

# Études des systèmes GNSS des smartphones

Noë Charlier

*Professeurs:* C. Delacour, M. Petitcuenot

Classe préparatoire aux grandes écoles

PT

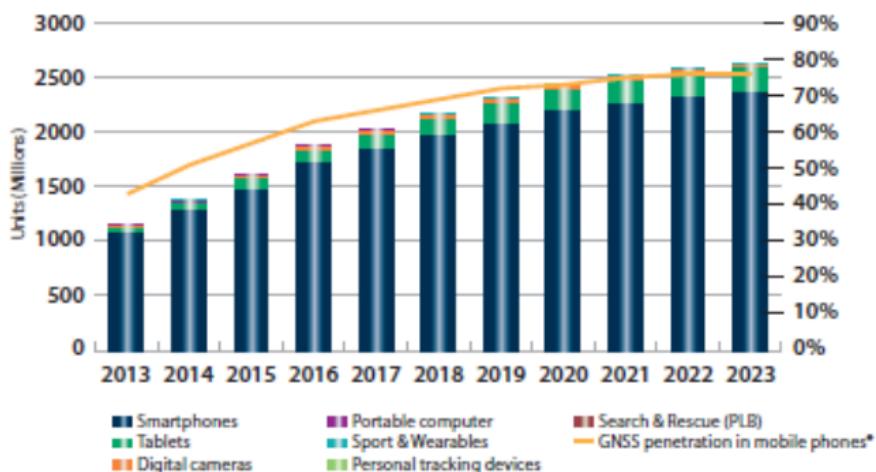
Lycée Paul Constans



TIPE - 2022, 2023

# Introduction

*Besoin grandissant de solution GNSS :*

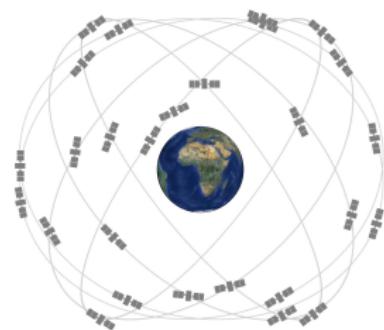


**Figure 1 –** Appareils GNSS par plate-forme. [3]

# Définition GNSS

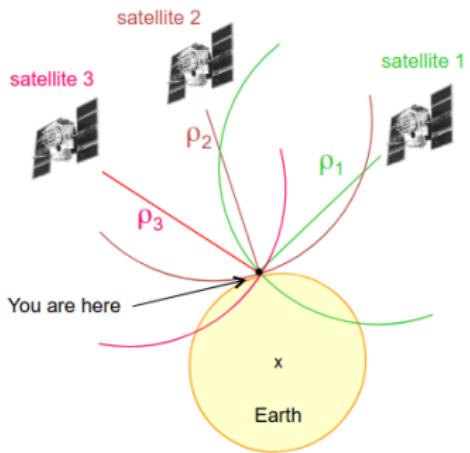
**GNSS** : *Global Navigation Satellite System* (Système de navigation par satellite global)

Constellation de satellites permettant de localiser un point sur la Terre.



**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.  
 $(\delta t)$  (Exemple Annexe 6)
- Réfraction lors de la propagation dans l'atmosphère :
  - ① Troposphérique (dépend de la température et de la pression atmosphérique) ( $T_r^s$ )
  - ② Ionosphérique (dépend de la densité ionique) ( $I_r^s$ )

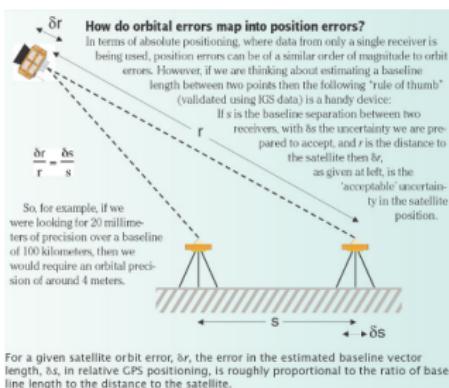
Modèle plus complet :

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

# 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 par un objet avant d'atteindre le récepteur. (cf. Figure 5)

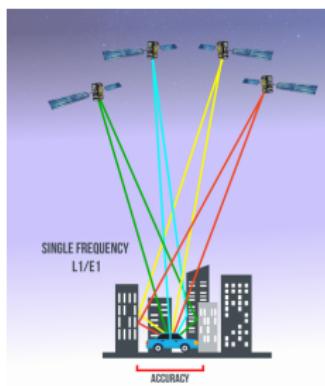


Figure 5 – Multipath [2]

La **dilution** (GDOP) : la géométrie des satellites par rapport au récepteur influe sur la précision de la mesure. (cf. Figure 6)

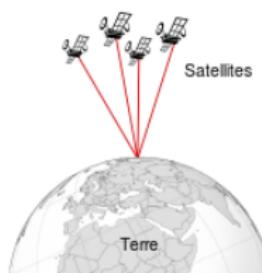


Figure 6 – Coef. de dilution élevée [2]

# Sommaire

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

# Problématique

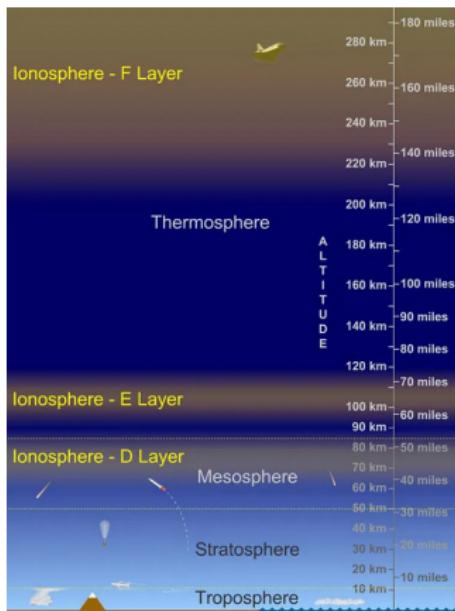
*Comment peut-on réduire l'impact de l'urbanisation sur les systèmes GNSS pour améliorer la précision de la géolocalisation par satellite ?*

# 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 :** L'ionosphère est la couche de l'atmosphère située entre 60 et 1000 km d'altitude. Elle est constituée de particules chargées électriquement, les ions, qui sont en mouvement.

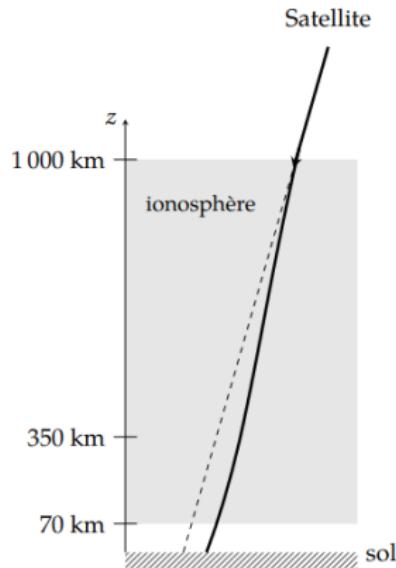


**Figure 7 – Régions de l'ionosphère [9]**

# Impact sur la propagation

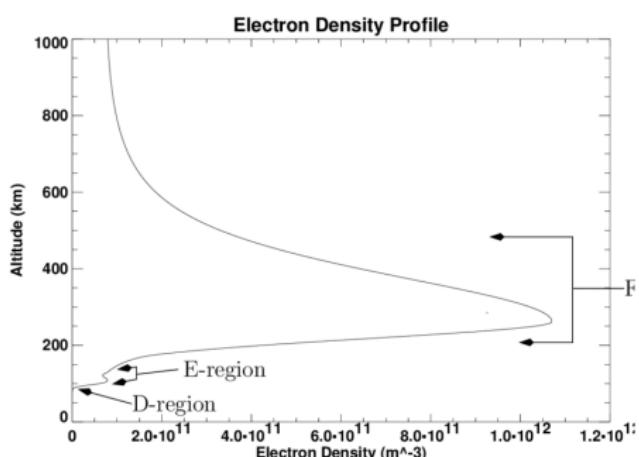
## Impact sur la propagation :

- **Propagation directe** - La propagation directe est la propagation d'une onde radio entre deux points sans interaction avec l'ionosphère.
- **Propagation diffusée** - La propagation diffusée est la propagation d'une onde radio entre deux points avec interaction avec l'ionosphère.



**Figure 8** – Propagation directe et diffusée [6]

# Quelle erreur ?



**Figure 9 – Profil ionosphérique [4]**

Retard ionosphérique :

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

Erreur de distance :

$$L = \frac{a}{f_1^4} C_{ET} \text{ avec } C_{ET} = \int_0^{H_0} n_e dz$$

(Contenu Électronique Total)

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

$$L = 220m$$

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) :

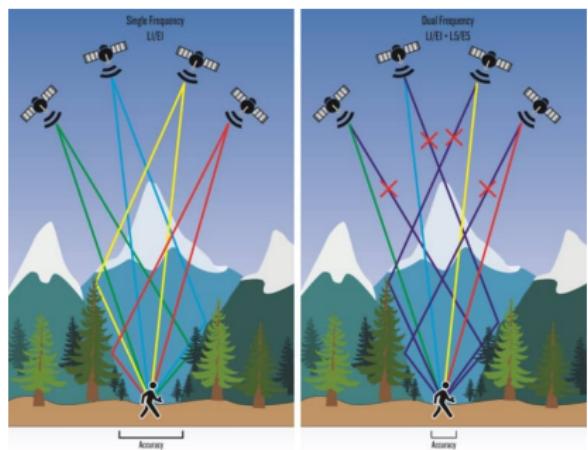


Figure 10 – Image : Garmin



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<sub>p</sub>).

# Protocole expérimental

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

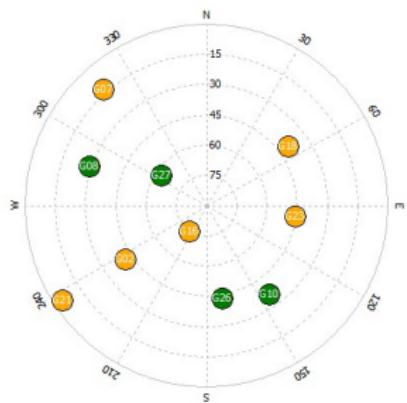


**Figure 12 – GNSS  
Logger de Google**



**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 :

- Le signal sur bruit est le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit.
- $SNR = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_{signal}}{P_{bruit}}\right)$

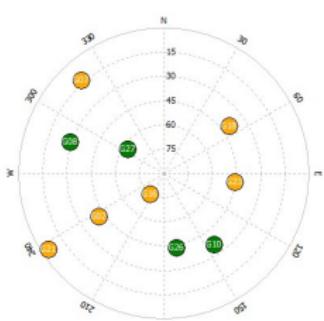


Figure 16 – Skyplot

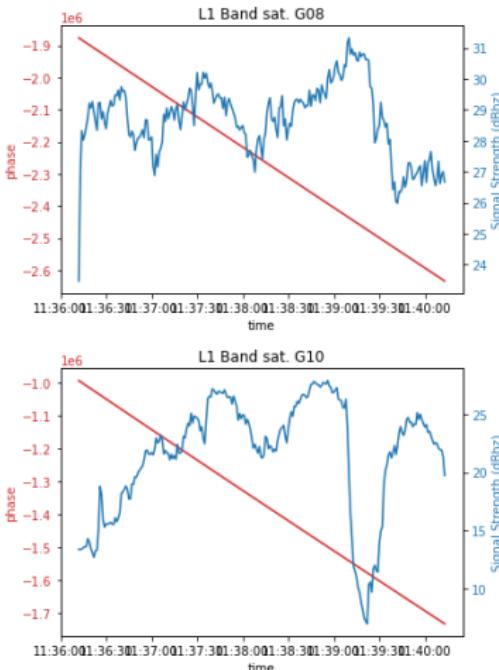
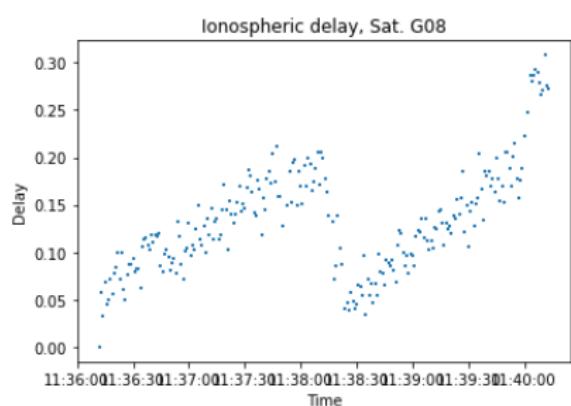


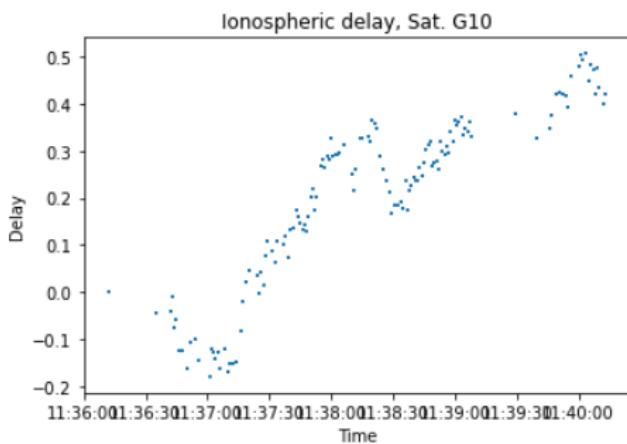
Figure 17 – SNR, G08 et G10

# Résultats

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



**Figure 18** – Délai ionosphérique sur G08



**Figure 19** – Délai ionosphérique sur G10

# Multipath

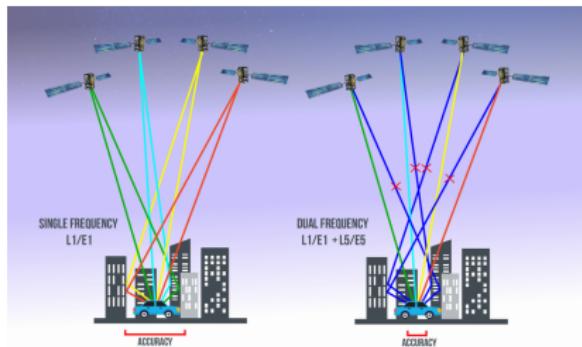
**Multipath** : Le multipath est un phénomène de propagation d'onde radio qui se propage sur plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur.

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)

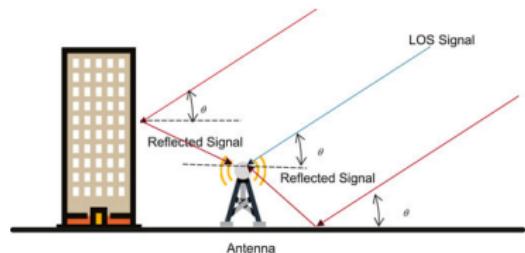
avec  $P$  la phase,  $L_1$  la pseudorange,  $L_2$  la pseudorange sur la deuxième fréquence et  $\alpha$  le coefficient de réflexion.



**Figure 20 – Multipath [2]**

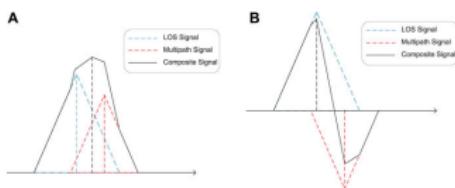
On a donc besoin de la **phase** et de la **pseudorange** sur deux fréquences.

# Quelle erreur ?

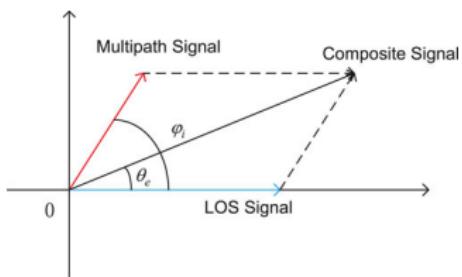


**Figure 21 – Description du multipath [10]**

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*



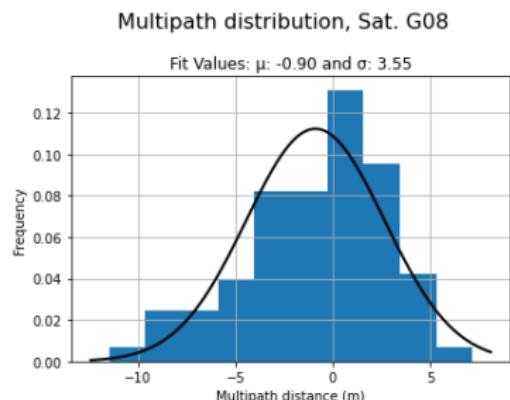
**Figure 26** – Outil de récupération de données, *Google GNSS Logger*

# Résultats

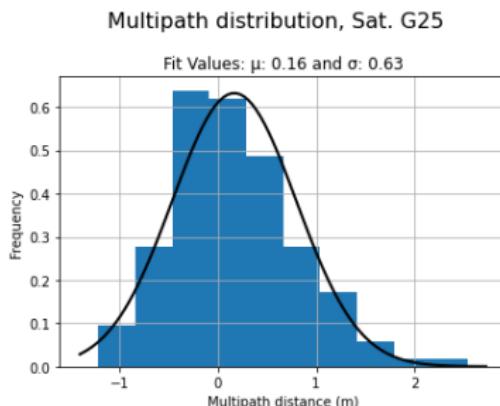
Erreur multipath en ville et en campagne ; statique.

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 3,2m



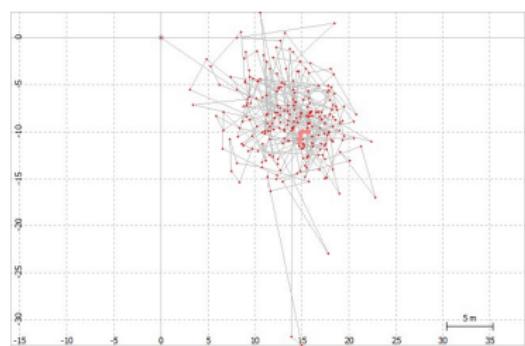
**Figure 28** – Multipath en extérieur, erreur 60cm

# Corrections

Avec **RTKlib** :

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

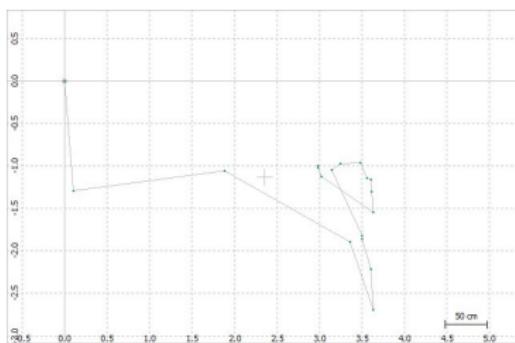
Uniquement sur le **code** (pseudorange)



**Figure 29** – Calcul statique (Single), 5 m

Avec correction liée à la double fréquence.

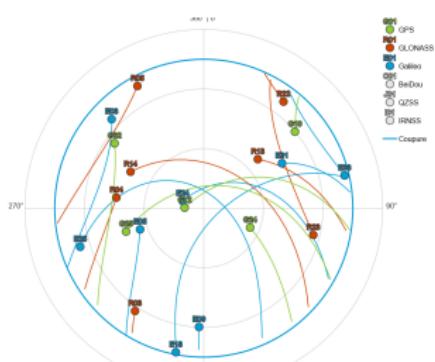
Sur **pseudorange et phase**.



**Figure 30** – Calcul statique (PPP), 50 cm

# Outils

Outils : gnssplanning.com, calcul le GDOP.



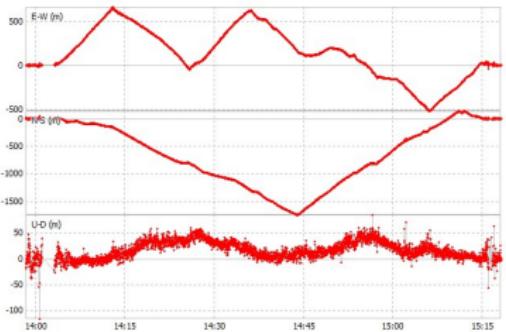
**Figure 31** – Skyplot pour une limite de  $15^\circ$  (22/01/23 15h), GDOP : 2.35



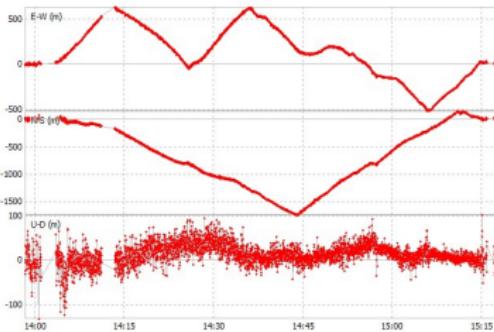
**Figure 32** – Skyplot pour une limite de  $35^\circ$  (22/01/23 15h), GDOP : 4.56

# Expérimentations

**Calcul de la position** à l'aide de *RTKlib* avec un mask de  $15^\circ$  et  $35^\circ$ .



**Figure 33** – Position avec un mask de  $15^\circ$



**Figure 34** – Position avec un mask de  $35^\circ$

# 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 augmente par SBAS.

La présentation n'a pas présenté le début d'étude dynamique. (Voir début en annexe)

Ainsi, les smartphones sont des outils de positionnement intéressants, mais peuvent devenir assez précis pour des applications de précision. Ainsi diminuant le coût de l'infrastructure.

# *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](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](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

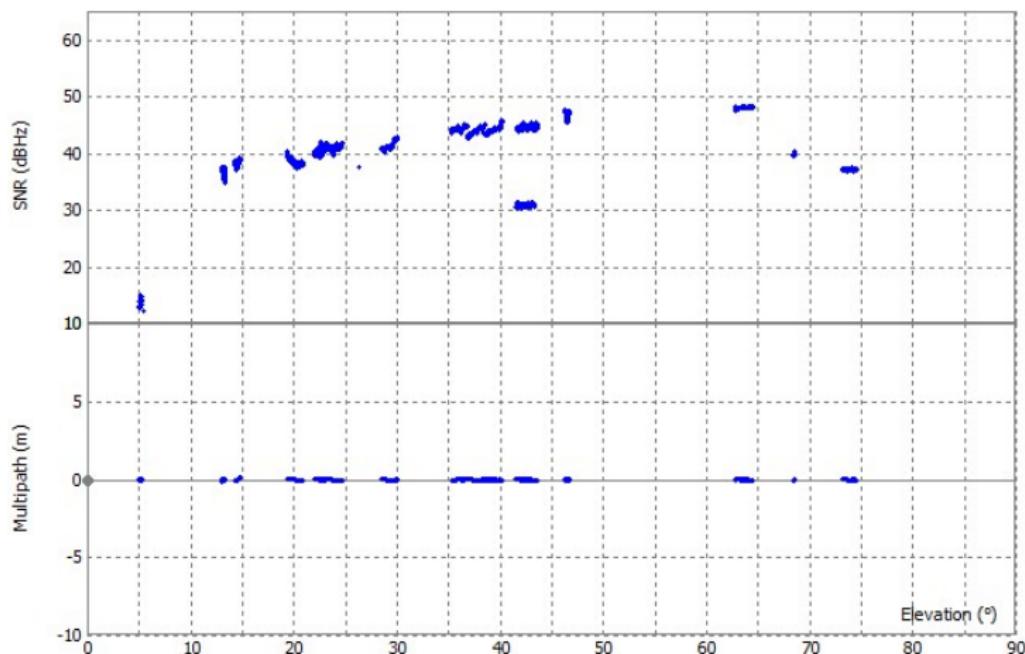


Figure 35 – Élévation et SNR

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

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

D'après l'équation de propagation :

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

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 :  $\boxed{\frac{1}{c} \int_0^H \left( \frac{c}{v_g} - 1 \right) dz}$

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

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

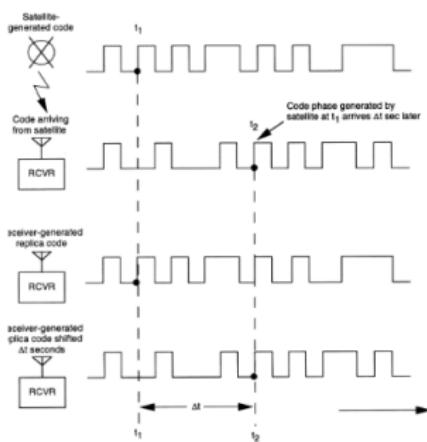
**On a donc :**

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

D'après sujet E3A, [6]

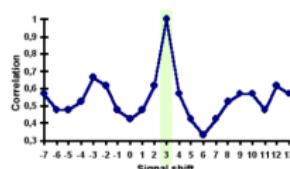
# Le signal GPS

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

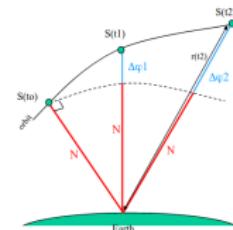


**Figure 36 – Décodage [1]**

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



**Figure 37 – Fonction de corrélation [1]**

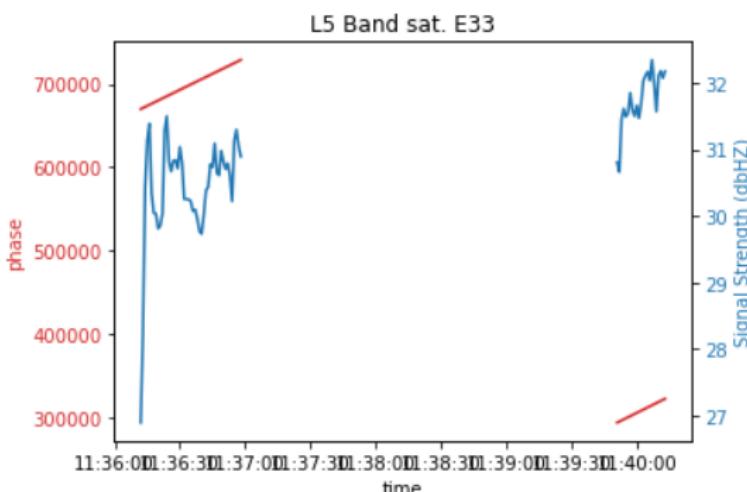


**Figure 38 – Cycle de phase [1]**

# 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 ( $C/N_0$ )

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          17—JAN—23 13:53   PGM / RUN BY / DATE
IGS BROADCAST EPHEMERIS FILE      COMMENT
                                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 0.400711955078D+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 :

OBSERVATION DATA				M	RINEX VERSION / TYPE	
GnssLogger	Xiaomi	10		20230117 132006 UTC	PGM / RUN BY / DATE	
Google GnssLogger					MARKER NAME	
G 8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q					SYS / ##### / OBS TYPES	
E 8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q					SYS / ##### / OBS TYPES	
E L5Q 0.00000					SYS / PHASE SHIFT	
C1C 0.000 C1P 0.000 C2C 0.000 C2P 0.000					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					
G10	8004.38113			-2010.76113	19.12713	593
-1433.92611	10.63511					
G11	-12882.26412			3222.43712	17.30012	
G12 20136967.66714	-2423.03914			846.72914	28.16814	
G15	14170.13812			-3560.32412	15.63512	
G17	11523.98012			-2880.99612	16.73612	

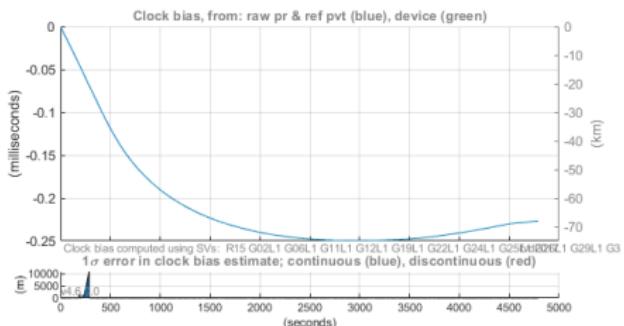
**Note :** Les données ont été tronquées pour des raisons de lisibilité.

**Dataset complet :**

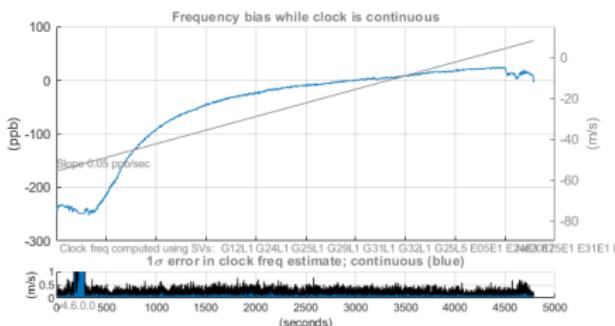
<https://mega.nz/folder/dlRWAb5K#JNMzol3-uhl9gx0fF0147w>

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](https://github.com/n005/tipe)**

# Étude dynamique (PPP, RTK)