

IONOSPHERE & GPS

ROLLAND.FLEURY@IMT-ATLANTIQUE.FR

SOMMAIRE

1. L'IONOSPHERE
2. LA PROPAGATION SPATIALE
3. VTEC
4. SCINTILLATION

Question : Pourquoi le GNSS conçu comme un système de Navigation, Positionnement, Temps (PNT) est également un système d'observation de l'ionosphère ?

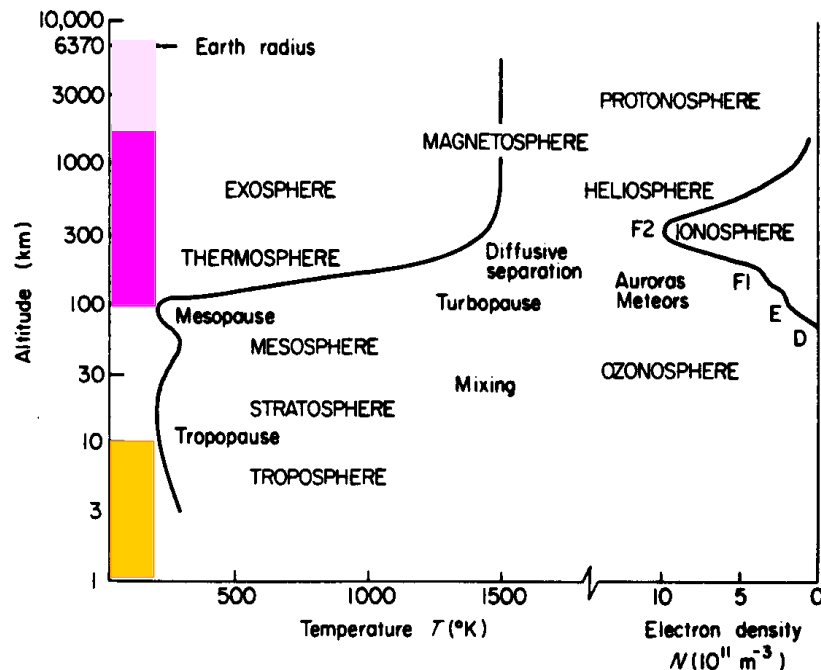
Réponse :

- Morphologie de l'ionosphère
- Propagation des ondes radioélectriques dans l'espace
- Mesures GNSS : les formats RINEX (v-2 -3 -4)
- Paramètres déduits : vTEC & Scintillation

L'IONOSPHERE

L'atmosphère terrestre

2



L'IONOSPHERE & GPS

L'atmosphère terrestre

> 600 km EXOSPHERE Collisions
peu fréquentes
Particules en orbites balistiques

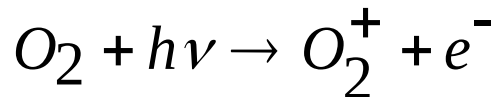
80-600 km THERMOSPHERE
Ionisation par le rayonnement solaire X-
EUV IONOSPHERE

30-80 km MESOSPHERE
Absorption des rayons solaires UV par
l'ozone

11-30 km STRATOSPHERE
Turbulence

0-11 km TROPOSPHERE
Phénomènes météorologiques

- Ionosphère = plasma électriquement neutre
- **particules neutres (N_2, O_2, O) et H (exosphère)**
- **particules chargées (ions +, électrons e^-)**
- Densité électronique N_e = nb d'électrons par unité de volume
- Équation de continuité N_e : traduit l'équilibre entre la production, la recombinaison, les mouvements verticaux et horizontaux
- Production par le rayonnement UV et RX émis par le Soleil, exemple



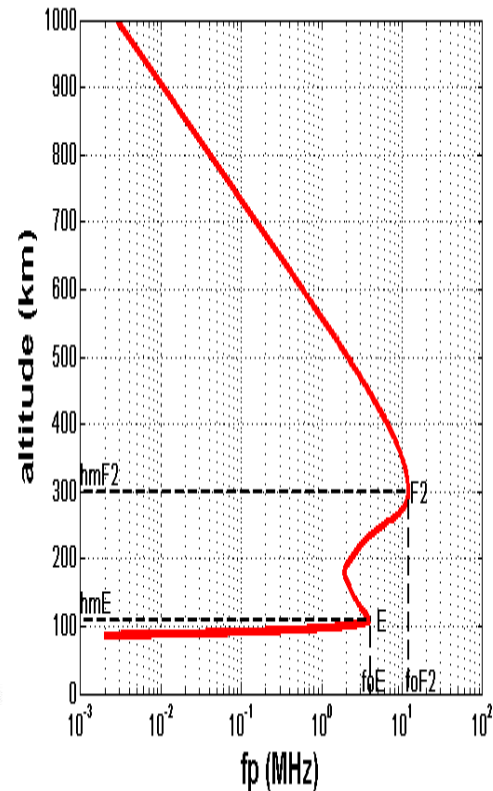
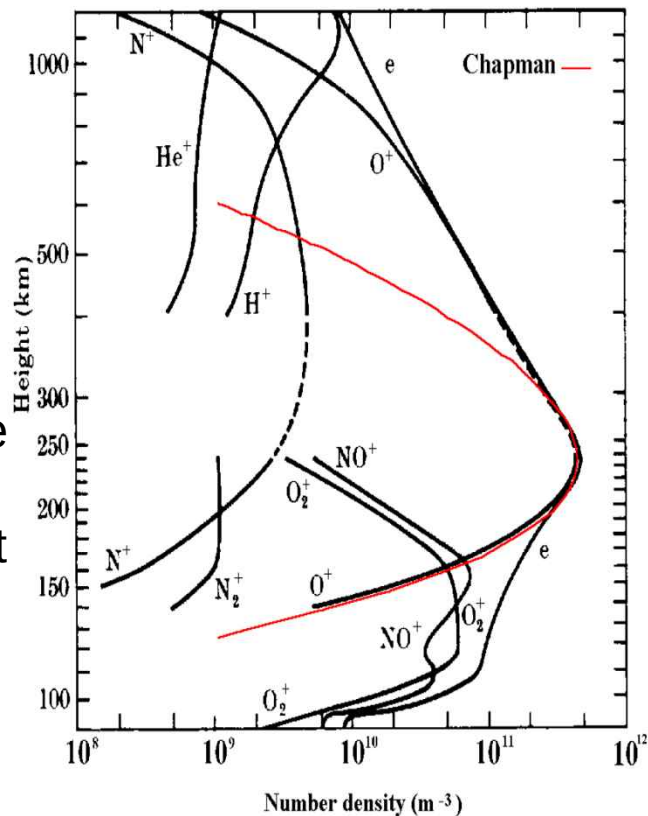
- Profil de densité électronique sous forme de régions stratifiées verticalement entre 80 et 1000 km (couches ionosphériques) : D, E, F

L'IONOSPHERE

Le profil vertical d'ionisation

6

- Composants atmosphériques différents selon l'altitude
- Large spectre de rayonnement solaire ionisant
- Grandes mouvements verticaux et horizontaux de l'ionisation
- Variabilité dans le temps et l'espace



L'IONOSPHERE

La fréquence plasma

7

Lame de plasma formée par la séparation électrons/ions +
déplacement des bords de x champ crée (rouge)

Équilibre force de sens opposé (bleu) $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = - \frac{N_e e x}{\epsilon_0}$
Équation du mouvement d'1 el

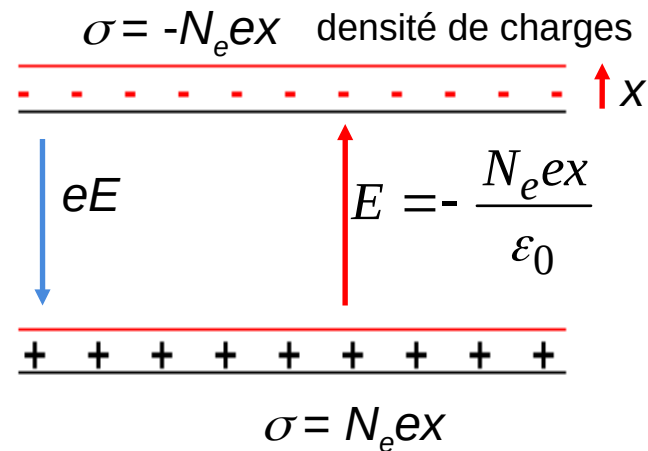
$$\ddot{x} = \frac{e}{m} E = - \frac{N_e e^2}{m \epsilon_0} x$$

Résolution (oscillations)

$$\omega_p^2 = \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m}$$

Fréquence plasma

$$f_p (\text{Hz}) \approx 9 \sqrt{N_e (\text{m}^{-3})}$$

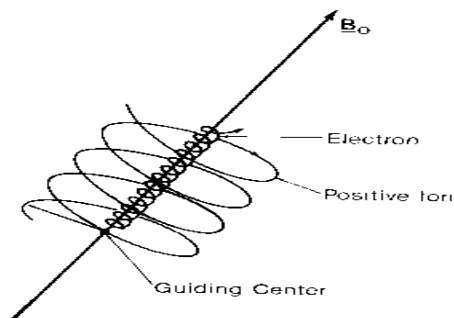


$$N_e = 10^{12} \text{ el.m}^{-3} \quad f_p = 9 \text{ MHz}$$

Mouvement d'une particule chargée dans le champ magnétique terrestre B_0

Force centrifuge = force de Lorentz

$$ev_{\perp} B_0 = e\omega_H r_H B_0 = m\omega_H^2 r_H$$



$$\omega_H = \frac{|e|\hbar}{m} B_0$$

gyrofréquence électrons : $f_H(\text{MHz}) = 2,8 B_0 \text{ (G)}$

	Rayon de Larmor r_H	Gyrofréquence f_H
Électrons	2 cm	1,2 MHz
Ions O+	4 m	50 Hz

- Régime permanent, 1 fréquence
Temporel fréquentiel $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$
Mouvement d'un électron

$$\ddot{x} = \frac{e}{m} E = j\omega \dot{x} \quad \dot{x} = -(j\omega) \frac{e}{m\omega^2} E$$

- Courant de conduction J_c

$$J_c = N_e e v = -(j\omega) \frac{N_e e^2}{m\omega^2} E$$

- Courant de déplacement J_d

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} = j\omega \epsilon_0 E$$

- Courant total

$$J_d + J_c = j\omega \epsilon_0 \left(1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \right) E = j\omega \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) E$$

Identification à un milieu diélectrique de permittivité ϵ

$$J_c + J_d = j\omega\epsilon_0 \left(1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \right) E = j\omega\epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) E = j\omega\epsilon E$$

d'où

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)$$

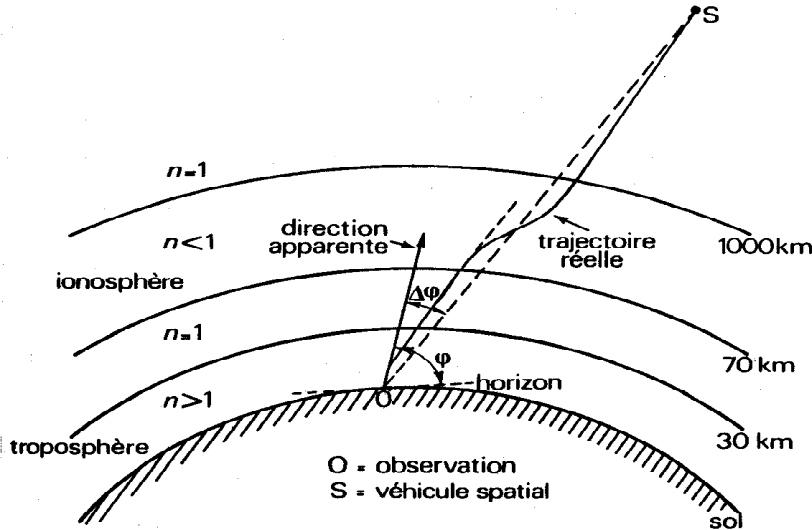
définition de l'indice de réfraction :

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}$$

- Conclusion 1: $n=n(f)$, l'ionosphère est un milieu dispersif en fréquence
- Conclusion 2: $n \leq 1$ $v_{\phi} \geq c$

$n=$



Courbure des rayons

- Pour $h < h_m$: $\frac{dn}{dh} < 0$

Les rayons s'écartent de la normale

- Pour $h > h_m$: $\frac{dn}{dh} > 0$

Les rayons se rapprochent de la normale

Application : satellites radar par mesure d'angles d'arrivée pour localiser un émetteur

➤ Déphasage d'une onde $d\varphi$ sur une distance ds : $d\varphi = kds$

k = vecteur d'onde

$$k = \frac{\omega}{v_\varphi} = \frac{\omega}{c/n} = \frac{\omega}{c}n = \frac{2\pi f}{c}n = \frac{2\pi}{cT}n = \frac{2\pi}{\lambda_0}n$$

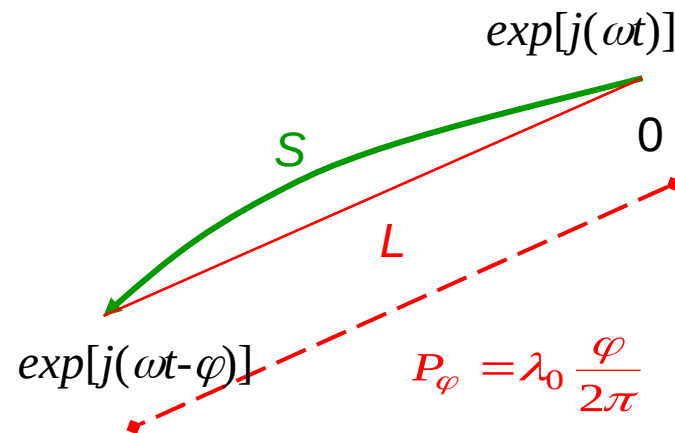
$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \int n ds = \frac{2\pi}{\lambda_0} P_\varphi$$

P = longueur du chemin de phase

= longueur à parcourir par une onde dans le vide pour avoir un déphasage φ

L = trajet géométrique

S = rayon électromagnétique



$f=1575.42$ MHz, la phase fait 1 tour ou 360° tous les 19.04 cm (λ_0) !

➤ Mode o ou approximation QL

$$P_{\varphi} = \int_S n ds \approx \int_S ds - \frac{1}{f^2} \int_S f_p^2 ds$$

Signe - : raccourcissement /géométrique avance de phase

$$\Delta P = P - L = \int_S (n - 1) ds$$

$$\Delta P = - \frac{a}{f^2} \int_S N_e ds$$

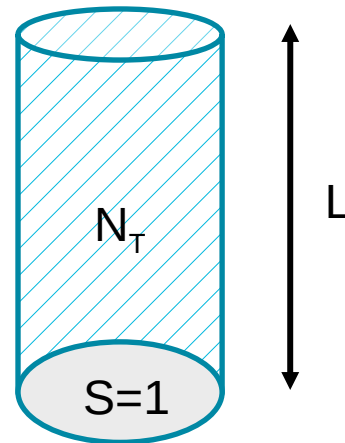
$$a = 40.3 \text{ m}^3 \text{ Hz}^2$$

➤ Contenu total électronique (TEC en anglais)

$$\int_S N_e ds \approx \int_L N_e dl = N_T$$

$$\Delta P_{\varphi} = - a \frac{N_T}{f^2}$$

Valeurs typiques de N_T : 10^{16} el/m^2 (1 tecu) – 10^{19} el/m^2 (1000 tecu)



➤ Indice de groupe

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c \frac{\partial k}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega}(\omega n) \sim \frac{\partial}{\partial \omega}[(\omega^2 - \omega_p^2)^{1/2}] = \frac{1}{n} \quad \text{Inverse de l'indice de phase}$$

Pour $f < 100$ MHz, ordre 1

$$n_g \approx 1 + a \frac{N_e}{f^2}$$

➤ Chemin de groupe

$$P_g = \int_S n_g ds \approx L + \frac{1}{f^2} \int_S f_p^2 ds$$

Signe + : retard de groupe

$$\Delta P_g = - \Delta P_\varphi \approx a \frac{N_T}{f^2}$$

Retard du temps de groupe:

- Proportionnel au TEC
- Inversement proportionnel au carré de la fréquence

LA PROPAGATION

Le chemin de groupe

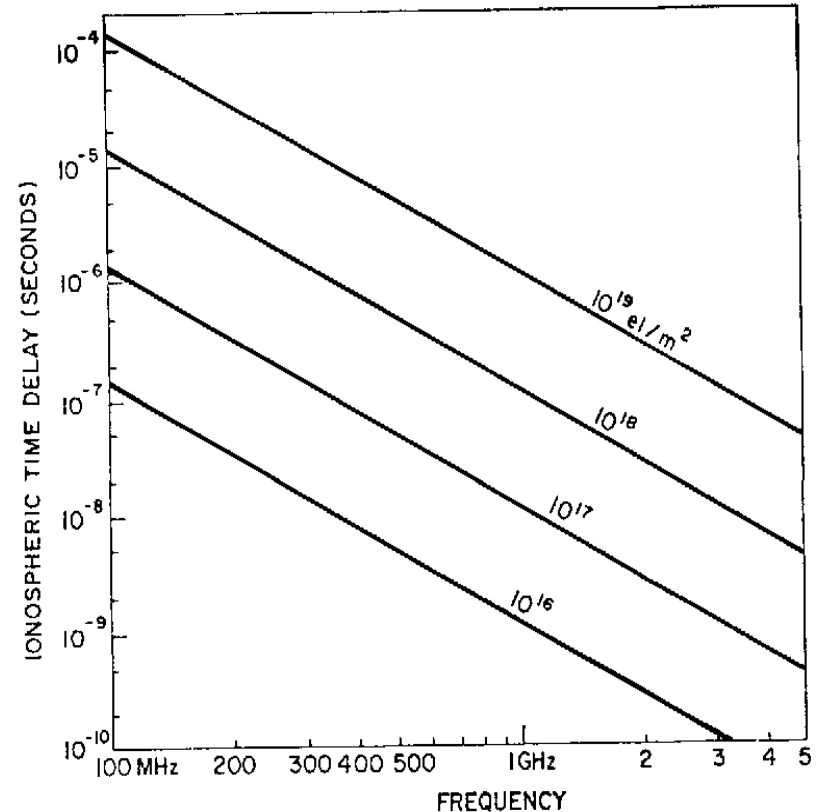
15

Ex: estimer le retard de propagation et celui lié à l'ionosphère pour un satellite GPS à 24000 km, $f=1.6\text{GHz}$ et $N_T=50\text{ tecu}$?

$$\Delta t_g = \frac{1}{c} (P_g - L) = \frac{a}{cf^2} N_T$$

$$\triangleright T_{\text{geom}} = 24000/3 \times 10^5 = 80\text{ ms}$$

$$\triangleright T_{\text{iono}} = aN_T/c/f^2 = 26\text{ ns (7.8 m)}$$



Rappels sur les équations

Vitesse de groupe variable, inconnue : hypothèse de la vitesse de la lumière c d'où l'utilisation du mot pseudo. Mesure de pseudo-distance (m)

$$P_u^s(f) = \rho_u^s + c \left[b_u(f) - b^s(f) \right] + T_u^s + \frac{a}{f^2} N_s + \alpha_u^s(f) \quad \begin{array}{l} N_s = \text{STEC entre } s \text{ et } u \\ a = 40,3 \end{array}$$

$$\underbrace{P_u^s(f_1) - P_u^s(f_2)}_{P1 - P2} = c \underbrace{\left[b_u(f_1) - b_u(f_2) \right]}_{\Delta b_u} - c \underbrace{\left[b^s(f_1) - b^s(f_2) \right]}_{\Delta b^s} + \underbrace{a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}_{C_I} N_s + \underbrace{\alpha_u^s(f_1) - \alpha_u^s(f_2)}_{\text{supposé}}$$

$$P1 - P2 = P4 = C_i * \text{STEC} + \Delta b_{\text{rec}} - \Delta b_{\text{sat}} \quad \text{négligeable}$$

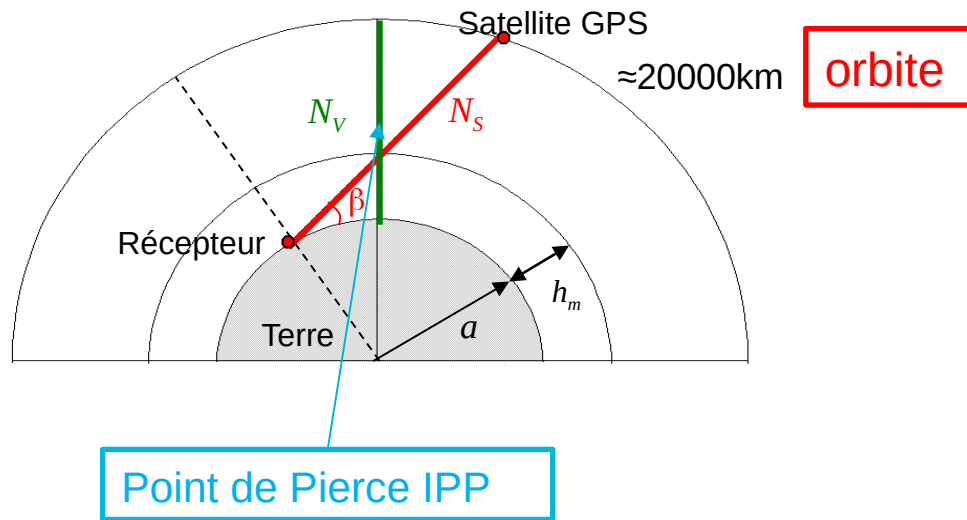
STEC relatif : Differential Code Bias (DCB) $\Delta b_{\text{rec}} = \Delta b_{\text{sat}} = 0$

utilisation du GNSS pour le suivi de l'état de l'ionosphère pour $f > 10^6$

Loi de la sécante : 'Mapping function'

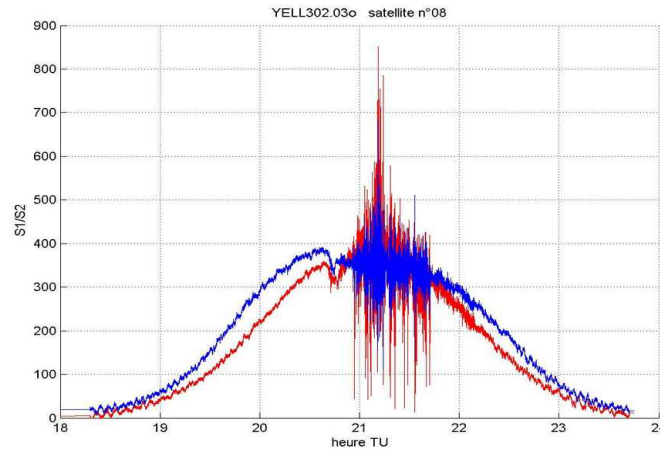
$$N_s = N_v \sqrt{1 - \left(\frac{a}{a + h_m} \cos \beta \right)^2}$$

$$h_m = 450 \text{ km}$$

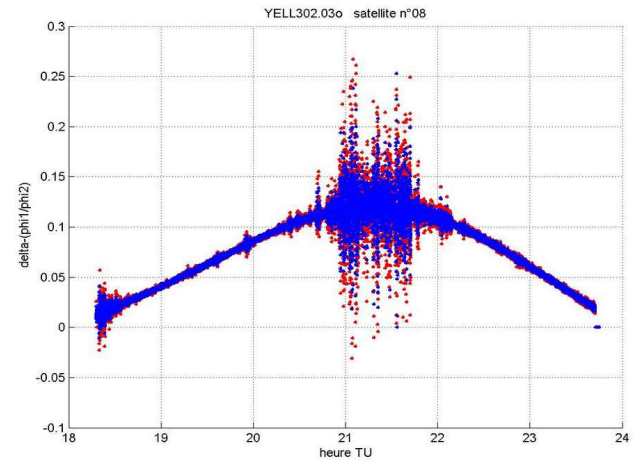


Fluctuations rapides du signal dues aux inhomogénéités du milieu

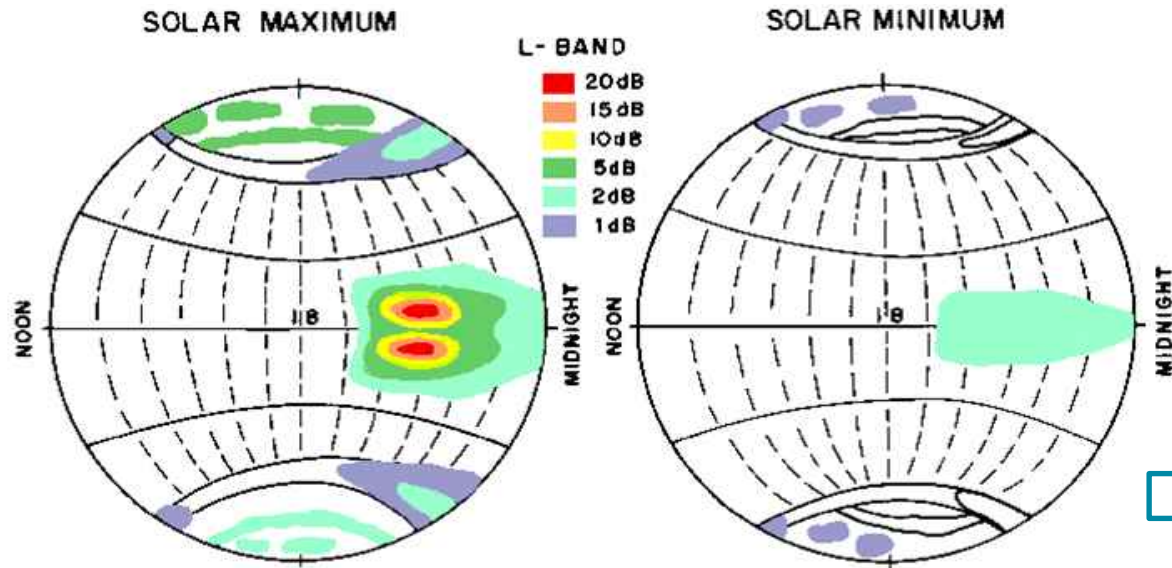
*Scintillation
d'amplitude*



*Scintillation
de phase*



Phénomène équatorial nocturne et auroral



BASU et al.,JATP,2002

Indices de scintillation (typiquement toutes les mn)

Constructeurs: Novatel, Septentrio, ...

Indice d'amplitude (rapport de l'écart-type de la puissance sur la puissance moyenne)

$$S_4 = \frac{\sqrt{P^2 - \bar{P}^2}}{\bar{P}} = \frac{\sqrt{\sum (P - \bar{P})^2}}{\bar{P}}$$

P = puissance du signal

= moyenne temporelle de P

$0 < s_4 < 0.3$ faible scintillation

$S_4 > 1$ régime de saturation

Indice de phase (écart-type de la phase en rad)

$$\sigma_\Phi = \sqrt{\langle \Phi^2 \rangle - \langle \Phi \rangle^2}$$

Indice ROTI

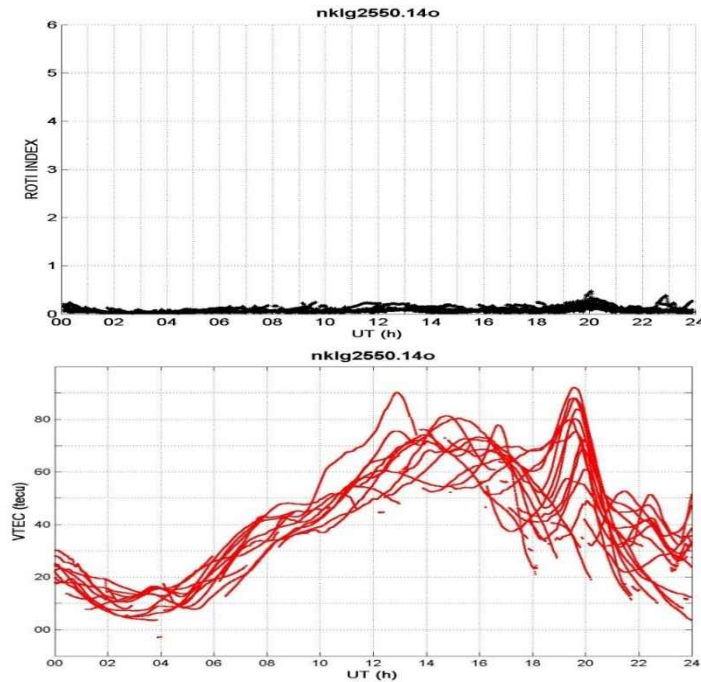
Définition (Pi et al., 1997)

Calcul de ROT 'Rate Of TEC' en tecu/mn

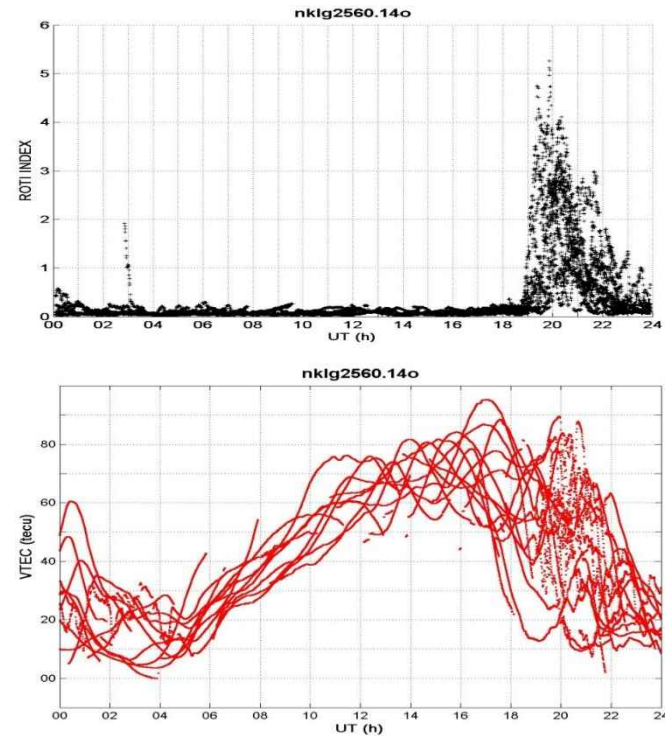
Gradient du STEC à partir des mesures de phase sur les fichiers rinex 30s

Indice ROTI = RMS de ROT, intervalle de 10 mn (20 pts) pour une élévation au dessus d'un seuil (20°) pour éviter l'influence des multi trajets (version IMT)

ROTI & VTEC/phase : Phénomène nocturne (19-24 TL) aux basses latitudes

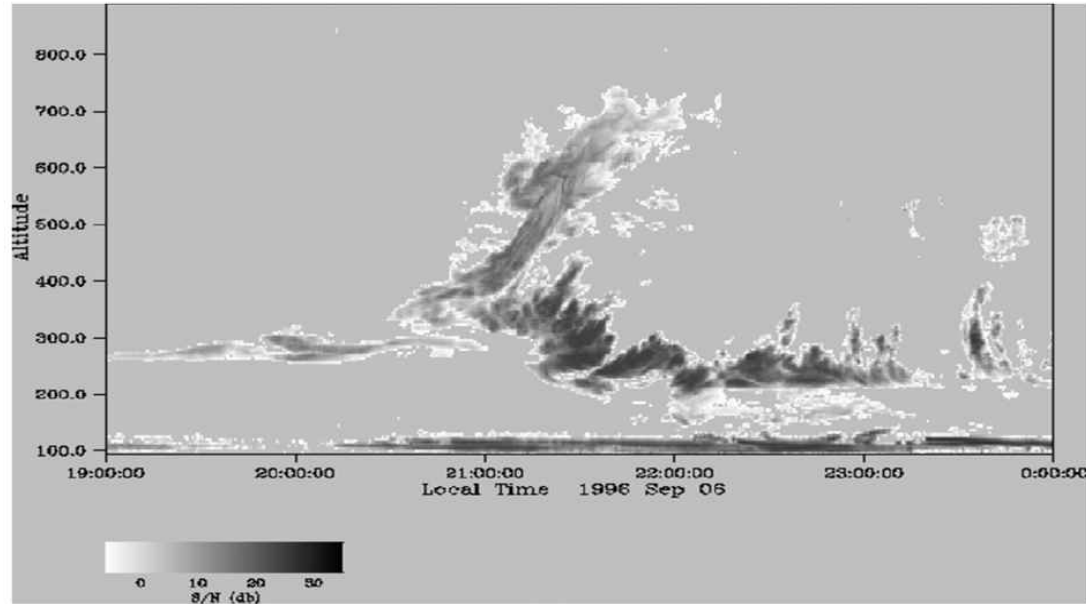


L'IONOSPHERE & GPS

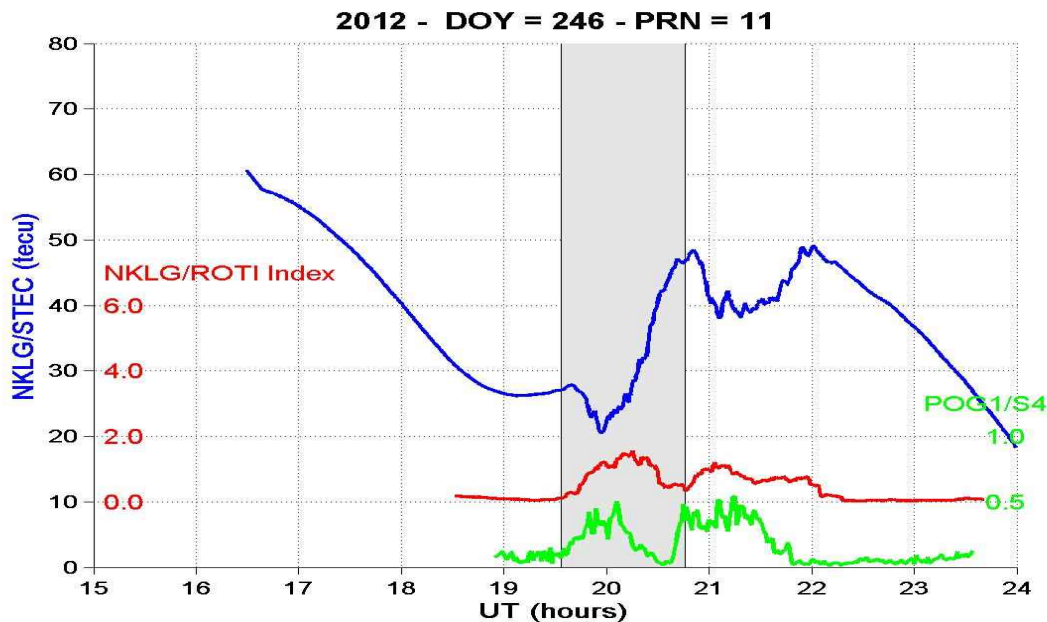


EPB : 'Equatorial Plasma Bubble' = structures sous-ionisées après le coucher du Soleil

Mesures SNR par le radar cohérent (50 MHz) Julia, Jicamarca (Pérou)



bulles EPB 'Equatorial Plasma Bubble'



TU

Receiver INdependent EXchange Format (RINEX)

Hatanaka compressé

RINEX-2

nklg3000.09d.gz

RINEX-3/-4

NKLG00GAB_R_20221830000_01D_30S_MO.crx.gz



Les 2 formats ne sont pas compatibles

Translation de RINEX 3 en RINEX 2

Application gfzrnrx

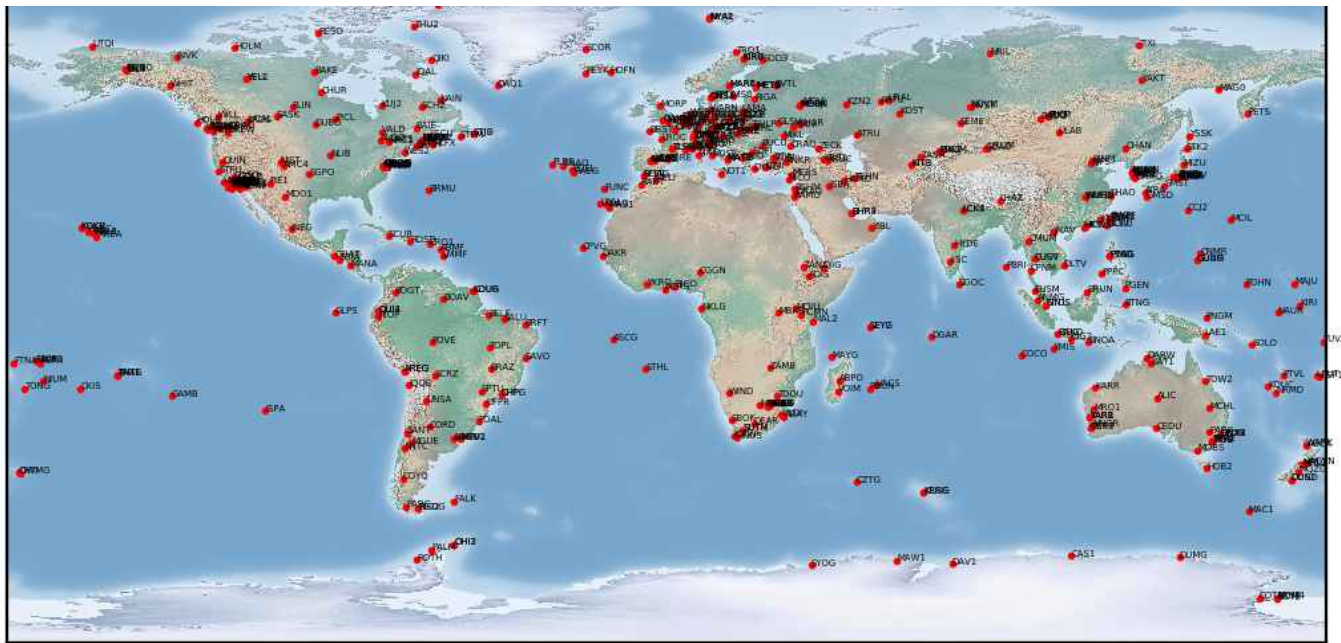
Site : <https://gnss.gfz-potsdam.de/services/gfzrnrx>

LES MESURES

Le réseau IGS

26

<https://igs.org/> : 519 stations le 8/09/2024



Davies, K., Ionospheric radio, Peter Peregrinus Ltd., ISBN 0-86341-186-X, 1990

Leick A., GPS satellite surveying, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-30626-1, 1995

Bidaine, B., Modelling the mid-latitude ionosphere, assessment of the NeQuick model using GPS TEC and ionosonde data, Master Thesis of university of Liege, 91p., 2007

El-Gizawy, M.L., development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users, Thesis of university of Calgary, 174p., 2003

Komjathy, A., Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system, Thesis of university of New Brunswick, 265p., 1997

Memarzadeh, Y., Ionospheric modeling for precise GNSS applications, Thesis of university of Delft, 234p., 2009

Nohutcu, M., Development of a Matlab based software package for ionospheric modeling, Thesis of the middle east technical university, 131p., 2009

Sammuneh, M.A., Contribution au positionnement en temps réel par GPS, prediction de la correction ionosphérique, Thèse de l'Observatoire de Paris, 147p., 2003

Schaer, S., Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system, Thesis of university of Bern, 228p., 1999

Van Der Merwe, S.J., Characterisation of the ionosphere over the south atlantic anomaly by using a ship-based dual-frequency GPS receiver, Thesis of university of Prétoria, 155p., 2011