

Introduction

Besoin grandissant de solution GNSS :

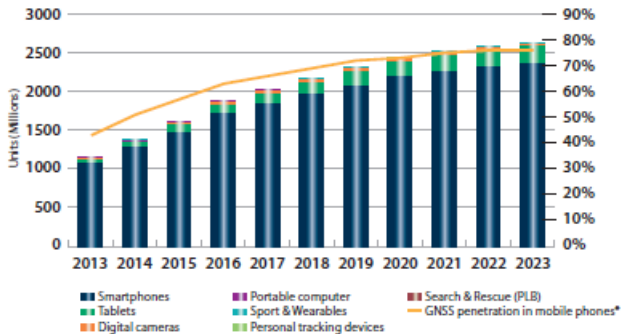


Figure 1 – Appareils GNSS par plate-forme. [3]

Définition GNSS

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

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

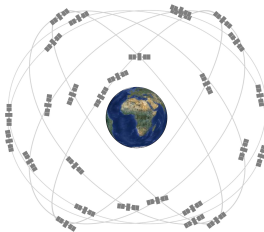


Figure 2 – Système de navigation par satellite global. [5]

Sources d'incertitude

- Les horloges des satellites et des récepteurs ne sont pas synchronisés. (δt)
- Réfraction lors de la propagation dans l'atmosphère :
 - ❶ Troposphérique (dépend de la température et de la pression atmosphérique) (T_r^s)
 - ❷ 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 prédites émises par les satellites.

Ces **éphémérides** doivent donc être très précises. (Perturbation gravitationnelle (cf. Annexe 1))

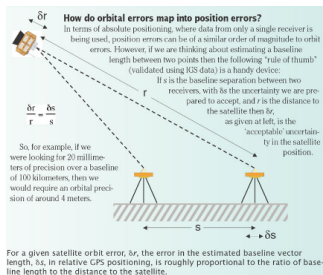


Figure 4 – Précision des orbites. [1]

Il existe aussi des services qui recalculent les éphémérides a posteriori. (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)

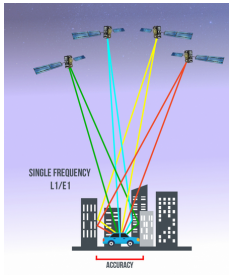


Figure 5 – Multipath [2]

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

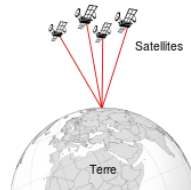


Figure 6 – Coef. de dilution élevée [2]

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 L'ionosphère
- 3 Expérimentations Ionosphérique
- 4 Multipath
- 5 Expérimentations Multipath
- 6 Dilution géométrique

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.

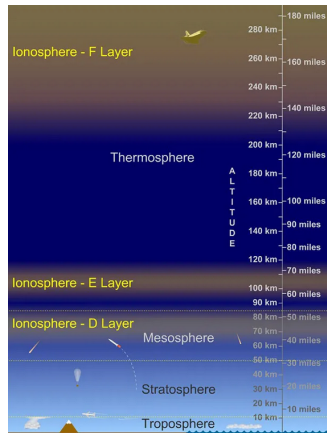


Figure 7 – Régions de l'ionosphère [9]

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.

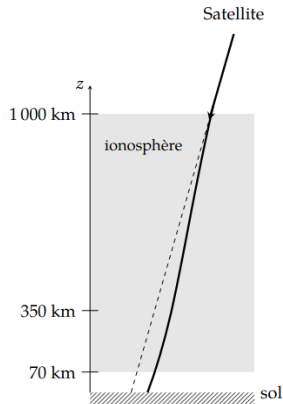


Figure 8 – Propagation directe et diffusée [6]

Quelle erreur ?

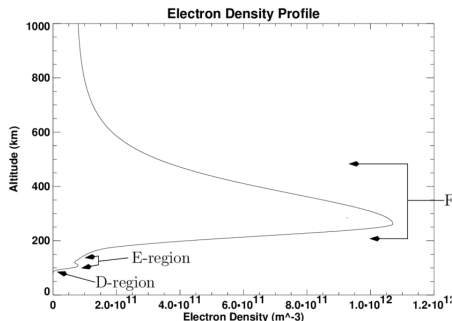


Figure 9 – Profil Ionosphérique [4]

Retard Ionosphérique :

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

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 $1.5 \cdot 10^{17} m^{-2}$,

$$L = 220m$$

On a besoin de la **phase** et de la **spseudorange** 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) :

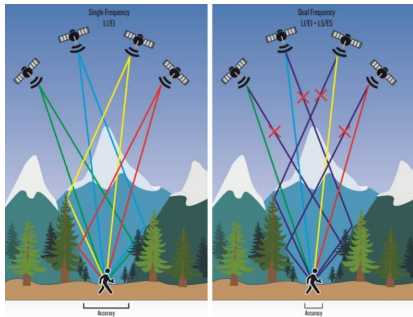


Figure 10 – Image : Garmin

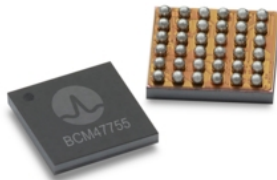


Figure 11 – Broadcom BCM47755,
Broadcom Inc.

Expérimentations Ionosphérique

Préambule

Méthode d'évaluation : Le CET *Total electron content* s'évalue grâce à un même signal sur deux fréquences.

Le signal GPS :

- **Speudorange** - La speudorange (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)

Protocole expérimental



Figure 12 – Outil de calcul du TEC, tecq
UNAVCO



Figure 13 – Outil de calcul de solution, *rtklib*

- RTKlib avec et sans correction ionosphérique.
- Calcul du TEC à partir de la phase et de la pseudorange.

Résultats

Figure 14 – TEC en fonction du temps

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.

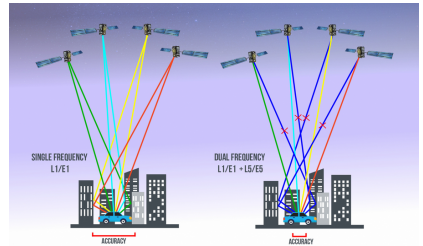


Figure 15 – Multipath [2]

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

Quelle erreur ?

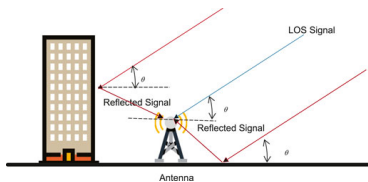


Figure 16 – Description du multipath [10]

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

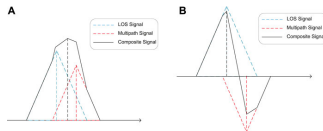


Figure 17 – Impact sur la fonction de corrélation (Annexe 3)

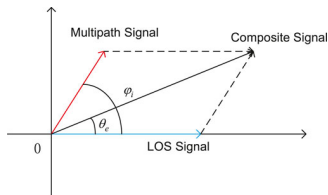


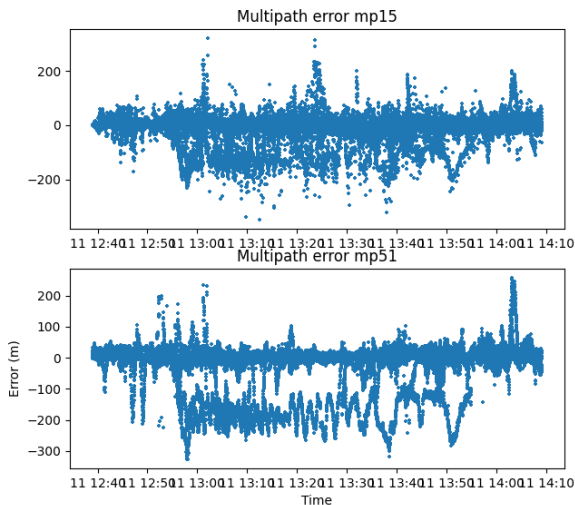
Figure 18 – Impact sur la phase

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]

Résultats



Outils

Outils : gnssplanning.com, calcul le GDOP.

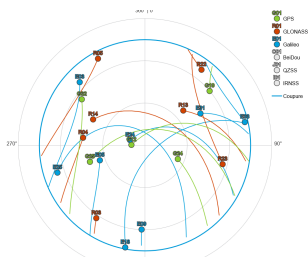


Figure 20 – Skyplot pour une limite de 15° (22/01/23 15h), GDOP : 2.35

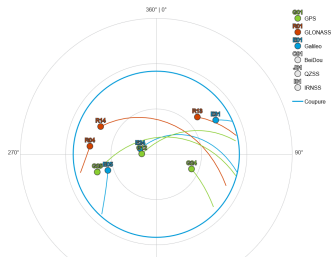


Figure 21 – Skyplot pour une limite de 35° (22/01/23 15h), GDOP : 4.56

Expérimentations

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

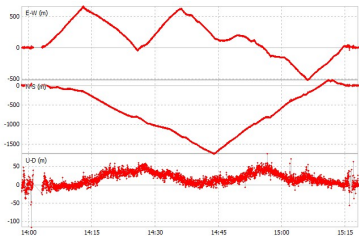


Figure 22 – Position avec un mask de 15°

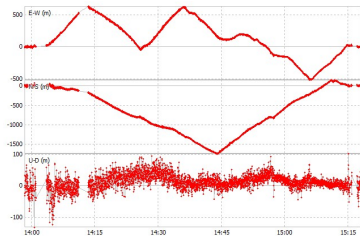


Figure 23 – Position avec un mask de 35°

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 transionospheric 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 ROBUSTELLI, 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>.

Modélisation, perturbation gravitationnelle

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 :

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

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'indice est inférieur à 1, ...

D'après sujet E3A, [6]

Le signal GPS

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

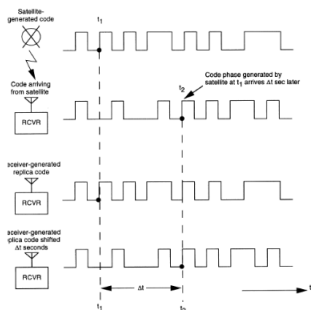


Figure 24 – Décodage [1]

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

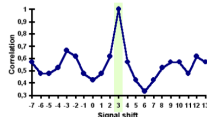


Figure 25 – Fonction de corrélation [1]

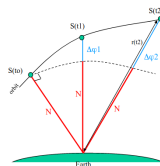


Figure 26 – Cycle de phase [1]

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 (Speudorange)
- 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             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 0.0 -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 :

Bibliographie

```

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
R      4 C1C L1C D1C S1C      SYS / ##### / OBS TYPES
C      4 C2C L2C D2C S2C      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
G19      6755.80613      -1698.35913      19.88813
G23      10819.77012      -2698.71212      15.78612
G29      -17008.92912      4251.70412      15.18812

```

Biais d'horloge - Xiaomi Mi 8

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

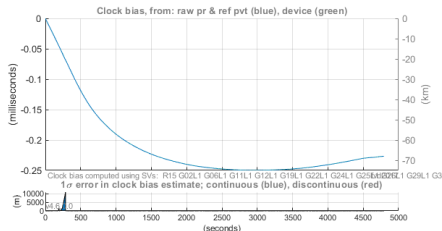


Figure 27 – Biais d'horloge

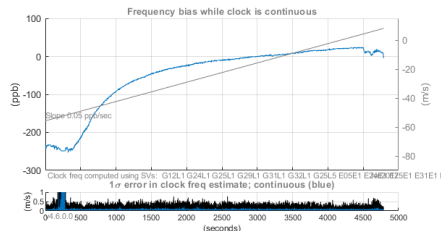


Figure 28 – Biais de fréquence