



Institut
Mines-Télécom

GPS et IONOSPHERE

Formation Rabat

Janvier 2017

Rolland FLEURY

IMT Atlantique, campus de Brest, France

rolland.fleury@telecom-bretagne.eu





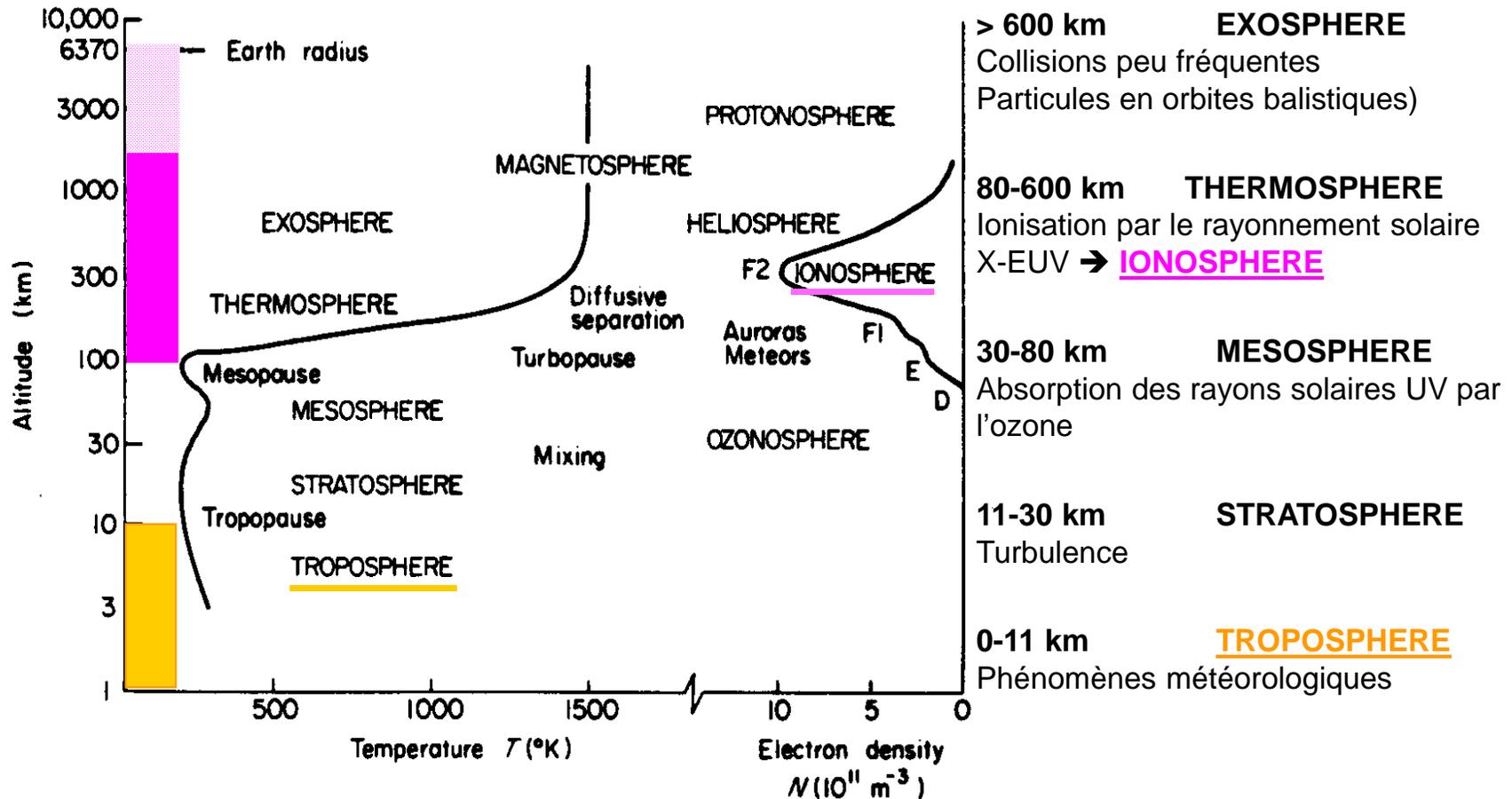
Plan

Institut
Mines-Télécom

- **L'atmosphère terrestre**
- **Ionosphère**
- **Météorologie de l'espace**
- **Influence de l'ionosphère sur la propagation**
- **modélisation du TEC**
- **La scintillation ionosphérique**



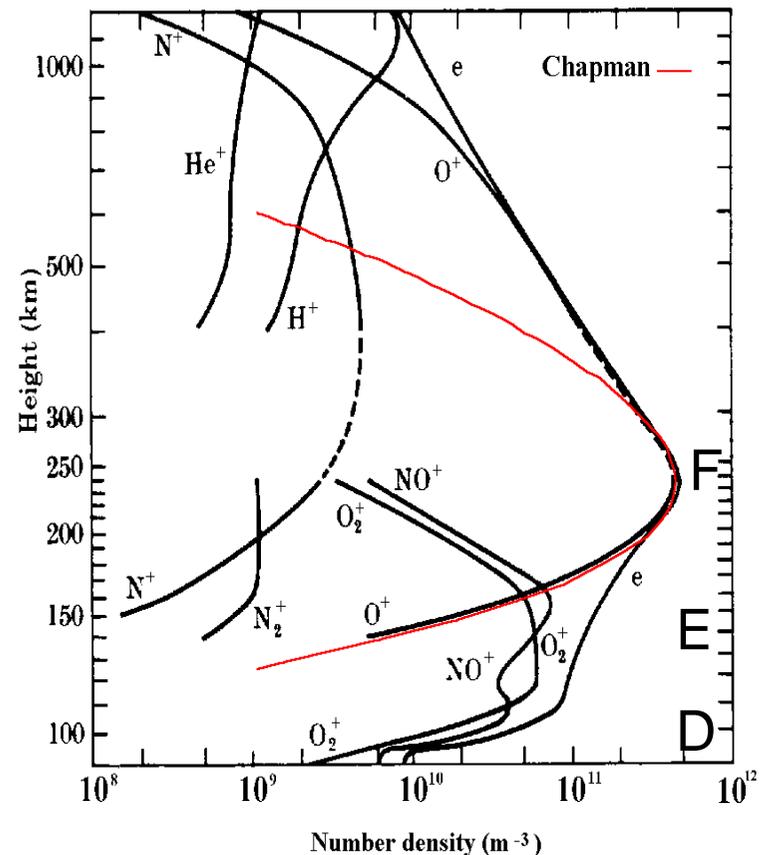
L'atmosphère terrestre



Le profil vertical de l'ionosphère

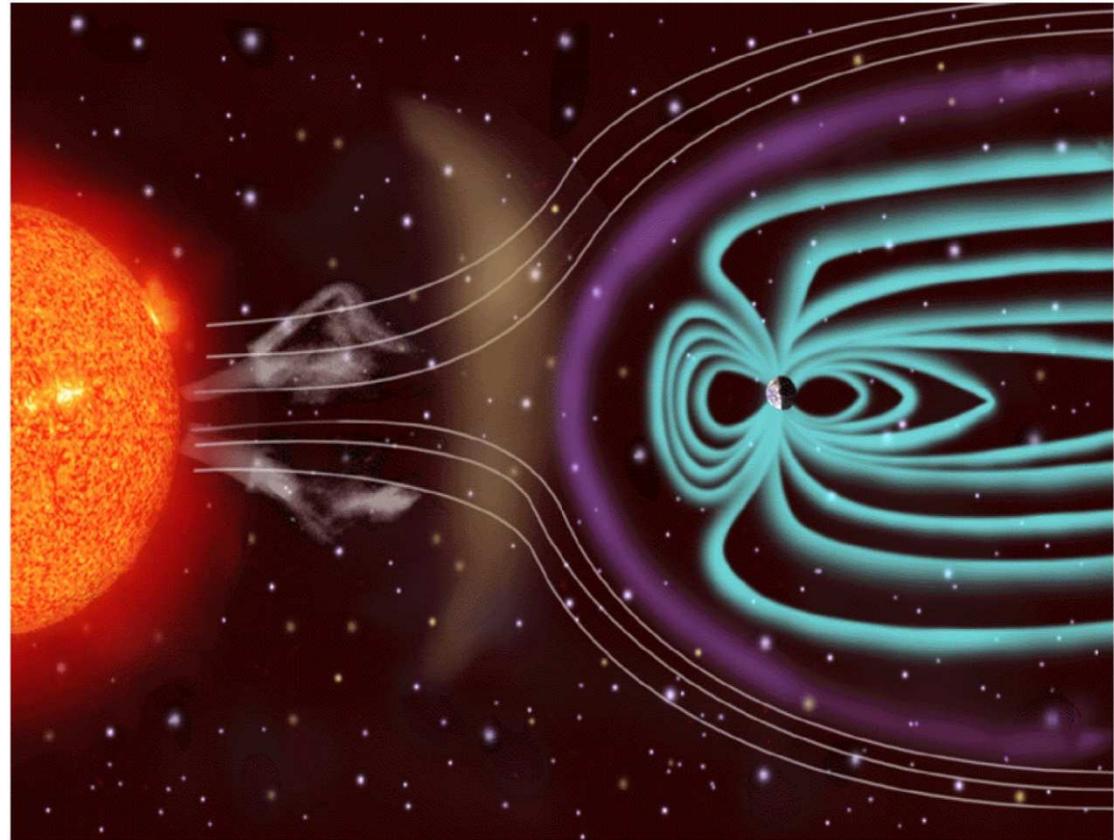
■ Morphologie

- Couches E, F entre 90 et 2000 km
- Région F la plus ionisée
 - Constituant principal O^+
 - $N_{\max} = \text{qq } 10^{12} \text{ électrons/m}^3$
 - $h_{\max} = 200\text{-}400 \text{ km}$
- Variabilité temporelle et spatiale
 - Cycles : L'ionisation dépend du rayonnement solaire \Rightarrow Cycles diurne, saisonnier, cycle d'activité solaire (11ans)
 - Variations géographiques (latitudes)
 - Variations à court terme



■ Principaux phénomènes

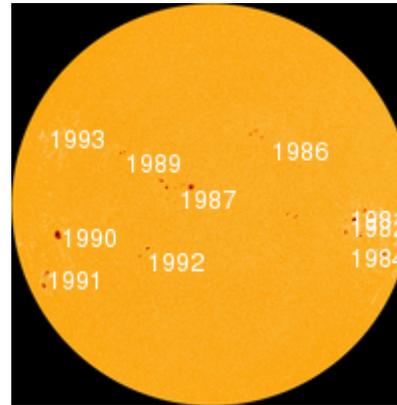
- Flux solaire RX et UV
- Eruption solaire (CME) et Trou coronal (HSS)
- Vent solaire
- Composante du champ interplanétaire IMF
- Magnétosphère
- Précipitation de particules (zones aurorales)
- Sous orage et orage magnétique
- perturbation ionosphérique



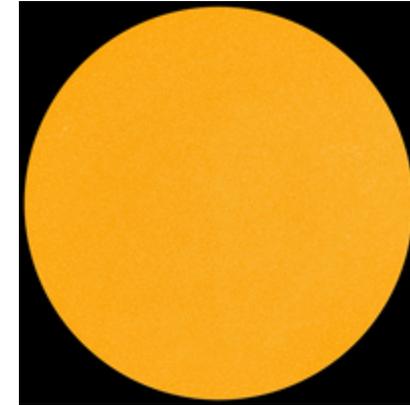
Météorologie de l'espace

■ activité solaire taches solaires

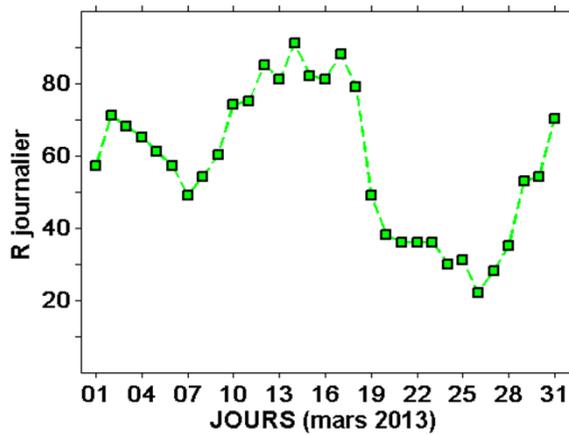
$$R_j = k(10g+f)$$



27/02/2014



08/06/2016



$$R_m = 57,9$$



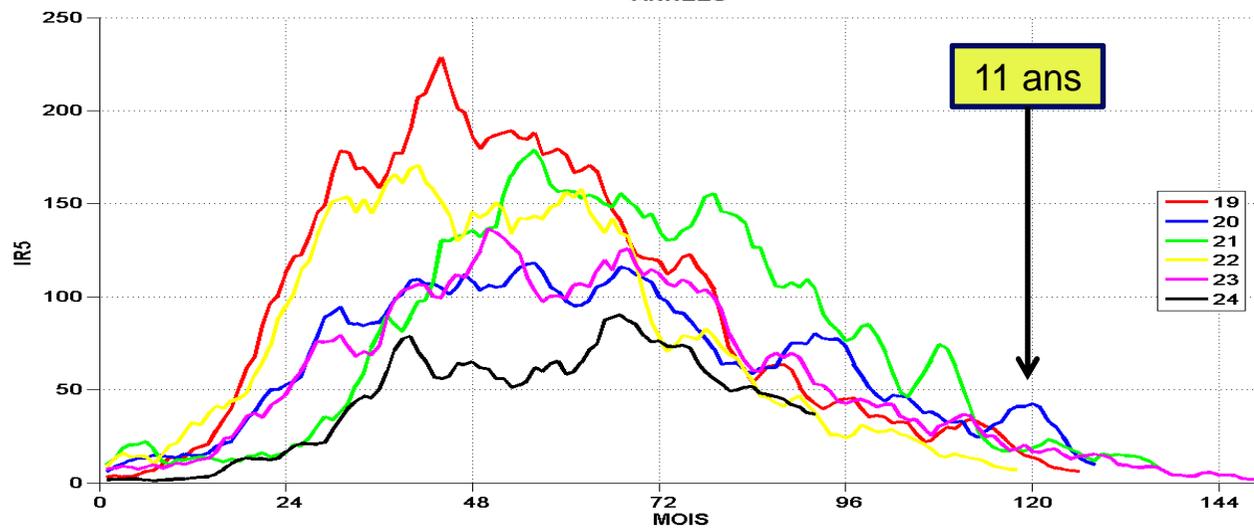
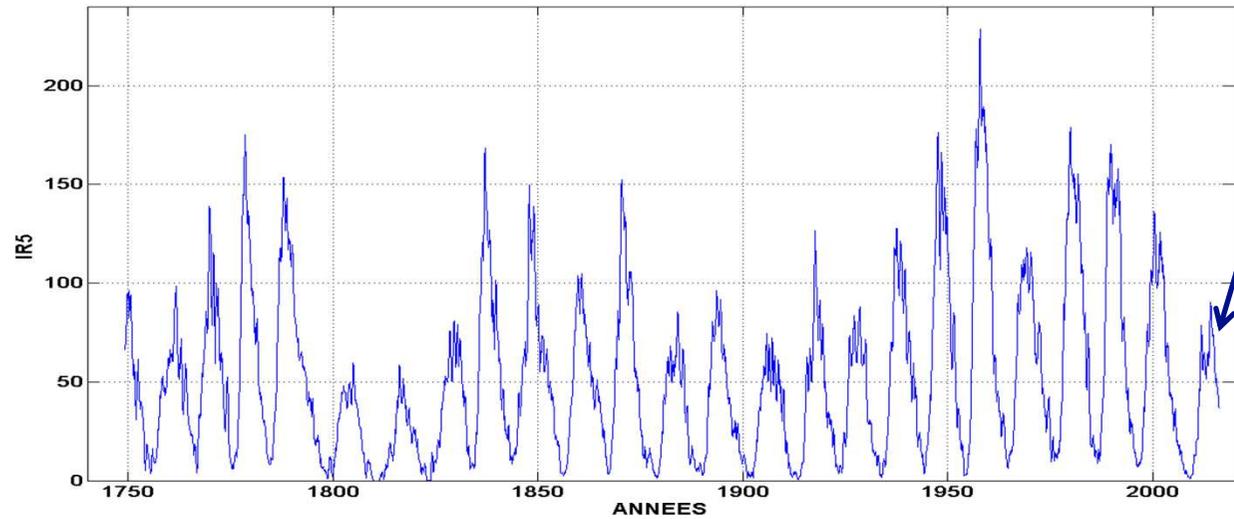
$$IR5 = 54,4$$

$$IR5(m) = \frac{1}{5} \sum_{i=m-3}^{m+1} R_i$$



Météorologie de l'espace

Cycle solaire



Cycle 24

11 ans

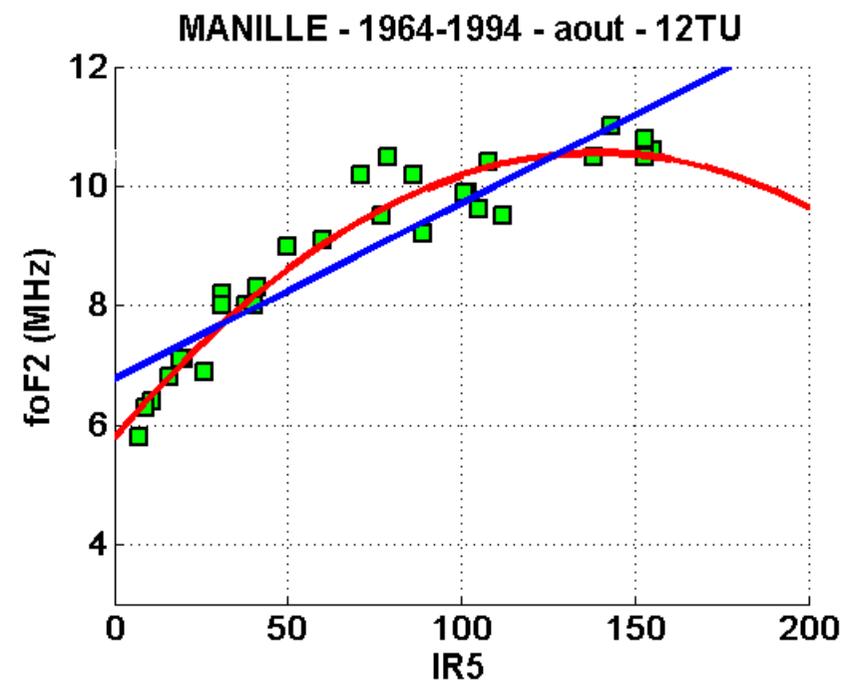
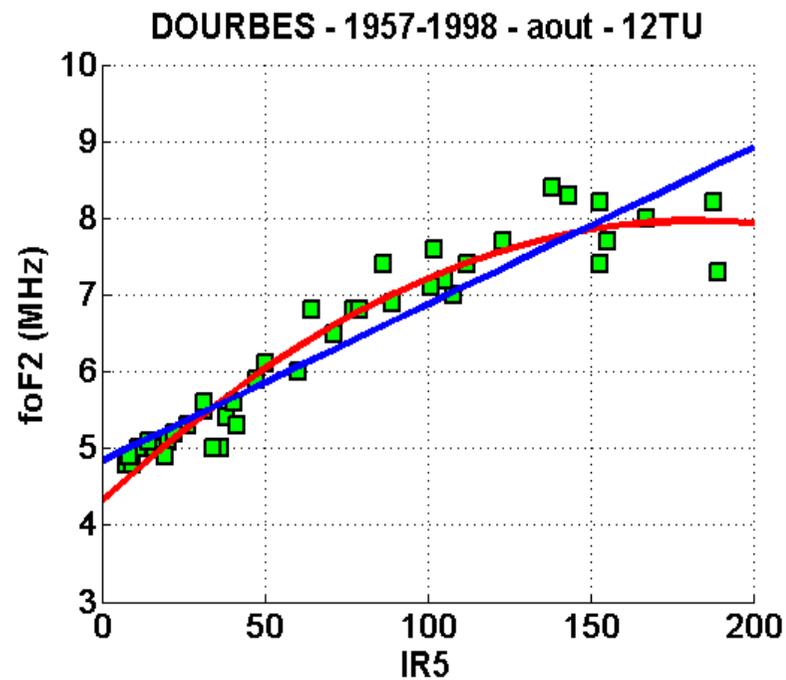
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24

Météorologie de l'espace

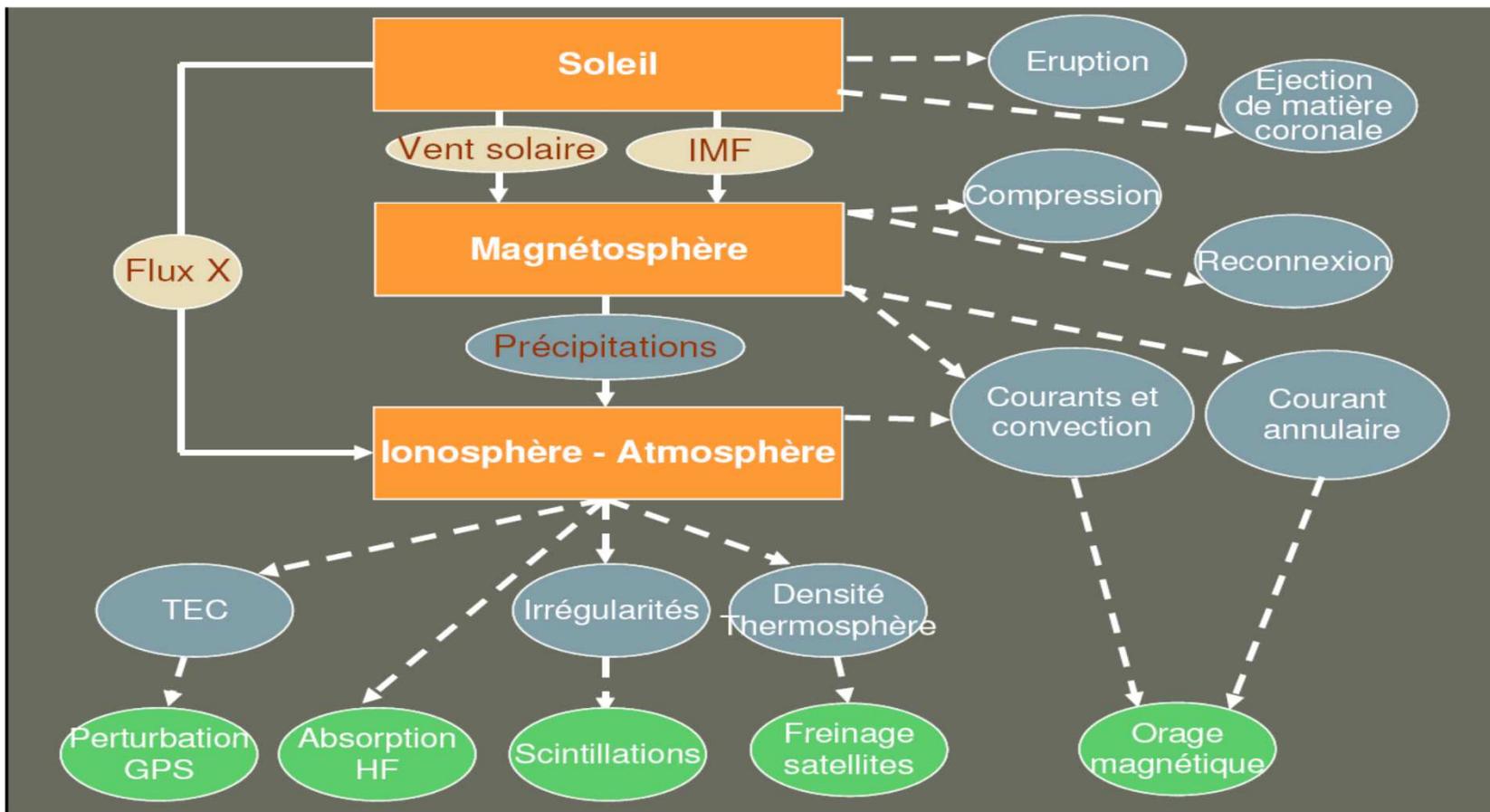
■ Relation entre activité solaire et ionisation

Corrélation statistique des valeurs mensuelles: foF2 médian & IR5

→ Prévision statistique médiane des paramètres du profil d'ionisation



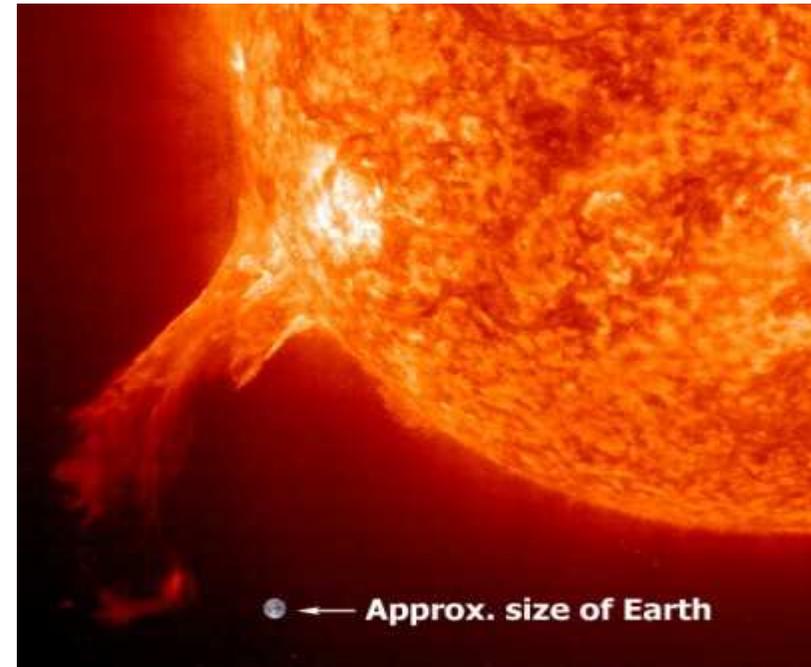
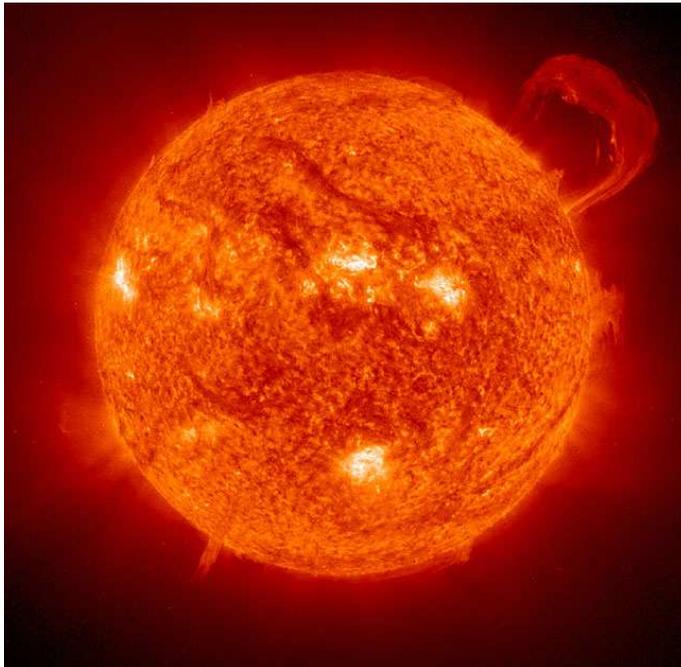
■ Chaîne du processus dans la relation perturbée



■ Activité solaire : protubérances et éruptions

(source : sonde spatiale solaire SDO)

CME



Météorologie de l'espace

- **Activité solaire : trous coronaux, rotation 27 jours, images NASA/SDO**

HSSW

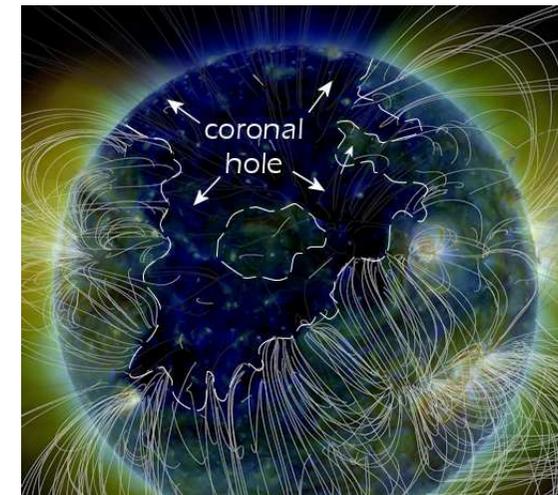


26/09/2016

24/10/2016



22/11/2016



Météorologie de l'espace

Milieu interplanétaire

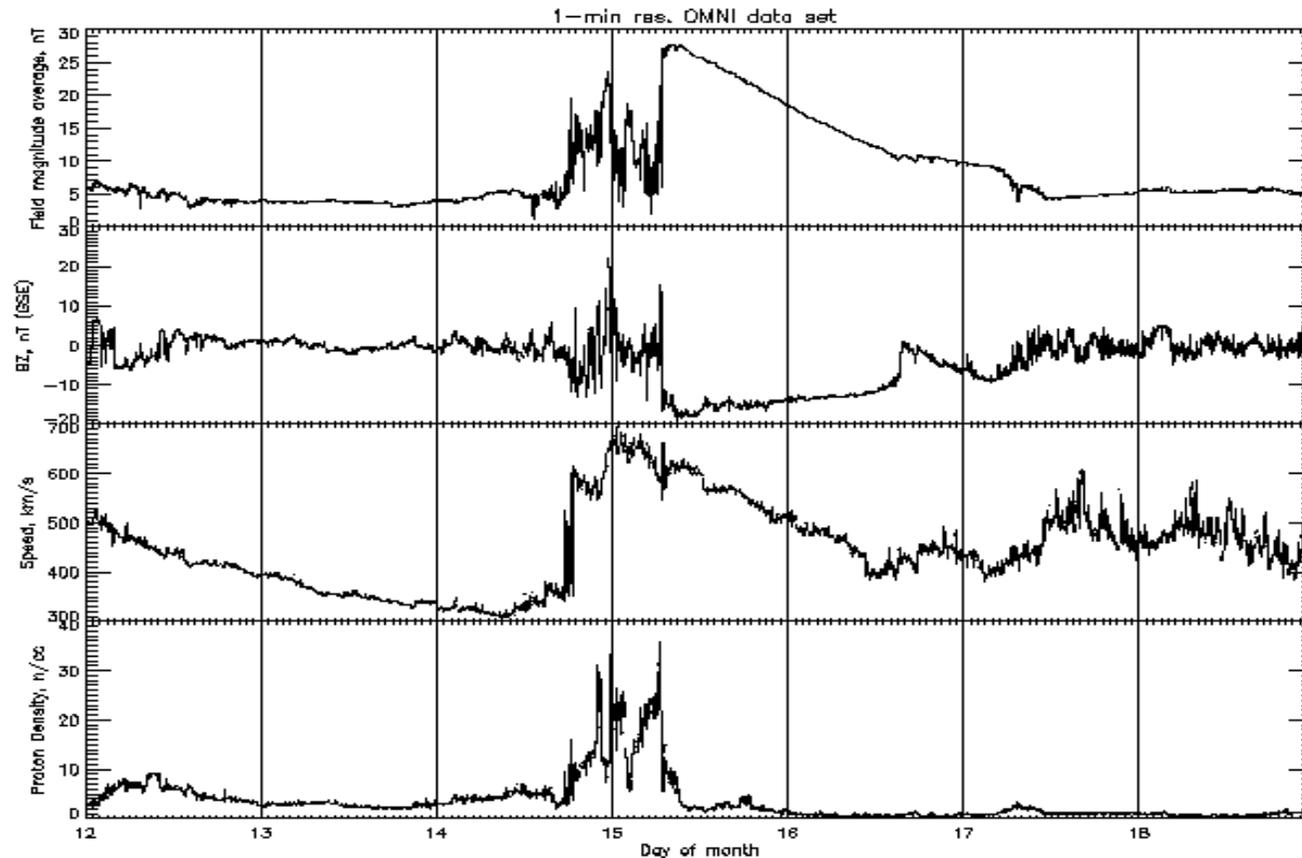
- Satellite **ACE** (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html)

B_T

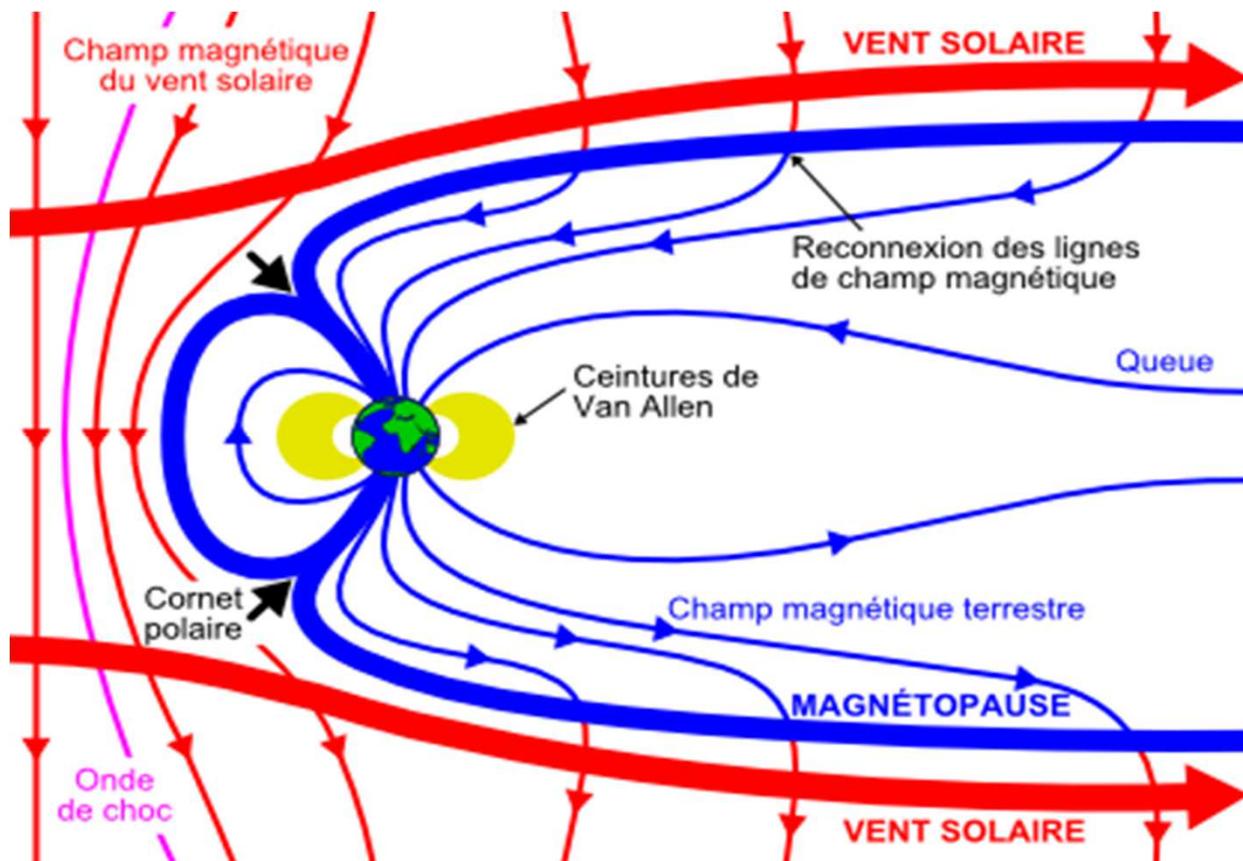
B_Z

Vitesse
(km/s)

Densité
protons

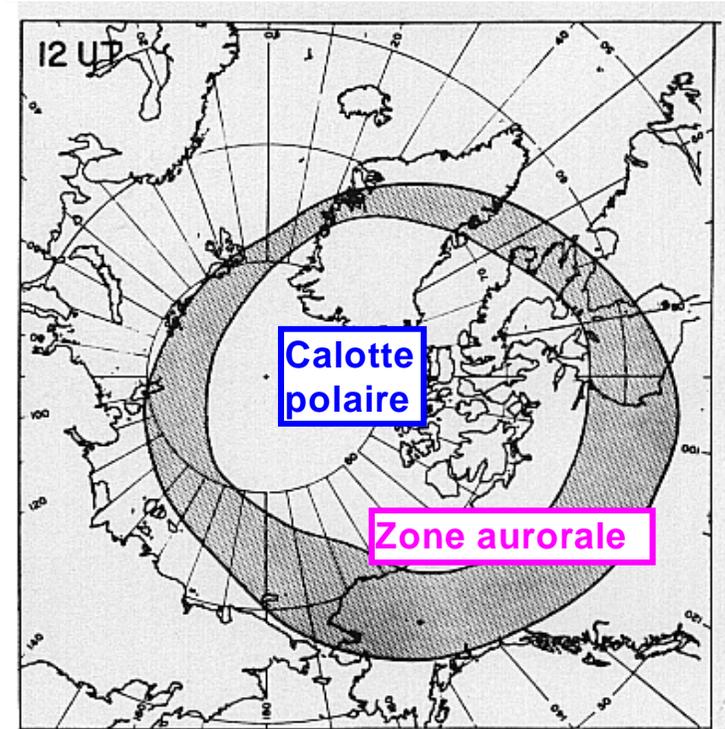
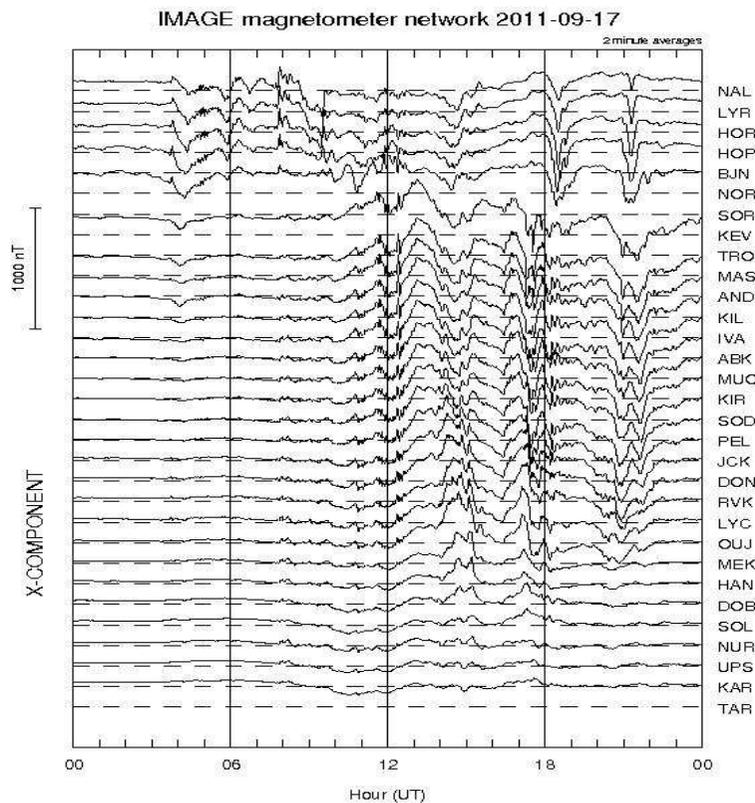


■ Relations Soleil-Terre



Météorologie de l'espace

■ Perturbation du champ magnétique et zones en latitude magnétique



Météorologie de l'espace

■ Aurores boréales

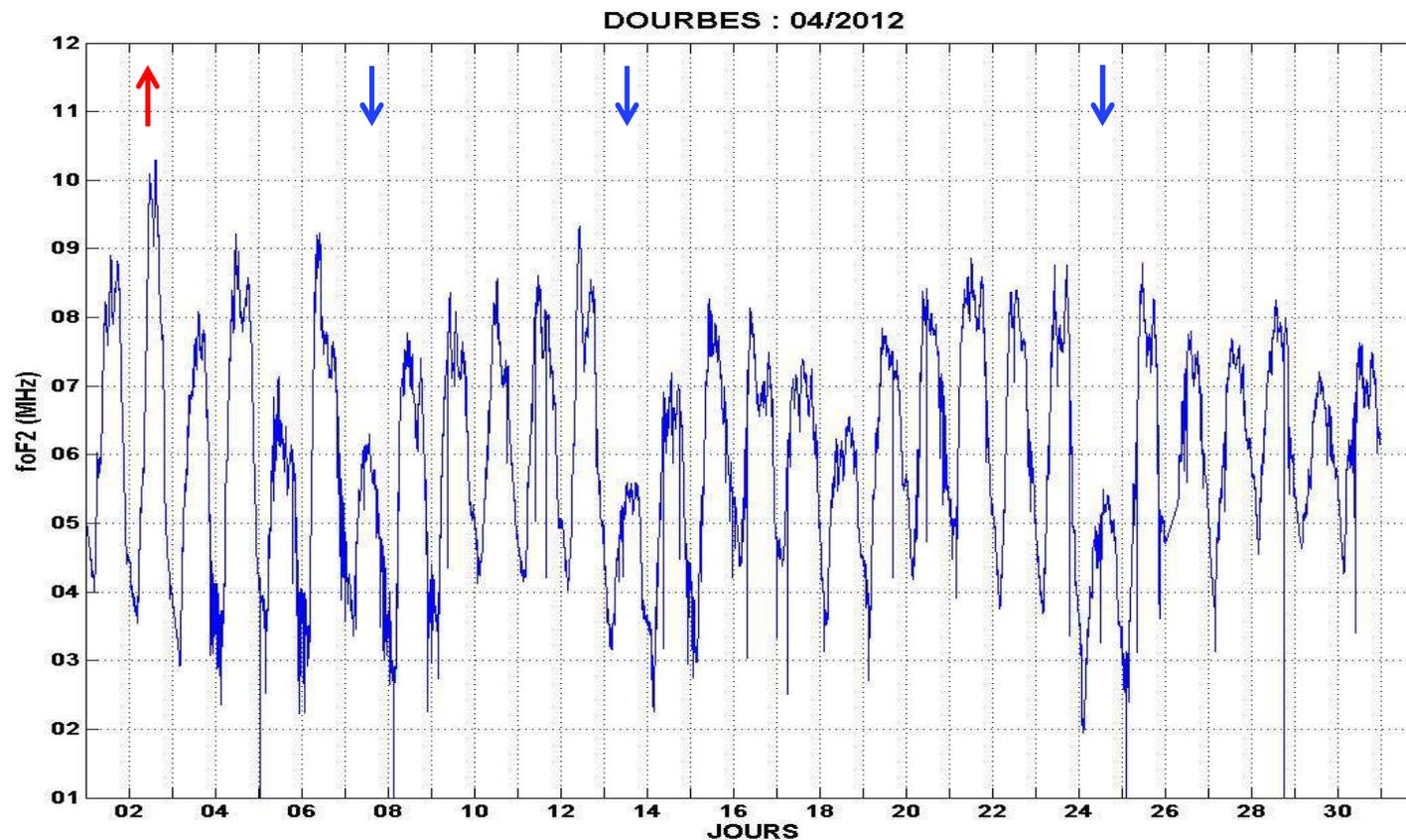
■ O₂, 05/12/2011 →

■ N₂, 24/10/2011 ↓



Météorologie de l'espace

- **Dynamique de l'ionosphère** : évolution 5 mn de la foF2 au cours du mois d'avril 2012 à Dourbes (Belgique)



Le système GPS

■ historique

■ Le système GPS : Historique

- 1965 : Mise au point du concept
- 1972 : Etudes de faisabilité
- 1974 : Validation
- 1978-1986 : Lancement de la première constellation
- 1986** : Système opérationnel
- 1989-1994 : Deuxième constellation
- 2018 : GPS III

■ 2 modes de fonctionnement

- Standard Positioning System (civil) – L1=1575,42 MHz
- Precise Positioning System (militaire) – L2=1227,60 MHz

■ Objectifs

Position

Vitesse

Temps

■ Usages civils

- Navigation maritime
- Suivi de flotte de véhicules
- Agriculture
- Géodésie, arpentage
- Services de secours
- Guidage automobiles
- Navigation aérienne
- Télécommunications mobiles

Le système GPS

■ Constellation nominale

- 6 plans orbitaux inclinés de 55° sur l'équateur
 - 4 satellites par plan orbital
⇒ 24 satellites
 - ~31/32 satellites depuis 2011
 - Orbites quasi-circulaires
Altitudes : $\approx 20\,200$ km (MEO)
Période : ≈ 12 h (demi-jour sidéral)
- ⇒ Au moins 4 satellites visibles :
- à tout moment
 - en tout point du globe

Slot	Plan					
	A	B	C	D	E	F
1	65	56	57	61	69	41
2	52	62	66	63	47	55
3	64	44	59	45	50	68
4	48	58	53	67	54	60
5	(39)	71	72	46	(23)	70
6	(27)	51	(36)	(34)	73	43

Numéro SVN sur chaque slot
Slots 5 & 6 : de rechange
(xx) Non opérationnel

Le système GPS

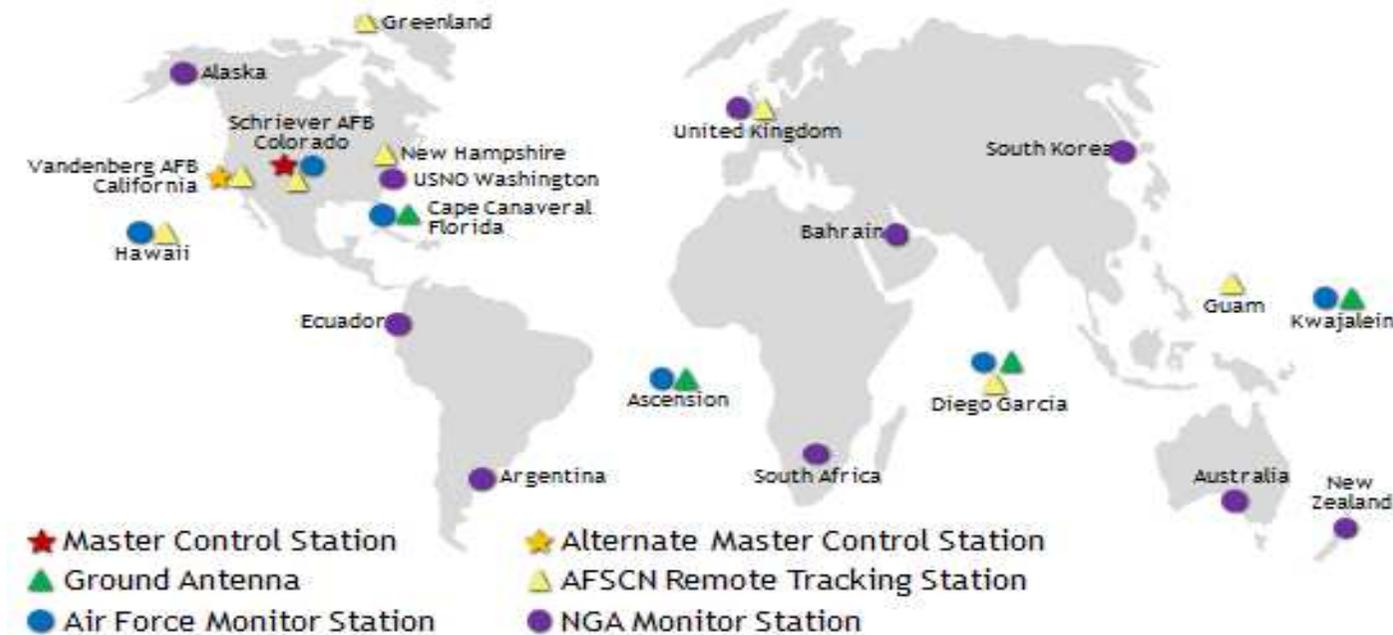
■ Segment spatial

BLOC	planning	Nombre (actuel)	Fréquences	commentaires
BLOC I	1978-1983	11(0)		Valider les concepts
BLOC II	1989-1990	9 (0)	C/A-L1 P(Y) -L1/L2	+ durée de vie (~7.5 ans) P=800w
BLOC IIA	1990-1997	19 (0)	C/A-L1 P(Y) -L1/L2	Horloges césium (2) + rubidium (2), contrôlées sol durée de vie (~7.5 ans)
BLOC IIR	1997-2009	21 (12+7)	+C/A-L2 (L2C) (IIR-M)	durée de vie (~7.5 ans) Autonomie + liaison intra 3 horloges rubidium P=1.0 kW, position 3.0m
BLOC IIF	2010-2015	12 (12)	+L5 aviation (3eme freq. civile)	durée de vie (~12 ans) 2 rubidium+1 césium P=1.9 kW, position 1.5m
BLOC III	2018-2030+	32 (0)	+L1C (4eme freq.commune GNSS civil)	durée de vie (~15 ans) 3 rubidium 9 prêts en 2014, position 0.63m

Le système GPS

■ Segment de contrôle

- Infrastructure (04/2014)
 - 6 stations de contrôle
 - 1 station maîtresse
 - Stations complémentaires
 - Responsable: 2nd Space Operations Squadron (2SOPS)
- Fonctions
 - Suivi des satellites (intégrité)
 - Acquisition, calcul et envoi aux satellites des corrections de temps et d'orbites (éphémérides)



Le système GPS

■ Segment utilisateur

- Récepteurs
 - Réception des signaux GPS
 - 10-80 canaux
 - Décodage message navigation
 - Calcul et correction des biais
 - Visualisation des résultats (IHM)
 - Intégration à des systèmes



Téléphone+GPS



GPS + Kit entraînement sportif



GPS

+ Guidage automobile



Sonar+GPS



GPS + relevés topographiques



Récepteur + antenne intégrée



Influence de l'ionosphère sur la propagation

■ Fréquence plasma

Séparation électrons-ions d'une lame de plasma : Condensateur plan

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = -\frac{N_e e x}{\epsilon_0}$$

Equation du mouvement d'un électron

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

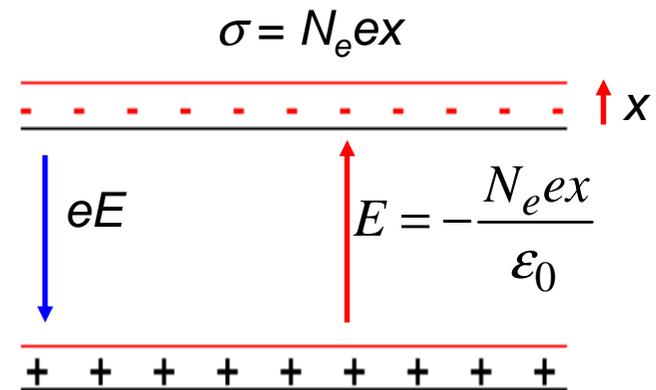
Oscillations de relaxation

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

Fréquence plasma

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

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



Influence de l'ionosphère sur la propagation

■ Indice de réfraction

Equation du mouvement
d'un électron :

$$\ddot{x} = \dot{v} = j\omega v = \frac{e}{m} E$$

$$v = -j\omega \frac{e}{m\omega^2} E$$

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

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

Equations de Maxwell : $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_d + \vec{J}_c$

Courant de déplacement : $J_d = \frac{\partial D}{\partial t} = j\omega\epsilon_0 E$

Courant de conduction : $J_c = N_e e v$



Influence de l'ionosphère sur la propagation

- Identification à un milieu diélectrique de permittivité ϵ

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

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

- Indice de réfraction

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

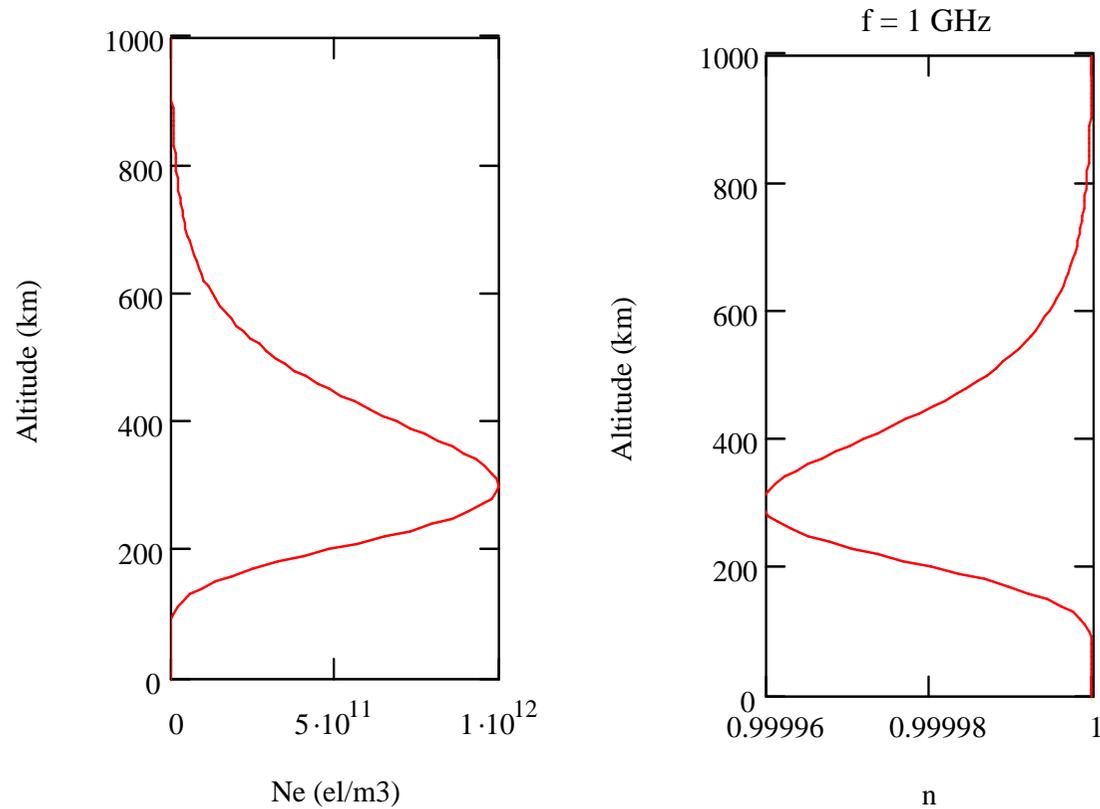
$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}$$

- Pour $f > 100$ MHz

$$n \approx 1 - a \frac{N_e}{f^2}$$

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

Influence de l'ionosphère sur la propagation



- Remarques :
- $n = n(f)$: l'ionosphère est un **milieu dispersif en fréquence**
 - $n < 1 \Rightarrow v_\varphi > c$

Influence de l'ionosphère sur la propagation

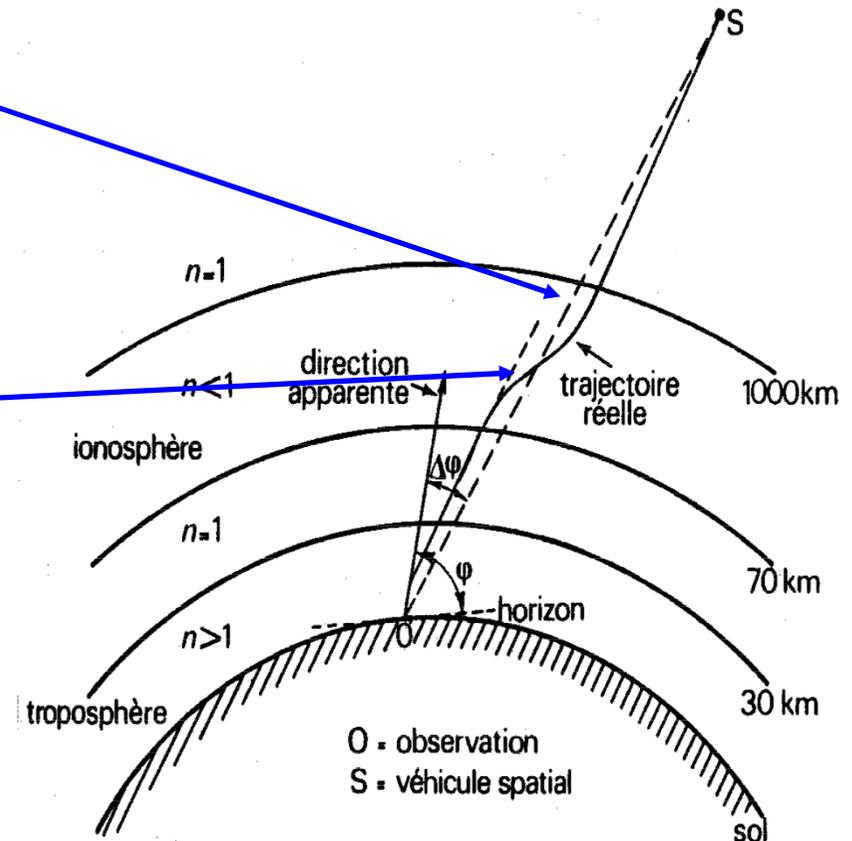
■ Courbure des rayons

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

Les rayons se rapprochent de la normale

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

Les rayons s'écartent de la normale



Influence de l'ionosphère sur la propagation

- **Avance de phase**

Déphasage d'une onde sur une distance ds :

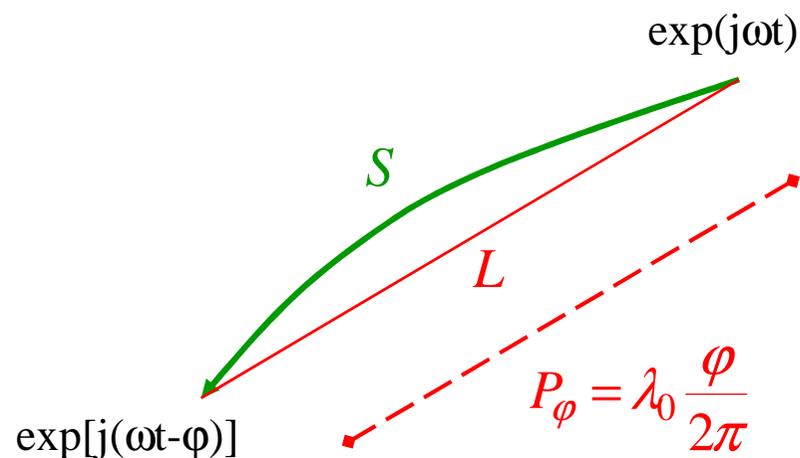
$$d\varphi = k \cdot ds = \frac{\omega}{v_\varphi} ds = \frac{\omega}{c} n \cdot ds$$

$$\varphi = \frac{\omega}{c} \int_S n \cdot ds = \frac{\omega}{c} P = 2\pi \frac{P_\varphi}{\lambda_0}$$

$$P_\varphi = \int_S n \cdot ds \approx \int_L n \cdot ds$$

Application: mesures de phase système GPS ($\lambda \sim 19\text{cm}$)

- P_φ = Longueur du chemin de phase (longueur à parcourir par une onde dans le vide pour avoir un déphasage φ)
- S = Rayon électromagnétique
- L = distance géométrique



$$\text{Si } \varphi = 2\pi \rightarrow P_\varphi = \lambda_0$$

Influence de l'ionosphère sur la propagation

- **Raccourcissement du chemin de phase** (par rapport à une propagation dans le vide)

$$\Delta P_\varphi = P_\varphi - L = \int_L (n-1) ds$$

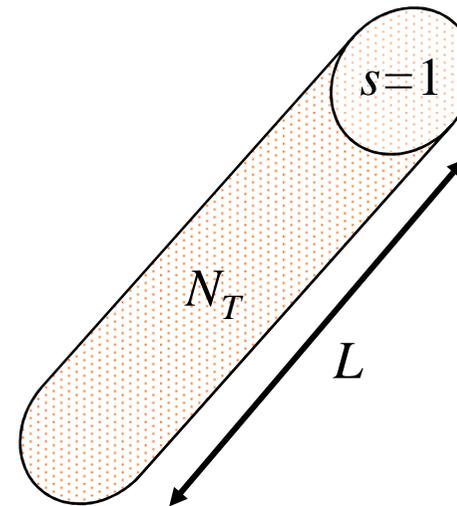
$$n = 1 - a \frac{N_e}{f^2}$$

$$\Delta P_\varphi = -\frac{a}{f^2} \int_L N_e ds$$

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

- **Contenu Electronique Total** (TEC en anglais)

$$N_T = \int_L N_e dl$$





Influence de l'ionosphère sur la propagation

- **Retard de groupe**

- Indice de groupe

Vitesse de groupe : $v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ $k = \frac{\omega}{c} n$

Indice de groupe : $n_g = \frac{c}{v_g}$

$$n_g = c \frac{\partial k}{\partial \omega} = c \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\omega}{c} n \right) = \frac{\partial}{\partial \omega} (\omega n)$$

$$n_g = \frac{\partial}{\partial f} (nf)$$

Influence de l'ionosphère sur la propagation

Indice de groupe de l'ionosphère

$$n_g = \frac{\partial}{\partial \omega}(\omega n) = \frac{\partial}{\partial \omega} \left[\omega \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{1/2} \right] = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{1/2}} = \frac{1}{n}$$

Pour $f > 100$ MHz :

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

— Chemin de groupe dans l'ionosphère :

$$P_g = \int_s n_g ds \approx L + a \frac{N_T}{f^2}$$

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

Retard du temps de groupe:

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



Influence de l'ionosphère sur la propagation

- **Exercice: temps de groupe géométrique/ionosphère**
- Satellite ($E=30^\circ$) à 24000 km $\rightarrow \Delta t=80.0$ ms
- Ionosphère: Conversion oblique ($h_m=400$ km)

$$ObVe = \sqrt{1 - \left(\frac{r_T \cos(E)}{r_T + h_m} \right)^2} = 0.58$$

TEC (tecu)	L_iono(m) f=1.575GHz	Δt_{iono} (μs)
Vertical = 50	8.12	0.027
Oblique = 86	14	0.0467

■ Système mono fréquence Correction par modèle

- TEC vertical

On suppose une variation du TEC vertical de la forme

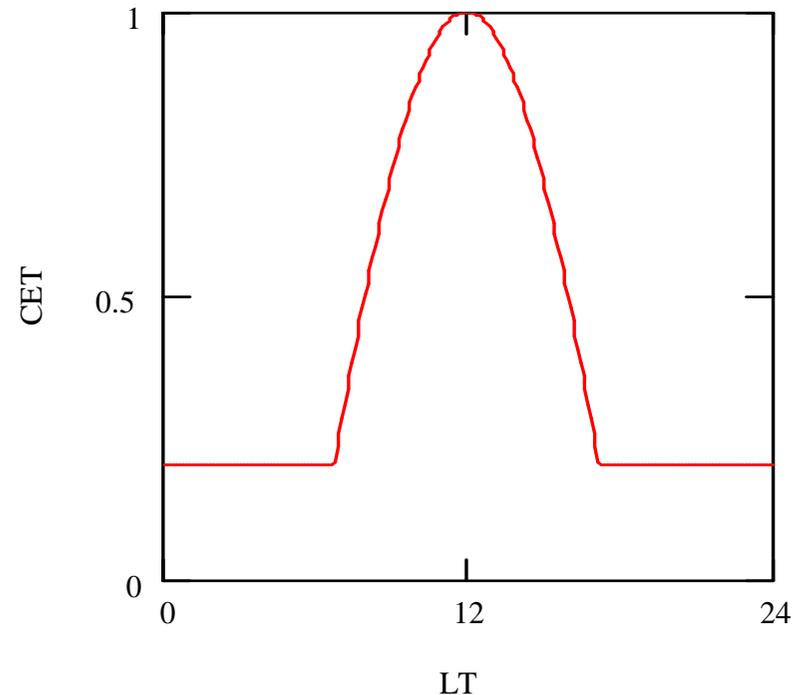
$$N_v = \max\left\{A \cos\left[\frac{2\pi}{P}(t - \phi)\right], D\right\}$$

t = temps local du point de traversée de l'ionosphère

ϕ , D = constantes

A , P = diffusés par les satellites (message de navigation)

(Voir TP)



☞ En moyenne, correction de 50% de l'erreur ionosphérique par le modèle de Klobuchar

- **Conversion STEC-VTEC**

On suppose toute l'ionisation concentrée à l'altitude h_m valeurs possibles 300-450 km

Facteur d'obliquité :

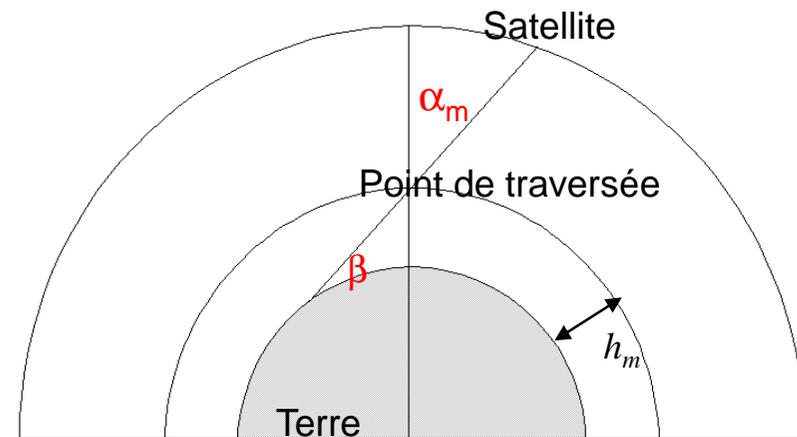
$$K = \frac{N_T}{N_V} \cong \sec(\alpha_m)$$

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{r_0}{r_0 + h_m} \cos \beta\right)$$

avec N_T = TEC oblique, N_V = TEC vertical

α_m = angle zénithal du satellite à l'altitude h_m

β = angle d'élévation du satellite



modélisation du TEC

■ Système bi fréquence

GNSS : Modulation de 2 porteuses cohérentes aux fréquences f_1 et f_2

Chemins de groupe au 1^{er} ordre:

$$P_{g1} = L + a \frac{N_T}{f_1^2} \qquad P_{g2} = L + a \frac{N_T}{f_2^2}$$

Résolution en L et N_T :

Chemin géométrique vrai
corrigé de l'ionosphère

$$L = \frac{f_1^2 P_{g1} - f_2^2 P_{g2}}{f_1^2 - f_2^2}$$

Contenu Total Electronique (TEC)

$$N_T = \frac{1}{a} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_{g1} - P_{g2})$$

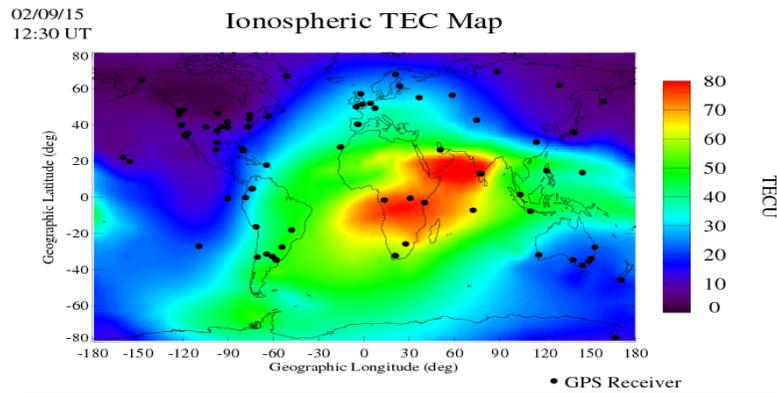
☞ Utilisation du GNSS pour le suivi
de l'état de l'ionosphère



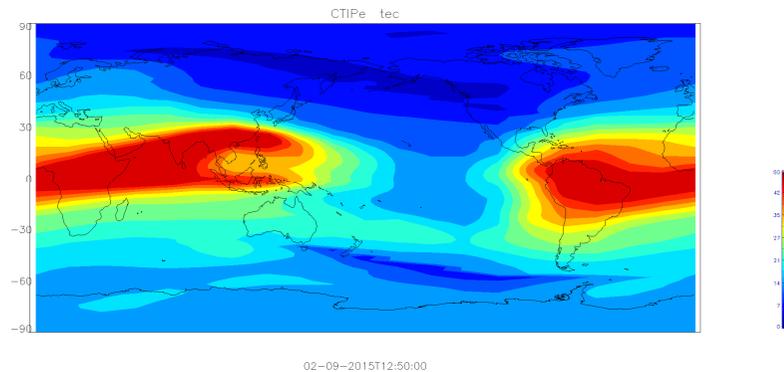
modélisation du TEC

■ Exemples: 09 février 2015 – 12:30

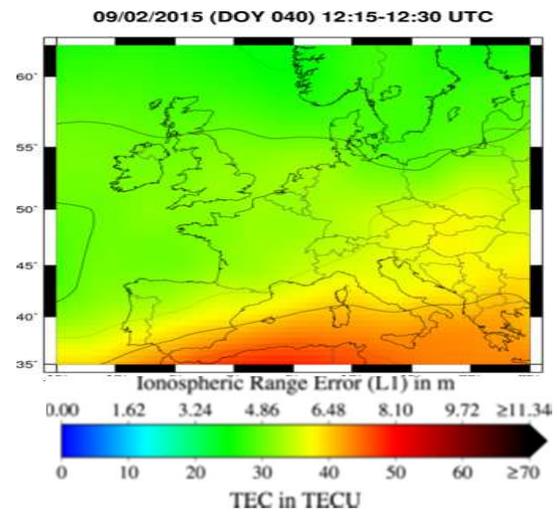
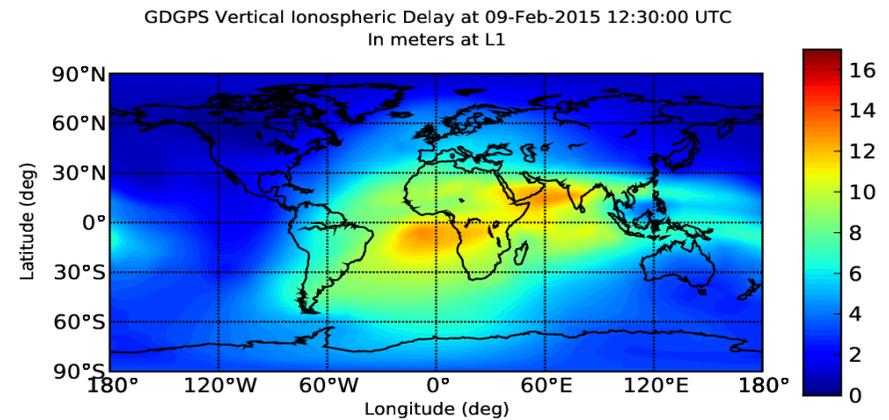
http://iono.jpl.nasa.gov/latest_rti_global.html



<http://helios.swpc.noaa.gov/ctipe/TEC.html>



<http://www.gdgps.net/products/tec-maps.html>



EUREF

TELECOM
Bretagne

modélisation du TEC

■ Données/mesures – traitement

■ Récepteurs géodésiques

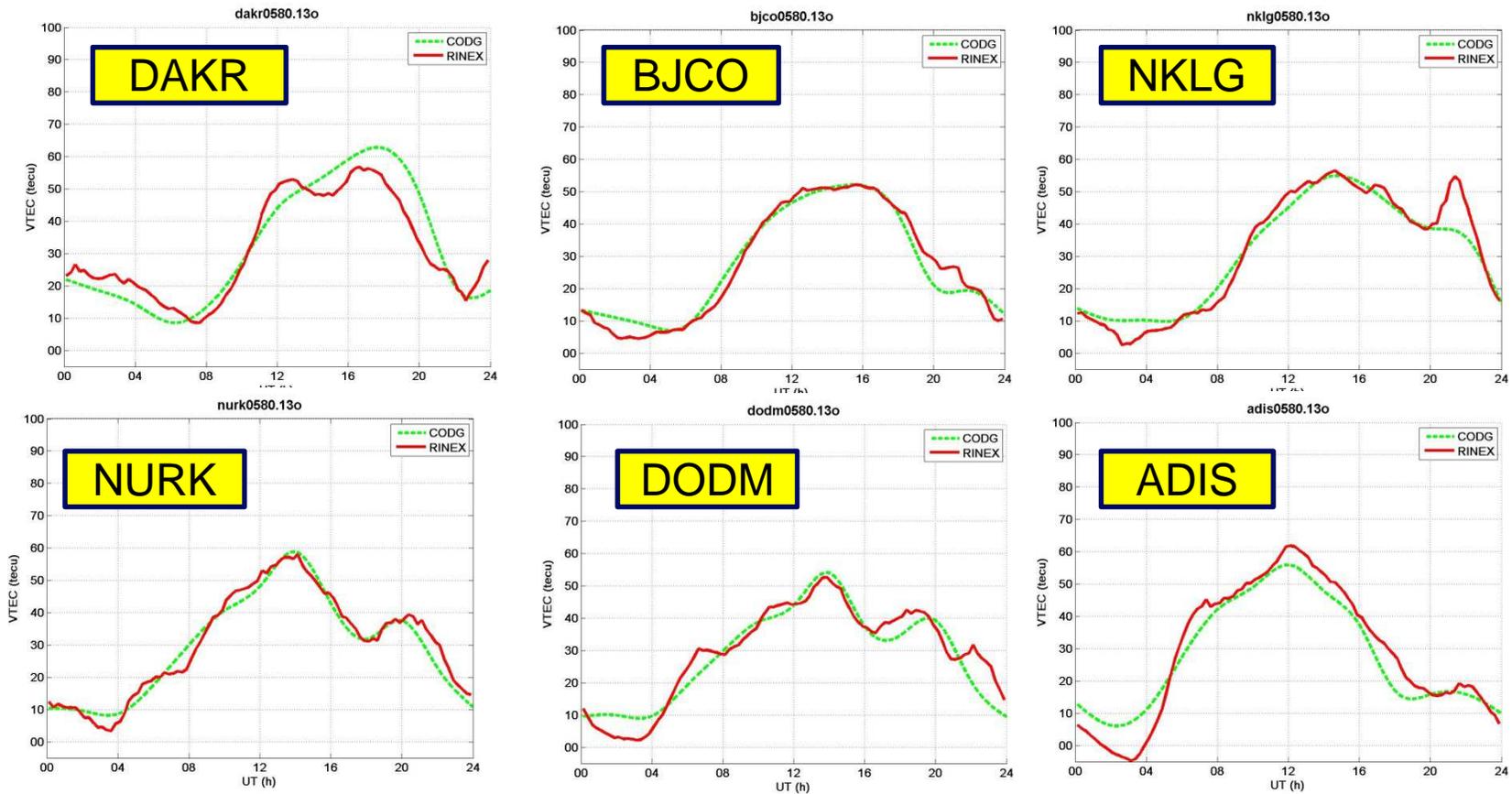
- Constructeurs: Trimble, Leica, Javad, Topcon, Astech, Septentrio
- Signal codé (C/A,P), 2 fréquences f1, f2
- Mesure du temps de propagation t_u
- Vitesse de groupe variable, inconnue : on adopte la vitesse de la lumière c d'où l'utilisation du mot pseudo
- Mesure de pseudo-distance (m)

$$P_g(f) = c.t_u + \textit{termes d'erreurs}$$

- Mesures de phase (cycles)
- Mesures archivées, ~5-8 serveurs disponibles, format rinex
- TP: déroulement d'une méthode pour estimer VTEC à 1 station :
choix contraint : ykro350.09o

modélisation du VTEC

■ Résultats du TP sur l'estimation du VTEC (27/02/2013)





modélisation du TEC

■ NeQuick

- référence: <http://t-ict4d.ictp.it/nequick2>
- Modèle du profil électronique vertical sous la forme de 5 couches représentées par les fonctions d'Epstein. L'épaisseur des couches est calculée. Les paramètres caractéristiques du profil foE, foF1, foF2 et M(3000)F2 sont issues de modèles UIT fonctions de l'indice solaire R_{12} ou du flux solaire F10.7.
- L'intégration de la densité électronique en altitude conduit au TEC vertical.
- Logiciel Fortran applicable en tout point du globe
- Utilisé pour modélisé le retard mono fréquence dans Galileo



modélisation du TEC

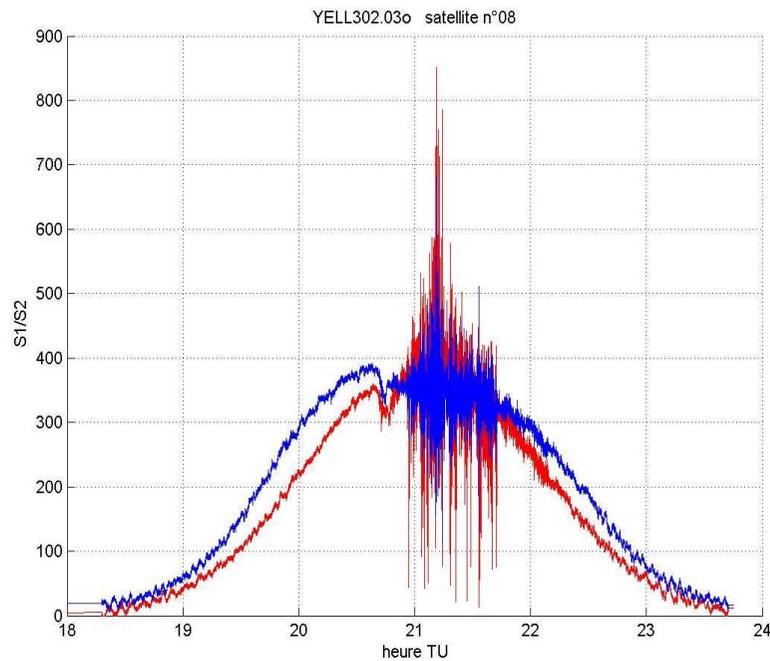
- **IRI** 'International Reference Ionosphere'
 - Référence: <http://iri.gsfc.nasa.gov/>
 - En tout point du globe et en fonction de l'altitude, modélisation de la densité électronique, des températures électronique et ionique, de la composition des ions (O^+ , H^+ , He^+ , NO^+ , O_2^+), du TEC.
 - Utilisation de fonctions analytiques et de modèles des caractéristiques de l'ionosphère mesurées par les ionosondes.
 - Évolutions ~5 ans, dernière version IRI-2012
 - Version SPIM ('Standard Plasmapheric Ionospheric Model') : IRI + modèle de plasmasphère -> logiciel Fortran de calcul du TEC pour le système GNSS (~22000 km)
 - Référence: <http://ftp.izmiran.ru/pub/izmiran/SPIM/>

La scintillation ionosphérique

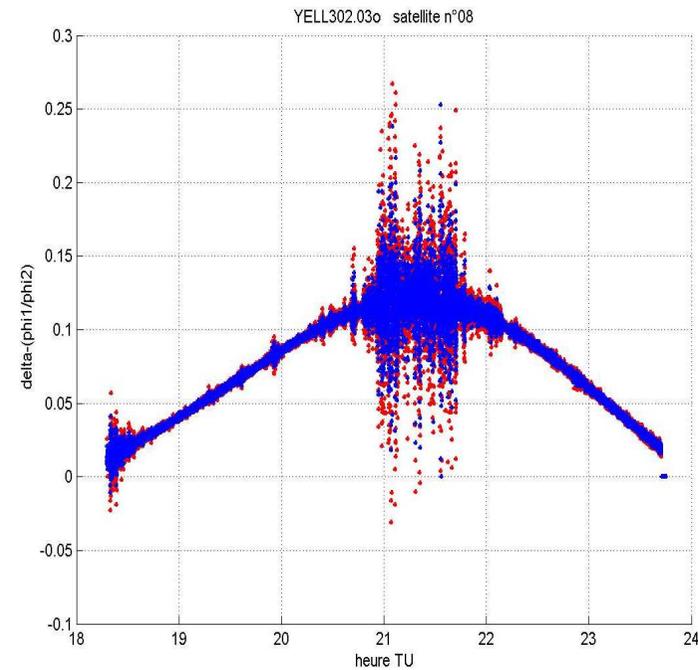
■ Scintillation ionosphérique

Fluctuations rapides du signal dues aux inhomogénéités du milieu

*Scintillation
d'amplitude*

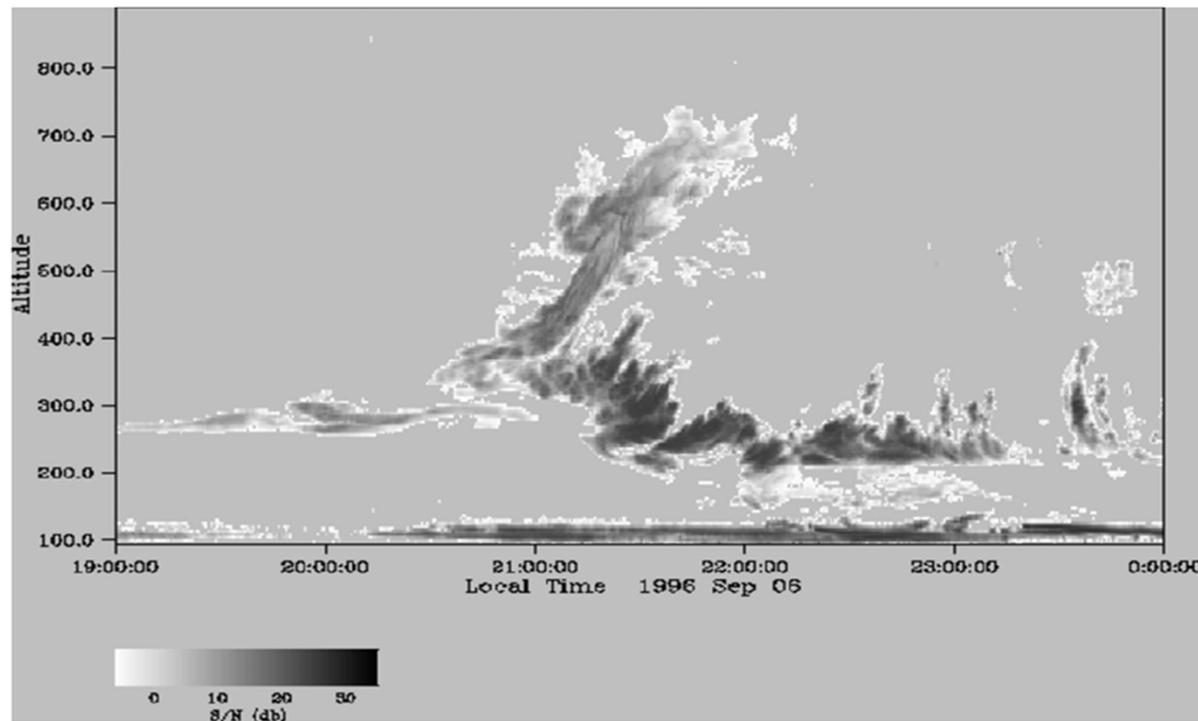


*Scintillation
de phase*



La scintillation ionosphérique

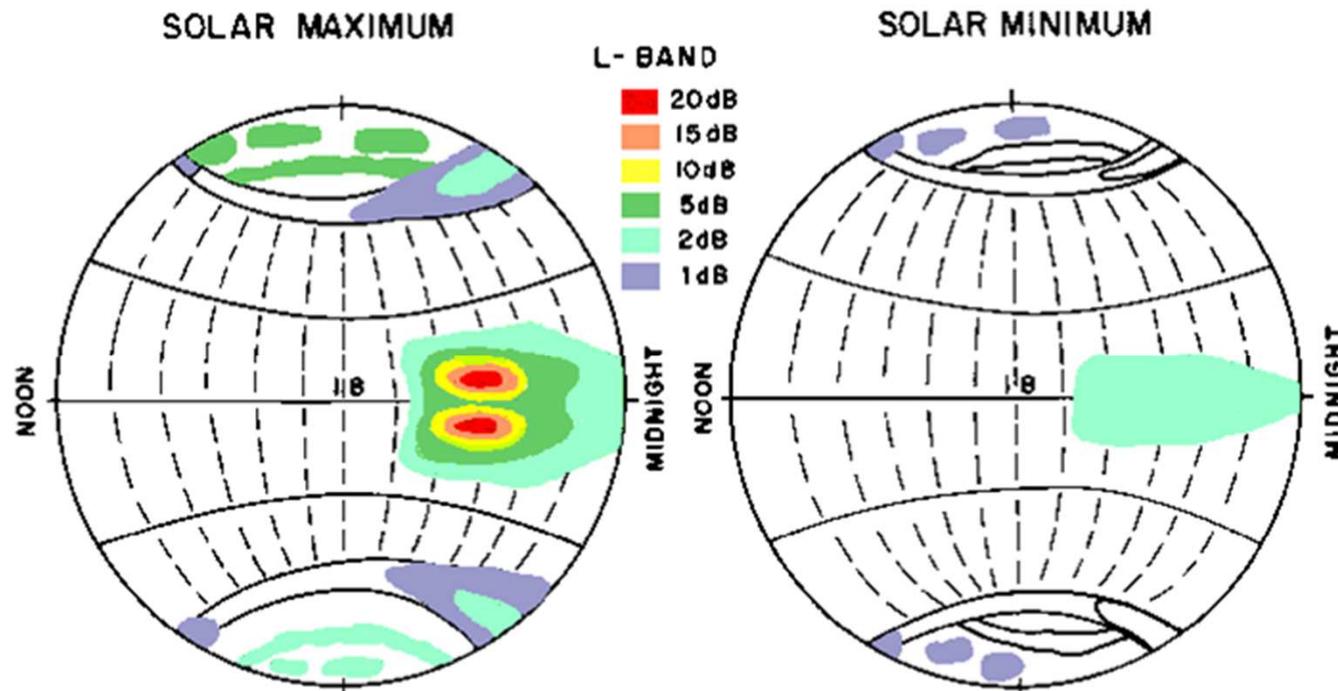
- **EPB : 'Equatorial Plasma Bubble' = structures sous-ionisées après le coucher du Soleil**
- Mesures SNR par le radar cohérent (50 MHz) Julia, Jicamarca (Pérou)



La scintillation ionosphérique

- **Occurrence de la scintillation**

Phénomène équatorial nocturne et auroral



BASU et al., JATP, 2002

La scintillation ionosphérique

- **Indices de scintillation** (typiquement toutes les mn)
- **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
 \bar{P} = moyenne temporelle de P
 $0 < s_4 < 0.3$ scintillations faibles
 $s_4 > 1$ 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 sur le TEC** (écart-type de l'indice ROT)
ROTI est le gradient de TEC sur un intervalle

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}$$



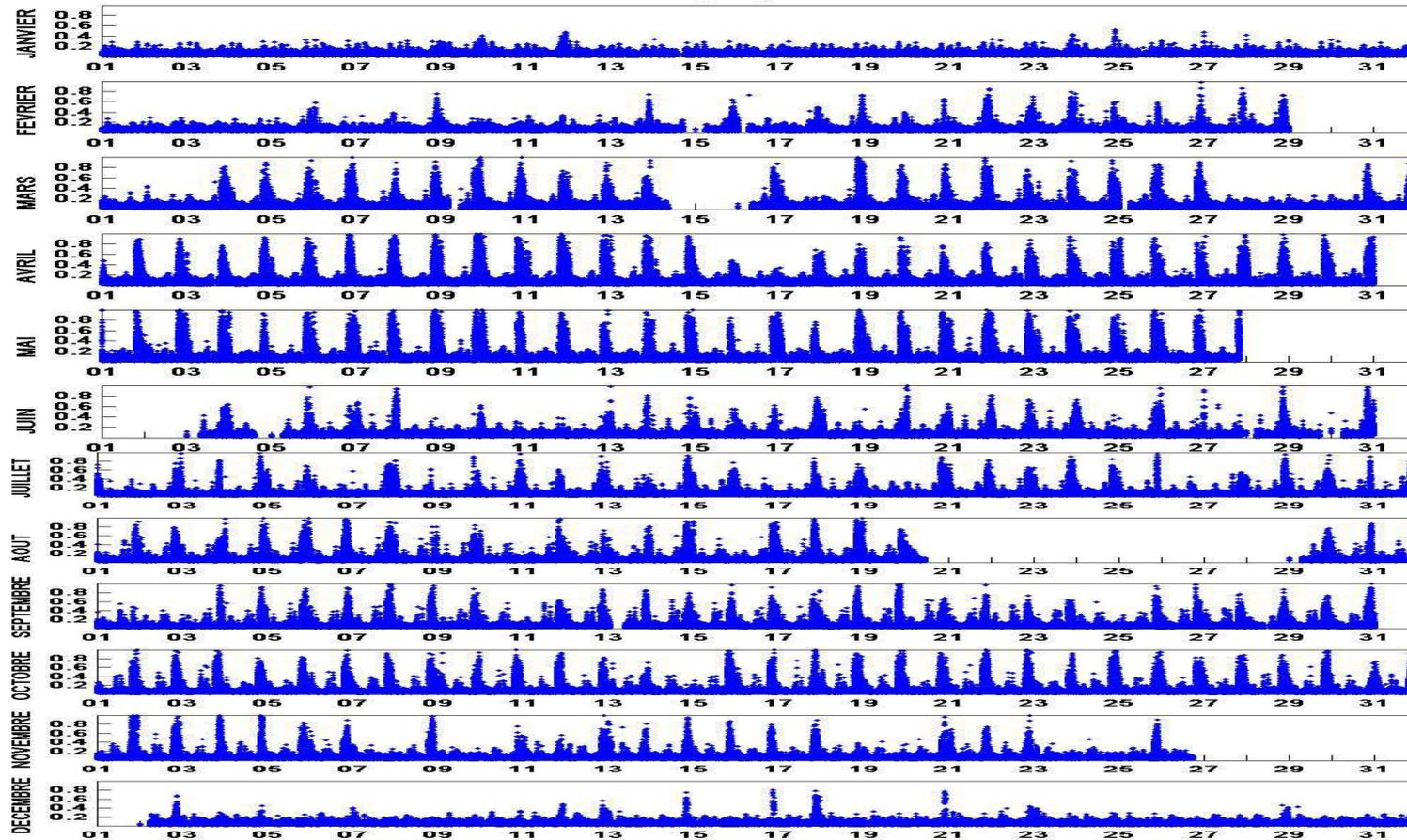
La scintillation ionosphérique

■ Récepteurs dédiés à la scintillation

- Constructeurs: Novatel, Septentrio
- Mesures de S4 et σ_ϕ toutes les mn
- Pas de mesures disponibles sur Internet

La scintillation ionosphérique

■ S4/POG1 (Gabon) : variation journalière 2013



La scintillation ionosphérique

- **Indice ROTI (Pi et al., 1997)**
- **« Rate of TEC » en tecu/mn**

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

$$\text{ROT} = \frac{\text{STEC}_{k+1} - \text{STEC}_k}{\text{time}_{k+1} - \text{time}_k} * 60$$

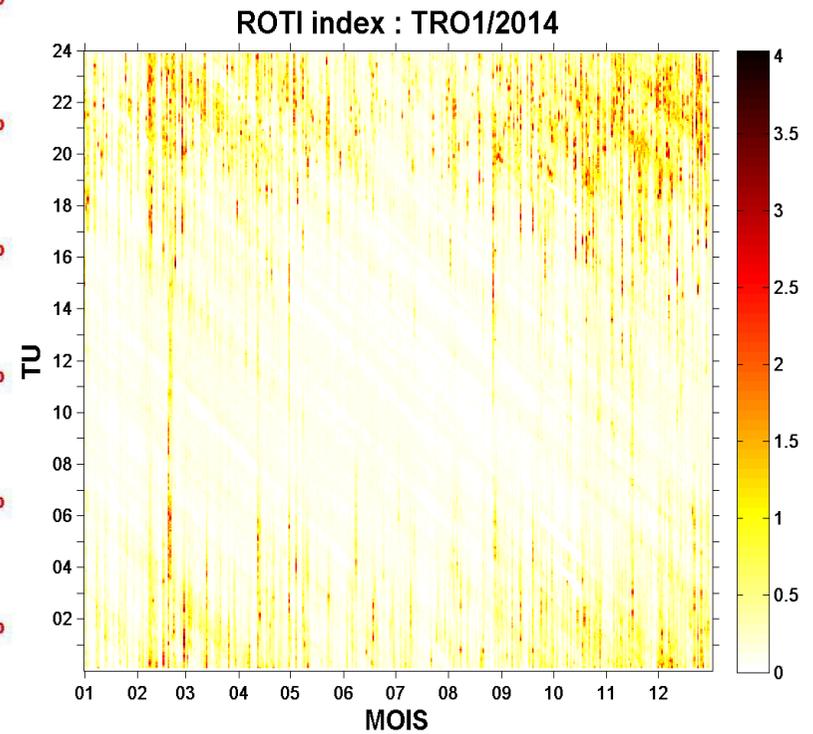
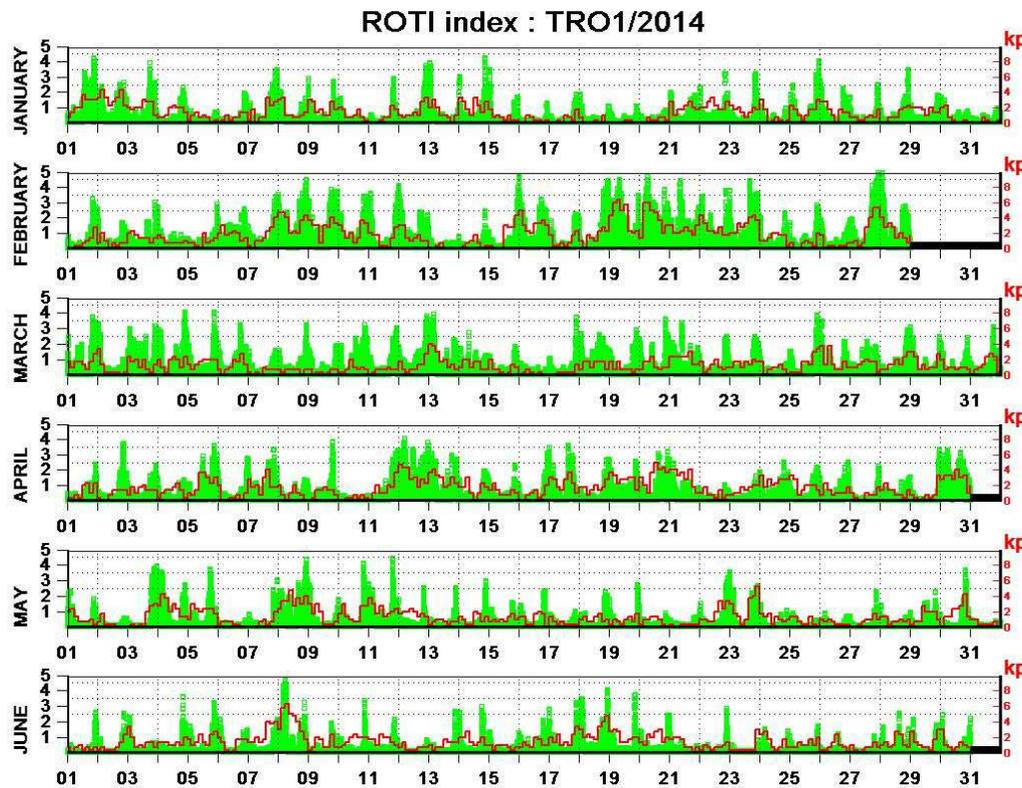
- **Indice ROTI = valeur RMS de ROT, intervalle de 10 mn (20 pts)**

$$\text{ROTI} = \sqrt{\langle \text{ROT}^2 \rangle - \langle \text{ROT} \rangle^2}$$

- **Logiciel 'calcul_roti_v41.m'**

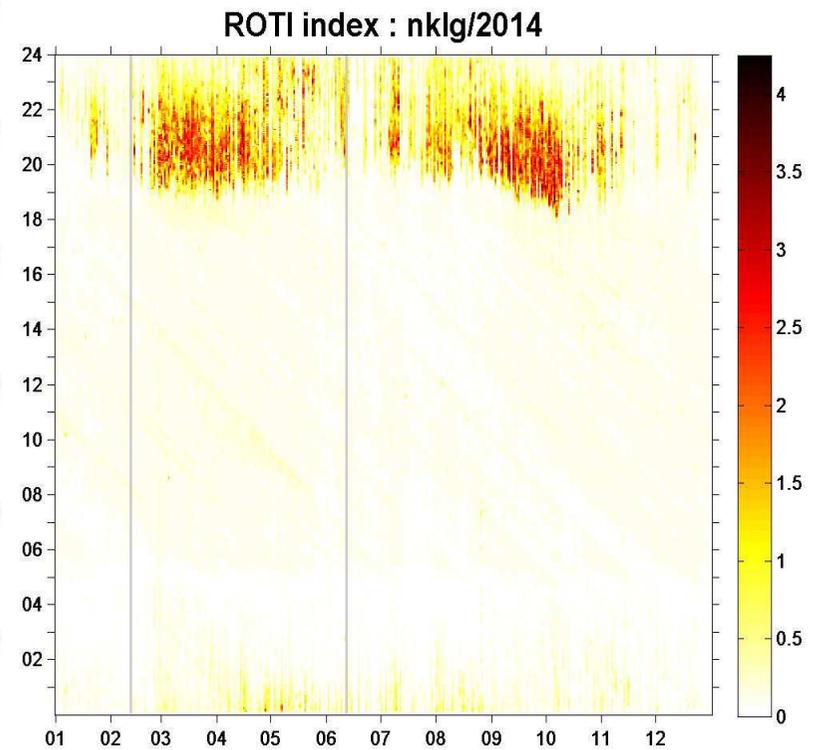
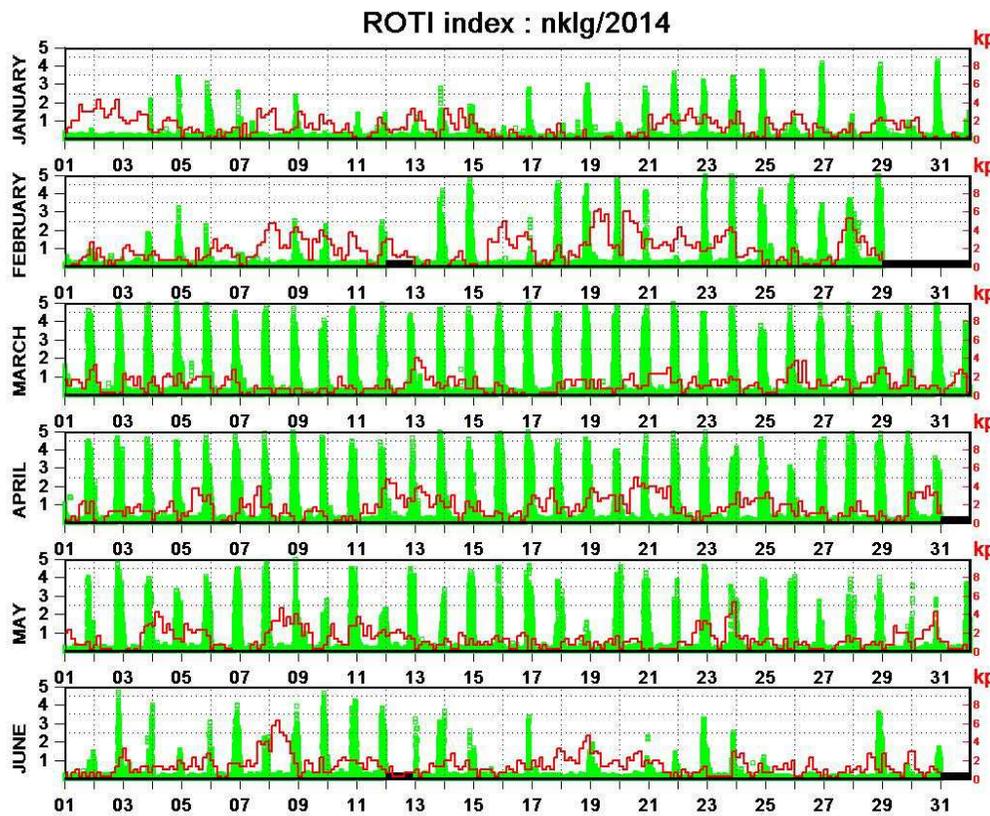
La scintillation ionosphérique

■ Indice ROTI / hautes latitudes (TRO1)



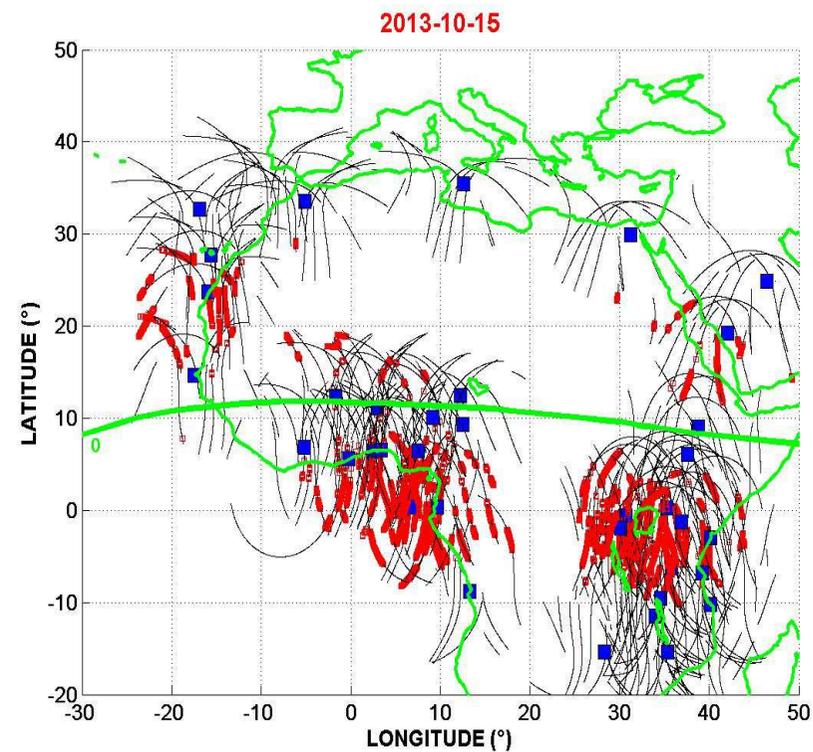
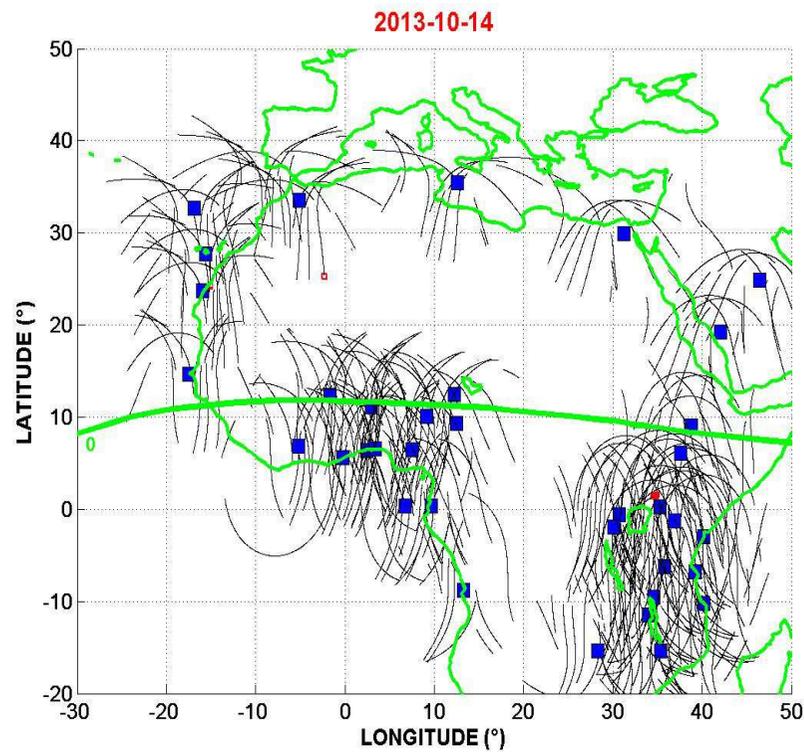
La scintillation ionosphérique

■ Indice ROTI/ basses latitudes (NKLG)



La scintillation ionosphérique

■ Indices ROTI / variation spatiale



■ Voir animation



bibliographie

- 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