

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 :

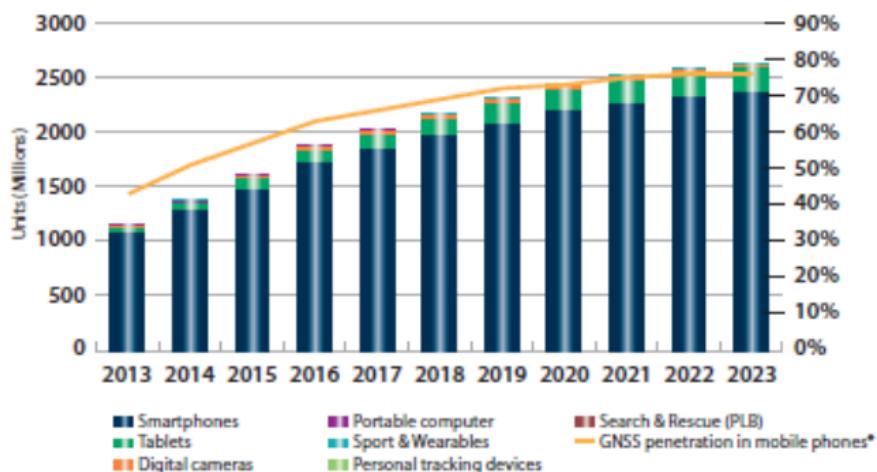


Figure 1 – Appareils GNSS par plate-forme. [3]

Définition GNSS

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

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

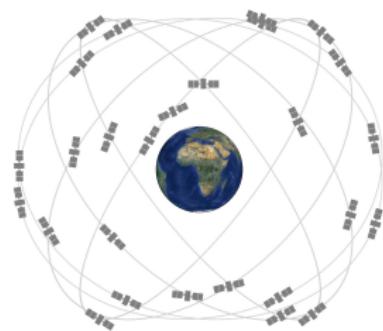


Figure 2 – Système de navigation par satellite global. [5]

Fonctionnement du GPS

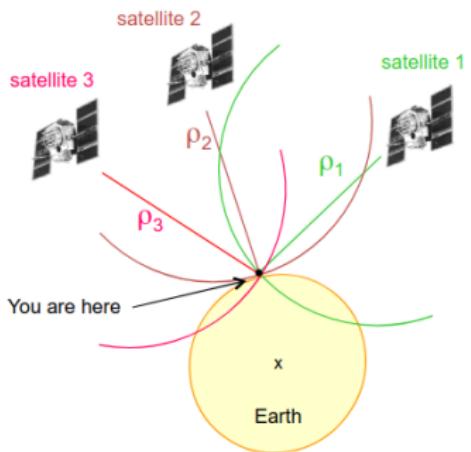


Figure 3 – Fonctionnement du GPS.
[1]

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.

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 (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.

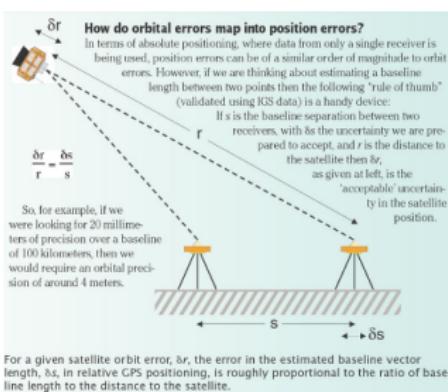


Figure 4 – Précision des orbites. [1]

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)

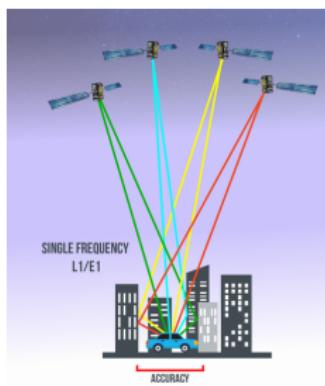


Figure 5 – Multipath [2]

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

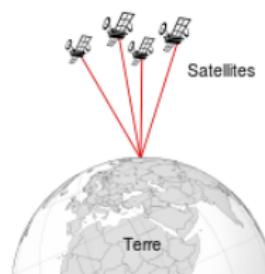


Figure 6 – Coef. de dilution élevée [2]

Sommaire

① Introduction

② L'ionosphère

③ Exp. Ionosphérique

④ Multipath

⑤ Exp. Multipath

⑥ Dilution géométrique

⑦ 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.

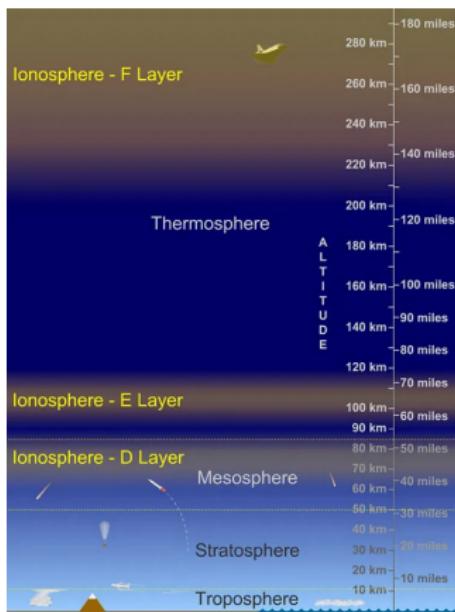


Figure 7 – Régions de l'ionosphère [9]

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.

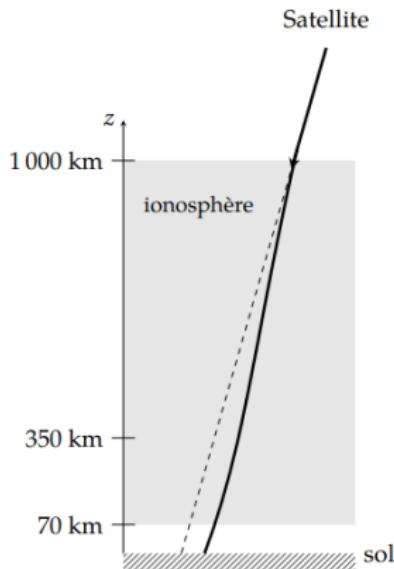


Figure 8 – Propagation directe et diffusée [6]

Quelle erreur ?

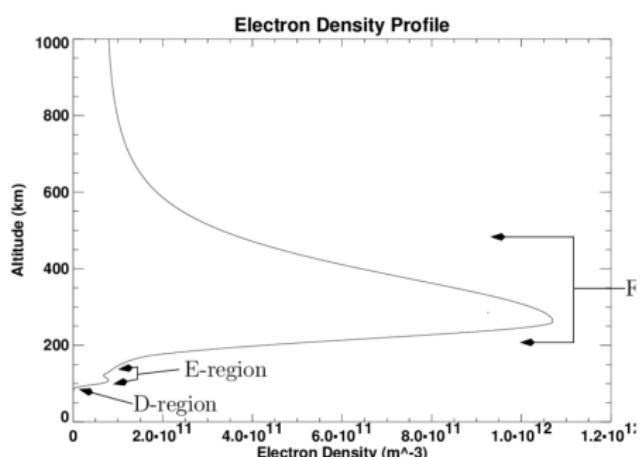


Figure 9 – Profil ionosphérique [4]

Retard ionosphérique :

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

Erreur de distance :

$$L = \frac{a}{f_1^1} C_{ET} \text{ avec } C_{ET} = \int_0^{H_0} n_e dz$$

(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) :

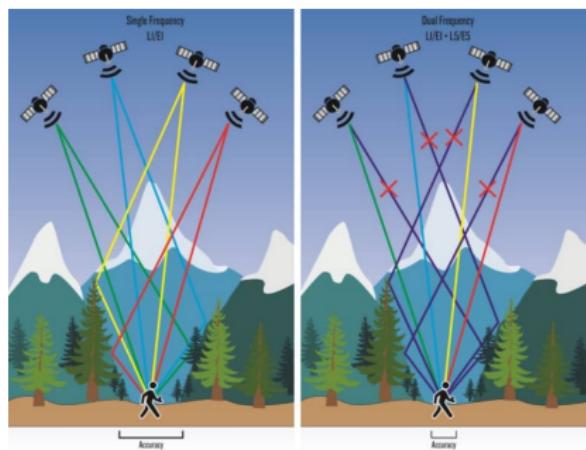


Figure 10 – Image : Garmin



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_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

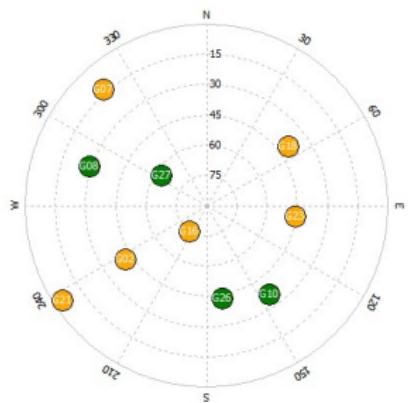


Figure 14 – Carte du ciel



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

Contexte - Signal sur bruit

Signal sur bruit :

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

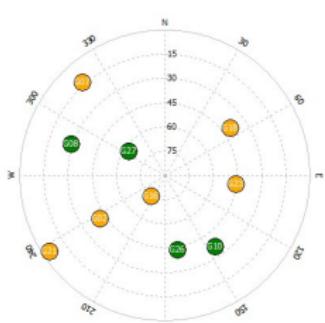


Figure 16 – Skyplot

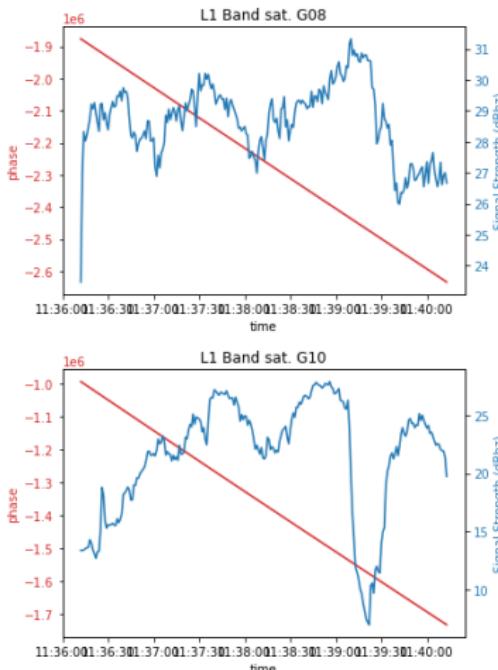


Figure 17 – SNR, G08 et G10

Résultats

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

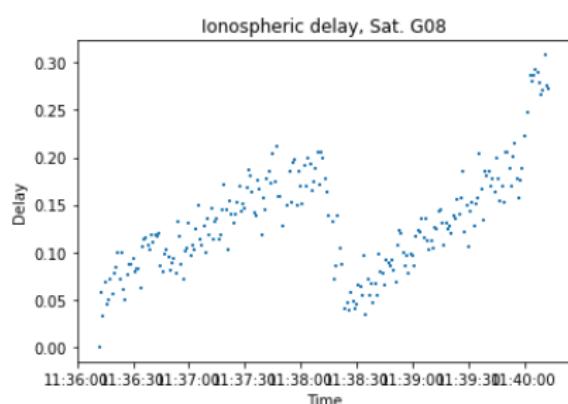


Figure 18 – Délai ionosphérique sur G08

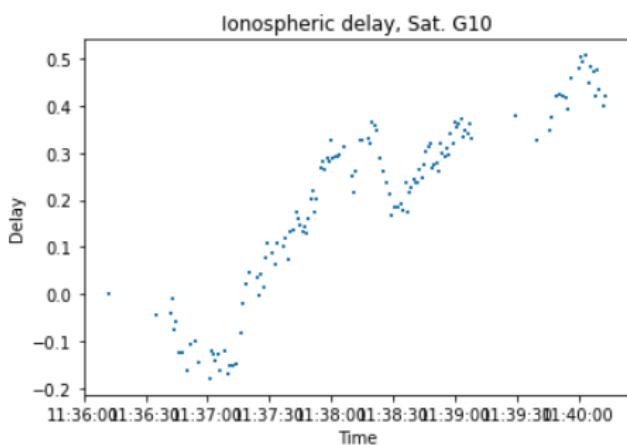


Figure 19 – Délai ionosphérique sur G10

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 α le coefficient de réflexion.

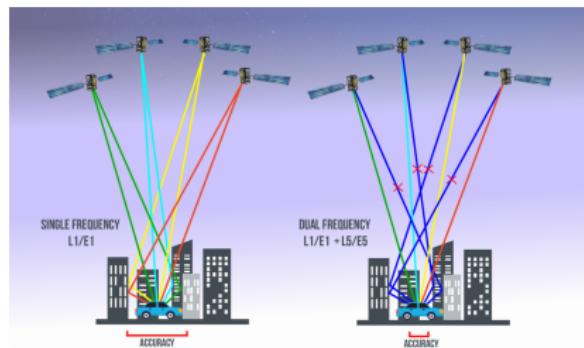


Figure 20 – Multipath [2]

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

Quelle erreur ?

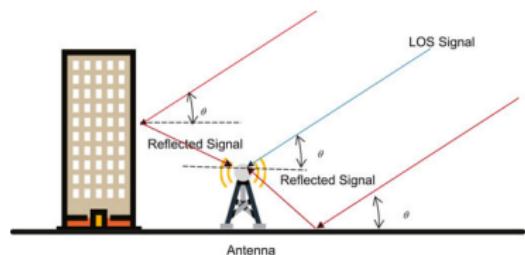


Figure 21 – Description du multipath [10]

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

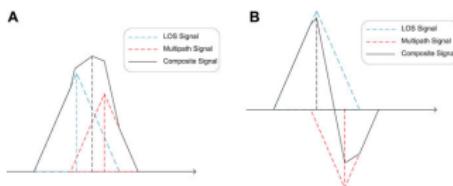


Figure 22 – Impact sur la fonction de corrélation (Annexe 3)

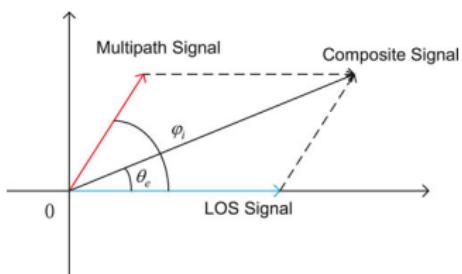


Figure 23 – Impact sur la phase

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*

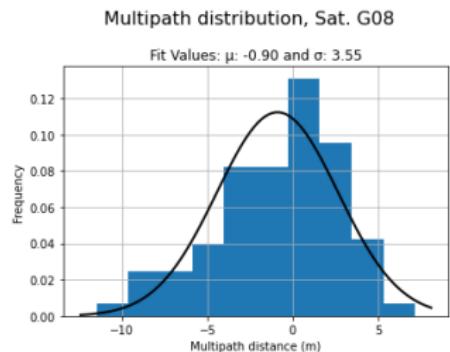


Figure 26 – Outil de récupération de données, *Google GNSS Logger*

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.

J'ai pas encore les résultats, mais ça arrive.

Figure 27 – Multipath de G08

Outils

Outils : gnssplanning.com, calcul le GDOP.

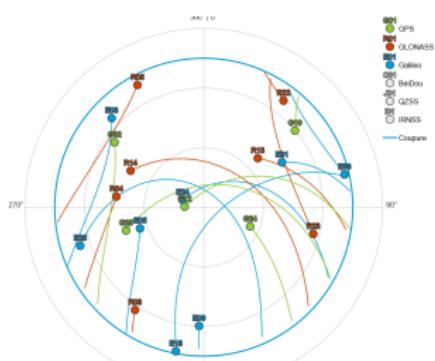


Figure 28 – Skyplot pour une limite de 15° (22/01/23 15h), GDOP : 2.35



Figure 29 – 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° .

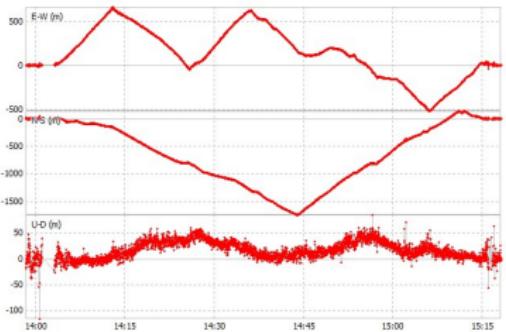


Figure 30 – Position avec un mask de 15°

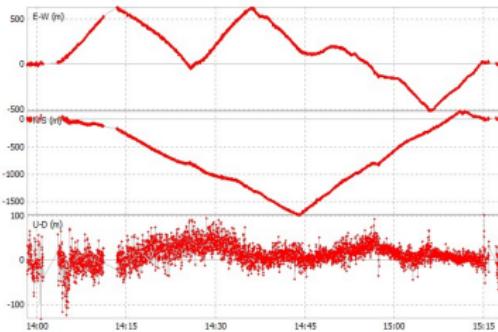


Figure 31 – Position avec un mask de 35°

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 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/>
- [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

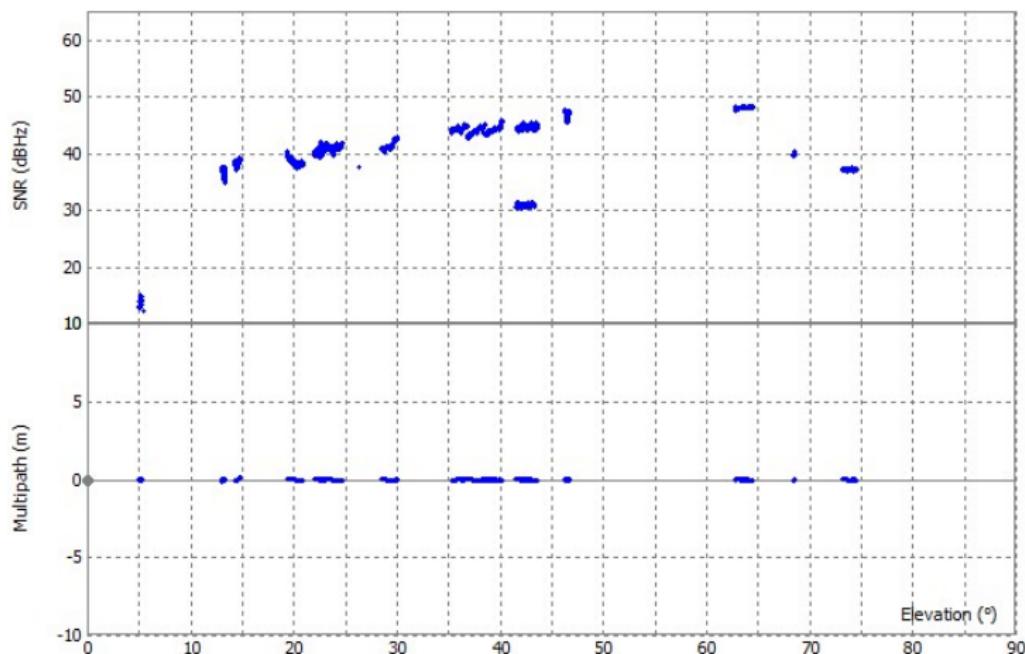


Figure 32 – Élévation et SNR

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 :

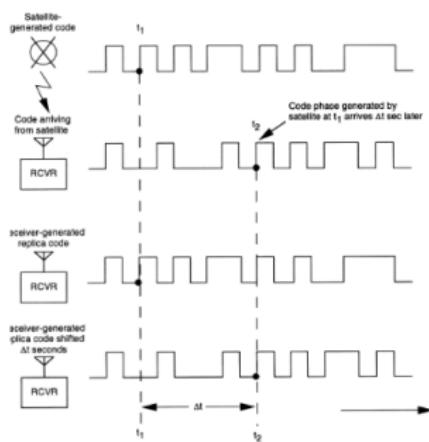


Figure 33 – Décodage [1]

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

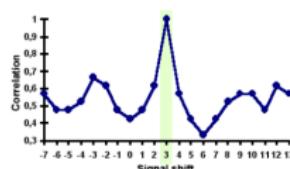


Figure 34 – Fonction de corrélation [1]

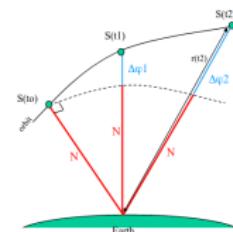


Figure 35 – Cycle de phase [1]

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.

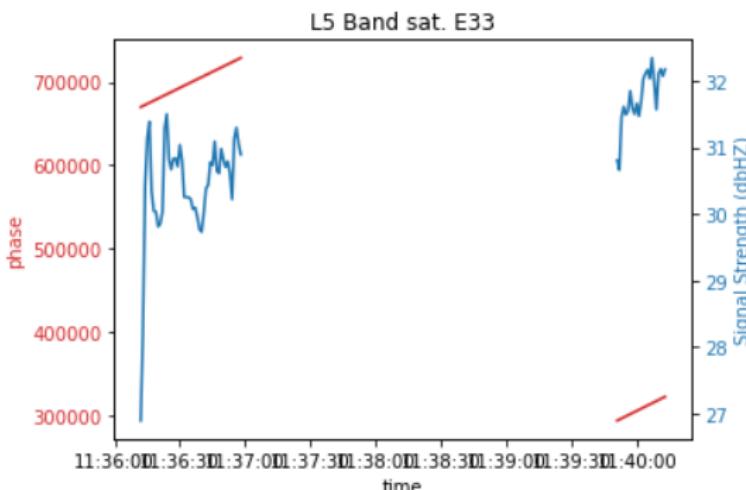


Figure 36 – Exemple d'une interruption

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 :

```

3.03          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          8004.38113          -2010.76113          19.12713          593
G10           -1433.92611          10.63511          -12882.26412          3222.43712          17.30012
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.

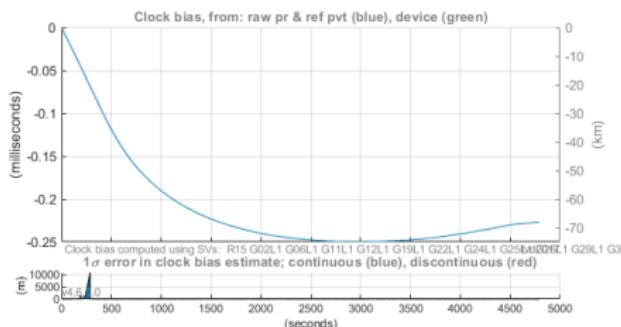


Figure 37 – Biais d'horloge

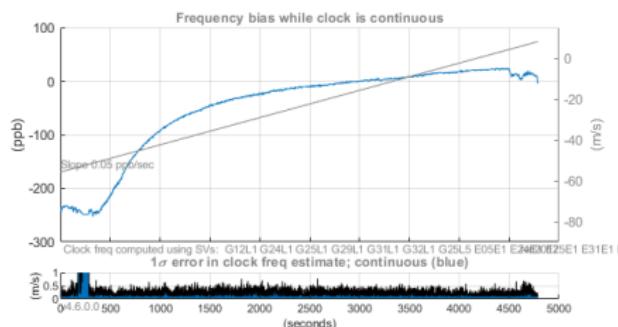


Figure 38 – Biais de fréquence

Code python - COMPACT3

```
import pandas as pd
from datetime import datetime, timedelta
nbval=0
sat=[]
def comread(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 (PPP, RTK)