Contexte - Signal sur bruit

Signal sur bruit :

- Rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit.
- $SNR = 10 \cdot \log_{10}(\frac{P_{signal}}{P_{bruit}})$

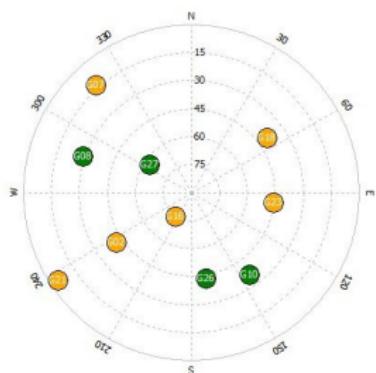


Figure 16 – Skyplot

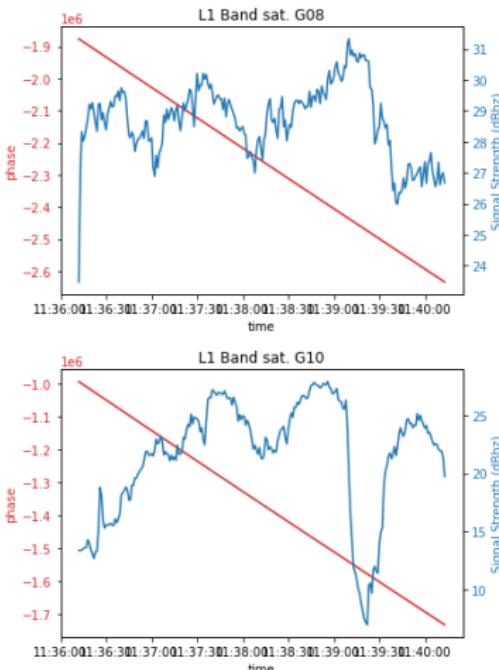


Figure 17 – SNR, G08 et G10

Résultats

L'estimation du délai n'est possible que sur de courte session due aux *duty cycle* (Voir Annexe 3)

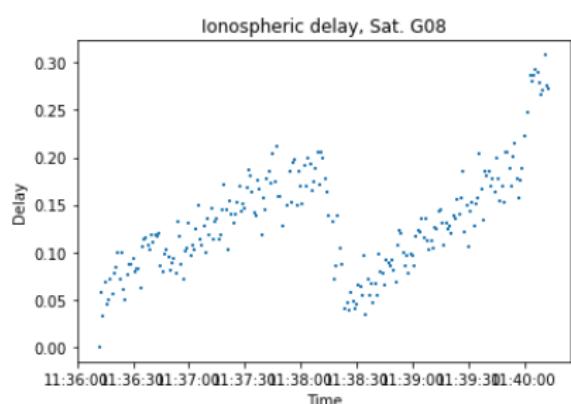


Figure 18 – Délai (m) ionosphérique sur G08

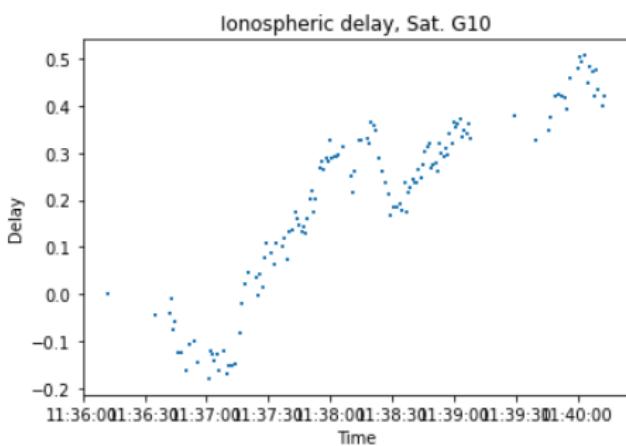


Figure 19 – Délai (m) ionosphérique sur G10

Multipath

Multipath : Plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur d'une même onde.

Le multipath s'estime par :

$$MP = P - \left(\frac{2}{\alpha-1} + 1 \right) \cdot L_1 + \frac{2}{\alpha-1} \cdot L_2$$

(Voir Démonstration Annexe 4)

avec P la phase, L_1 la pseudorange, L_2 la pseudorange sur la deuxième fréquence et α le coefficient de réflexion.

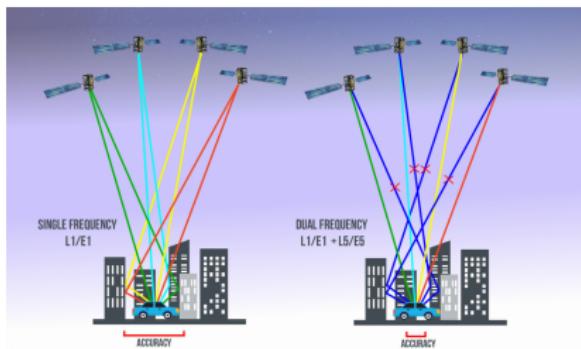


Figure 20 – Multipath [2]

Besoin de la **phase** et de la **pseudorange** sur deux fréquences.

Quelle erreur ?

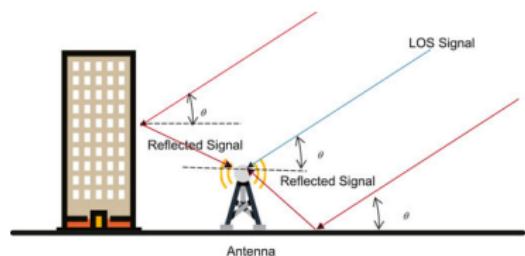


Figure 21 – Description du multipath [10]

L'erreur est de **plusieurs mètres**. [8]

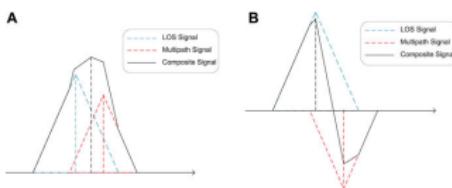


Figure 22 – Impact sur la fonction de corrélation (Annexe 3)

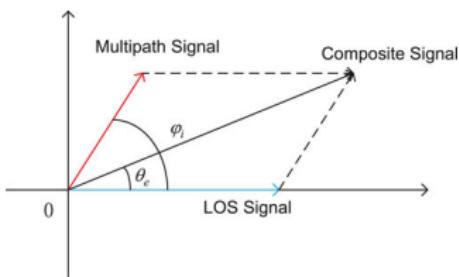


Figure 23 – Impact sur la phase

Expérimentations Multipath

Protocole expérimental

- Calcul du multipath à partir de la phase et de la pseudorange.
- Basé sur un article de Umberto et al. [7]
 - Utilisation d'un *Xiaomi mi 8* et de *Google GNSS Logger* pour récupérer les fichiers RINEX. (voir Annexe 5)
 - Deux cas, peu de réflexion (campagne) et beaucoup de réflexion (ville).
 - Traitement des données avec *rtklib*. (Conversion de format)
 - Traitement et calcul du multipath avec *Tecq*.
 - Analyse des résultats avec *Python*. (Voir Annexe 7)



Figure 24 – Outil de calcul de solution, *rtklib*



Figure 25 – Outil de calcul de multipath,
Tecq



Figure 26 – Outil de récupération de données, *Google GNSS Logger*

Résultats

Erreur multipath en ville et en campagne ; statique.

En **ville**, on a une erreur de **2.5 mètres** en moyenne.

En **campagne**, l'erreur est de **quelques centimètres**.

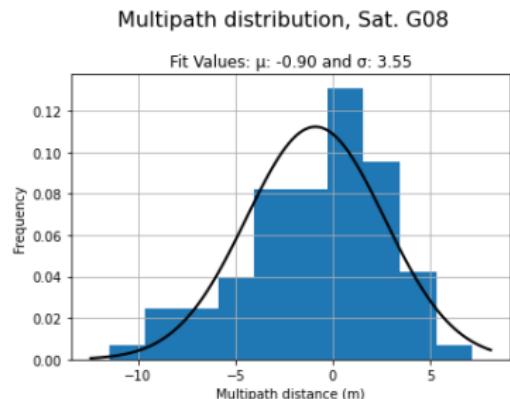


Figure 27 – Multipath de G08, erreur $(1 \pm 7)m$

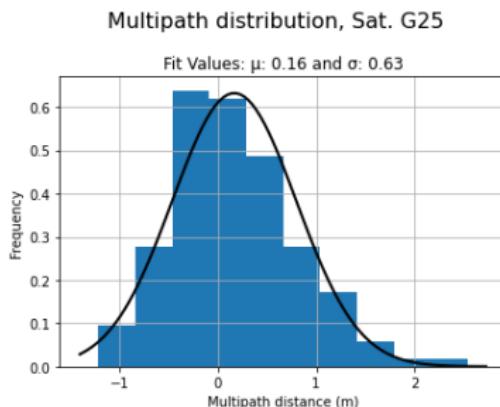


Figure 28 – Multipath en extérieur, erreur $(0.2 \pm 1.2)m$

Corrections

Avec **RTKlib** :

Sans correction liée à la double fréquence (soit, *ionosphère et multitrajets*)

Uniquement sur le **code** (pseudorange)

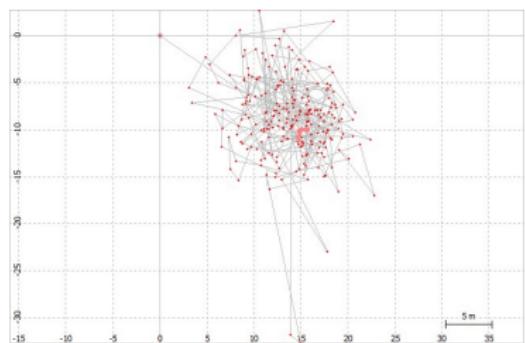


Figure 29 – Calcul statique (Single), 5 m

Avec correction liée à la double fréquence. [2]

Sur **pseudorange et phase**.

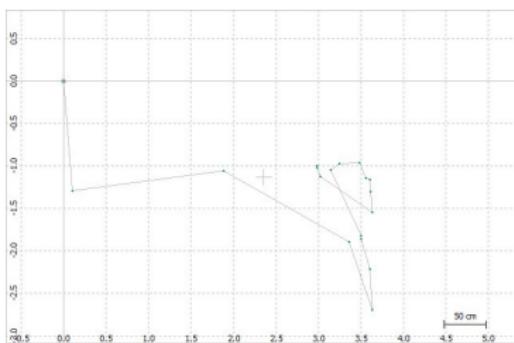


Figure 30 – Calcul statique (PPP), 50 cm

Outils

Outils : gnssplanning.com, calcul le GDOP.

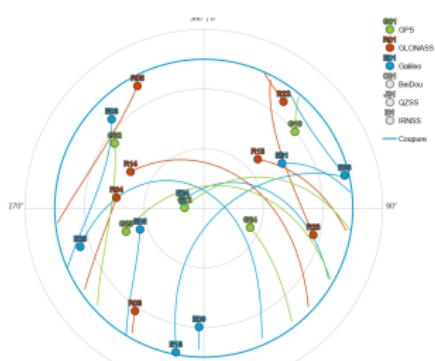


Figure 31 – Skyplot pour une limite de 15° (22/01/23 15h), GDOP : 2.35



Figure 32 – Skyplot pour une limite de 35° (22/01/23 15h), GDOP : 4.56

Expérimentations

Calcul de la position à l'aide de *RTKlib* avec un mask de 15° et 35° .

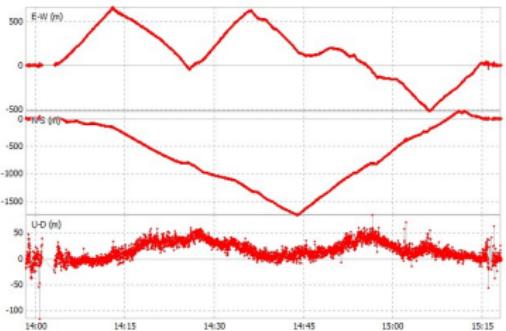


Figure 33 – Position avec un mask de 15°

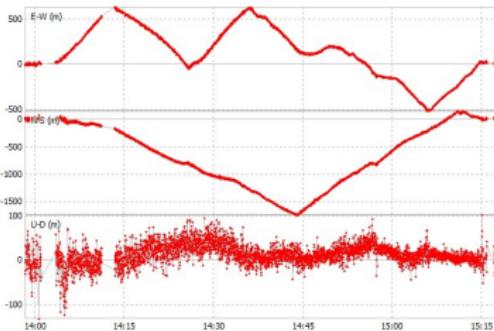


Figure 34 – Position avec un mask de 35°

Conclusion

Les smartphones multibandes, multi-constellation permettent d'améliorer la précision de la position :

- Une correction de l'erreur ionosphérique.
- En ville, grâce à la réduction du multipath.
- Le multi-constellation augmente le nombre de satellites utilisables, réduisant le GDOP.

Application commerciale possible : projet FLAMMINGO.

Perspectives : Solution RTK, PPP et augmenté par SBAS.

(Voir début d'analyse dynamique en annexe)

Merci de votre attention

Des Questions ?

Bibliographie

- [1] Eric CALAIS. *Géopositionnement GNSS, principe et applications.* URL : <https://www.geologie.ens.fr/~ecalais/teaching>.
- [2] ESA. *ESA GNSS Navipedia.* URL : https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Market_Report#Report_Overview.
- [3] ESA. *GNSS Market Report.* URL : https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Market_Report#Report_Overview.
- [4] Robert GILLIES. « Modelling of transitionospheric HF radio wave propagation for the ISIS II and ePOP satellites ». In : (jan. 2006).
- [5] GPS.GOV. *GPS Constellation.* URL : <https://www.gps.gov/multimedia/images/constellation.jpg>.
- [6] E3A - POLYTECH. *Épreuve de Physique.* 2020.

Bibliographie

- [7] Umberto ROUSTELLI, Valerio BAIOCCHI et Giovanni PUGLIANO. « Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis ». In : *Electronics* 8 (jan. 2019). DOI : 10.3390/electronics8010091.
- [8] Luis SERRANO, Don KIM et Richard B. LANGLEY. « Carrier-phase multipath calibration in GPS-RTK machine-guidance applications ». In : *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*. 2008, p. 479-488. DOI : 10.1109/PLANS.2008.4570023.
- [9] Randy Russell UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. *Regions of the ionosphere, showing the D, E, and F layers*. URL : <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/ionosphere>.

Bibliographie

- [10] Zhihao XUE et al. « Overview of multipath mitigation technology in global navigation satellite system ». In : *Frontiers in Physics* 10 (2022). ISSN : 2296-424X. DOI : 10.3389/fphy.2022.1071539. URL : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2022.1071539>.

Élévation et SNR

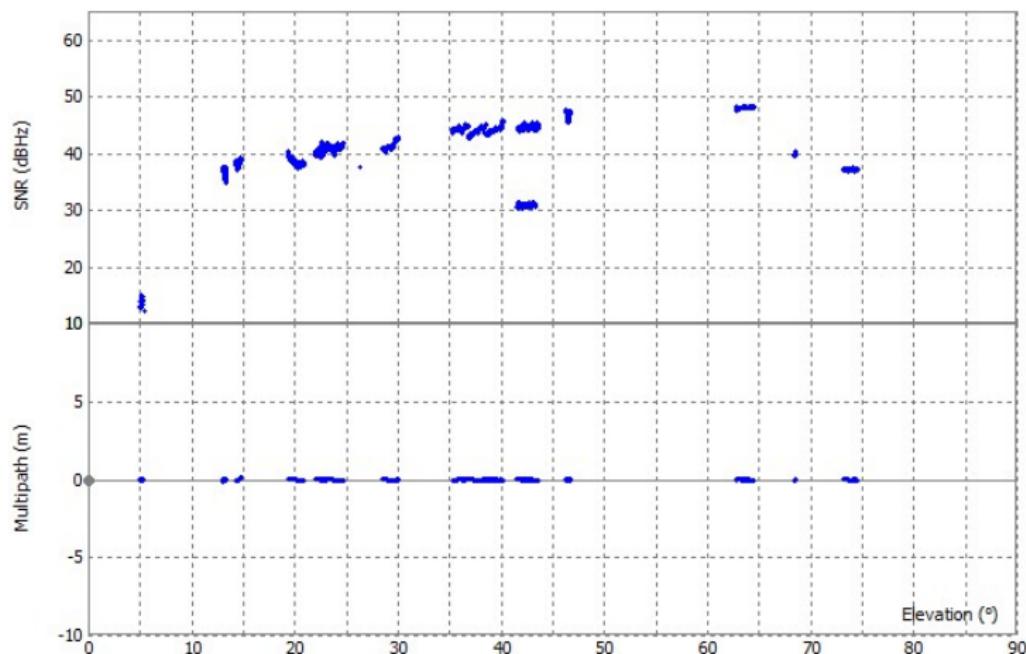


Figure 35 – Élévation et SNR

Démonstration TEC

Modélisation de l'onde par :

$$\underline{\vec{E}} = \underline{\vec{E}_0} \cdot \exp(i(\omega t - kx))$$

Hypothèses :

Poids et champ magnétique négligeable devant le champ électrique.

PDF et passage en complexe :

$$m_e \frac{d\underline{\vec{v}_e}}{dt} = -e \underline{\vec{E}} \leftrightarrow i m_e \omega \underline{\vec{v}_e} = -e \underline{\vec{E}}$$

Par définition : $\underline{\vec{j}_e} = -en_e \underline{\vec{v}_e}$, soit :

$$\underline{\vec{j}_e} = \frac{e^2 n_e}{im_e \omega} \underline{\vec{E}}$$

D'après l'équation de propagation :

$$\Delta \underline{\vec{E}} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \underline{\vec{E}}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \underline{\vec{j}}}{\partial t}$$

On en déduit le signal complexe :

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{e^2 n_e}{c^2 \epsilon_0 m_e}$$

Vitesse de phase : $v_\phi = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}}$

L'erreur de distance : $L_1 = c \tau_1$

$$\text{Le retard : } \tau = \int_0^H \frac{dz}{v_g} - \int_0^H \frac{dz}{c}$$

Ainsi le **retard** est : $\boxed{\frac{1}{c} \int_0^H \left(\frac{c}{v_g} - 1 \right) dz}$

$$\text{On a que } v_g = v_\phi \cdot \left(1 - \frac{f_p^2}{f_1^2} \right)$$

$$\text{Soit : } L_1 = \frac{a}{f_1^2} C_{ET}$$

On a donc :

$$\boxed{C_{ET} = \int_0^H n_e dz = \frac{\tau}{a} \frac{f_1^2 f_5^2}{f_1^2 - f_5^2}}$$

D'après sujet E3A, [6]

Le signal GPS

Les récepteurs génèrent les fréquences porteuses L1 et L5 et compare avec celui reçu :

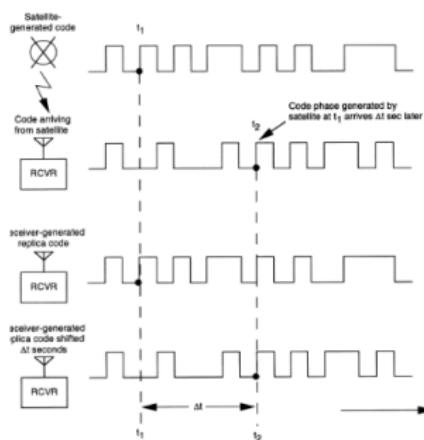


Figure 36 – Décodage [1]

Détermine le pic de corrélation (code GOLD) et en déduit le décalage temporel.

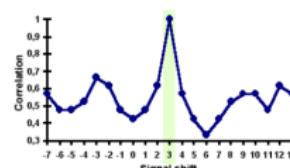


Figure 37 – Fonction de corrélation [1]

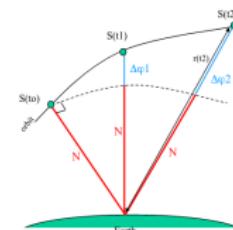


Figure 38 – Cycle de phase [1]

Duty-Cycle

Ainsi comme le récepteur ne connaît que le nombre de phases, il l'initialise à chaque fois.

Lorsque qu'il y a une interruption de signal, un nouveau cycle recommence.

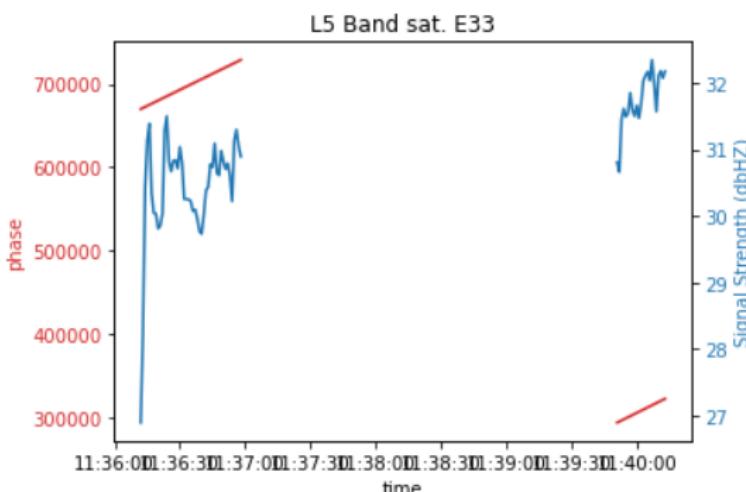


Figure 39 – Exemple d'une interruption

Démonstration Multipath

On modélise les signaux L_1 et L_5 par :

$$P_1 = R + I_1 + MP_1 \text{ et}$$

$$P_5 = R + I_5 + MP_5$$

Avec : R la distance réelle, I_1 et I_5 les erreurs ionosphériques, MP_1 et MP_5 les erreurs multipath.

Ainsi que leurs **phases respectives** :

$$L_1 = R - I_1 + mp_1 + B_1 \text{ et}$$

$$L_5 = R - I_5 + mp_5 + B_5$$

Avec : B_1 et B_5 les ambiguïtés de phase.

On néglige $mp \ll MP \leftrightarrow mp = 0$

D'après Annexe 3 $I_i = \frac{A}{f_i^2} T_{EC}$ soit :

$$\frac{I_5}{I_1} = \frac{f_1^2}{f_5^2} = \alpha$$

Après calcul des différentes combinaisons, **on obtient** :

$$MP_1 - P_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1} + 1\right) L_1 - \left(\frac{2}{\alpha-1}\right) L_5 = cte$$

Comme le multipath est à valeur moyenne nulle, **on a** :

$$MP_1 = P_1 - \left(\frac{2}{\alpha-1} + 1\right) L_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right) L_5$$

De même pour MP_5 :

$$MP_5 = P_5 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) L_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1} - 1\right) L_5$$

D'après Eric Calais, [1]

Fichiers RINEX

RINEX : Receiver Independent Exchange Format

Fichier d'observation :

- Phase
- Code (Pseudorange)
- Doppler
- Rapport signal sur bruit (C/N0)

Fichier de navigation :

- Ephémérides
- Heure
- Erreurs ionosphériques
- Erreurs de relativité restreinte
- ...

Exemple de fichier RINEX

Fichier de navigation :

2 NAVIGATION DATA RINEX VERSION / TYPE
CCRINEXN V1.6.0 UX CDDIS PGM / RUN BY / DATE
IGS BROADCAST EPHEMERIS FILE COMMENT
17—JAN—23 13:53
0.2980D—07 0.2980D—07 —0.1192D—06 0.0000D+00 ION ALPHA
0.1516D+06 —0.1638D+06 0.0000D+00 0.6554D+05 ION BETA
—0.558793544769D—08—0.177635683940D—13 405504 2245 DELTA—UTC: A0,A1,T,W
18 LEAP SECONDS

1 23 1 17 0 0 0.0 0.223558396101D—03—0.466116034659D—11 0.000000000000D+00
0.850000000000D+02—0.782812500000D+02 0.394659296287D—08 0.40071195078D+00
—0.396929681301D—05 0.122224817751D—01 0.587478280067D—05 0.515365424919D+04
0.172800000000D+06—0.124797224999D—06—0.163560063383D+01 0.128522515297D—06
0.989089047026D+00 0.281125000000D+03 0.937393524649D+00—0.806640742682D—08
—0.222509268404D—09 0.100000000000D+01 0.224500000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00 0.465661287308D—08 0.850000000000D+02
0.165673000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00

2 23 1 17 0 0 —0.626868102699D—03 0.227373675443D—11 0.000000000000D+00
0.780000000000D+02—0.814375000000D+02 0.447197198987D—08—0.574309133343D+00
—0.426545739174D—05 0.200936053880D—01 0.661425292492D—05 0.515369303703D+04

Fichier d'observation :

```

3.03          OBSERVATION DATA      M          RINEX VERSION / TYPE
GnssLogger      Xiaomi 10          20230117 132006 UTC PGM / RUN BY / DATE
Google GnssLogger
G     8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q          MARKER NAME
E     8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q          SYS / ##### / OBS TYPES
E L5Q 0.00000          SYS / ##### / OBS TYPES
C1C   0.000 C1P    0.000 C2C    0.000 C2P    0.000          SYS / PHASE SHIFT
                                         GLONASS COD/PHS/BIS

> 2023 01 17 13 20 06.9995244 0 28
G06           -9106.87612          2273.16912          13.59612          -678
1726.83711    11.19011          8004.38113          -2010.76113          19.12713          593
G10           -1433.92611          10.63511          -12882.26412          3222.43712
G11           20136967.66714          -2423.03914          846.72914          28.16814
G12           14170.13812          11523.98012          -3560.32412          15.63512
G15           11523.98012          -2880.99612          16.73612

```

Note : Les données ont été tronquées pour des raisons de lisibilité.

Dataset complet :

<https://mega.nz/folder/dlRWAb5K#JNMzol3-uhl9gx0fF0147w>

Biais d'horloge - Xiaomi Mi 8

Exemple de biais d'horloge et de fréquence pour un récepteur Xiaomi Mi 8, expérimental.

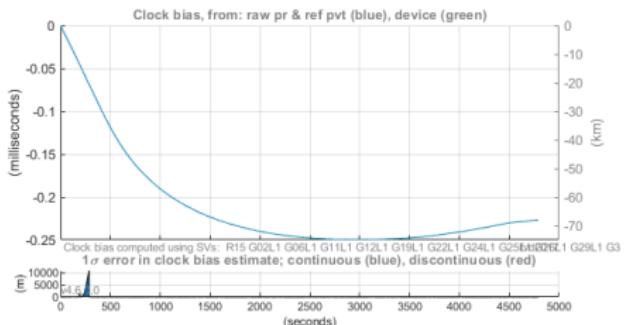


Figure 40 – Biais d'horloge

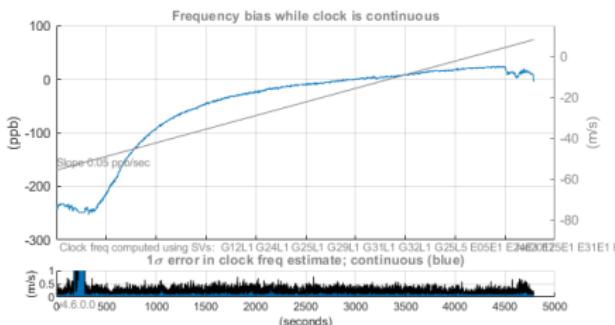


Figure 41 – Biais de fréquence

Code python - COMPACT3

```
import pandas as pd
from datetime import datetime, timedelta
nbval=0
sat=[]
def compread(filepath):
    file = open(filepath, "r")
    line = file.readline()
    i=1
    time=0
    cellsat=[]
    value=[]
    output=[[ 'TIME', 'PRN', 'misure']]
    while line:
        if "GPS.START_TIME" in line:
            celldata=line.split()
            year=int(celldata[1])
            month=int(celldata[2])
            day=int(celldata[3])
            hour=int(celldata[4])
            minute=int(celldata[5])
            second=int(float(celldata[6]))
            dt=datetime(year, month, day, hour, minute, second)
        if (i % 2) != 0 and i>2:
            cellsat=line.split()
            time=int(float(cellsat[0]))
            if int(cellsat[1]) != -1:
                nbval=int(cellsat[1])
```

Bibliographie

```
sat=[cellsat[e] for e in range(2,nbval+2)]
if (i % 2) == 0 and i>2:
    cellval=line.split()
    value=[]
    for f in range(nbval):
        if "S" in cellval[f]:
            value.append("NaN")
        else:
            value.append(float(cellval[f]))
    output.append([(dt+timedelta(seconds=time)),sat[f],value[f]]))

i=i+1
line = file.readline()
file.close()
return pd.DataFrame(output[1:], columns=output[0])
```

Code complet : github.com/n005/tipe

Étude dynamique

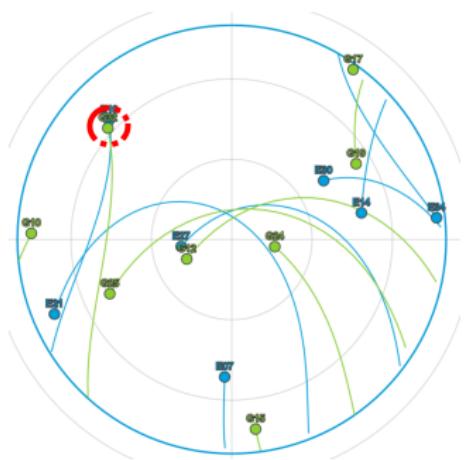


Figure 42 – Carte du ciel



Figure 43 – Vue Satellite

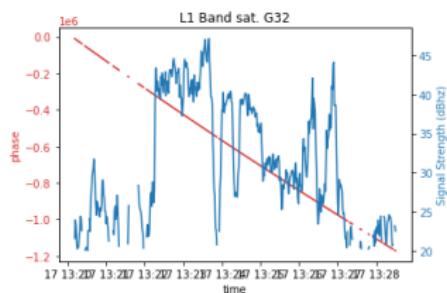


Figure 44 – C/N0 L1 et phase G32

Comparaison

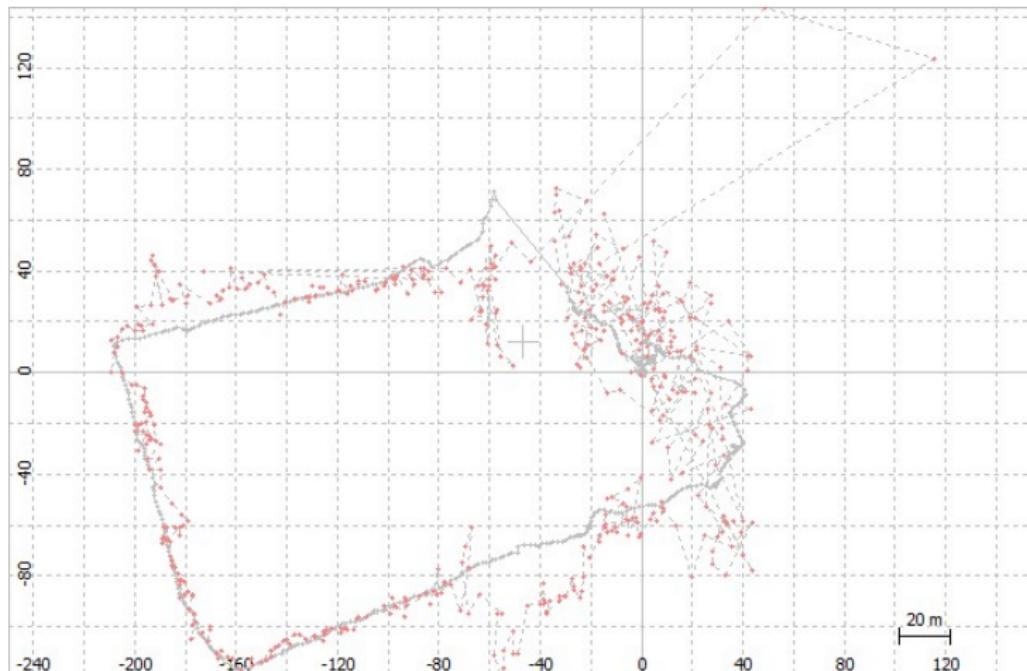


Figure 45 – Comparaison ADR(corrigé) et Pseudo-range

Réseau Centipede

Réseau RTK, permettant de faire du positionnement RTK (*Real Time Kinematic*, Cinématique temps réel) et DGNSS(GNSS différentiel).



Figure 46 – Logo - Centipede

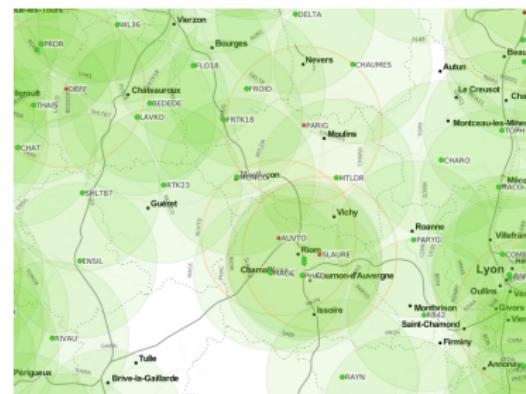


Figure 47 – Réseau Centipede

Utilisation de RTKlib permettant de récupérer les données.

Outils - RTKlib

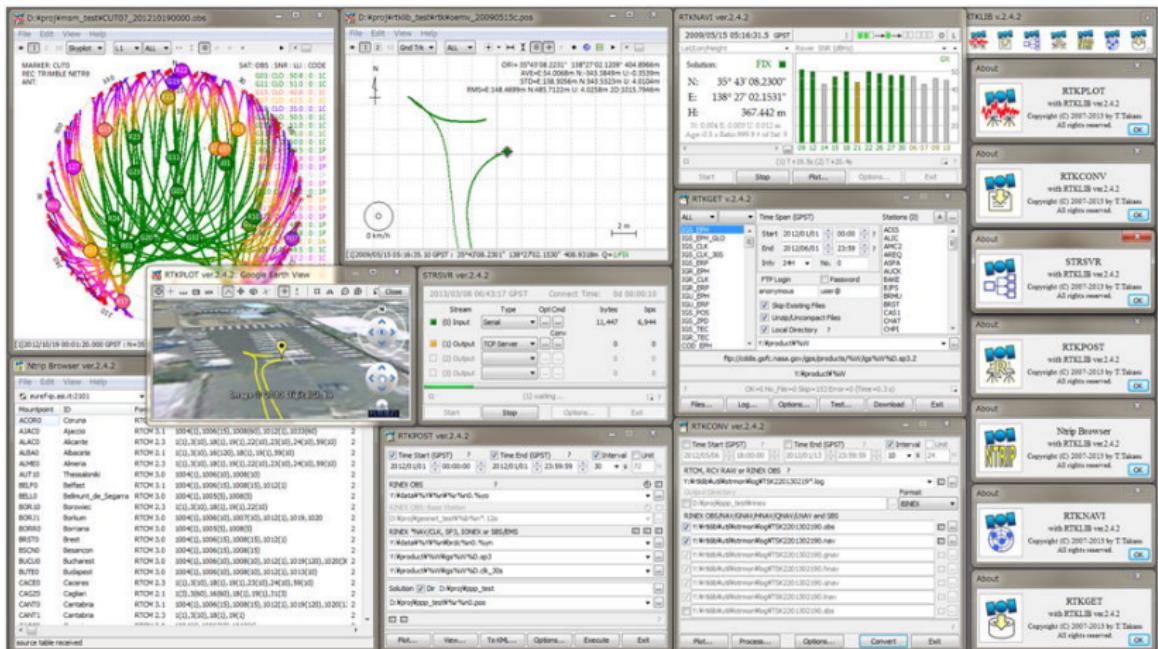


Figure 48 – RTKlib

Outils - GnssLogger

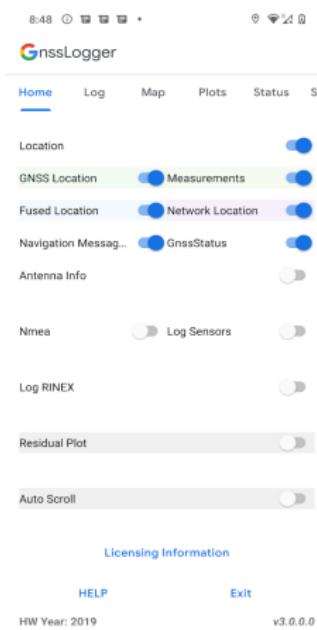


Figure 49 – GnssLogger