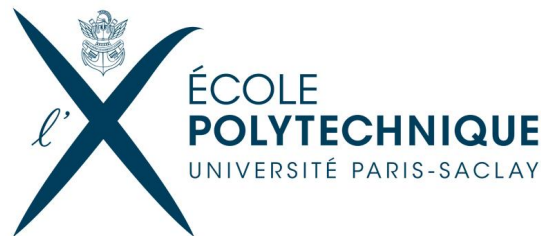


Mesures ionosphériques à l'aide de signaux GNSS



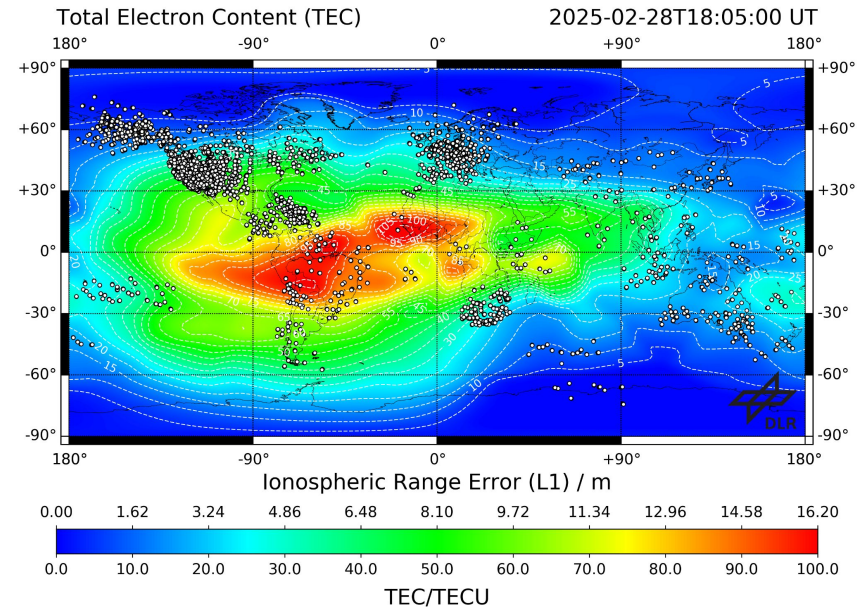
Alexis Deynes, Gauthier Brassel, Olivier Girard, Alexandre Declèves, Marc De Dieuleveult, Gaspard Malhomme

Encadrants : Luca Bucciandini (CSEP), Alexis Jeandet (LPP)



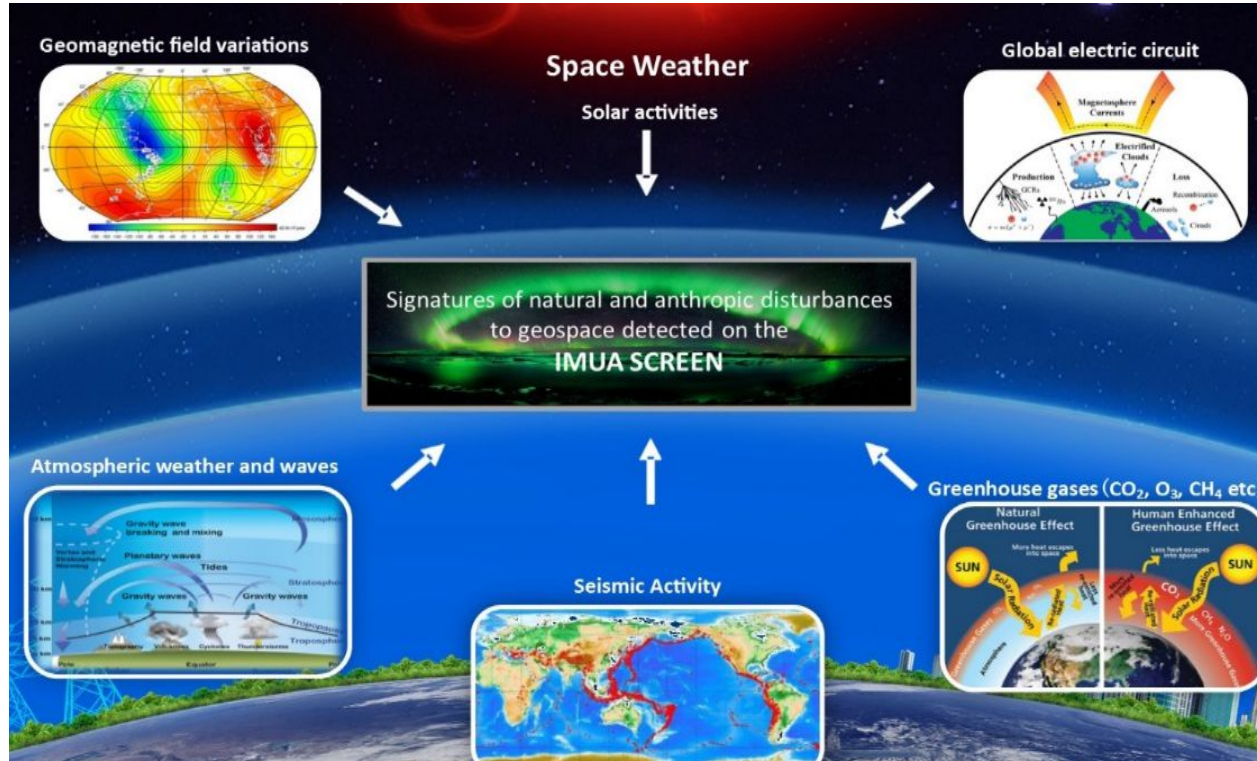
I. Enjeux et motivations

- **Ionosphère** : plasma (60-1000 km)
- *Total electron content (TEC)* : quantité d'électrons dans l'ionosphère
- Le choix du GPS : déphasage des signaux à cette fréquence (1.5 GHz)
- Accès en temps réel au TEC



Carte du TEC (Ionospheric Monitoring and Prediction Center) le 28/02/2025 à 19h heure locale

International Meridian Circle Program



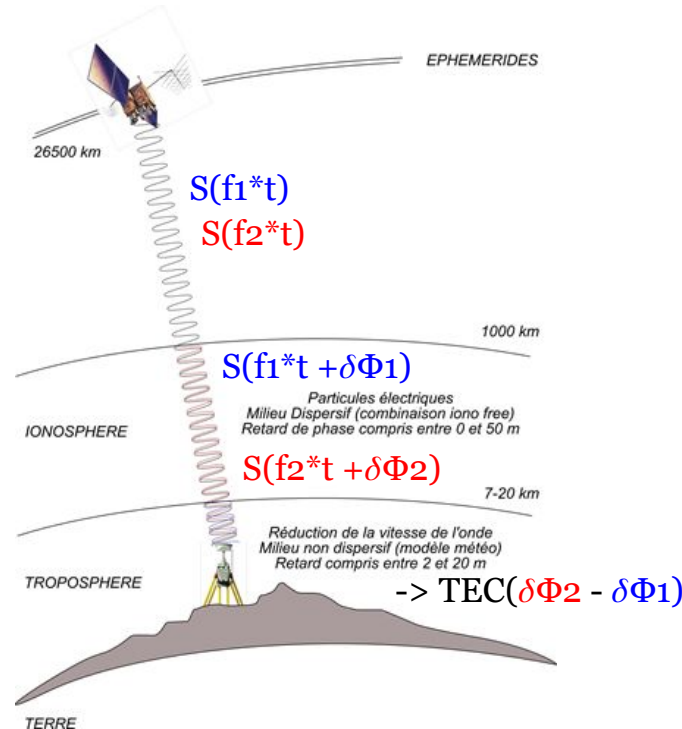
Différents phénomènes mesurables par leurs effets sur l'ionosphère - Présentation IMCP de Michel Blanc (IRAP, Toulouse) au CEDAR Workshop 2023, San Diego, June 25-30, 2023

II. Mesure bifréquence

Approche passive

Réception
simultanée des deux
fréquences GPS

Le déphasage
permet d'obtenir le
TEC



Déphasage [m] :

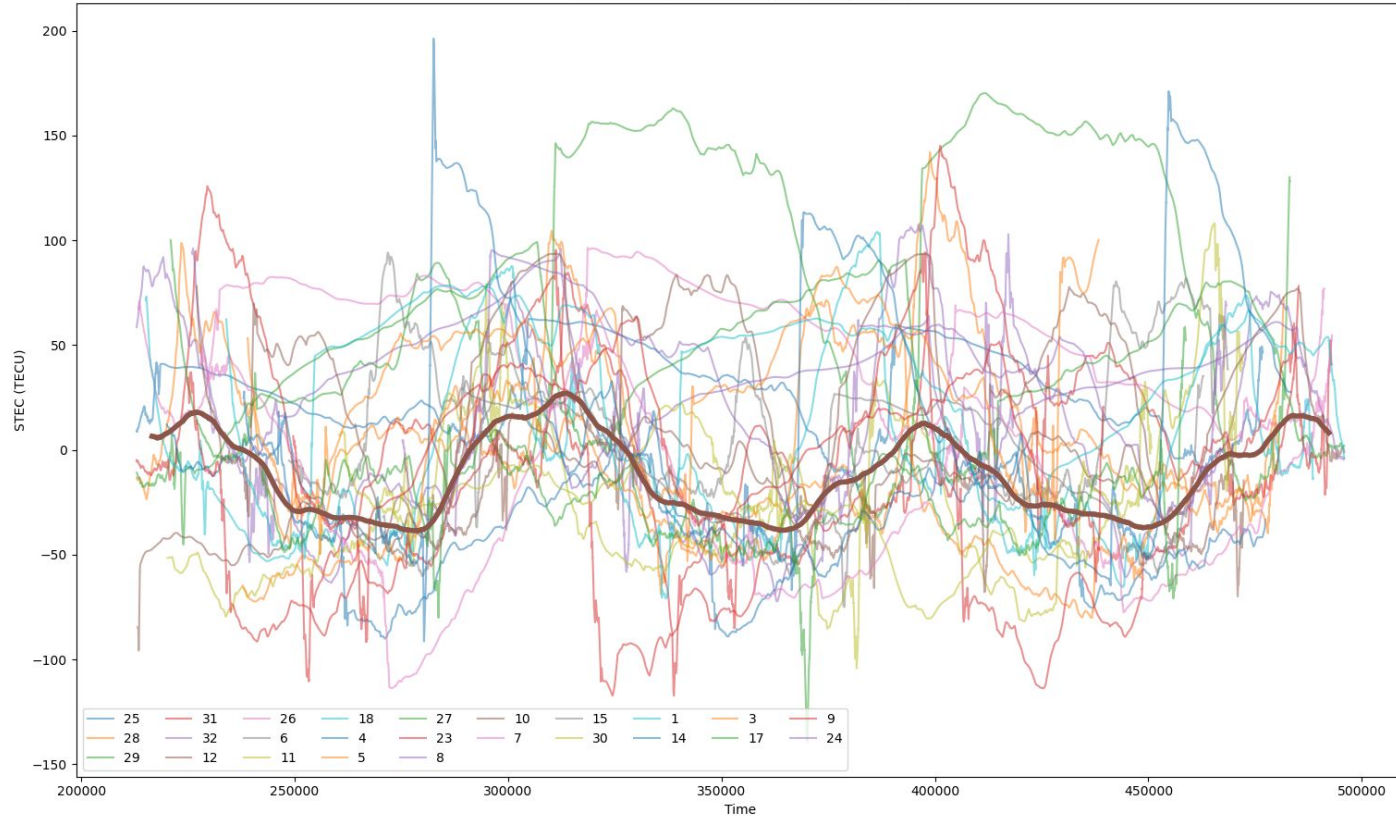
$$\delta_I = \int_{\vec{r}_R}^{\vec{r}_T} (n - 1) dl$$

Différence de marche
ionosphérique :

$$\delta\rho_I = -\frac{s_1}{f^2} - \frac{s_2}{f^3} - \frac{s_3}{f^4}$$

$$s_1 = 40.308 \int_{\vec{r}_R}^{\vec{r}_T} N_e dl$$

STEC vs Time from 25/02 12h to 28/02 19h



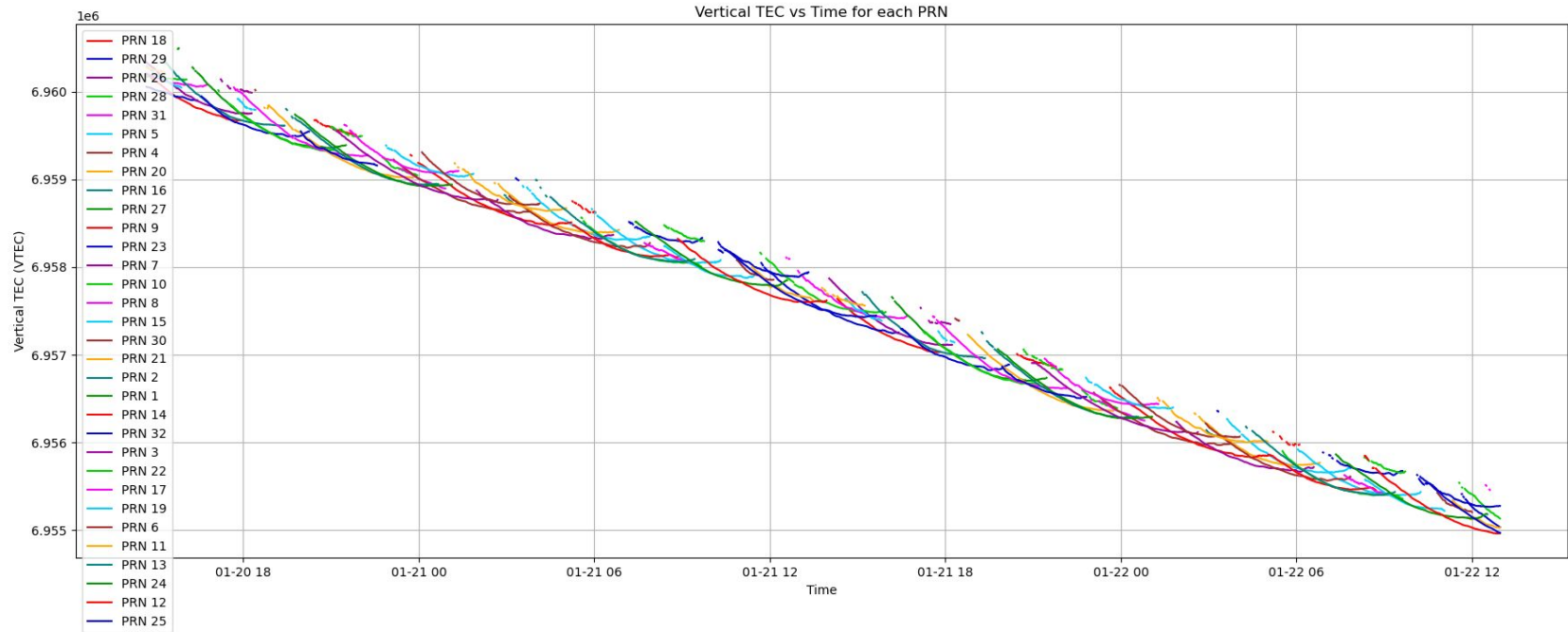
III. Mesure monofréquence

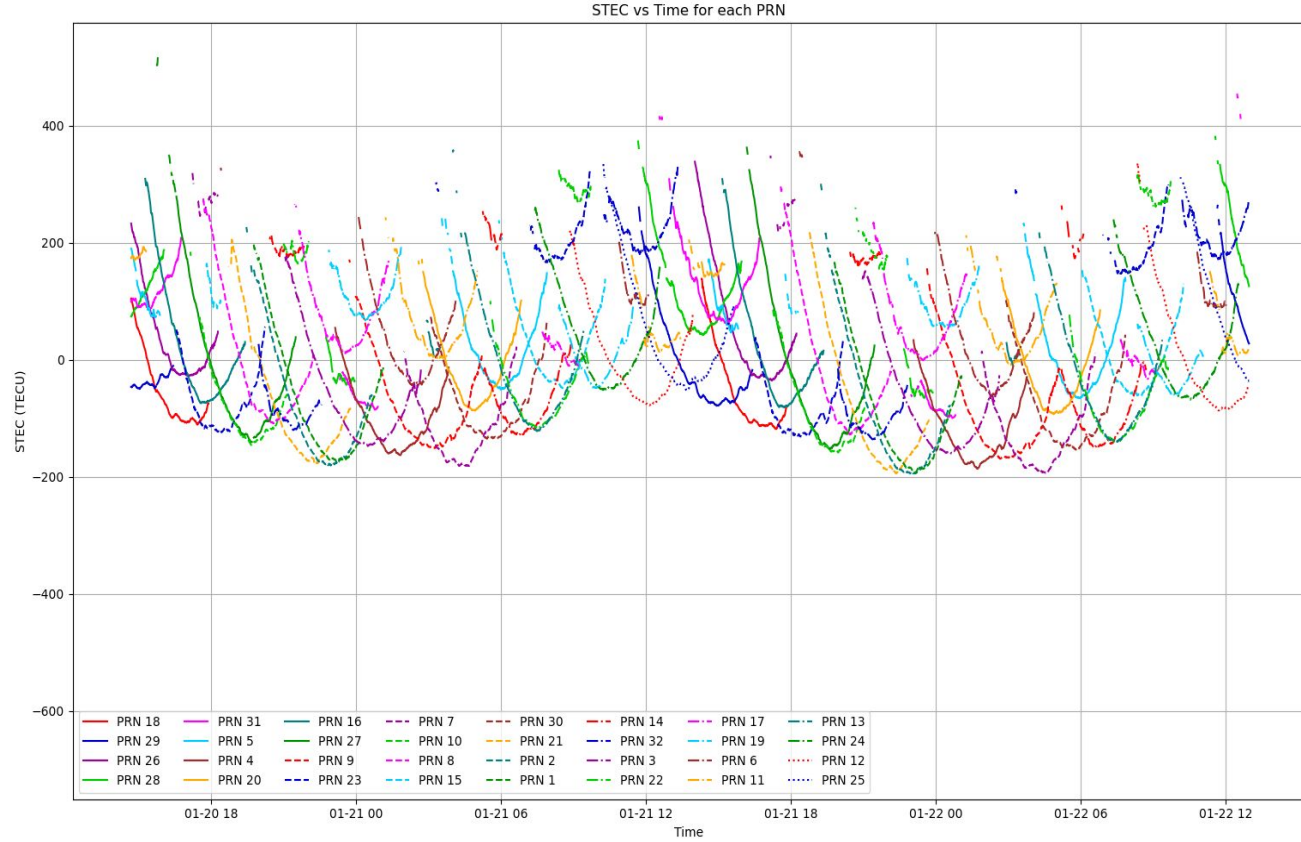
$$R_P = \rho + c(\delta t^R - \delta t^S) + I_P + T_P + \mathcal{M} + K_P^R + K_P^S + \varepsilon_P$$

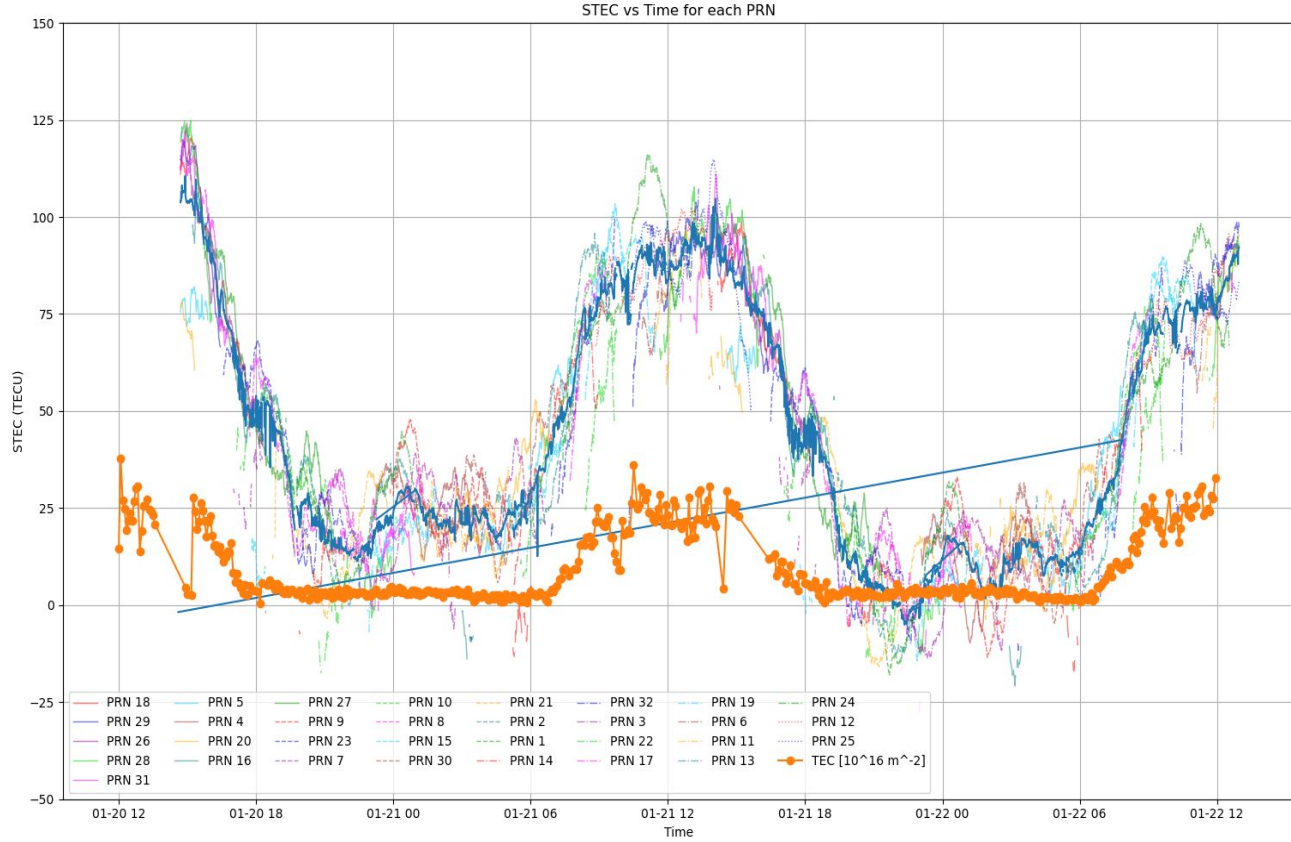
Moralement, pseudorange = distance + clock bias + ionosphère

On obtient [clock bias + ionosphère]...

Clock bias + ionosphère







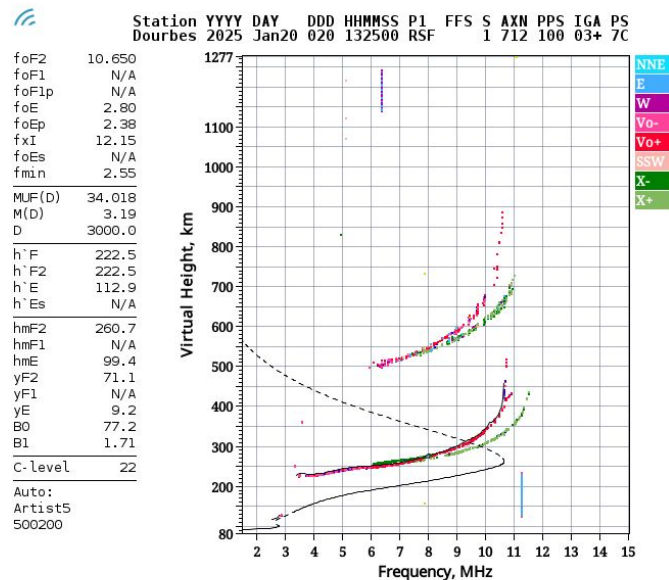
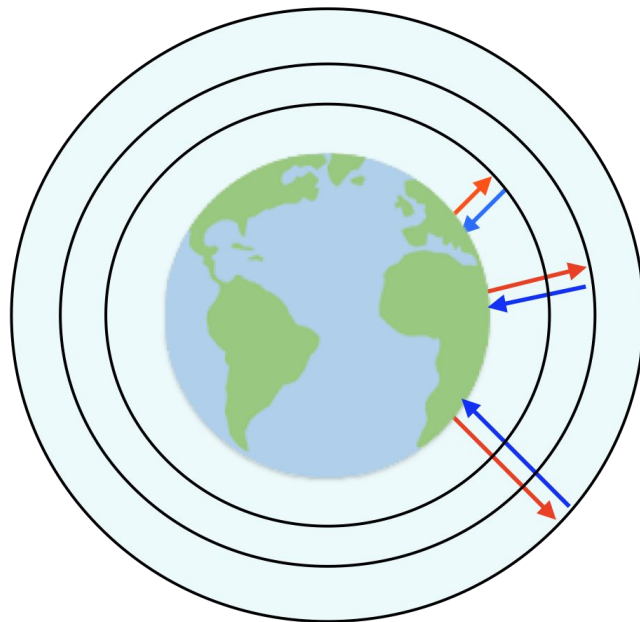
IV. Mesure par rebond

La mesure de $n_e(h)$ (approche active)

Émission et rebond
d'une onde sur le
plafond
ionosphérique.

Fréquence plasma,
fonction de N_e :

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$



D 100 200 400 600 800 1000 1500 3000 [km]
MUF 11.3 11.4 11.9 12.8 14.0 15.8 20.9 34.0 [MHz]
db049 2025020132500.rsrf / 271fx512h 5 kHz 2.5 km / DPS-4D DB049 49 / 50.1 N 4.6 E

Dispatcher

V. Partenaires

- Centre Spatial de l'École polytechnique
- Laboratoire de Physique des Plasmas
- Club radioamateur de Viry-Châtillon



Merci de votre écoute.

Avez-vous des questions ?

Sommaire

- I. Enjeux et motivations
- II. Objectifs du travail
- III. Moyens mis en place
- IV. IV. Aujourd'hui, où en sommes-nous ?

II. Objectifs du travail

Objectifs principaux :

Captage et enregistrement de signaux, premières mesures

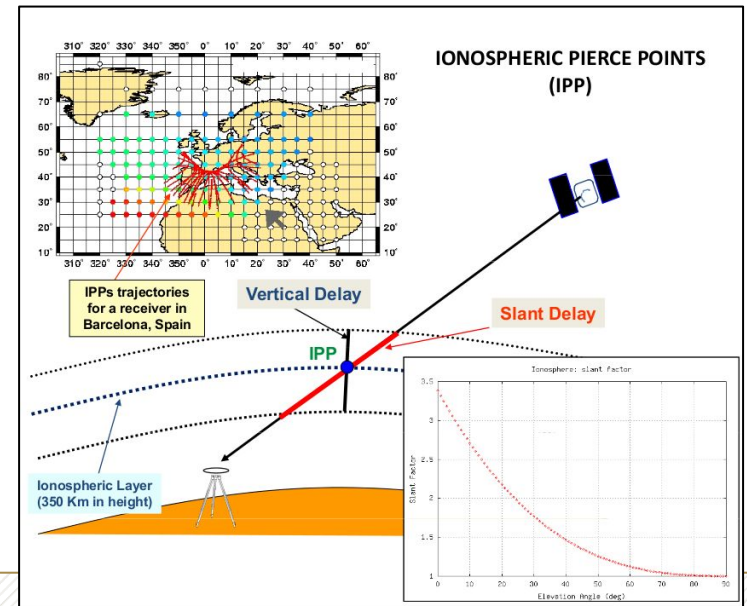
Raffiner les mesures du TEC

Au choix :

Cartographie du TEC

Miniaturisation du système

Profil de densité verticale d'ions



IV. Aujourd'hui, où en sommes-nous ?

Choix du SDR arrêté, attente de la commande

Premiers essais avec le logiciel gnss-sdr sur des enregistrements de signaux (mais impossible de trouver des signaux à deux bandes)

Réflexions en cours sur la tomographie -> sans doute très dur, vu avec monsieur Rolland Fleury

Possibilité de passage de la licence de radio-amateur et d'utiliser l'antenne du CSEP pour faire des mesures d'émission

Réflexions sur la miniaturisation du système -> très peu matures, besoin de voir les signaux