

Université
de Liège



Institut Royal Météorologique

Modélisation de l'erreur ionosphérique qui affecte les systèmes de positionnement par satellites

26 novembre 2009

Gilles WAUTELET
Doctorant en géographie

2^{ème} année master en géométrologie-géomatique

Sommaire

1. Introduction : mesures ionosphériques par GNSS
2. Irrégularités ionosphériques
 - a) *Le space weather* et les irrégularités dans l'ionosphère
 - b) Étude climatologique par GPS
3. Perspectives : modèle de prévisions ionosphériques

1. INTRODUCTION

Mesures ionosphériques par GNSS

GNSS = *Global Navigation Satellite System*

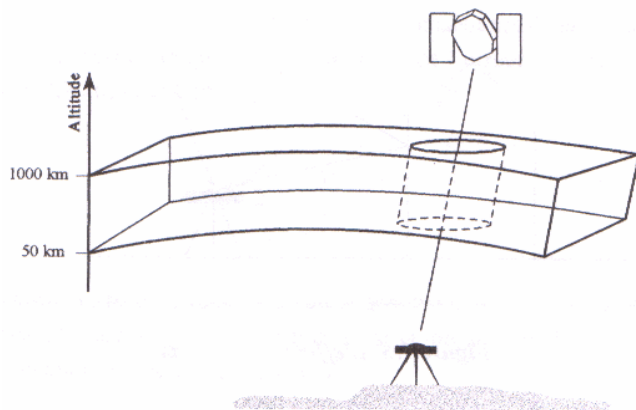
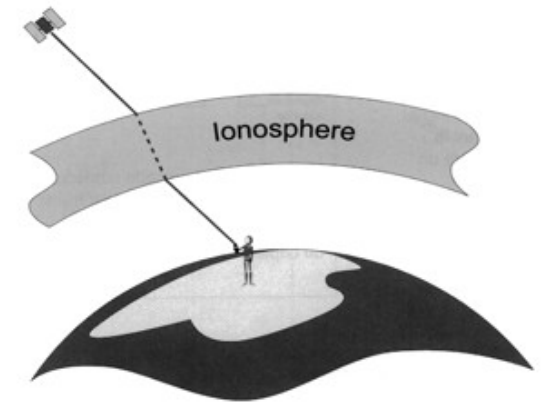
→ Systèmes de positionnement par satellites
(GPS, Glonass, Galileo, Compass)

Ionosphère = Couche de l'atmosphère terrestre dont la concentration en électrons libres est suffisante pour perturber de manière significative la propagation des ondes électromagnétiques.
Située généralement entre 50 et 1000 km d'altitude

GNSS + ionosphère : propagation *trans-ionosphérique*

L'ionosphère agit sur les signaux GNSS de 3 façons :

- modification de la direction de propagation
- modification de l'amplitude du signal
- **modification de la vitesse de propagation ($v \neq c$)**



Contenu Électronique Total (*Total Electron Content* ou TEC) : nombre d'électrons libres contenus dans un cylindre de section unitaire ayant pour axe la ligne de visée joignant le satellite au récepteur → valeur intégrée

Deux types de mesures GNSS :

- CODES** :
- rapide
 - pas d'ambiguïtés à résoudre
 - précision : qqs mètres

$$P_{p,k}^i(t) = D_p^i + T_p^i \oplus I_{p,k}^i + M_{p,k,m}^i + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \varepsilon_{p,k,m}^i$$

↳ Effet de l'ionosphère : **allongement** apparent du parcours

- PHASES** :
- ambiguïté à résoudre → plus lent (phase d'initialisation)
 - précision décimétrique à millimétrique.

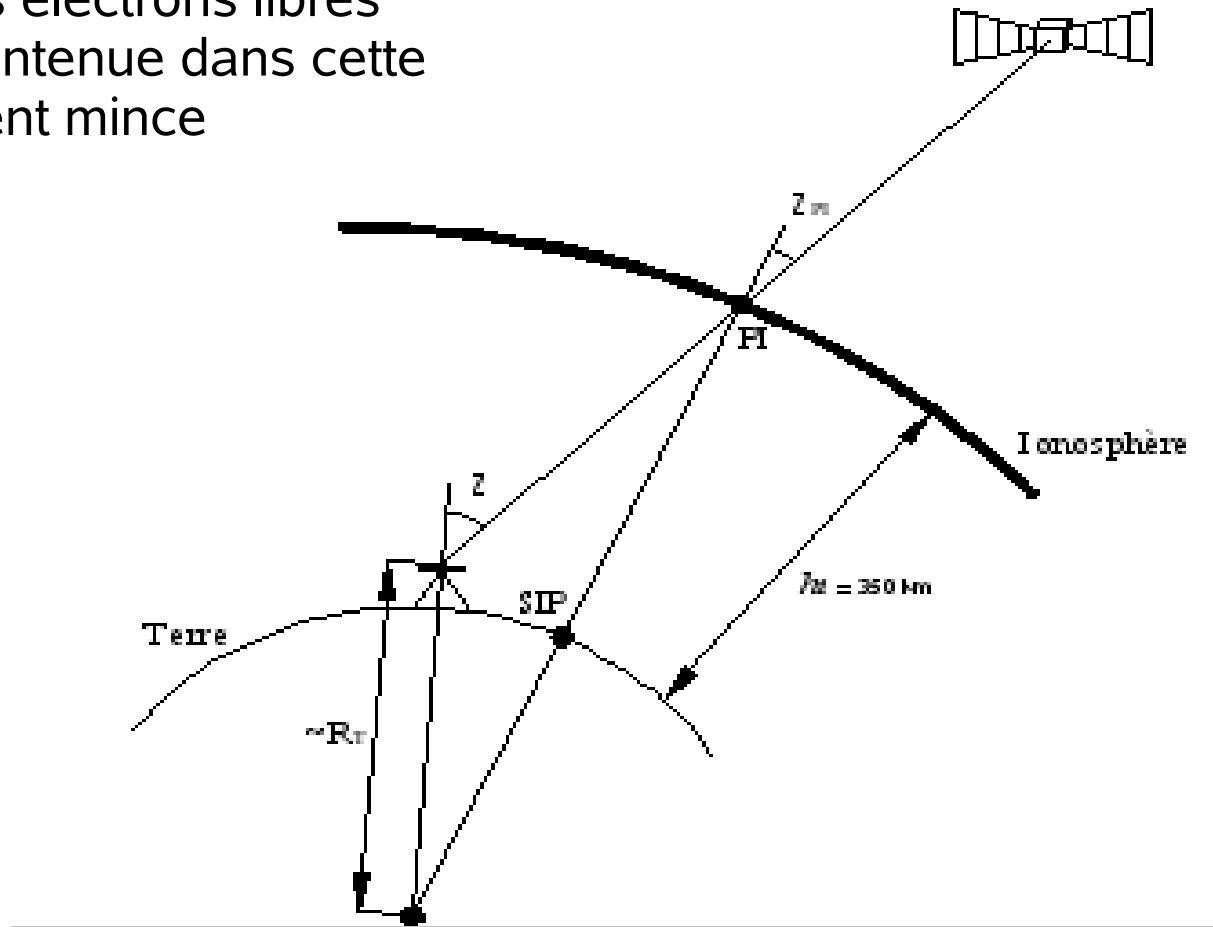
$$\varphi_{p,k}^i(t) = \left(\frac{f_k}{c} \right) (D_p^i + T_p^i \ominus I_{p,k}^i + M_{p,k,\varphi}^i) + f_k(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + N_p^i + \varepsilon_{p,k,\varphi}^i$$

↳ Effet de l'ionosphère : **raccourcissement** apparent du parcours

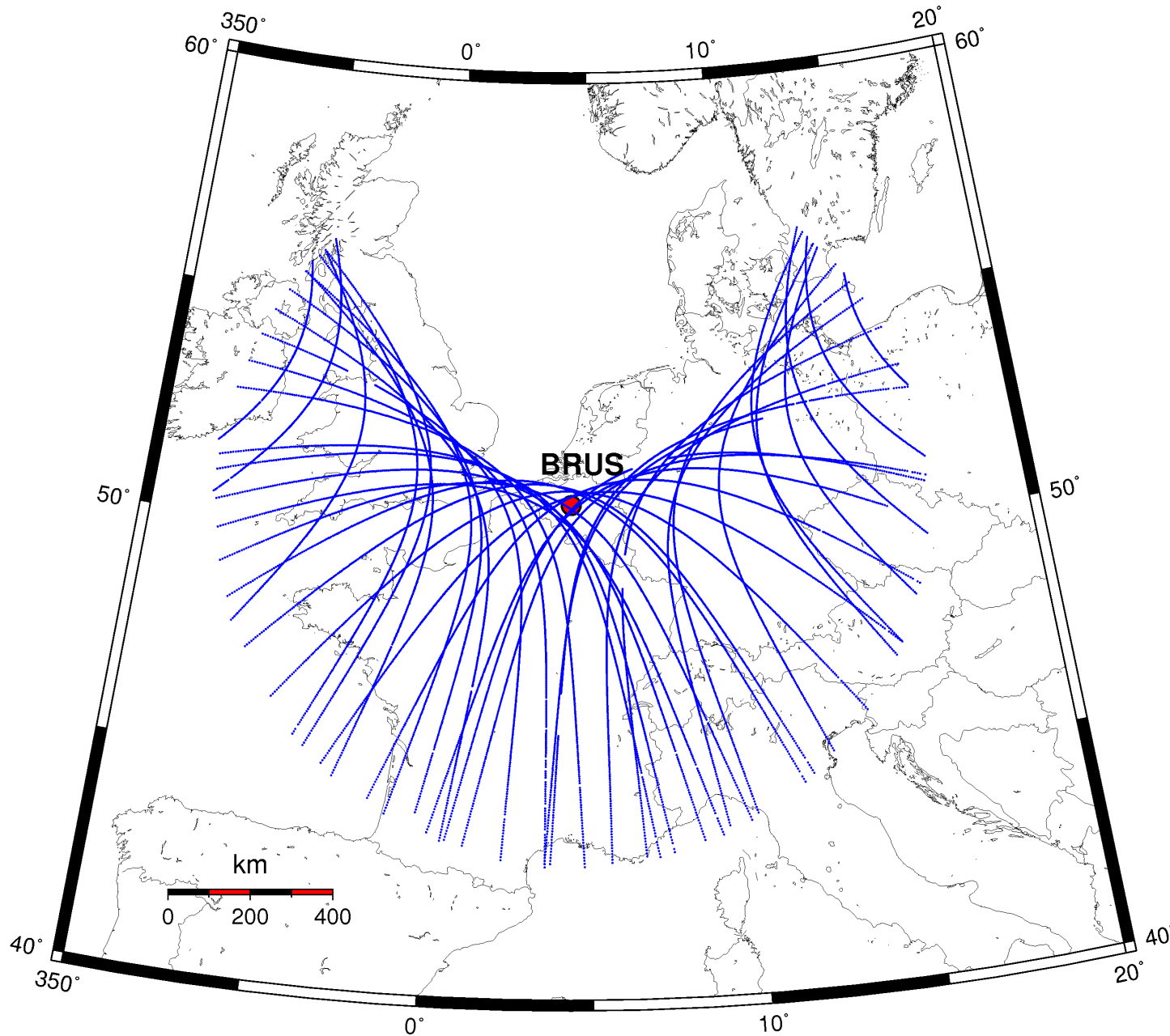
Le terme ionosphérique $I_{p,k}^i$

En pratique, l'ionosphère est assimilée à une coquille sphérique située à $h = 400 \text{ km}$

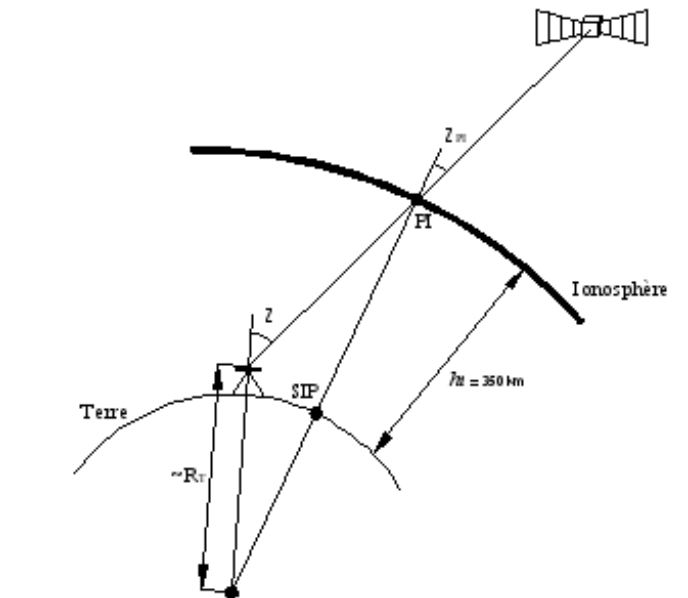
L'intégralité des électrons libres
(\rightarrow TEC) est contenue dans cette
couche infiniment mince



24 h de données GPS (réception à BRUS, cut-off = 20°)



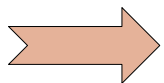
Le terme ionosphérique $I_{p,k}^i$



$$I_{p,k}^i = \left(\frac{40.3}{f_k^2} \right) STEC_p^i$$

$$VTEC = STEC \cos(z_{PI})$$

$$VTEC_p^i = \left(\frac{f_k^2 \cos(z_{PI})}{40.3} \right) I_{p,k}^i$$



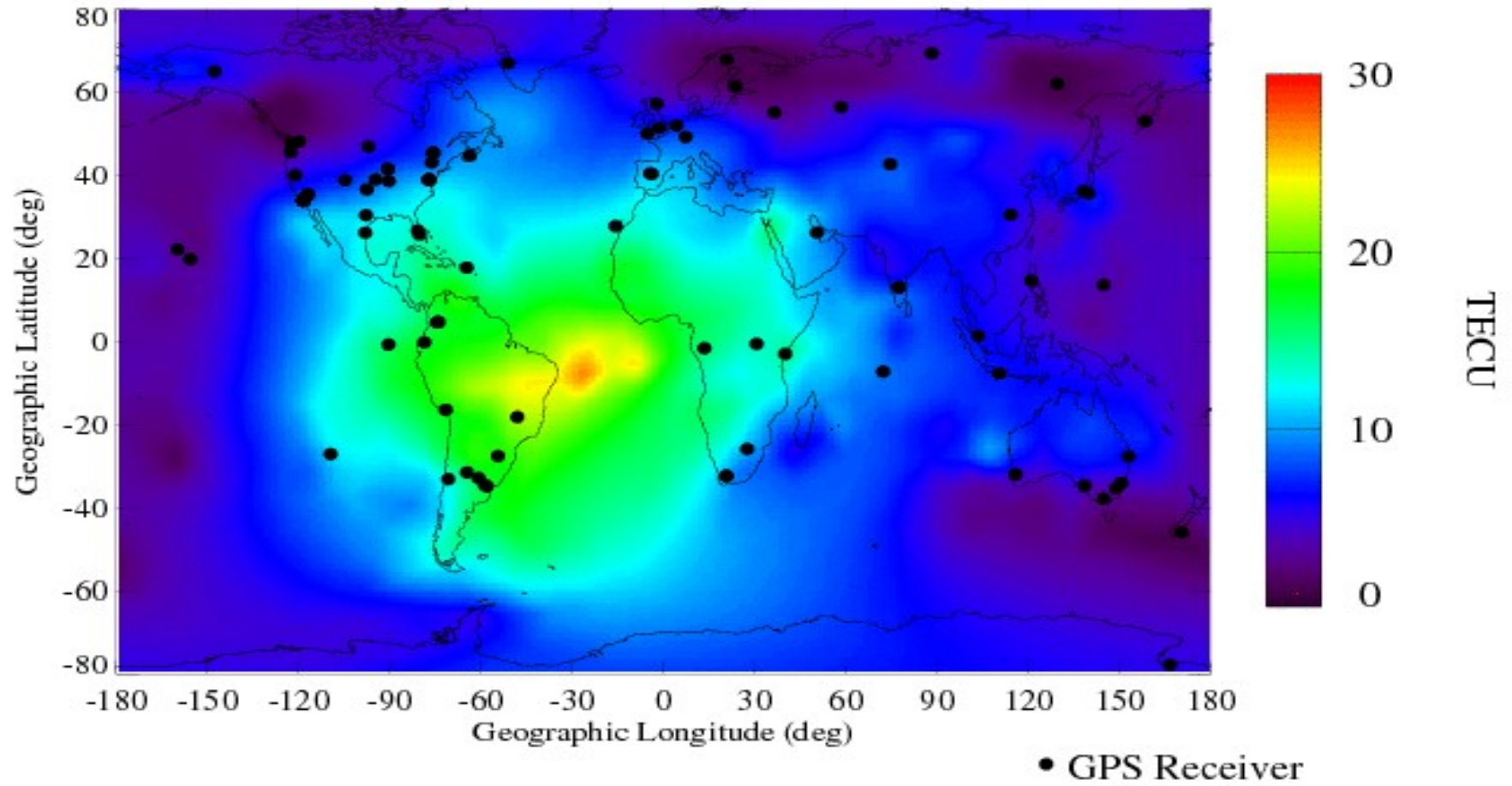
Le GPS permet de mesurer le TEC ramené à la verticale d'une station (VTEC) avec une précision de 2-3 TECu (*TEC units*)

1 TECu : 10^{16} e-/m²

Carte du TEC : exemple

02/04/09
15:40 UT

Ionospheric TEC Map



Wed Feb 4 07:41:09 2009

Source : NASA website

2. IRRÉGULARITÉS IONOSPHERIQUES

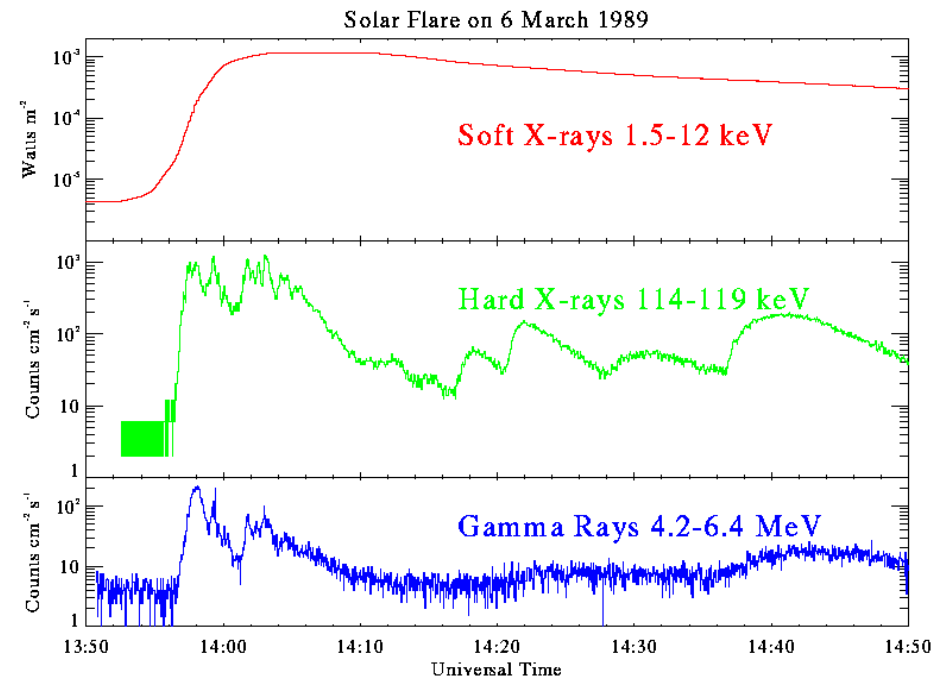
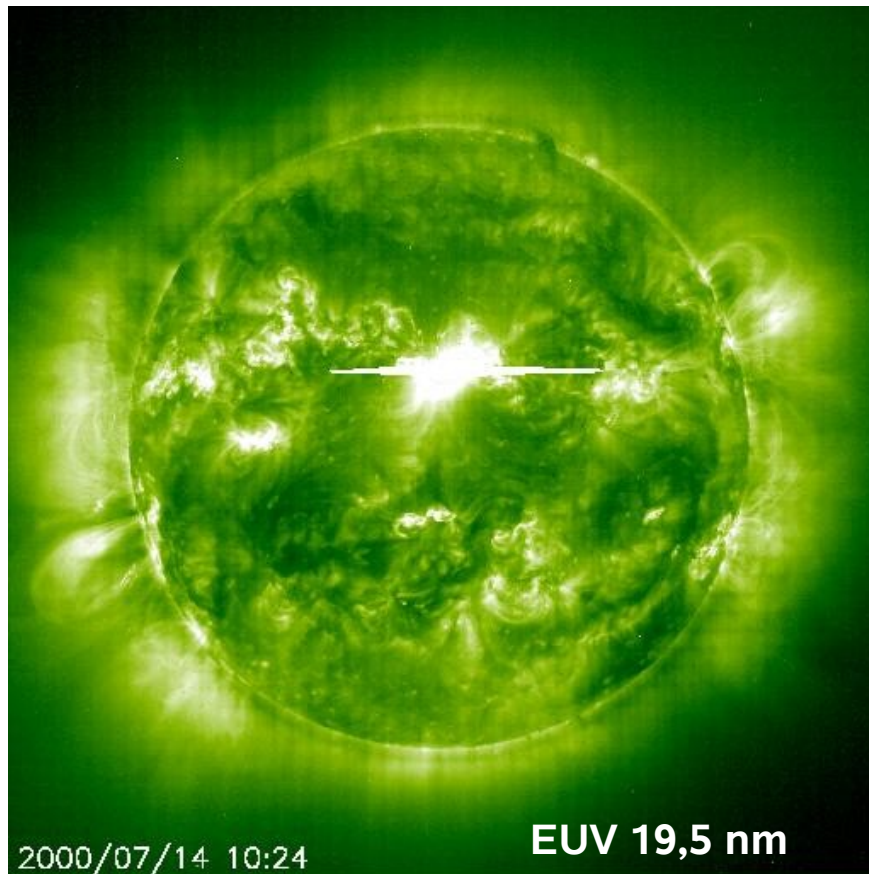
**a) La météorologie spatiale
(*Space Weather*)**

La météo spatiale (*Space Weather*)

« Les conditions du Soleil, du vent solaire, de la magnétosphère, ionosphère et thermosphère qui influencent la performance et la fiabilité des systèmes technologiques spatiaux et terrestres et qui mettent en danger la santé et la vie humaine »

➔ Interaction phénomènes solaires – atmosphère terrestre

Causes principales : 1. **Éruptions solaires** (*solar flare*) : EUV, soft/hard X-rays



+ video

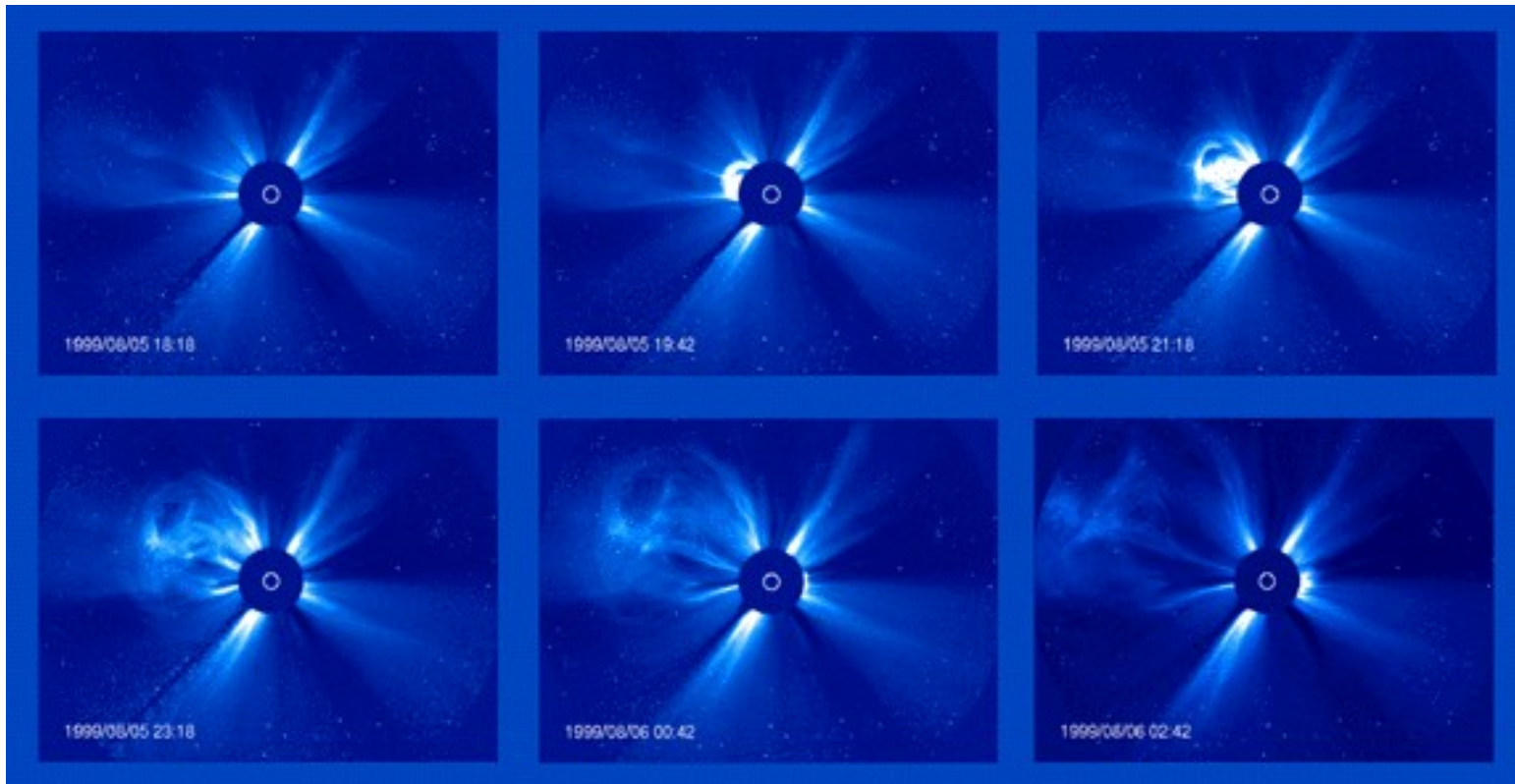
La météo spatiale (*Space Weather*)

« Les conditions du Soleil, du vent solaire, de la magnétosphère, ionosphère et thermosphère qui influencent la performance et la fiabilité des systèmes technologiques spatiaux et terrestres et qui mettent en danger la santé et la vie humaine »

➔ Interaction phénomènes solaires – atmosphère terrestre

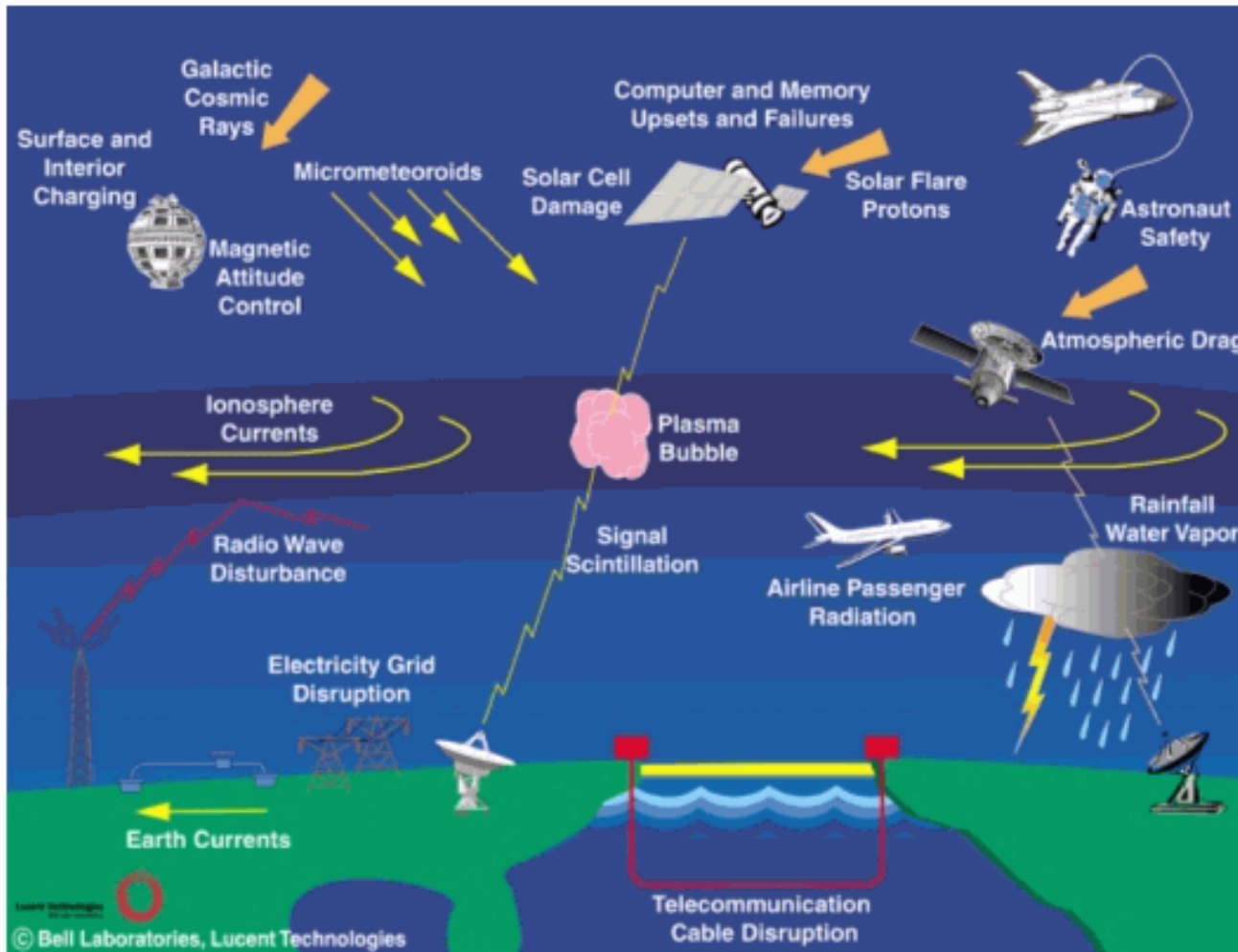
Causes principales :

2. **Éjections de masse coronale** (*Coronal Mass Ejection - CME*)



+ video

- Effets :
- freinage des satellites (*atmospheric drag*)
 - perte de précision/fiabilité des GNSS (*reliability, integrity*)
 - courants induits (*Ground-induced currents -GIC*) et érosion accélérée des pipe-lines
 - communications radio perturbées
 - aurores
 - etc.



+ video

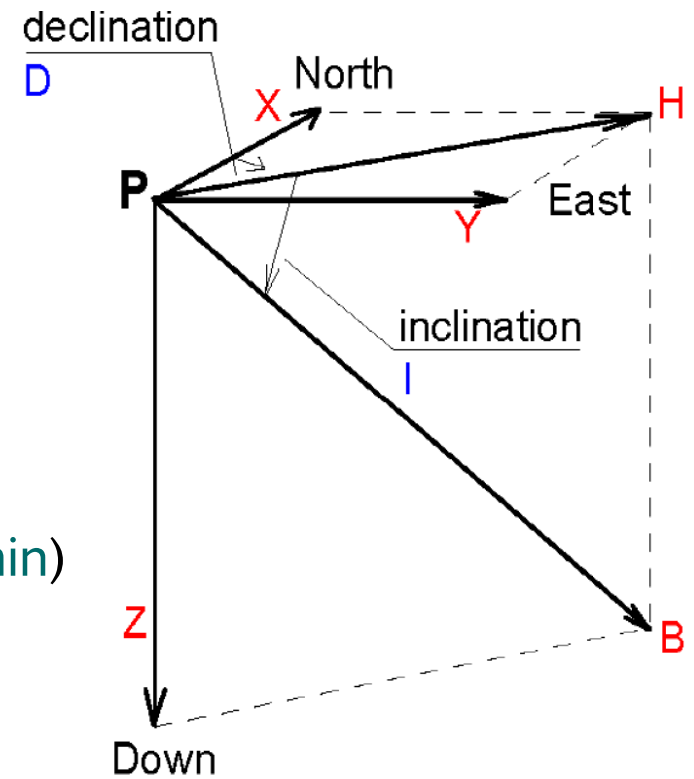
Space Weather et géomagnétisme

- Le champ magnétique terrestre est modifié par différents **courants**. Ceux-ci sont notamment produits par :
 - Le changement du rayonnement solaire
 - L'interaction vent solaire – magnétosphère – ionosphère
- Divers **indices standard** ont été définis pour caractériser les variations du champ magnétique et les courants qui en sont la cause : Dst, Kp, Ap, AE
- **Indice DST: Disturbance Storm Time**
 - Mesures magnétométriques dans stations proches de l'équateur géomagnétique.
 - Intensité du courant globalement symétrique présent dans la première ceinture de radiation (*ring current*).
 - Lors des tempêtes, diminution de l'indice: dépression de phase principale (*main phase*).
- **Indice Kp**
 - Mesures magnétométriques dans stations aux hautes et moyennes latitudes.
 - Variation de la déclinaison magnétique selon 3 axes calculée toutes les 3h.
 - Indice **GLOBAL** car moyenne sur 13 stations réparties entre 44 et 60° de latitude.

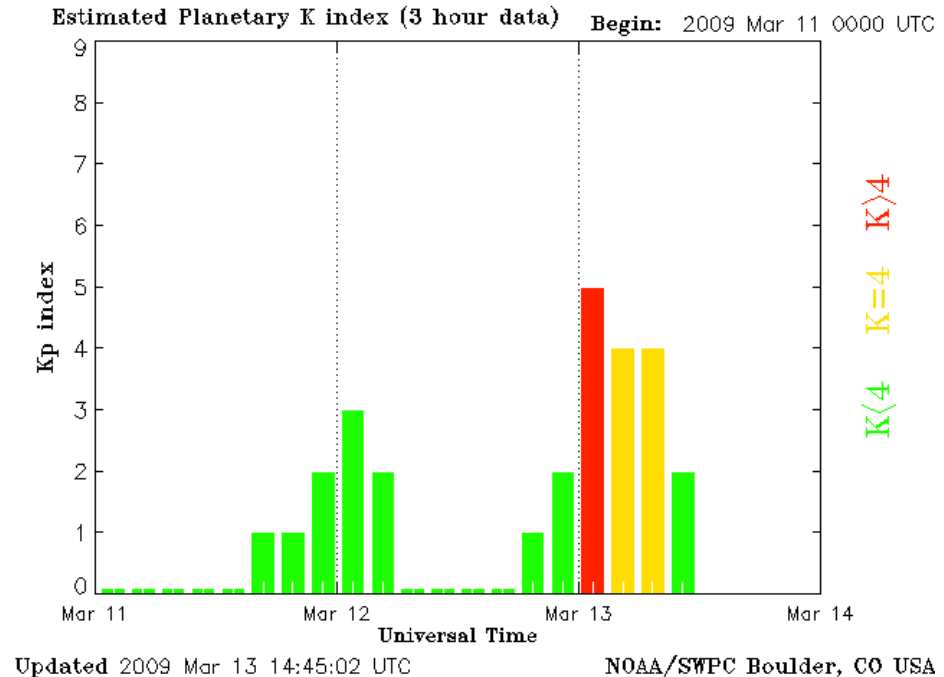
L'indice géomagnétique K

Indice **LOCAL** basé sur les mesures issues d'un magnétomètre qui mesure les trois composantes du champ géomagnétique.

- Indice basé sur **3 heures** de mesures
- Valeurs entières de **0 à 9**
- Calculé sur base de la déviation maximale (**max-min**) dans le plan horizontal sur les 3h d'intervalle



Exemple :



K	ΔB [nT]
0	0 - 5
1	5 - 10
2	10 - 20
3	20 - 40
4	40 - 70
5	70 - 120
6	120 - 200
7	200 - 330
8	330 - 500
9	> 500

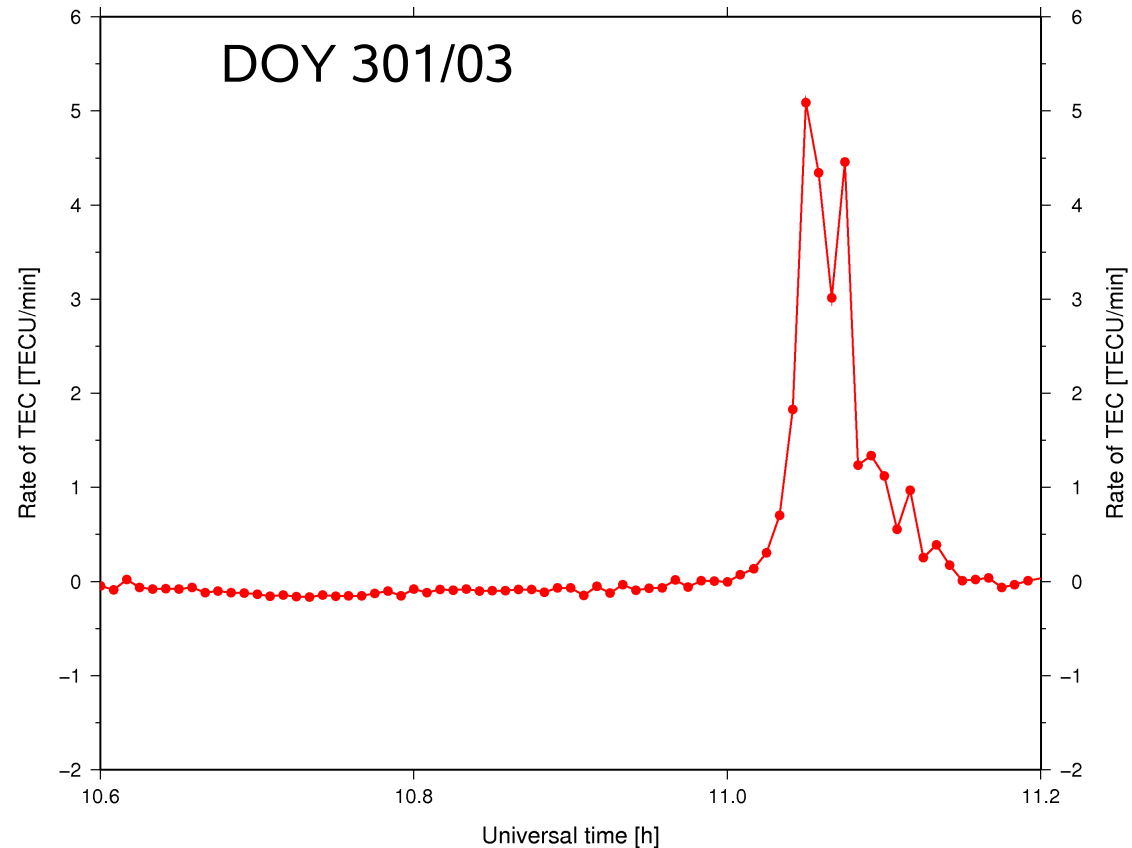
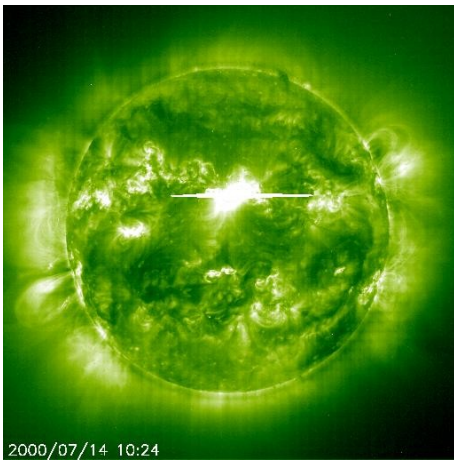
Structures ionosphériques

1) liées aux conditions perturbées du *space weather* :

a. Éruption solaire (*solar flare*)

Ionisation très importante en très peu de temps (EUV, X rays)

→ **augmentation brutale du TEC** pour la partie éclairée de la Terre. Plus on se rapproche de midi solaire, plus l'effet est marqué

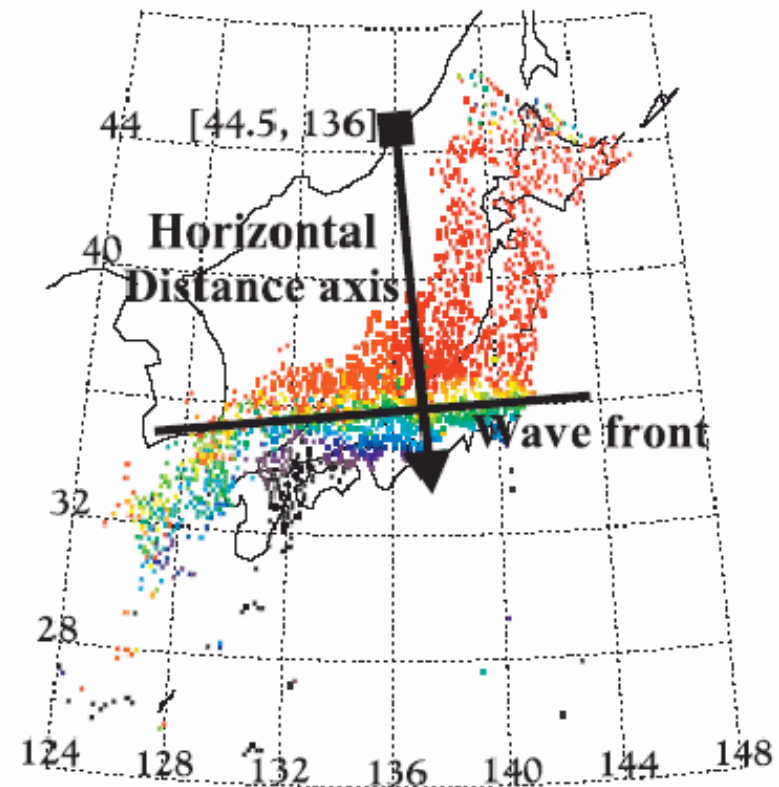
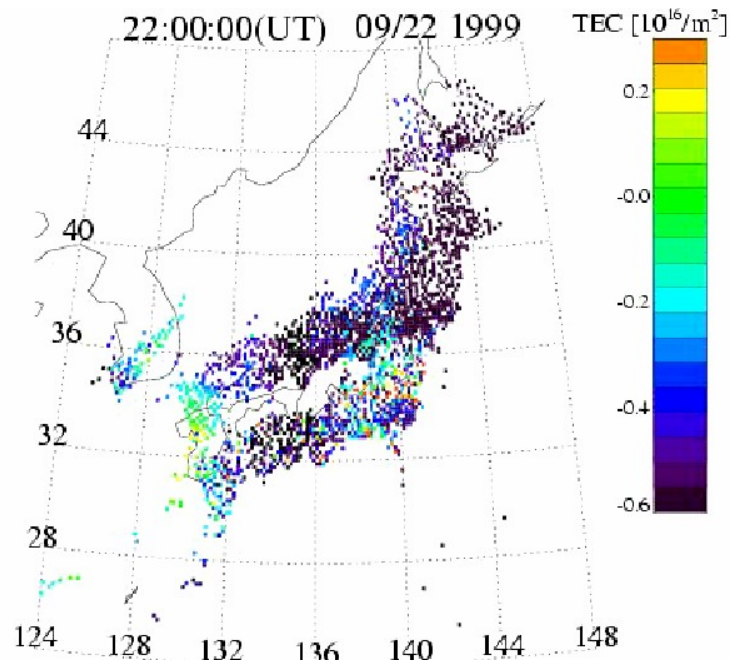


Structures ionosphériques

1) liées aux conditions perturbées du *space weather* :

b. Large-scale Traveling Ionospheric Disturbances (LSTID's)

- Génération dans les **zones aurorales** : « pluie » de particules issues du vent solaire sur le sommet de l'atmosphère → génération d'ondes de gravité qui font fluctuer de manière périodique (sinusoïdale) la concentration électronique de l'ionosphère
- Propagation **vers l'équateur**
- **Vitesse** 300 m/s → 1 km/s
- **Longueur d'onde** de 1000 à 3000 km
- **Damping** de l'amplitude durant propagation



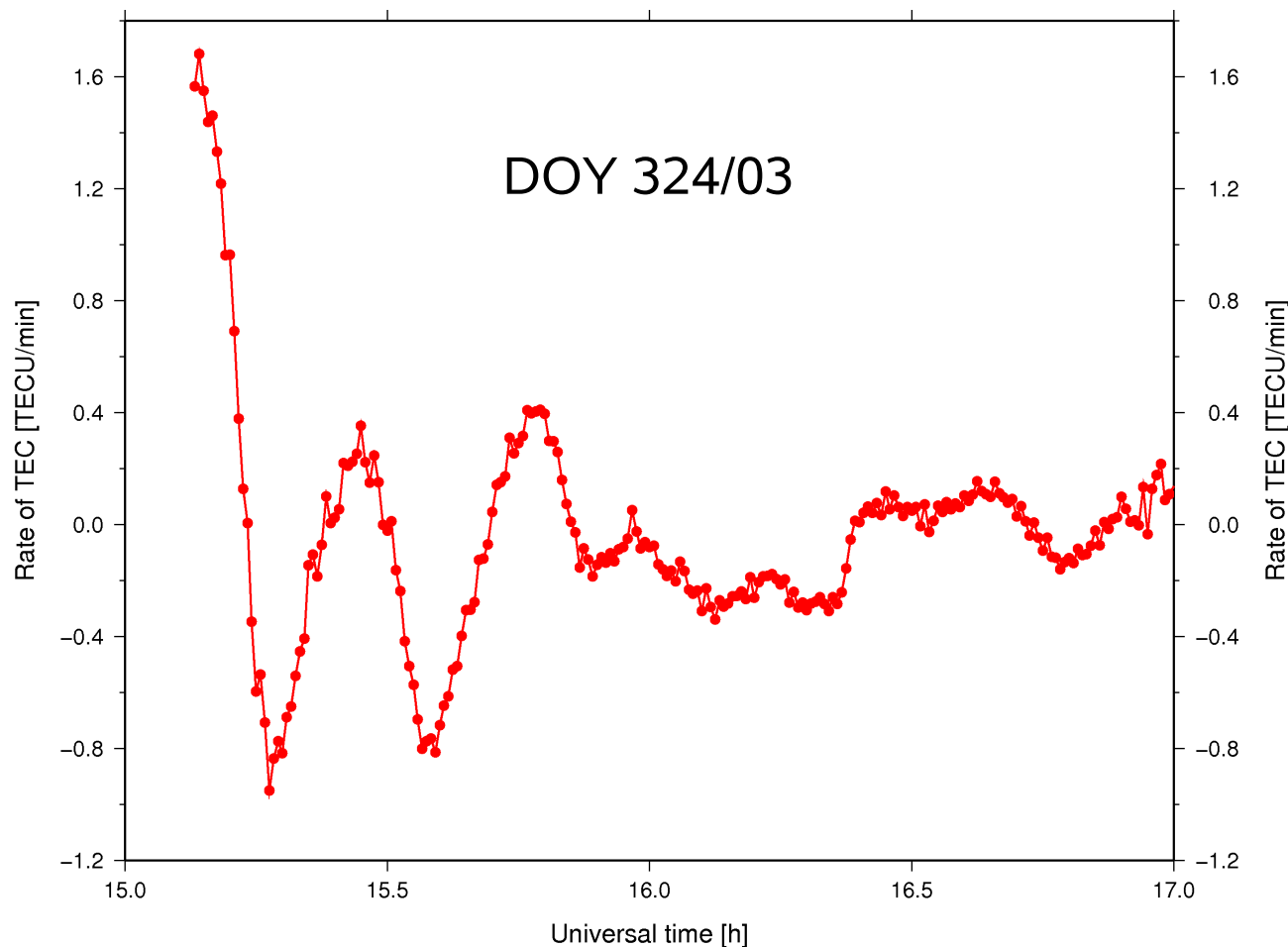
Tsugawa et al. 2003

Structures ionosphériques

1) liées aux conditions perturbées du *space weather* :

b. Large-scale Traveling Ionospheric Disturbances (LSTID's)

- Exemple de LSTID observée à Bruxelles (BRUS) à travers la dérivée du TEC par rapport au temps, appelé *Rate of TEC* (RoTEC – cf. plus loin) :



Structures ionosphériques

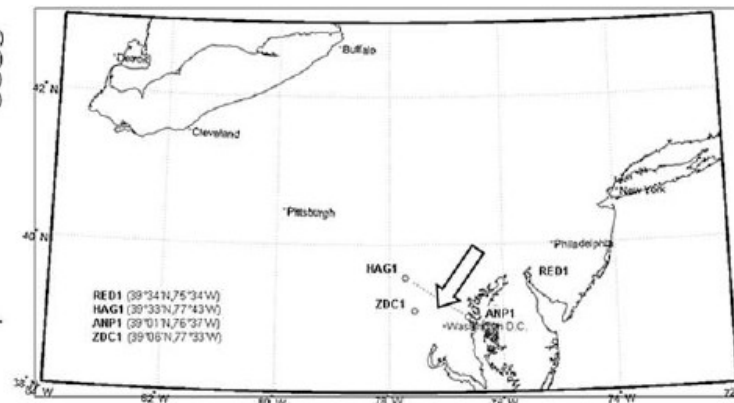
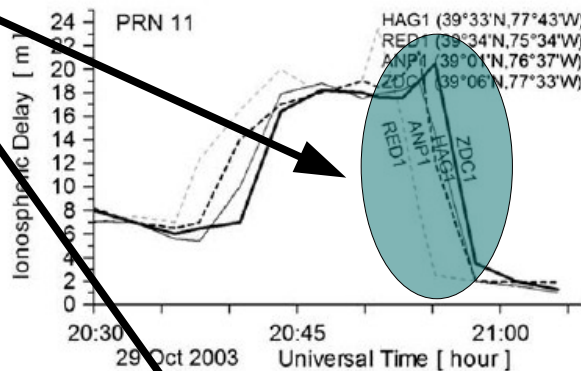
1) liées aux conditions perturbées du *space weather* :

c. Structures à grande échelle dans le TEC

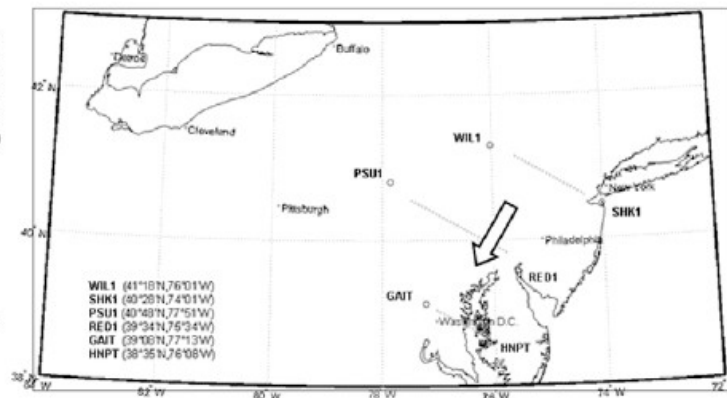
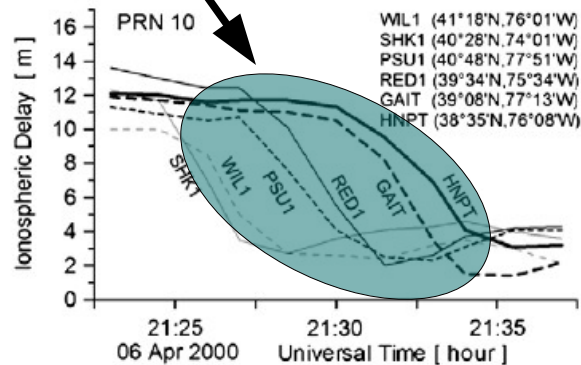
- L'effet d'une tempête géomagnétique (*i.e.* pour des conditions données du *space weather*) sur l'ionosphère diffère selon le secteur dans lequel on étudie l'ionosphère. Principalement, on isole 2 effets dans le TEC :

- **Augmentation** du TEC (*TEC enhancement*) → phase positive de l'orage ionosphérique
- **Diminution** du TEC (*TEC depletion*) → phase négative de l'orage ionosphérique

DOY 301/03
(29 oct. 2003)



DOY 097/00
(06 avr. 2000)



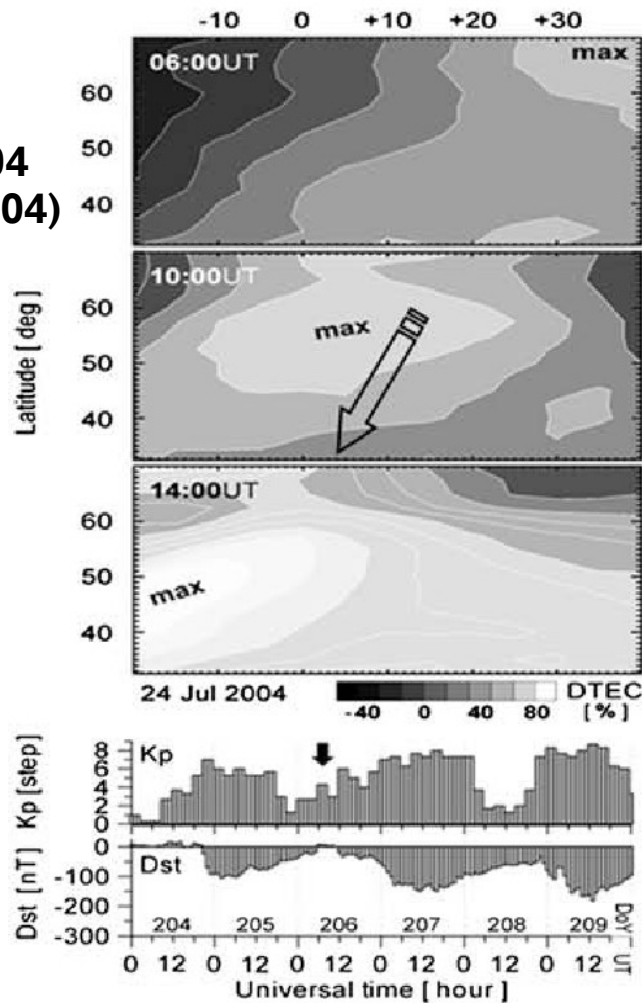
Structures ionosphériques

1) liées aux conditions perturbées du *space weather* :

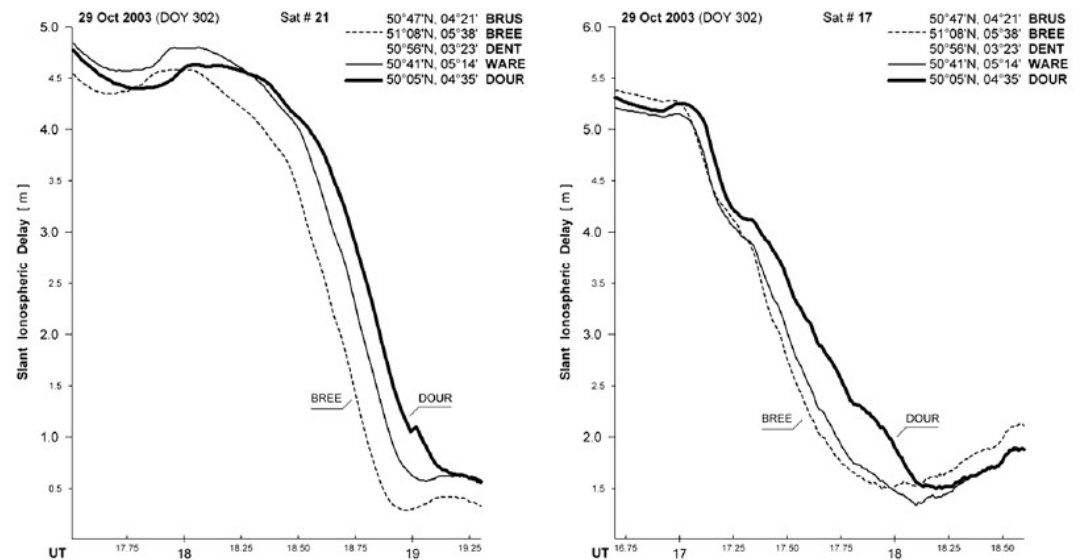
c. Structures à grande échelle dans le TEC

- Ces structures à grand échelle se meuvent à la manière d'un mur ; on parle de **mur ionosphérique** (*ionospheric wall*)

DOY 206/04
(24 juil. 2004)



DOY 301/03
(29 oct. 2003)

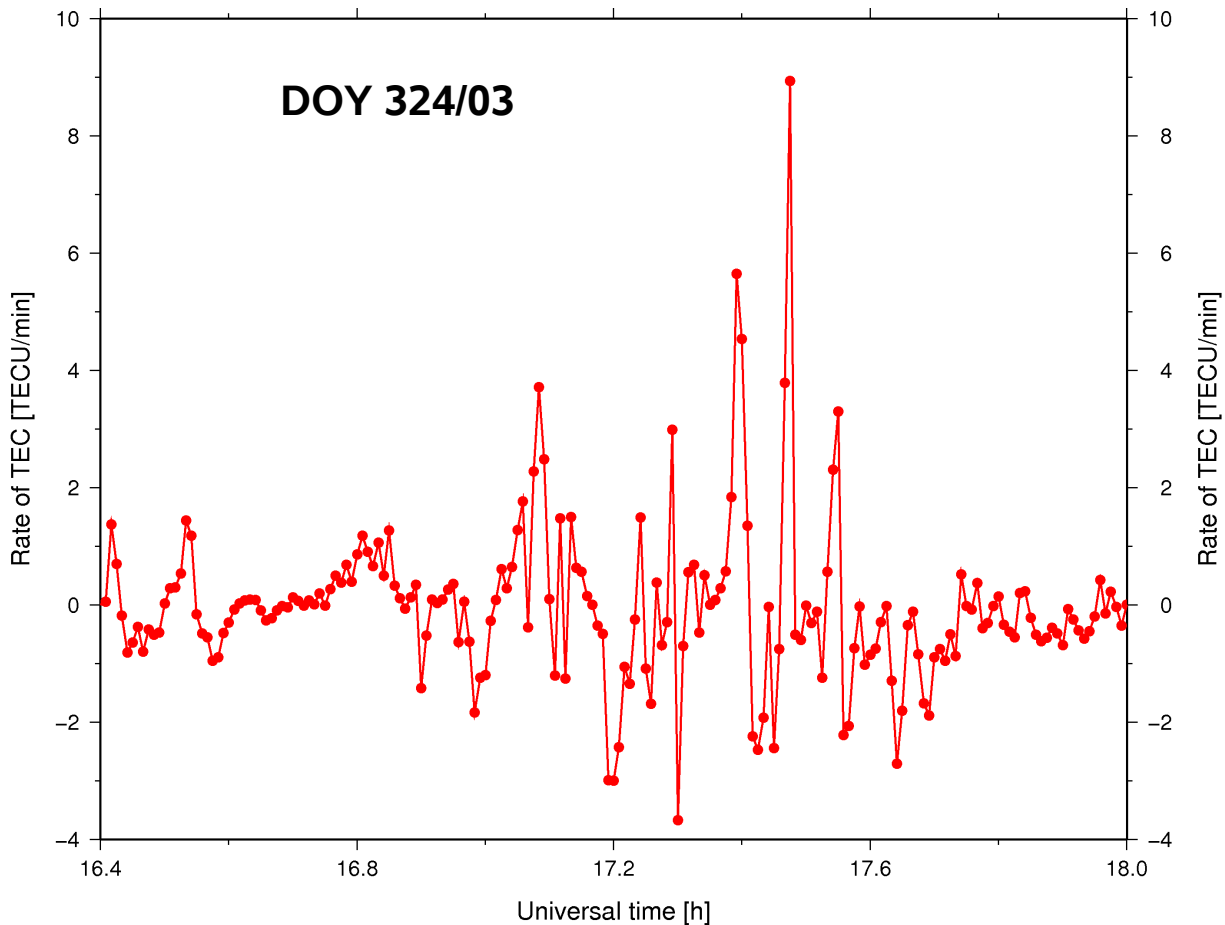


Structures ionosphériques

1) liées aux conditions perturbées du *space weather* :

d. Comportement aléatoire dans le TEC (bruit) : Noise-like structures (NLS)

- Comportement détecté dans le RoTEC mesuré à une station GPS. On constate que la concentration électronique varie de manière plus ou moins aléatoire → bruit
- Pas d'explication physique précise, si ce n'est le chaos généré par l'orage géomagnétique (champ magnétique et courants induits très variables...)

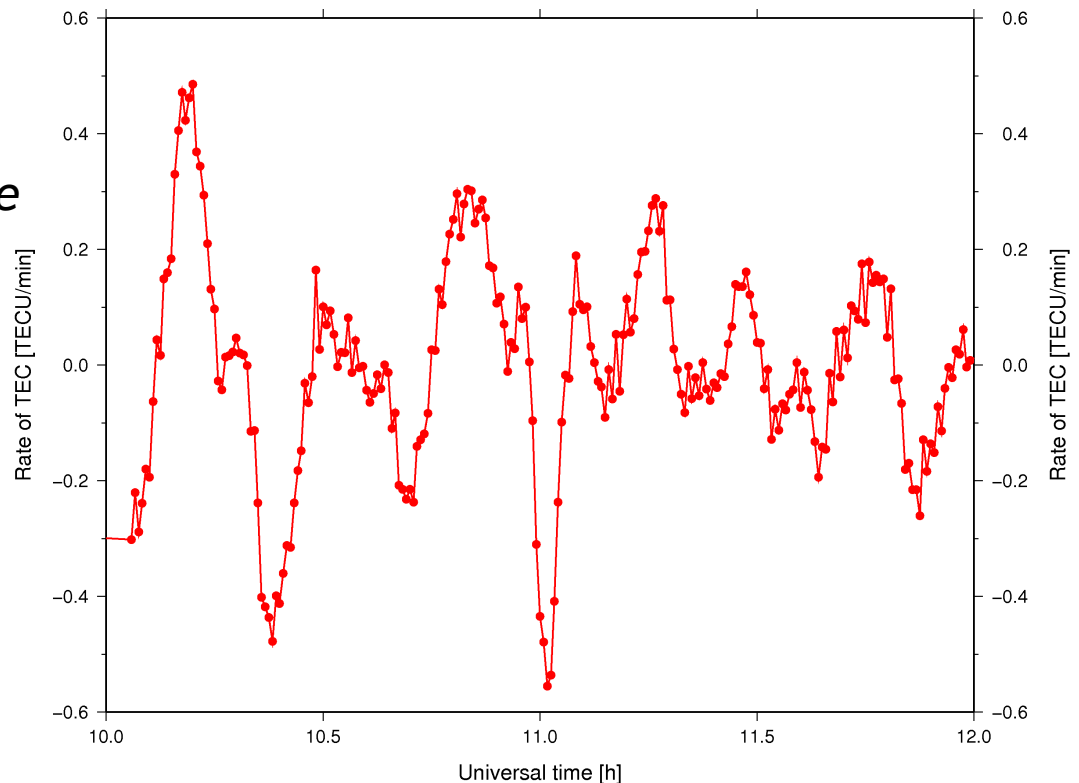


Structures ionosphériques

2) non liées au *space weather* :

Medium (and Small)-scale Traveling Ionospheric Disturbances : M(S)STID's

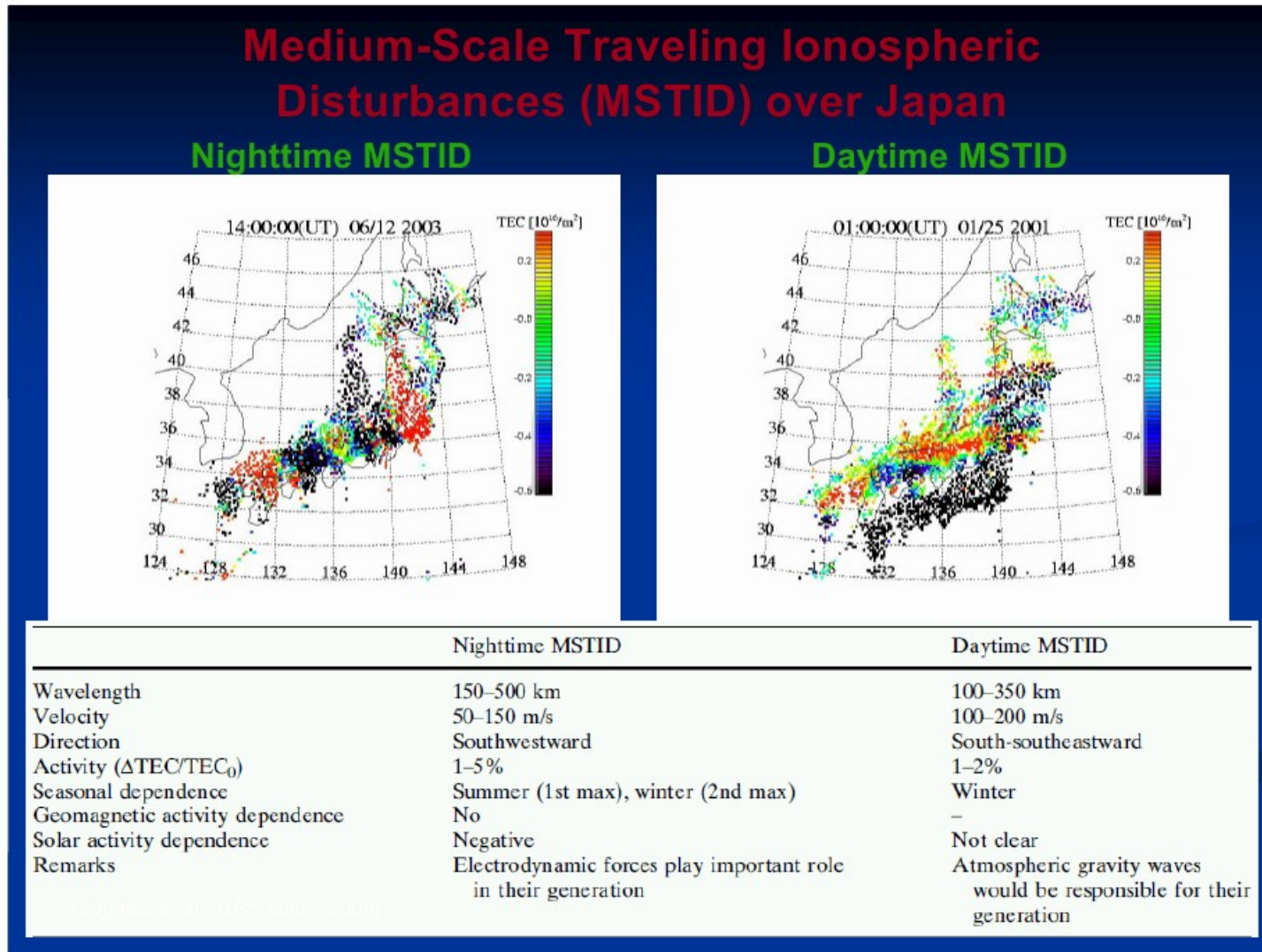
- Variation sinusoïdale de la concentration électronique de l'ionosphère due à l'interaction entre l'atmosphère neutre (excitée par des ondes de gravité) et le plasma ionosphérique.
- Diverses sources de génération de ces ondes : terminateur solaire, séismes, passage de fronts météo, marées atmosphériques, lancer de fusées...
- Longueur d'onde : 100 – 500 km ;
- Vitesse : 50 - 200 m/s.
- Distinction entre celle se produisant la nuit (nighttime MSTID) et le jour (*daytime* MSTID).
- Orientation préférentielle varie selon le type de MSTID.
- Fluctuation détectée dans le RoTEC mesuré à une station GPS :



Structures ionosphériques

2) non liées au *space weather* :

Medium (and Small)-scale Traveling Ionospheric Disturbances : M(S)STID's



2. IRRÉGULARITÉS IONOSPHERIQUES

b) Étude climatologique par GPS

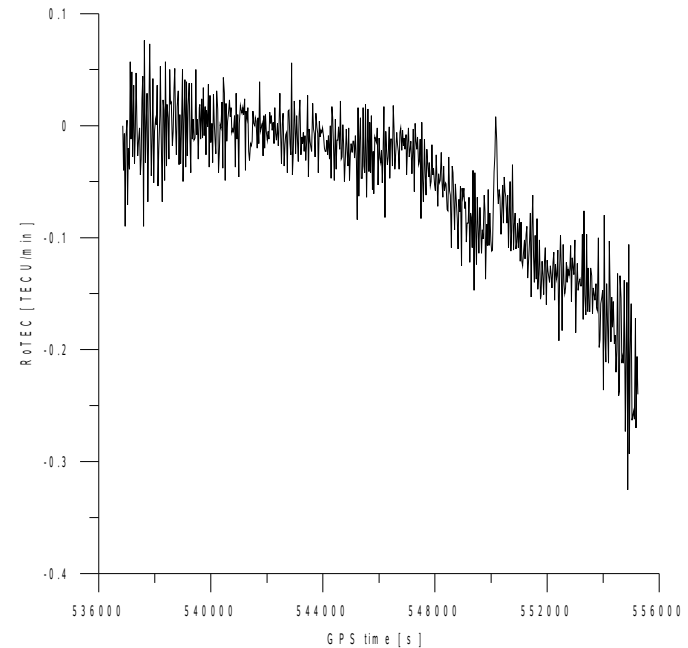
2.1. Principe de détection des petites structures ionosphériques par GPS

1. Formation de la combinaison « Geometric-Free » ϕ_{GF} sur les mesures de phases

$$\begin{aligned}\varphi_{GF}(t) &= \varphi_{L1}(t) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_{L2}(t) \\ &= 0.552 STEC(t) + M_{GF}(t) + N_{GF}\end{aligned}$$

2. Calcul du $\Delta VTEC$

$$\Delta VTEC(t_k) = 1,812 \frac{(\varphi_{GF}(t_k) - \varphi_{GF}(t_{k-1}))}{(t_k - t_{k-1})} \cdot \cos(Z_{PI})$$



2.1. Principe de détection des petites structures ionosphériques par GPS

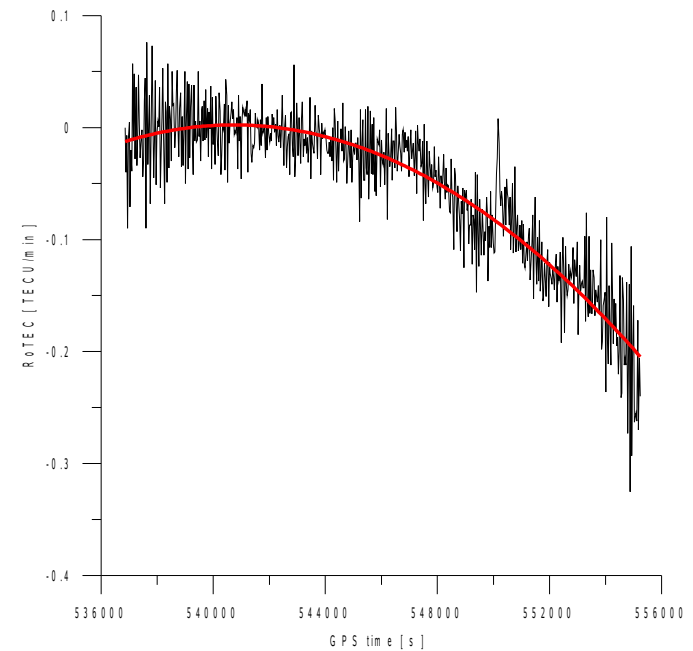
1. Formation de la combinaison « Geometric-Free » ϕ_{GF} sur les mesures de phases

$$\begin{aligned}\varphi_{GF}(t) &= \varphi_{L1}(t) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_{L2}(t) \\ &= 0.552 STEC(t) + M_{GF}(t) + N_{GF}\end{aligned}$$

2. Calcul du $\Delta VTEC$

$$\Delta VTEC(t_k) = 1,812 \frac{(\varphi_{GF}(t_k) - \varphi_{GF}(t_{k-1}))}{(t_k - t_{k-1})} \cdot \cos(Z_{PI})$$

3. **Modélisation polynomiale** des séries temporelles du $\Delta VTEC$



2.1. Principe de détection des petites structures ionosphériques par GPS

1. Formation de la combinaison « **Geometric-Free** » ϕ_{GF} sur les mesures de phases

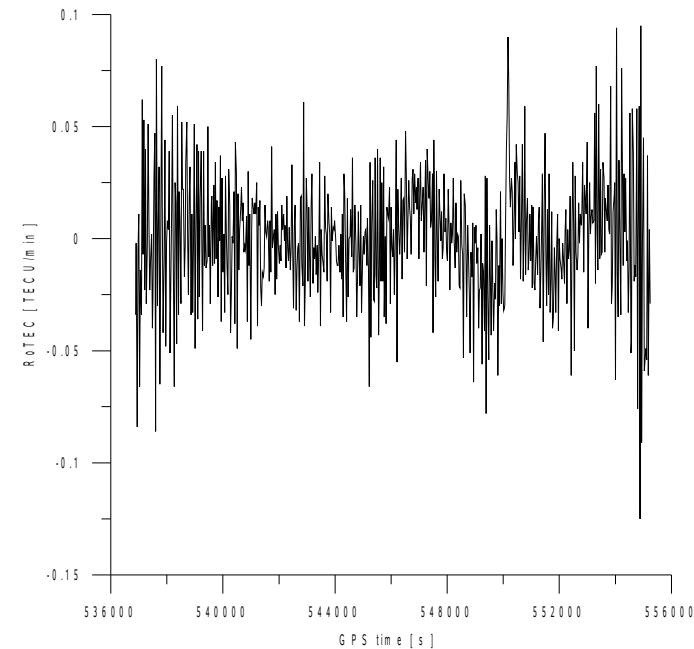
$$\begin{aligned}\varphi_{GF}(t) &= \varphi_{L1}(t) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_{L2}(t) \\ &= 0.552 STEC(t) + M_{GF}(t) + N_{GF}\end{aligned}$$

2. Calcul du **$\Delta VTEC$**

$$\Delta VTEC(t_k) = 1,812 \frac{(\varphi_{GF}(t_k) - \varphi_{GF}(t_{k-1}))}{(t_k - t_{k-1})} \cdot \cos(Z_{PI})$$

3. **Modélisation polynomiale** des séries temporelles du $\Delta VTEC$

4. Calcul des **résidus** « $\Delta VTEC$ – polynôme », encore appelés **Rate of TEC (RoTEC)**



2.1. Principe de détection des petites structures ionosphériques par GPS

1. Formation de la combinaison « **Geometric-Free** » ϕ_{GF} sur les mesures de phases

$$\begin{aligned}\varphi_{GF}(t) &= \varphi_{L1}(t) - \frac{f_1}{f_2} \varphi_{L2}(t) \\ &= 0.552 STEC(t) + M_{GF}(t) + N_{GF}\end{aligned}$$

2. Calcul du **$\Delta VTEC$**

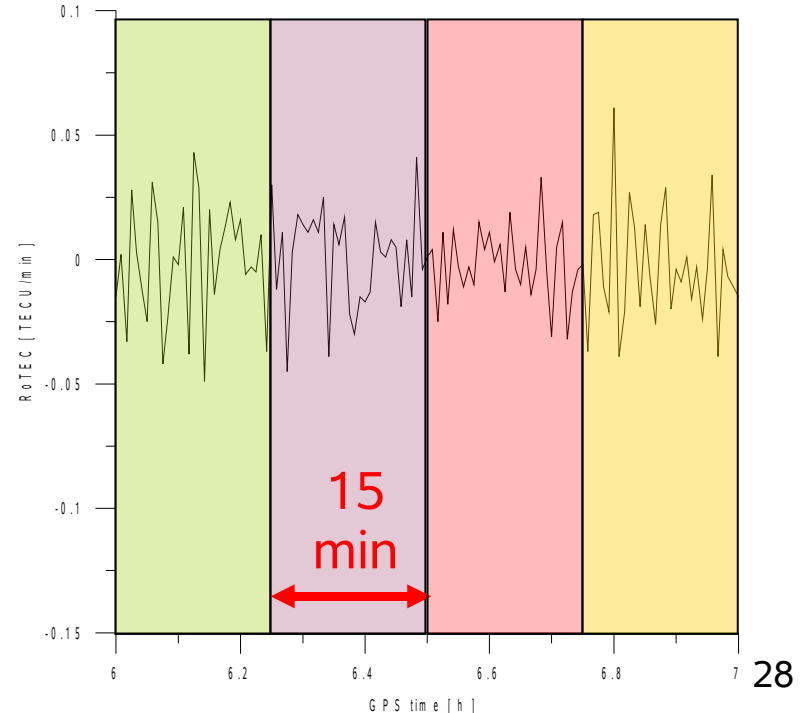
$$\Delta VTEC(t_k) = 1,812 \frac{(\varphi_{GF}(t_k) - \varphi_{GF}(t_{k-1}))}{(t_k - t_{k-1})} \cdot \cos(z_{PI})$$

3. **Modélisation polynomiale** des séries temporelles du $\Delta VTEC$

4. Calcul des **résidus** « $\Delta VTEC - \text{polynôme}$ », encore appelés **Rate of TEC (RoTEC)**

5. Toutes les 15 min, calcul de l'**écart-type σ** du RoTEC

Si $\sigma > 0,08$ TECU/min, on déclare qu'un **événement ionosphérique** a été détecté



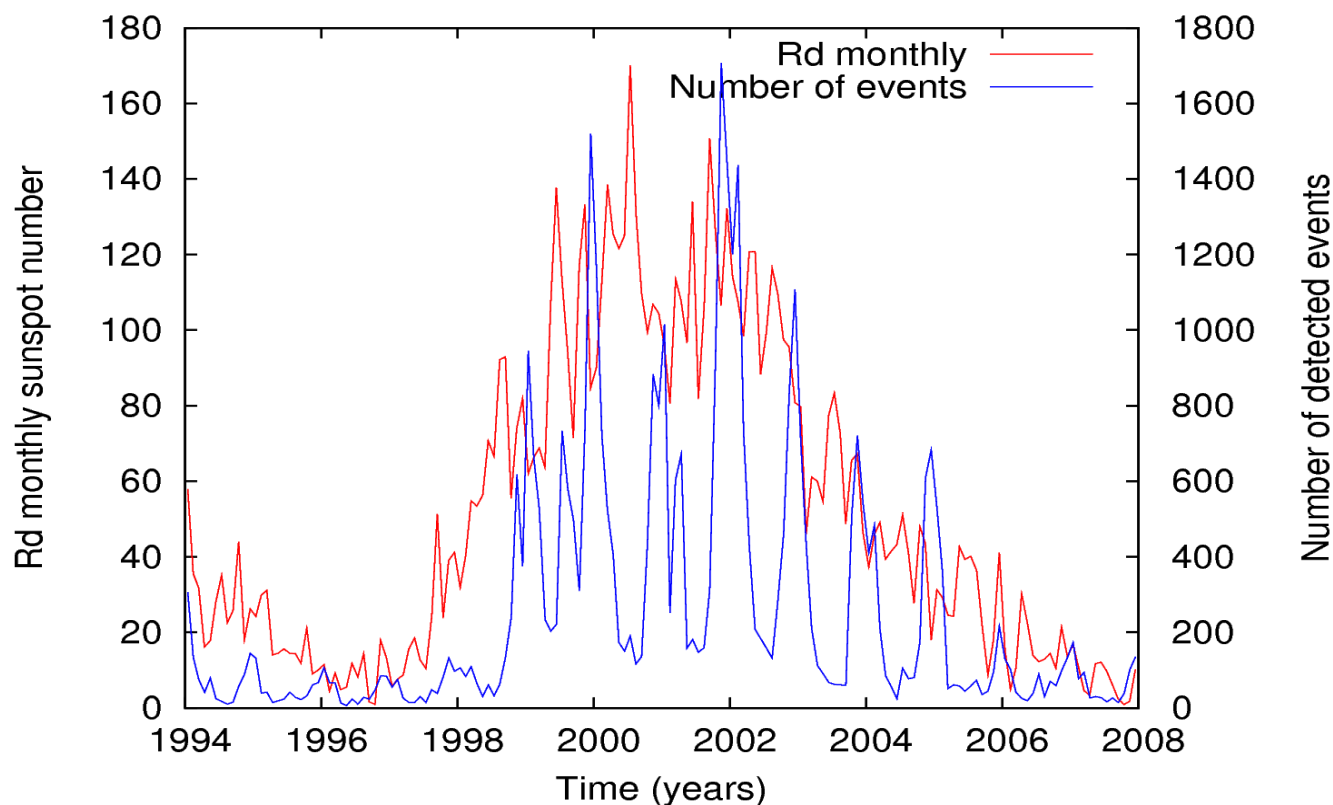
2.2. Étude climatologique des petites structures iono

Statistiques à la station GPS de BRUS de 1994 à fin 2008 (plus d'un cycle solaire)

1. Dépendance avec le cycle solaire

Le nombre d'événements détectés est plus grand durant les années de maximum solaire que durant les années de minimum solaire.

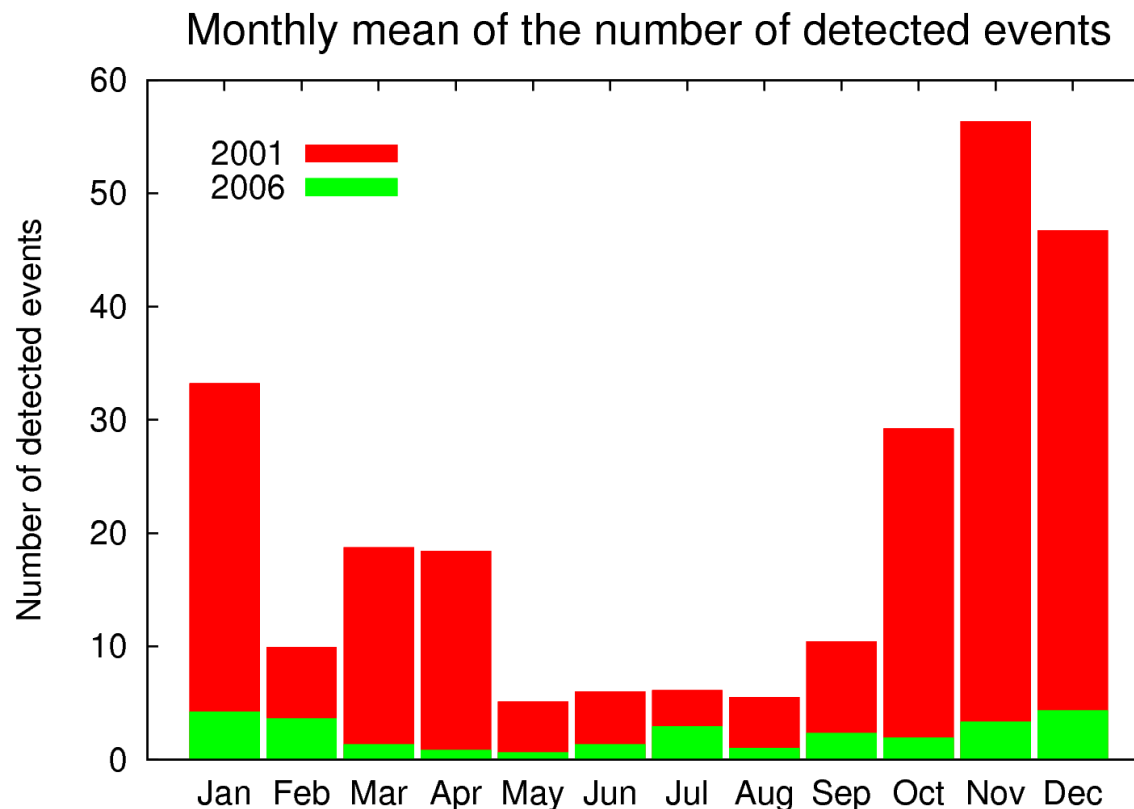
CEPENDANT la courbe montre une **dépendance mensuelle/saisonnnière**



2. Dépendance saisonnière

Moyenne mensuelle des événements calculée pour chaque mois en **2001 (max solaire)** et **2006 (min solaire)**

- Plus de petites structures détectée durant les mois d'**automne/hiver**
- Structures plus nombreuses durant max solaire (confirmation de l'influence de la phase solaire)

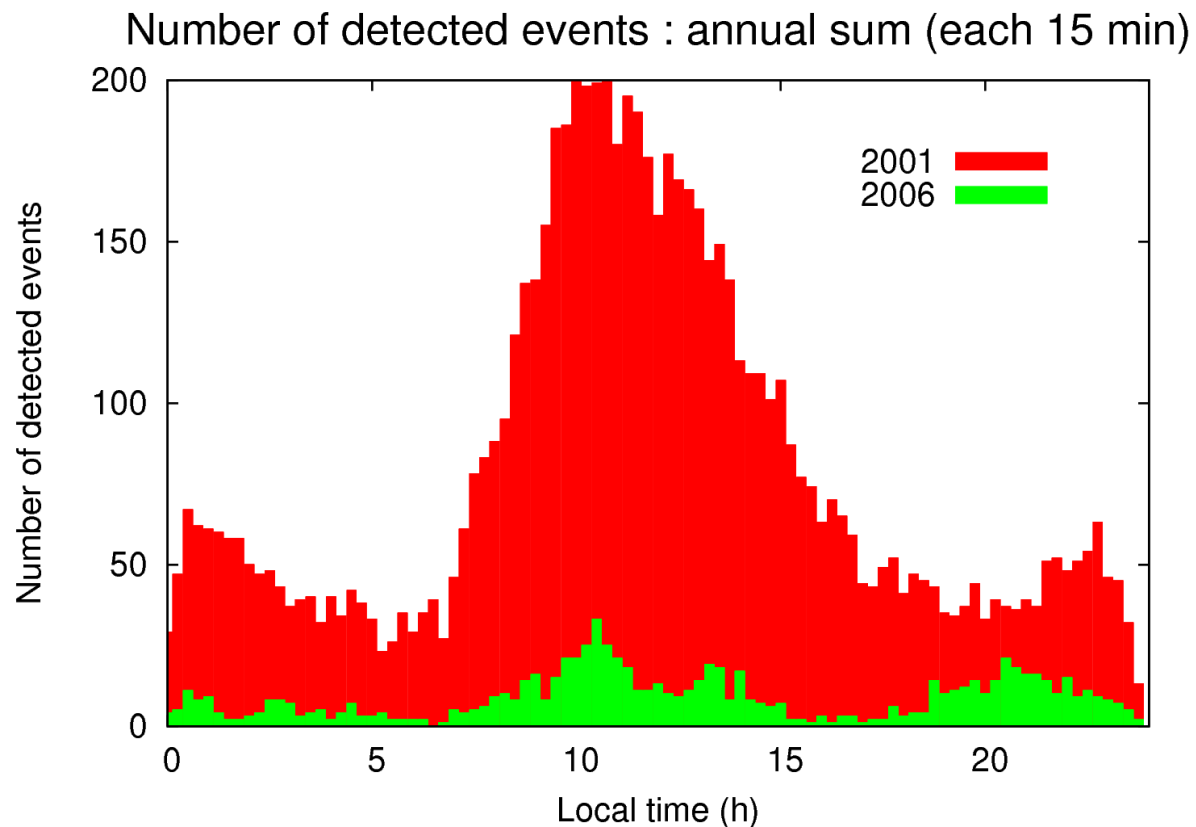


3. Dépendance en heure locale

Somme des événements calculée pour chaque tranche de 15 min en **2001** (max solaire) et **2006** (min solaire)

→ Maximum autour de **10 h**

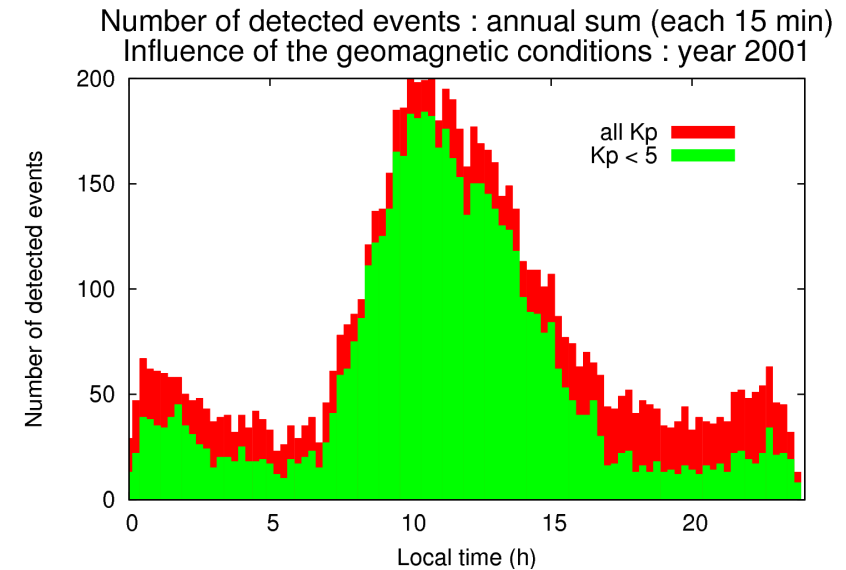
→ Max secondaire durant la **nuit**



4. Types de structures détectés

Somme des événements calculée pour chaque tranche de 15 min en 2001 (max solaire) et 2006 (min solaire) **MAIS** en incluant (rouge) ou non (vert) les jours de tempête géomagnétique ($Kp_{\max} < 5$).

- Offset entre les 2 courbes : structures dues aux orages géomagnétiques se produisent à n'importe quelle heure de la journée : **bruit ionosphérique**
- La majorité de ces structures ne sont pas corrélées à l'activité géomagnétique : **TID's**



5. Conclusions

2 types petites structures iono détectés :

- **Bruit ionosphérique** : petite fraction du nombre total / pas de comportement temporel spécifique (à part qu'ils sont plus nombreux durant max solaire)
- **TID's** : grande fraction du nombre total / fréquence d'occurrence dépend de la saison et de l'heure locale. Deux grands types :

➤ **TID's de jour** : autour 10h ; nombreuses

➤ **TID's de nuit** : entre 22 h et 2 h ; plus rares que les TID's de jour

6. Étude quantitative : extrêmes saisonnières

Valeurs maximales du RoTEC mesuré à BRUS entre 2001 et 2008 :

	Spring	Summer	Autumn	Winter
2001	6.881	1.147	4.028	9.068
2002	0.745	1.821	1.946	2.211
2003	0.693	0.653	9.839	1.231
2004	1.581	1.152	0.861	1.263
2005	1.234	2.579	0.543	1.276
2006	0.582	1.197	0.805	0.845
2007	1.068	0.886	0.593	0.796

En règle générale, les maxima sont plus importants durant les années de maximum d'activité solaire (+ de tempêtes géomagnétiques dues à l'activité solaire importante)

CEPENDANT, durant minimum solaire, possibilité d'observer de fortes variations du TEC

3. PERSPECTIVES

**Un modèle de prévisions
ionosphériques**

5.1. Idée et formulation

On a établi des **statistiques d'occurrence des petites structures** ionosphériques (principalement les TID's) pour la période 1994 – 2009

↳ Pourquoi ne pas utiliser ces statistiques pour implémenter un **modèle de prévision de l'activité ionosphérique**?

En effet, on sait que la fréquence d'occurrence (et l'intensité) des irrégularités ionosphériques dépend de :

- la phase dans le cycle solaire
- la saison (voire le mois)
- l'heure locale

⇒ Trouver f telle que $Nbre\ events(t) = f(\phi_{soleil}(t), M(t), h_{loc})$

→ modèle **EMPIRIQUE!**

Ces statistiques représentent le **caractère « moyen »** de la distribution temporelle des irrégularités ionosphériques (comportement prévisible à long terme). Les prévisions peuvent donc être calculées pour n'importe quel jour de l'année.

RTK status

This product provides users with qualitative information about ionospheric influence on Real Time Kinematic positioning technique in Belgium. The product is based on a colour scale: **green** (no degradation of RTK), **yellow** (small degradations of RTK possible), **orange** (strong degradations of RTK), **red** (severe degradations of RTK). Click [here](#) to learn more about the product.

BRUS 2003-11-20		
time	#events	intensity
00:00	0	0
01:00	0	0
02:00	0	0
03:00	0	0
04:00	0	0
05:00	0	0
06:00	0	0
07:00	0	0
08:00	0	0
09:00	1	1
10:00	5	6
11:00	7	13
12:00	3	5
13:00	15	37
14:00	18	49
15:00	22	114
16:00	22	115
17:00	24	352
18:00	25	223
19:00	26	313
20:00	20	119
21:00	19	144
22:00	14	59
23:00	9	21

Date:	<input type="text" value="2003-11-20"/>
Station:	<input type="text" value="BRUS"/> ↕
	<input type="button" value="Reload"/>

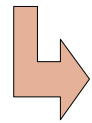
Actuellement :

Service web basé sur la méthode à 1 station : observations en temps quasi-réel de l'activité ionosphérique à Bruxelles : **nowcasting**.

Utilisation d'un **code couleur** en fonction de l'intensité de la dégradation (classe de risque).

Actuellement : Service web basé sur la méthode à 1 station : observations en temps quasi-réel de l'activité ionosphérique à Bruxelles : **nowcasting**.

Utilisation d'un **code couleur** en fonction de l'intensité de la dégradation.



Pourquoi ne pas **calquer** notre modèle de prévisions (*forecasting*) sur les codes couleurs utilisés pour le *nowcasting*?

→ lien entre *nowcasting* et *forecasting* renforcé dû à l'utilisation d'une même logique

A posteriori, l'utilisateur pourra effectuer de la **validation des prévisions** en utilisant les données du *nowcasting* (1 h de latence).

Forecasting (Prévisions)

A priori

Heure	Ionosphère
7 - 8	Vert
8 - 9	Vert
9 - 10	Orange
10 - 11	Rouge
11 - 12	Orange
12 - 13	Vert
13 - 14	Vert

Nowcasting (Observations)

A posteriori

Heure	Ionosphère
7 - 8	Vert
8 - 9	Orange
9 - 10	Orange
10 - 11	Orange
11 - 12	Vert
12 - 13	Vert
13 - 14	Vert

5.2. Amélioration du service existant et construction du modèle

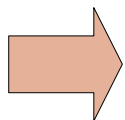
1) Échelle de couleurs : sur quelle base la fixer?

Avant : sur base de statistiques d'occurrence de telles conditions

Maintenant : utilisation d'une donnée quantitative concrète : l'erreur de position due à l'ionosphère ΔD_{iono}

Comment? Établir une **corrélation mathématique** rigoureuse pour une ligne de base typique du RTK (exemple : GILL – LEEU, 11.5 km) entre :

- le nombre (l'intensité?) horaire des événements ionosphériques détectés à BRUS par la méthode « 1 station »
- l'erreur de position due à l'ionosphère telle que calculée par notre programme RTK agrégée en une donnée horaire (moyenne, écart-type?)



A chaque code couleur correspondrait une classe de dégradation de la position RTK due à la présence de petites structures ionosphériques, pour une ligne de base typique (11 km dans ce cas)

	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Erreur de position	< 3 cm	3 – 10 cm	10 – 25 cm	> 25 cm

2) Et le géomagnétisme?

Les statistiques calculées sur les 15 ans de données fournissent une tendance « moyenne » du comportement temporel des irrégularités ionosphériques mais incluent cependant les observations relatives aux phénomènes géomagnétiques qui ne présentent pas de dépendance en la saison ou en l'heure locale (>< TID's)

- ➔ La « construction » de la **corrélation** entre ΔD_{iono} et le code couleur correspondant se ferait en **excluant les jours de tempête géomagnétique**, par exemple.
- ➔ La prévision de l'**occurrence des phénomènes géomagnétiques** (et l'erreur de position qui leur est associée, *i.e.* le code couleur) ne peut se faire qu'en utilisant des **données à court terme!**

Information géomagnétique → **indices géomagnétiques**.

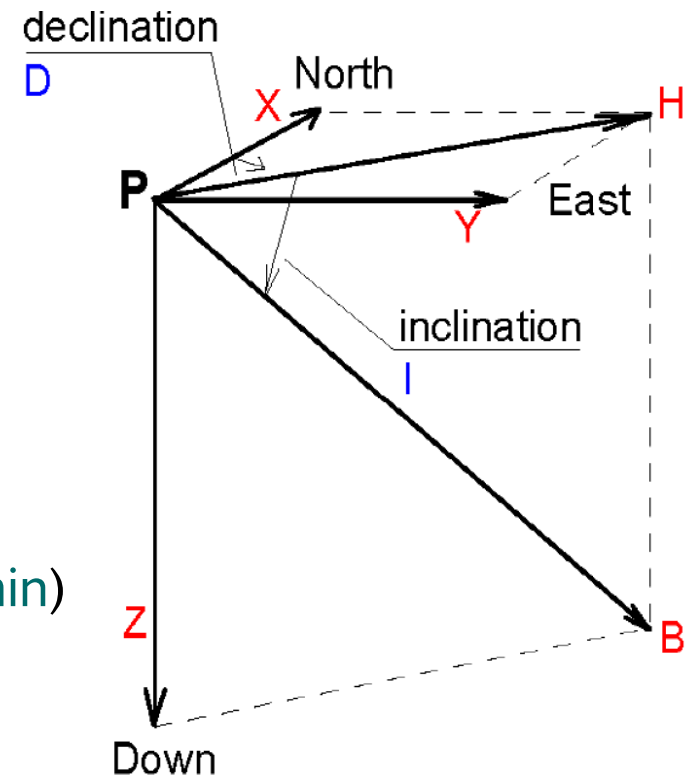
Dourbes (observatoire magnétique de l'IRM) : **$K_{Dourbes}$** (mesures continues).

De plus : **prévisions de l'indice $K_{Dourbes}$** grâce à un **modèle hybride**

L'indice géomagnétique K

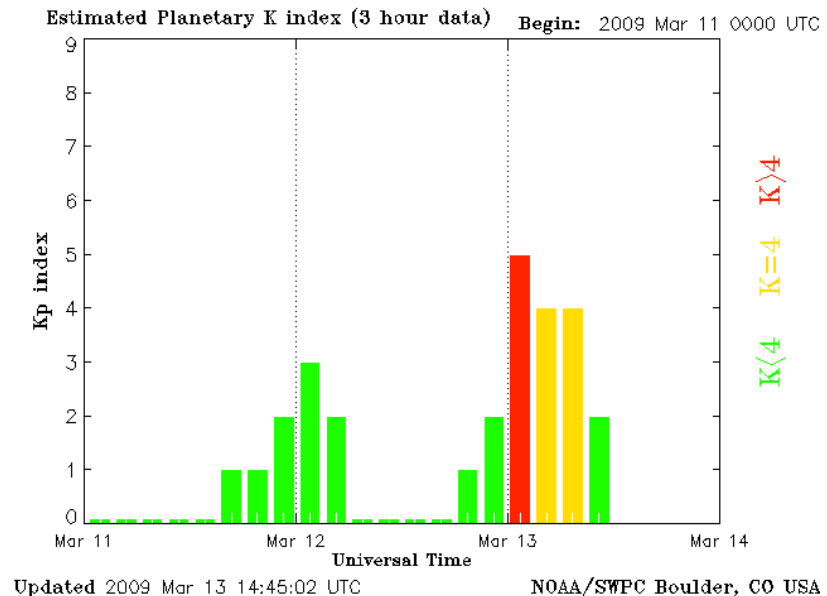
Indice **LOCAL** basé sur les mesures issues d'un magnétomètre qui mesure les trois composantes du champ géomagnétique.

- Indice basé sur **3 heures** de mesures
- Valeurs entières de **0 à 9**
- Calculé sur base de la déviation maximale (**max-min**) dans le plan horizontal sur les 3h d'intervalle



Exemple :

K	ΔB [nT]
0	0 - 5
1	5 - 10
2	10 - 20
3	20 - 40
4	40 - 70
5	70 - 120
6	120 - 200
7	200 - 330
8	330 - 500
9	> 500



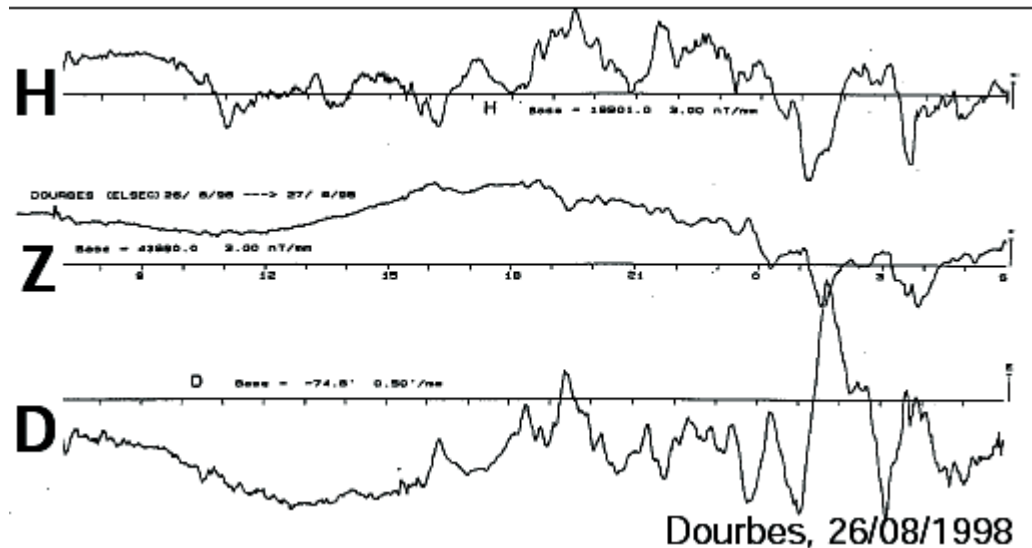
Prévisions de l'indice K sur base de :

- Mesures **magnétomètres** au sol (mesures géomagnétiques sur les 3 composantes)

H : valeur de B dans le plan HZ

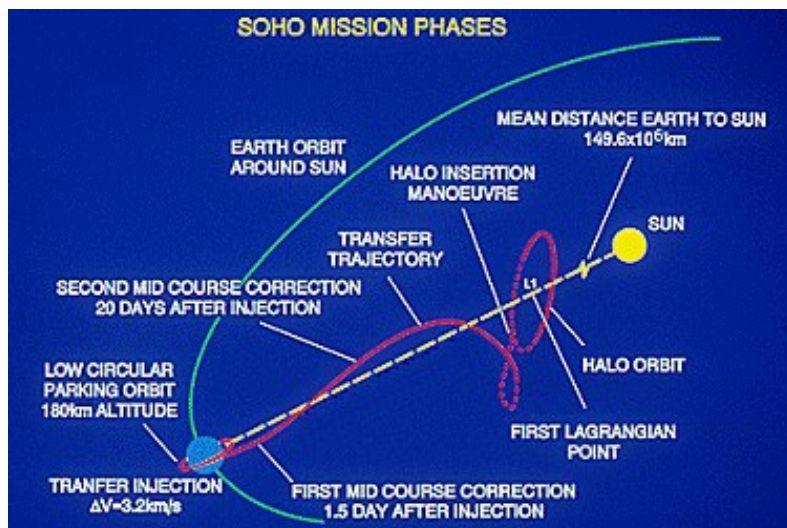
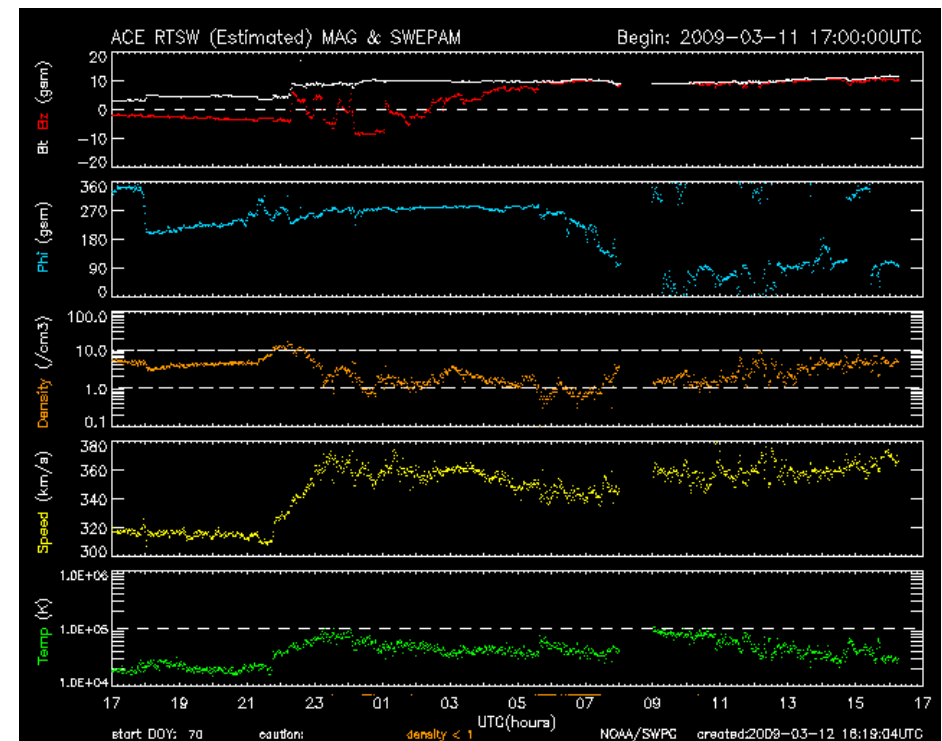
Z : valeur de B selon l'axe Z

D : déclinaison (angle)

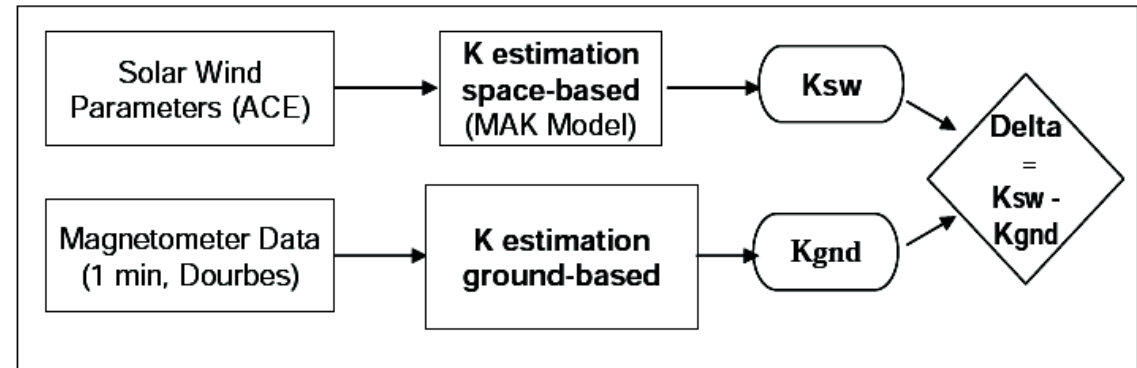


- Mesures du **vent solaire** et du champ magnétique interplanétaire (satellite ACE)

champ total, vitesse, densité, T...



↳ **Modèle empirique HYBRIDE**
de prévision de K_{Dourbes}



Pratiquement : prévisions de K_{Dourbes} **6 h** à l'avance

→ possibilité d'avertissements en cas de conditions de tempête ($K \geq 5$)

FINALEMENT, le **modèle de prévision ionosphérique** aura la forme suivante :

$$\text{Nbre events}(t) = \underbrace{f(\phi_{\text{soleil}}(t), M(t), h_{\text{loc}})}_{\text{long terme / TID's}} + \underbrace{f(K_{\text{Dourbes}})}_{\text{court terme / bruit iono}}$$

- Idée :
- Update toutes les 15 minutes (cf. site web opérationnel)
 - Avertissements envoyés en cas de conditions oranges ou rouges (selon le niveau de service exigé par le client)

Merci de votre attention !

Quelques liens intéressants

- GPS

<http://tycho.usno.navy.mil/gps.html> (site officiel du système GPS)

<http://www.agiv.be/gis/diensten/flepos/> (site de FLEPOS)

<http://gps.wallonie.be/> (site de WALCORS)

- Ionosphère et géomagnétisme

<http://digisonde.oma.be/> (sondeur ionosphérique de l'IRM)

<http://swans.meteo.be> (section « profils ionosphériques » de l'IRM)

<http://www.esa-spaceweather.net/swenet/index.html> (SWENET)

- Space Weather

<http://sidc.oma.be/> (Observatoire Royal de Belgique – section « Soleil »)

<http://www.spaceweather.com/> (portail « Space Weather »)

Références

- Coster A. and Tsugawa T., « The impact of traveling ionospheric disturbances on global navigation satellite systems », In *proceedings of URSI 2008*, Chicago, USA, August 2008.
- Hernandez-Pajares M., Juan J.M. and Sanz J. « Medium-Scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements : spatial and temporal analysis ». *Journal of Geophysical Research*, 111, 2006.
- Saito A., Nishimura M., Yamamoto M., Fukao S., Kubota M., Shiokawa K., Otsuka Y., Ishii M., Sakanoi T. and Miyazaki S. « Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT campaign ». *Geophysical Research Letters*, 82:31–45, 2008.
- Stankov S.M., Warnant R. and Stegen K. « Transionospheric GPS signal delay gradients observed over mid-latitude Europe during the geomagnetic storms of October–November 2003 ». *Advances in Space Research*, 43:1314–1324, 2009.
- Tsugawa T. and Saito A. « Damping of large-scale traveling ionospheric disturbances detected with GPS networks during the geomagnetic storm », *Journal of Geophysical Research*, 108, 2003
- Warnant R. and Pottiaux E. « The increase of the ionospheric activity as measured by GPS ». *Earth Planets Space*, 52:1055–1060, 2000.
- Wautelet G., Lejeune S. and Warnant R. « Effects of ionospheric small-scale structures on GNSS ». In *Proceedings of IRST 2009*, pages 196–200, Edinburgh, UK, April, 2009.

Université
de Liège



Institut Royal Météorologique

Modélisation de l'erreur ionosphérique qui affecte les systèmes de positionnement par satellites

26 novembre 2009

Gilles WAUTELET
Doctorant en géographie

2^{ème} année master en géométrologie-géomatique