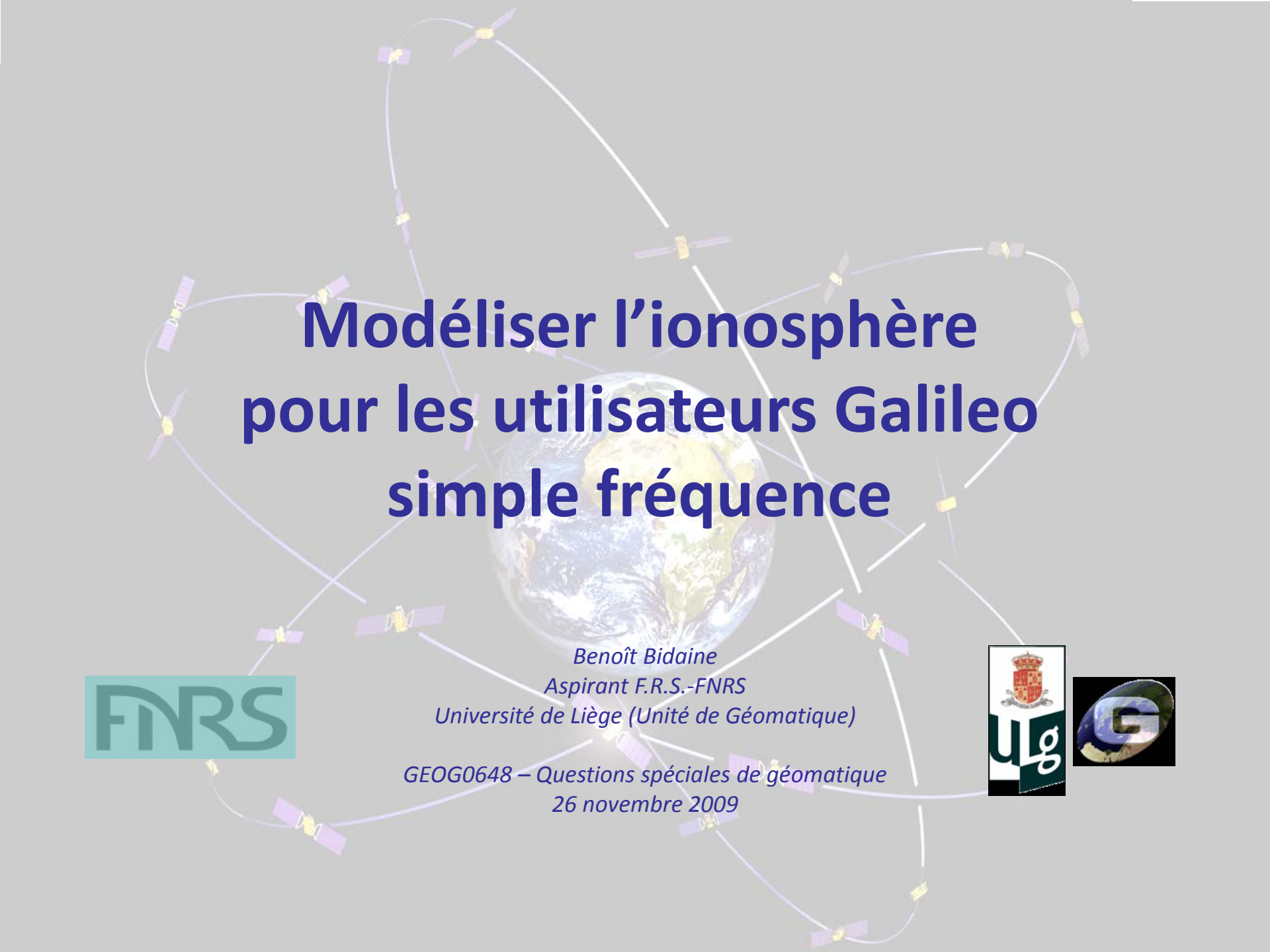




Modéliser l'ionosphère pour les utilisateurs Galileo simple fréquence

Benoît Bidaine

Aspirant F.R.S.-FNRS

Université de Liège (Unité de Géomatique)

GEOG0648 – Questions spéciales de géomatique

26 novembre 2009

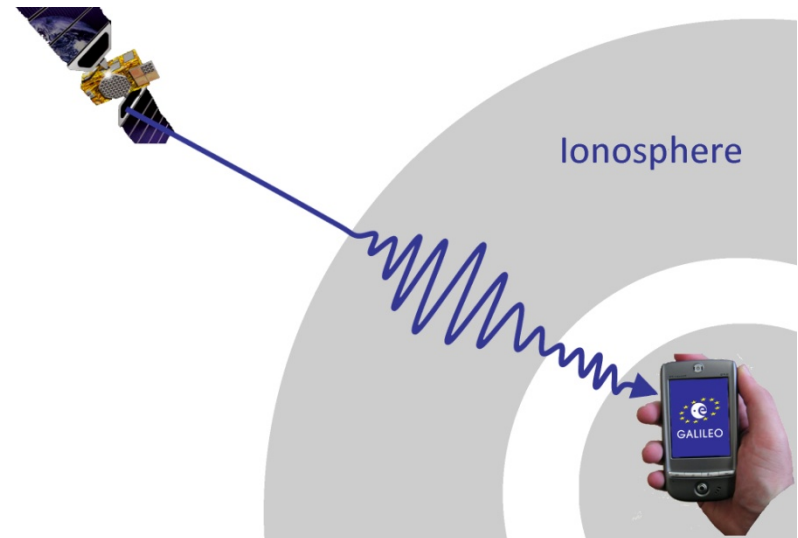


Le GPS est de plus en plus utilisé de nos jours!

Oui mais il commence à montrer ses limites...

4

C'est pourquoi l'Europe lance Galileo!



L'ionosphère doit être modélisée
pour les récepteurs simple fréquence.

1. Caractéristiques

L'**ionosphère** doit être modélisée
pour les récepteurs simple fréquence.

1. Caractéristiques

2. Influence

L'**ionosphère** doit être modélisée
pour les récepteurs simple fréquence.

1. Caractéristiques

2. Influence

3. Modélisation

1. Caractéristiques

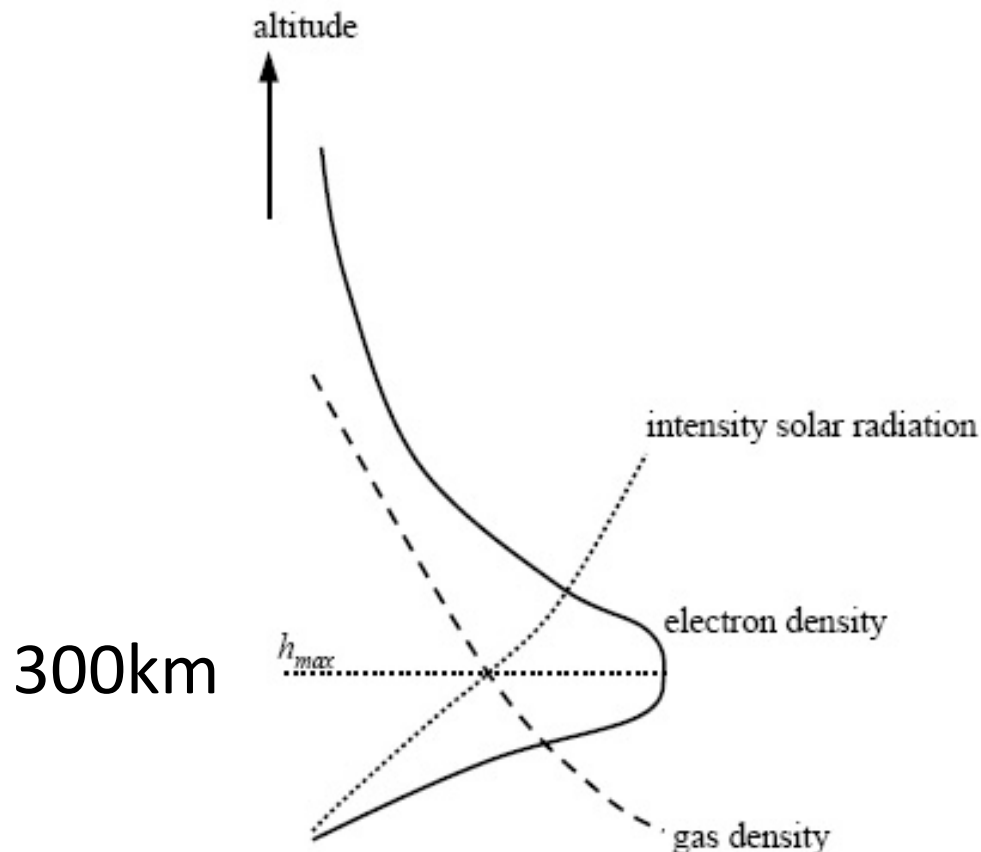
2. Influence

3. Modélisation

1. Caractéristiques

L'atmosphère est ionisée par le rayonnement solaire.

- Couche comprenant une certaine densité d'électrons



1. Caractéristiques

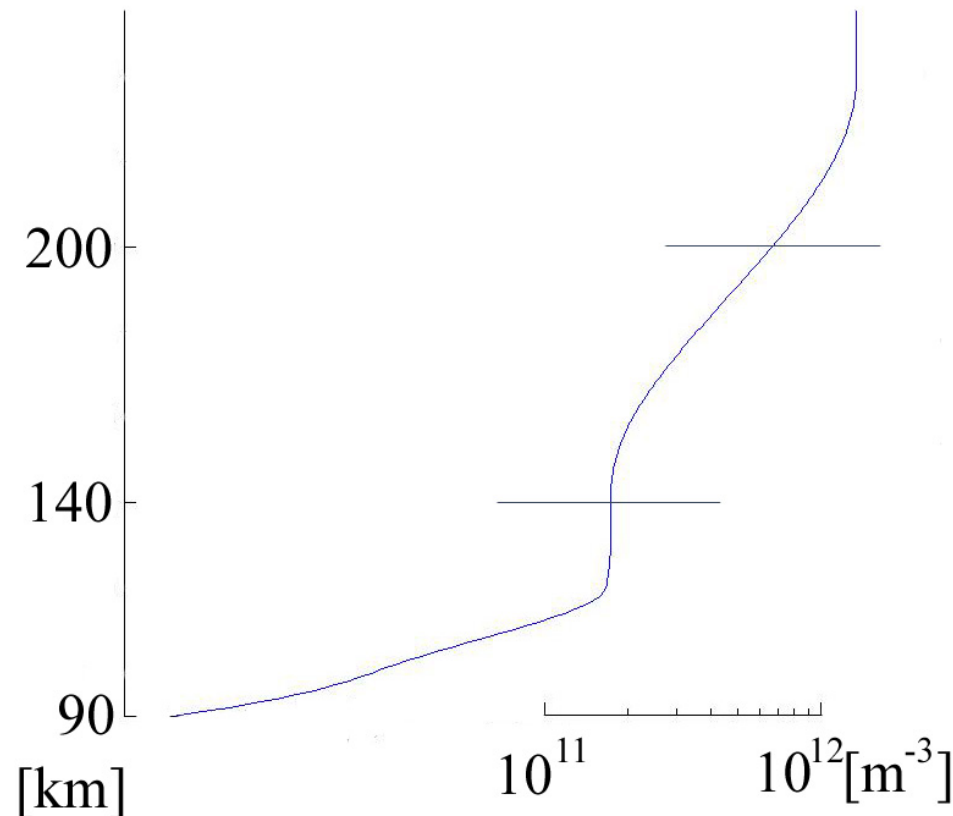
L'atmosphère est ionisée par le rayonnement solaire.

- Couche comprenant une certaine densité d'électrons

- F2

- F1

- E



1. Caractéristiques

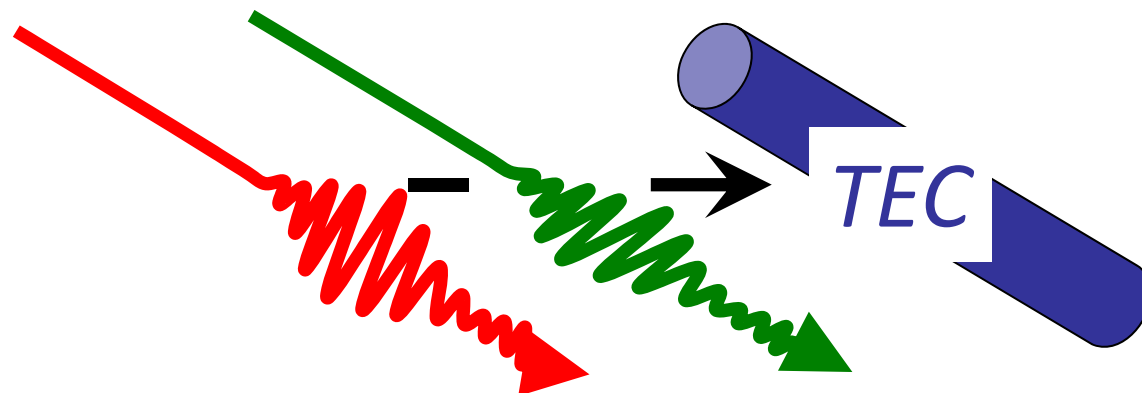
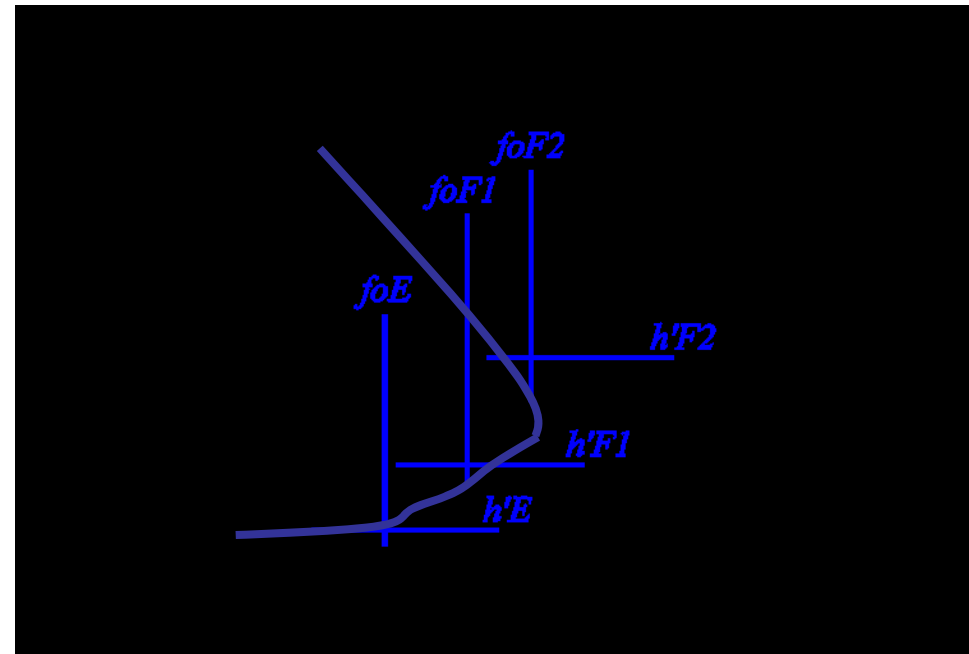
Différents paramètres sont couramment utilisés.

- Fréquences critiques : f_oE , f_oF_1 , f_oF_2
→ liées aux pics des couches
- Intégrale (verticale ou oblique) de Ne : TEC
→ 1 TECu = 10^{16} el. m⁻² ~ 0.16 m (L1)

1. Caractéristiques

Différentes mesures peuvent être effectuées.

- Sondages verticaux
 - paramètres (scaling)
 - profils Ne (inversion)
- Combinaisons GPS
« geometric free »
 - TEC



1. Caractéristiques

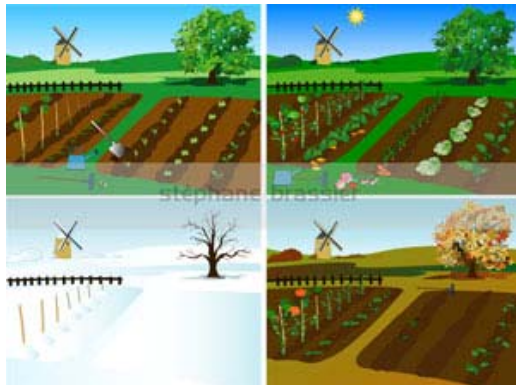
L'influence du rayonnement solaire suit certaines variables.



→ lat, long



→ UT



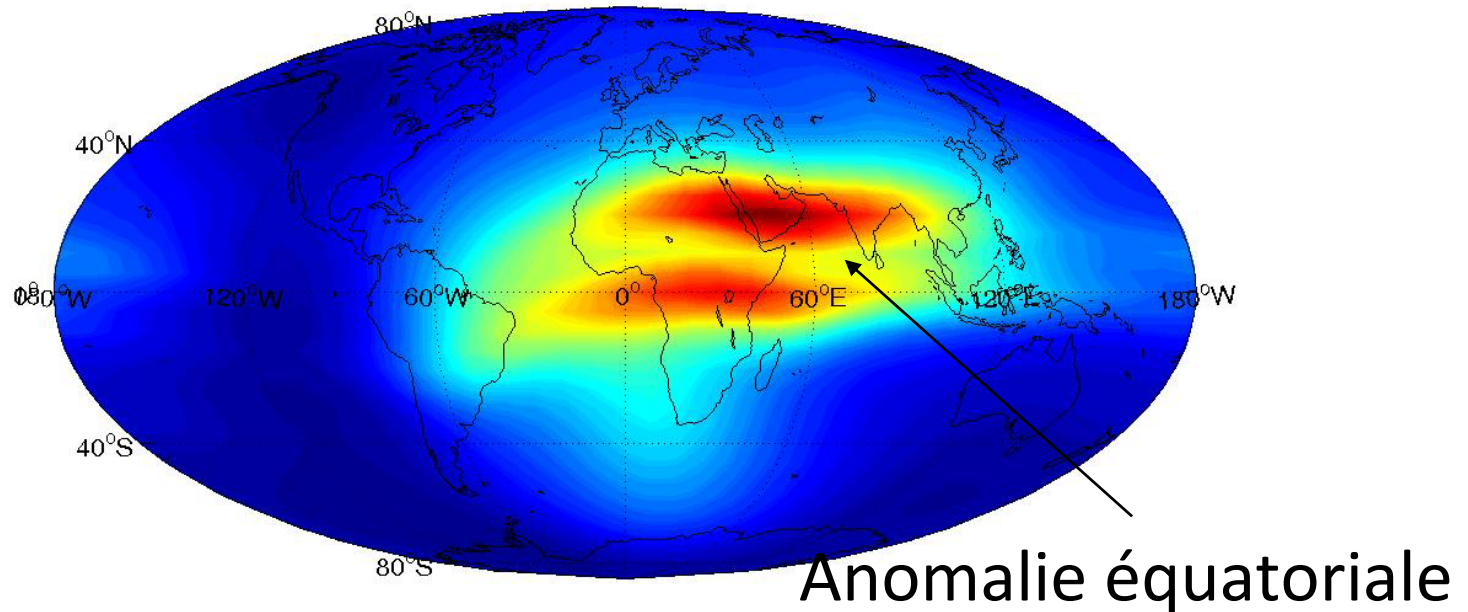
→ mth



→ F10.7/R

1. Caractéristiques

L'ionosphère suit la forme du champ magnétique terrestre.



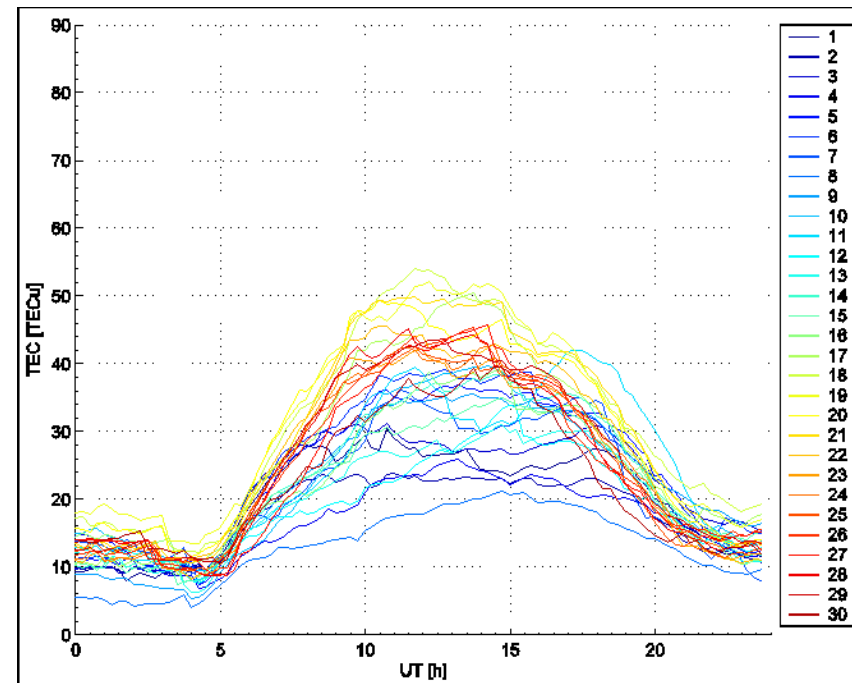
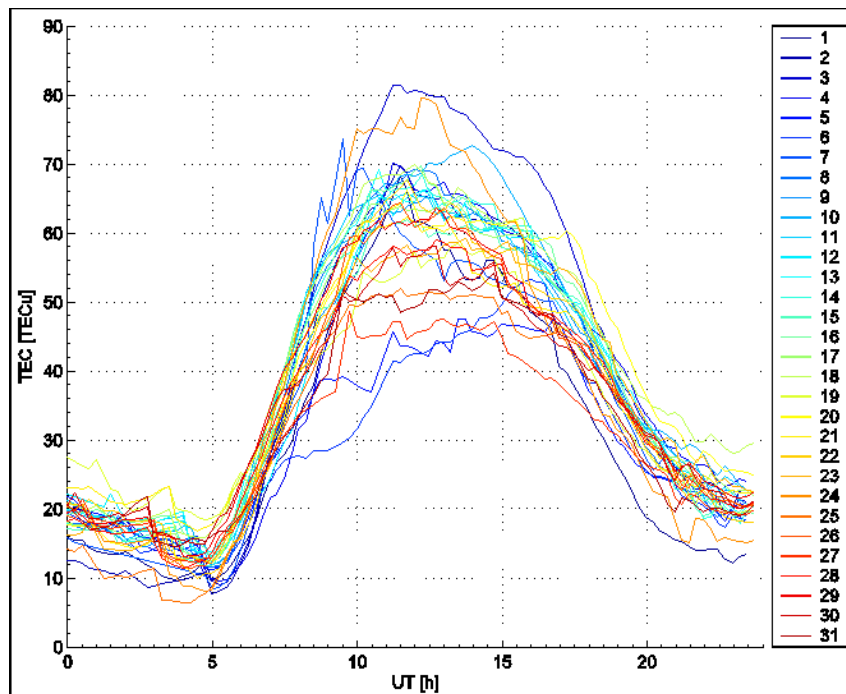
1. Caractéristiques

L'ionosphère suit l'évolution temporelle du rayonnement solaire.

Mars 2002

Bruxelles

Septembre 2002



- Variation au cours de la journée
suivant une médiane mensuelle
- Variation saisonnière

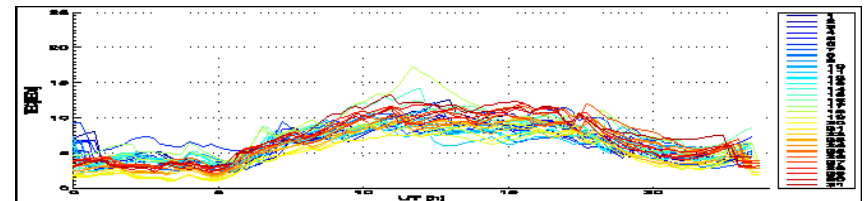
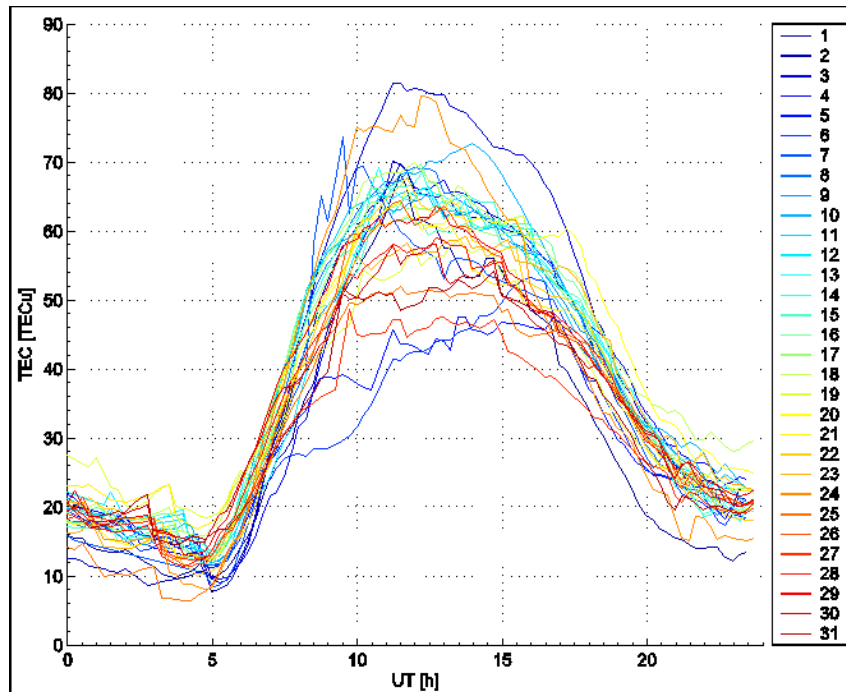
1. Caractéristiques

L'ionosphère suit l'évolution temporelle du rayonnement solaire.

Janvier 2002

Bruxelles

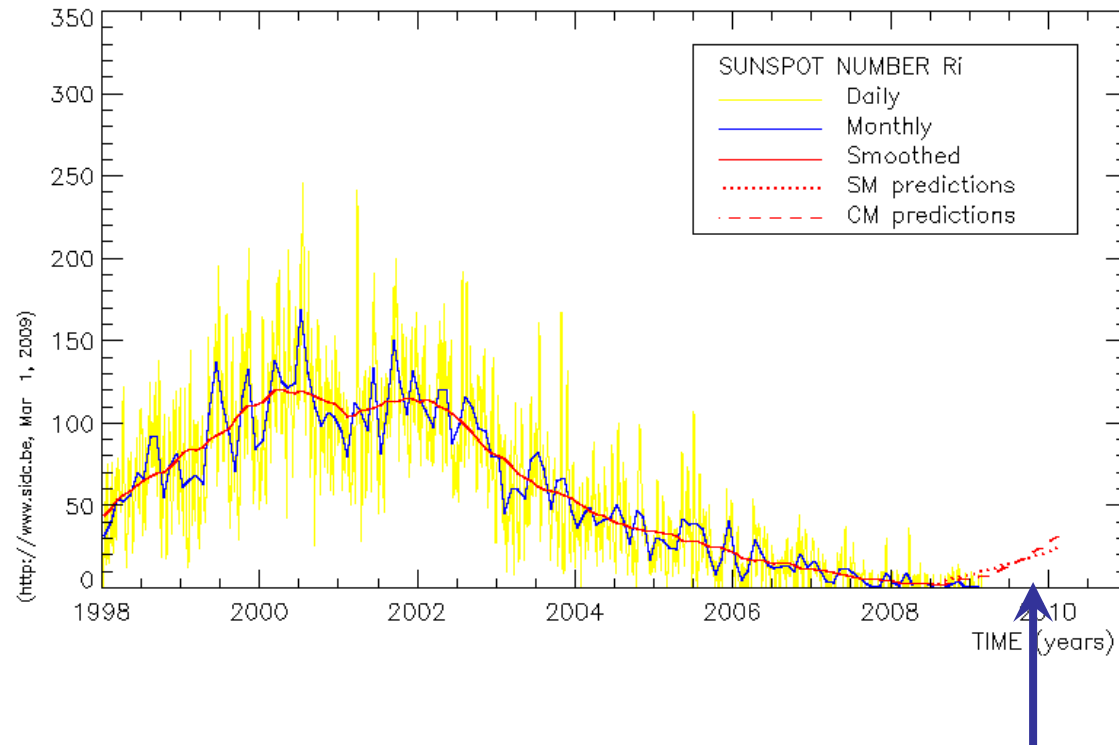
Janvier 2006



- Variation en fonction de l'activité solaire
- Ordre de grandeur du TEC vertical : 60 TECu $\rightarrow$ 10m

1. Caractéristiques

L'ionosphère suit l'évolution temporelle du rayonnement solaire.



- Minimum d'activité solaire
- Galileo opérationnel au prochain maximum

1. Caractéristiques

2. Influence

3. Modélisation

2. Influence

Le délai ionosphérique dépend du TEC et de la fréquence.

- Délai ionosphérique = différence entre temps de parcours du signal dans l'ionosphère et dans le vide

$$\tau = \int_{sat.}^{rec.} \frac{ds'}{v} - \int_{sat.}^{rec.} \frac{ds}{c} = \frac{1}{c} \left(\int_{sat.}^{rec.} n ds' - \int_{sat.}^{rec.} ds \right)$$

- Indice de réfraction : $n_g = 1 + 40.3 \frac{N_e}{f^2}$

2. Influence

Le délai ionosphérique dépend du TEC et de la fréquence.

- En termes de distance

$$I_g = \int_{sat.}^{rec.} (n_g - 1) ds = \frac{40.3}{f^2} \int_{sat.}^{rec.} N_e ds = \frac{40.3}{f^2} sTEC$$

- Utilisation de plusieurs fréquences pour éliminer ou mesurer l'erreur ionosphérique
- Contenu Total en Electons (TEC) à modéliser pour les utilisateurs simple fréquence

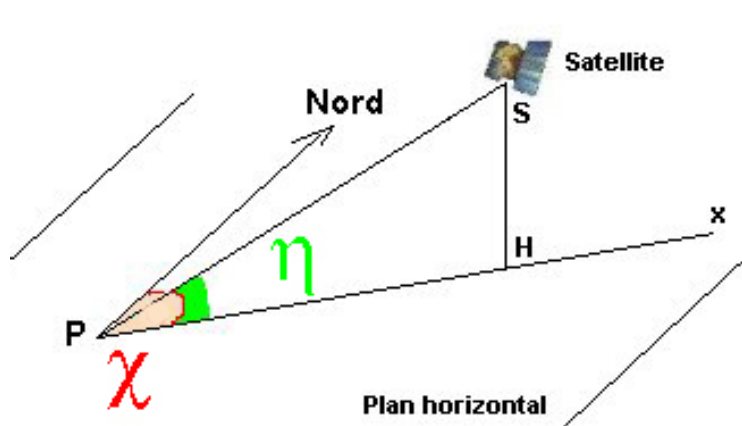
2. Influence

Voyons comment il se traduit en coordonnées.

- Solution (linéaire) des moindres carrés

$$\underline{x} = (A^T A)^{-1} A^T \underline{l} \quad \rightarrow \quad \underline{\Delta x}_l = (A^T A)^{-1} A^T \underline{l}$$

- Utilisation de coordonnées locales : $X, Y, Z \rightarrow n, w, h$



$$d^i = -\frac{(X^i - X_{p,0})}{D_{p,0}^i}$$

$$e^i = -\frac{(Y^i - Y_{p,0})}{D_{p,0}^i}$$

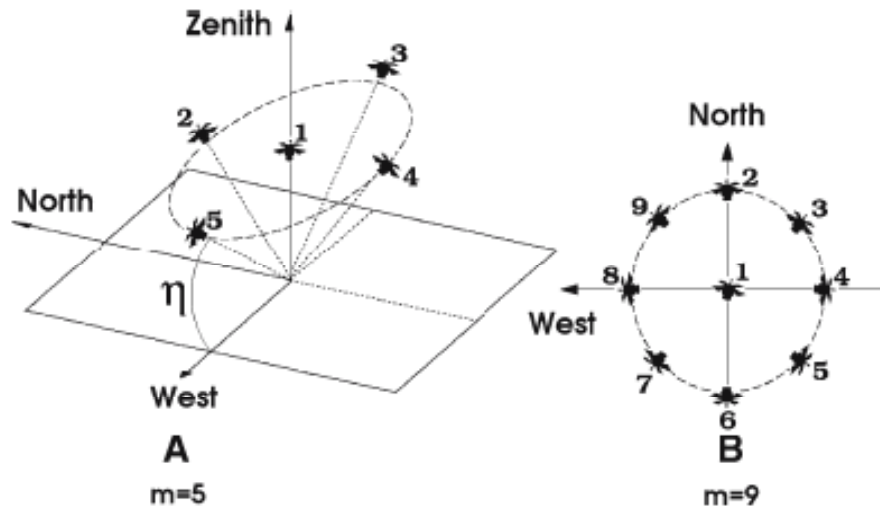
$$f^i = -\frac{(Z^i - Z_{p,0})}{D_{p,0}^i}$$

$$\rightarrow \begin{aligned} &\cos \eta^i \sin \chi^i \\ &-\cos \eta^i \cos \chi^i \\ &-\sin \eta^i \end{aligned}$$

2. Influence

Examinons un cas simple.

- Configuration permettant une résolution analytique



$$\eta^1 = \frac{\pi}{2} \quad \sin \chi^1 = \cos \chi^1 = 0$$
$$\eta^k = \eta \quad \chi^k = 2\pi \frac{k-2}{m-1} \quad k = 2, \dots, m$$

→ simplification maximale : 5 satellites

2. Influence

Les matrices caractéristiques se simplifient.

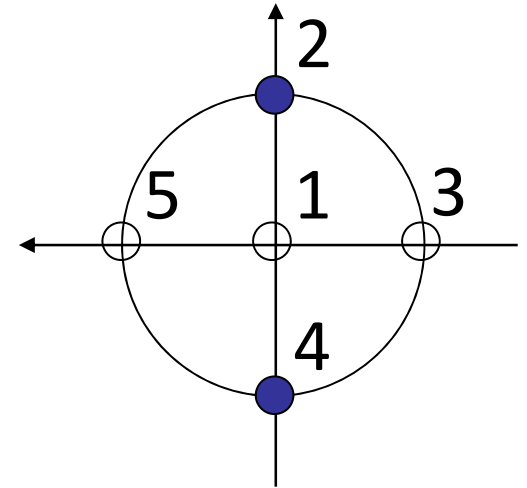
$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ -\cos \eta & 0 & -\sin \eta & 1 \\ 0 & \cos \eta & -\sin \eta & 1 \\ \cos \eta & 0 & -\sin \eta & 1 \\ 0 & \cos \eta & -\sin \eta & 1 \end{vmatrix}$$

$$(A^T A)^{-1} A^T = \begin{vmatrix} 0 & \frac{-1}{2 \cos \eta} & 0 & \frac{1}{2 \cos \eta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2 \cos \eta} & 0 & \frac{-1}{2 \cos \eta} \\ \frac{-1}{1 - \sin \eta} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} \\ \frac{-\sin \eta}{1 - \sin \eta} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} & \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} \end{vmatrix}$$

2. Influence

La composante nord est sensible aux gradients N-S.

$$\Delta n = \frac{1}{2 \cos \eta} (-I^2 + I^4)$$



Latitudes moyennes et hémisphère nord :

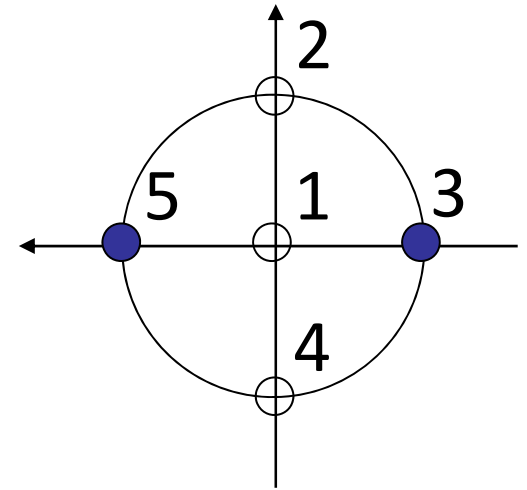
TEC plus élevé au sud

→ Erreur attendue positive vers le nord

2. Influence

La composante ouest est sensible aux gradients E-O.

$$\Delta w = \frac{1}{2 \cos \eta} (I^3 - I^5)$$



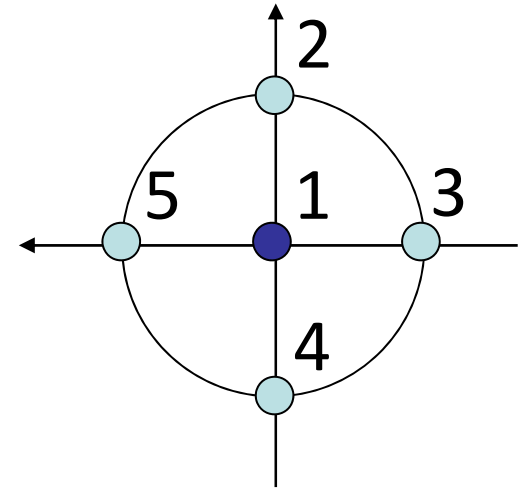
- TEC plus élevé à l'est le matin
→ Erreur attendue positive vers l'ouest
- TEC plus élevé à l'ouest l'après-midi
→ Erreur attendue positive vers l'est

2. Influence

La composante verticale et l'erreur d'horloge sont liées.

$$\Delta h = \frac{-1}{1 - \sin \eta} I^1 + \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} \sum_{i=2}^5 I^i$$

$$c\Delta(\Delta t_p) = \frac{-\sin \eta}{1 - \sin \eta} I^1 + \frac{1}{4(1 - \sin \eta)} \sum_{i=2}^5 I^i$$

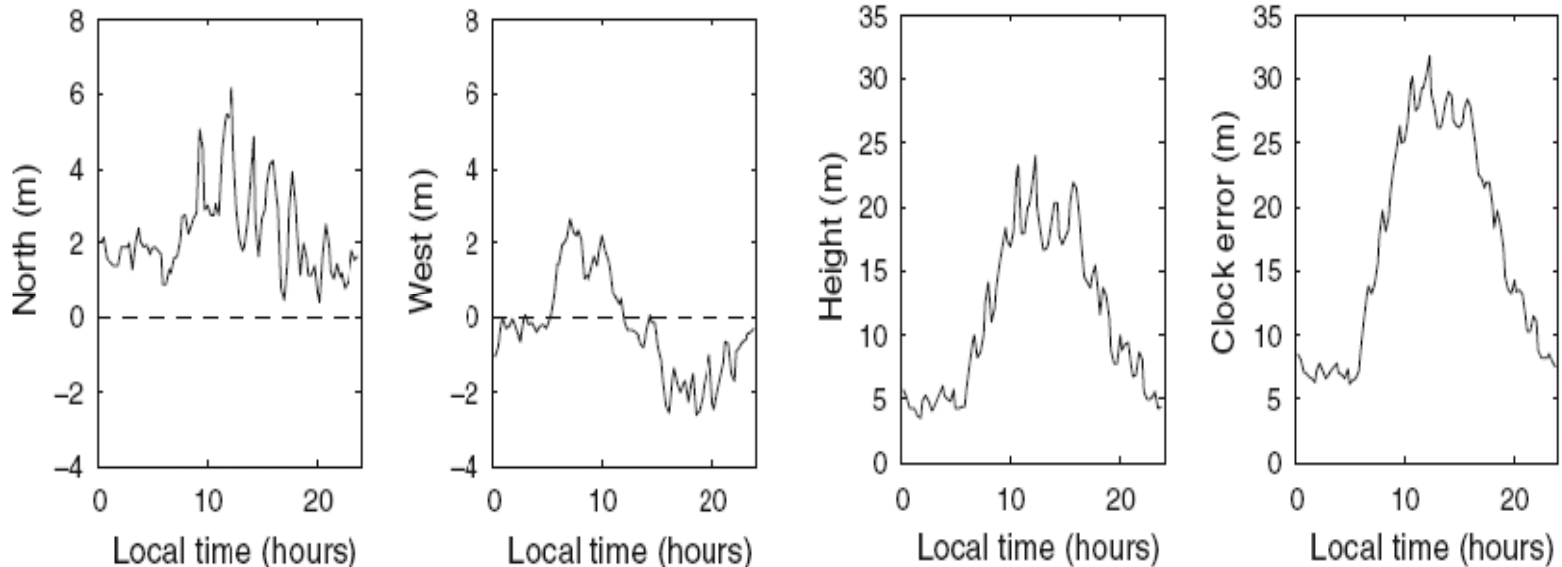


- Termes communs à la composante verticale et à l'erreur d'horloge
- Différence des deux = délai vertical

2. Influence

Les mesures confirment
ces interprétations.

Bruxelles, mars 2002

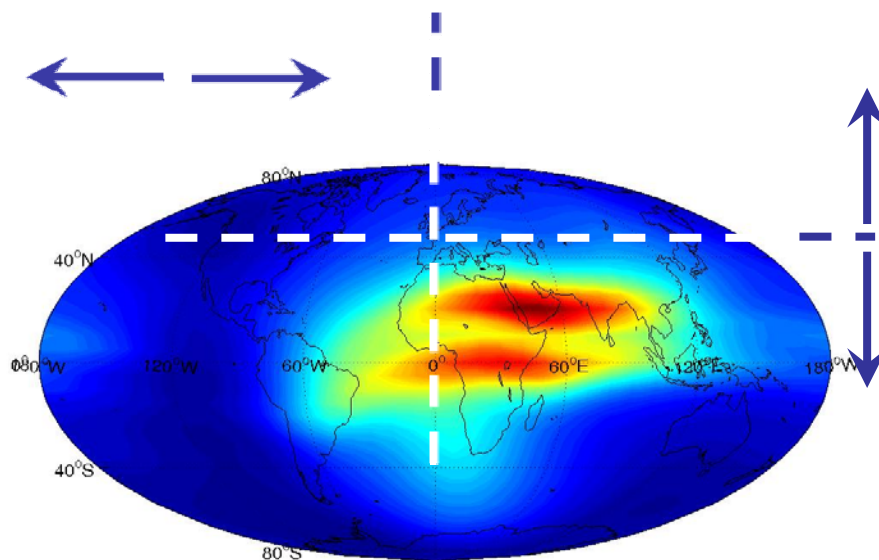
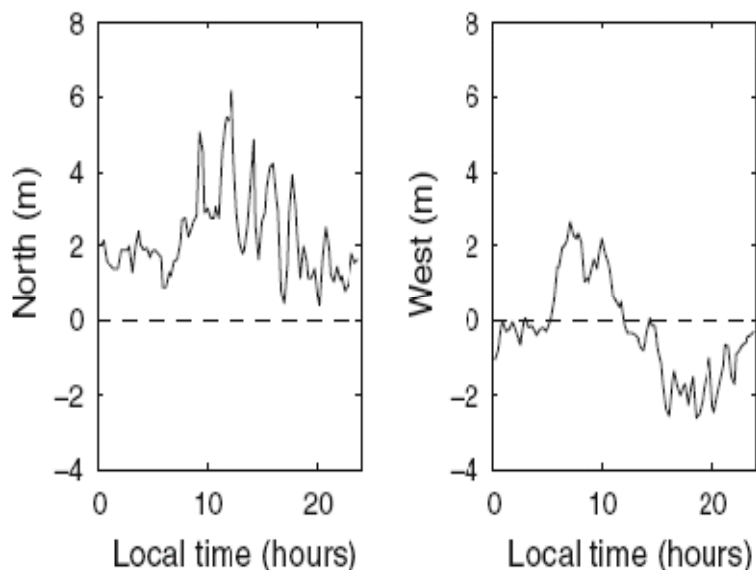


- Erreur non-aléatoire de **plusieurs mètres**
- **Oscillations** dues à l'évolution de la géométrie

2. Influence

Les mesures confirment ces interprétations.

Bruxelles, mars 2002

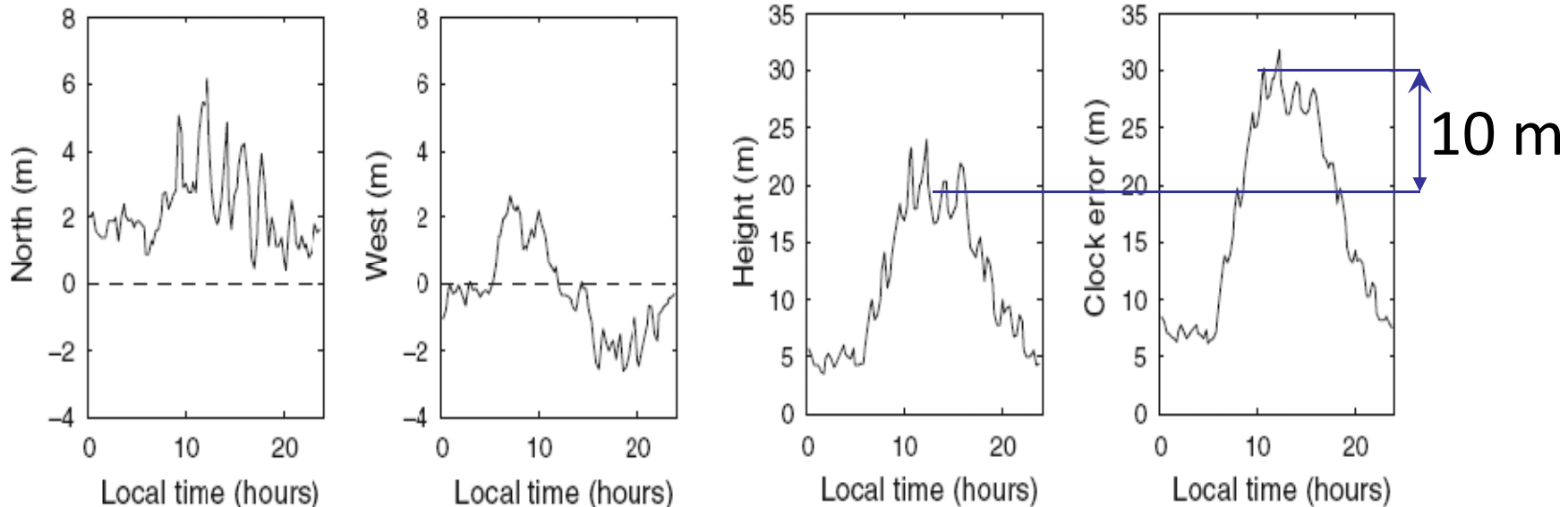


- Influence des **gradients de TEC**

2. Influence

Les mesures confirment ces interprétations.

Bruxelles, mars 2002



- **Ordre de grandeur** du TEC vertical : 60 TECu

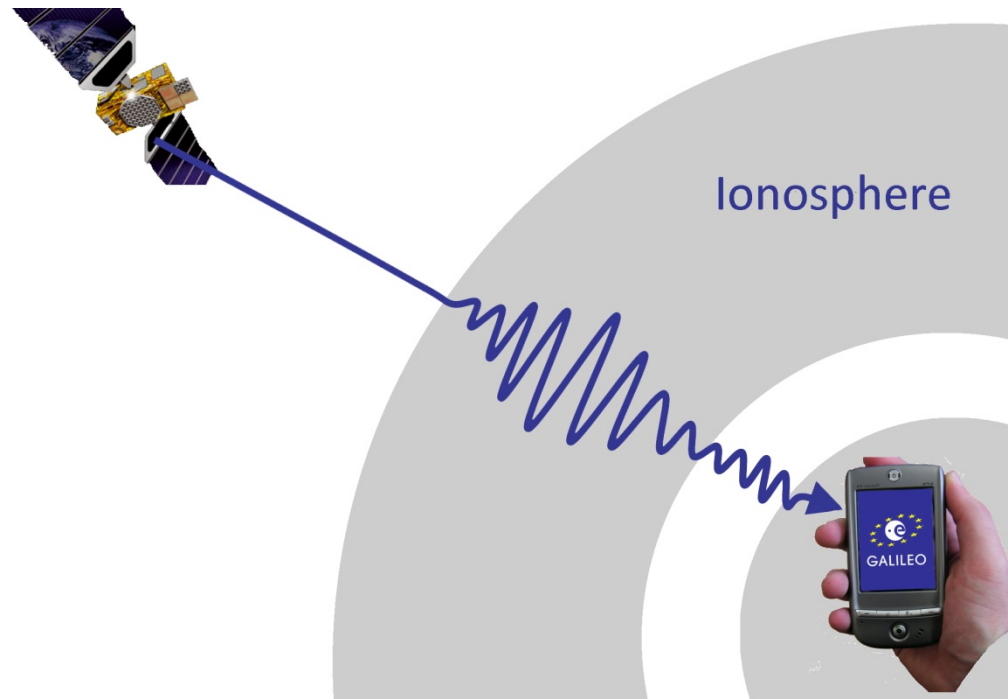
1. Caractéristiques

2. Influence

3. Modélisation

3. Modélisation

Nous devons modéliser le TEC pour un récepteur et un satellite donnés.

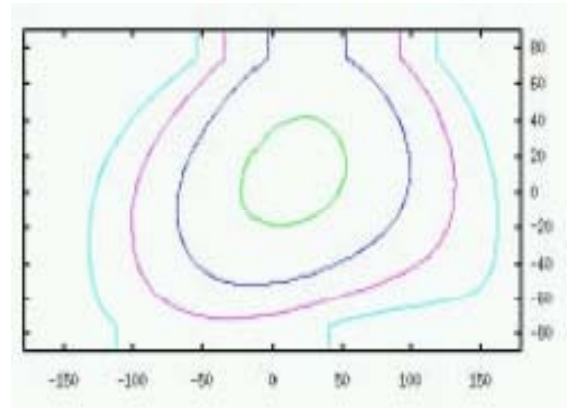


$$I = \frac{40.3}{f^2} sTEC \quad \rightarrow \quad sTEC ?$$

3. Modélisation

Différentes stratégies ont été élaborées.

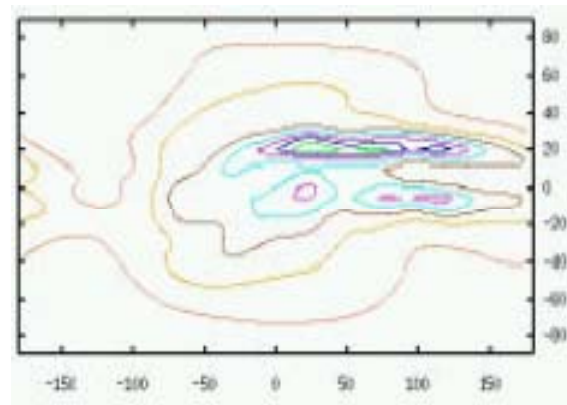
GPS : Klobuchar



vTEC
et facteur d'obliquité

→ correction de
50% RMS

Galileo : NeQuick



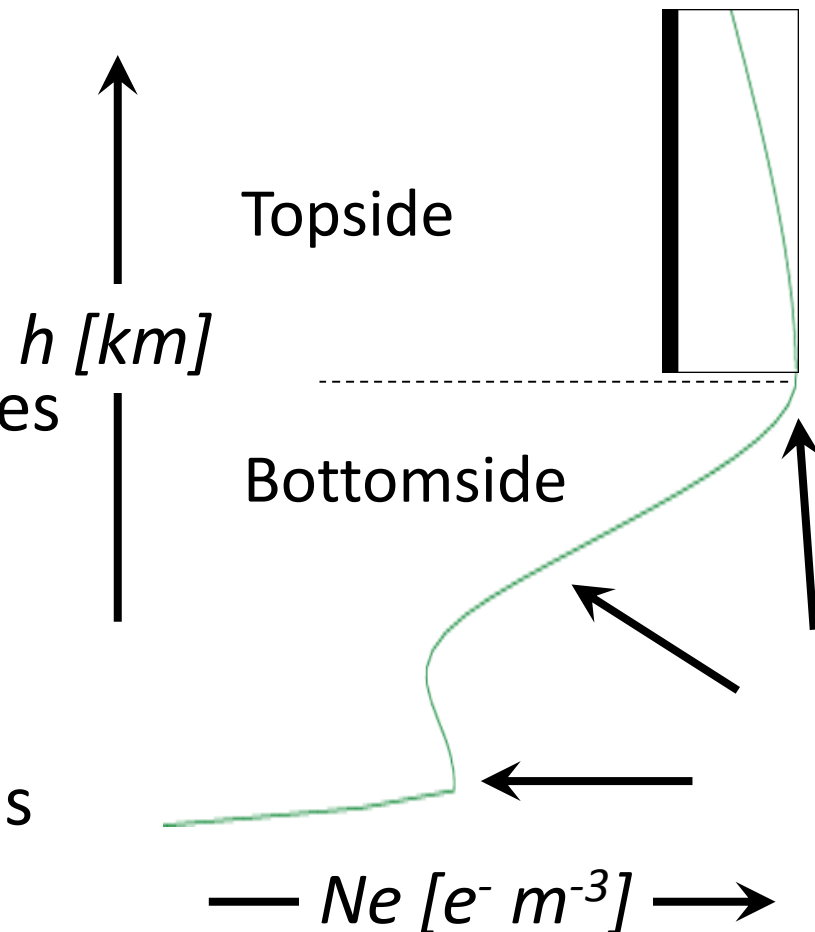
sTEC

→ correction de
70% RMS ?

3. Modélisation

NeQuick est un « profileur » empirique.

- **Output** = Ne
 - TEC avec intégration
- Pics des couches = points d'ancrage
 - cartes **mensuelles** médianes
- **Input** = variables ionosphériques
- **Nouvelle version** récente comportant des améliorations du topside



3. Modélisation

Nous étudions la formulation de NeQuick en utilisant des données co-localisées.

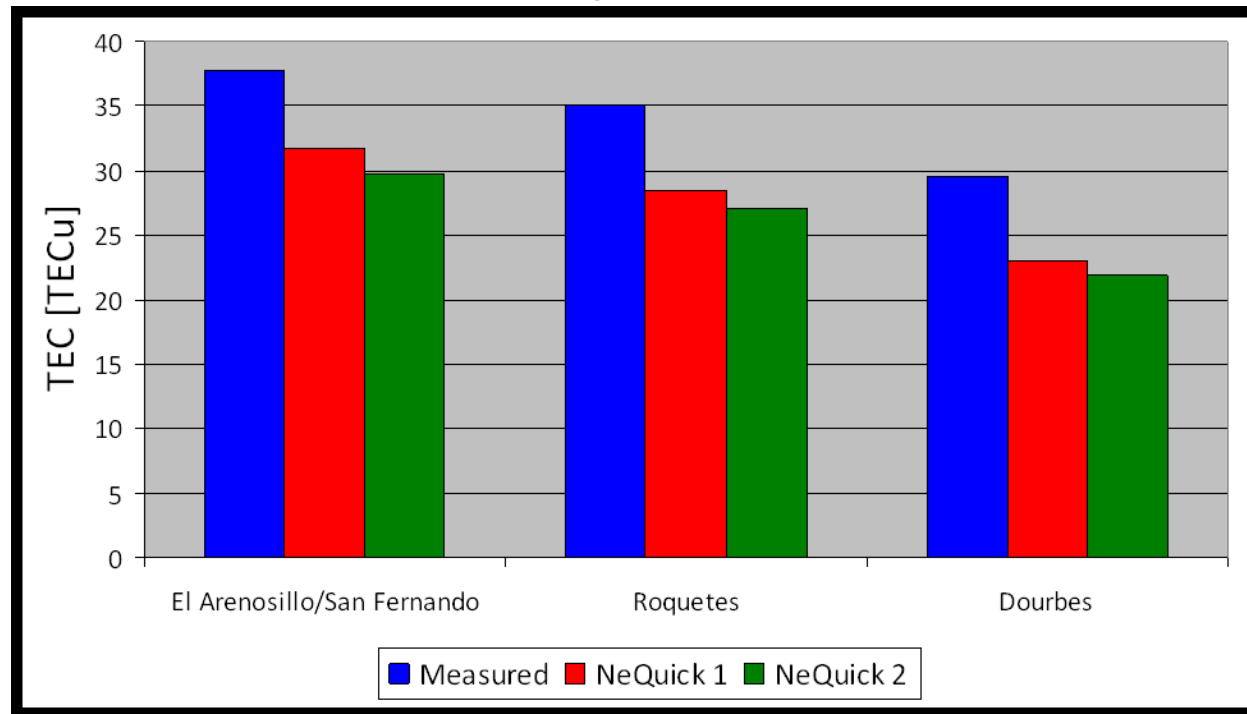
- Mesures **réelles** à la place des cartes mensuelles médianes
→ contrainte au moyen des données d'ionosonde
- Comparaison du TEC vertical modélisé avec le TEC GPS
→ ionosonde et récepteur GPS **co-localisés**
- Trois exemples en Europe présentant une **digisonde** et une station **IGS/EUREF** (quasi) **co-localisées**
- **Année 2002** (HAS)



3. Modélisation

La modélisation du TEC s'améliore sur base annuelle.

TEC moyen annuel

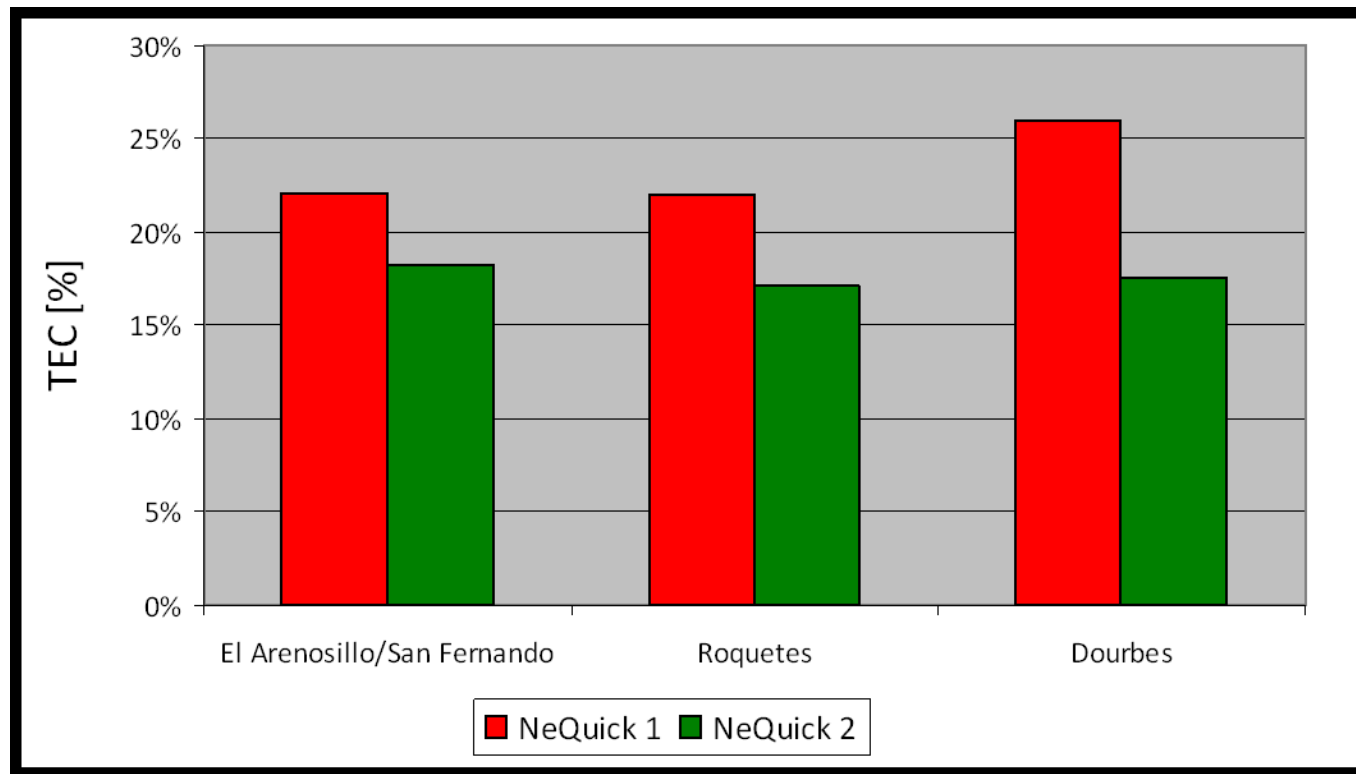


- TEC sous-estimé en moyenne
- Plus grande (environ 20%) sous-estimation avec NeQuick 2

3. Modélisation

La modélisation du TEC s'améliore sur base annuelle.

Ecart-type relatif annuel du TEC

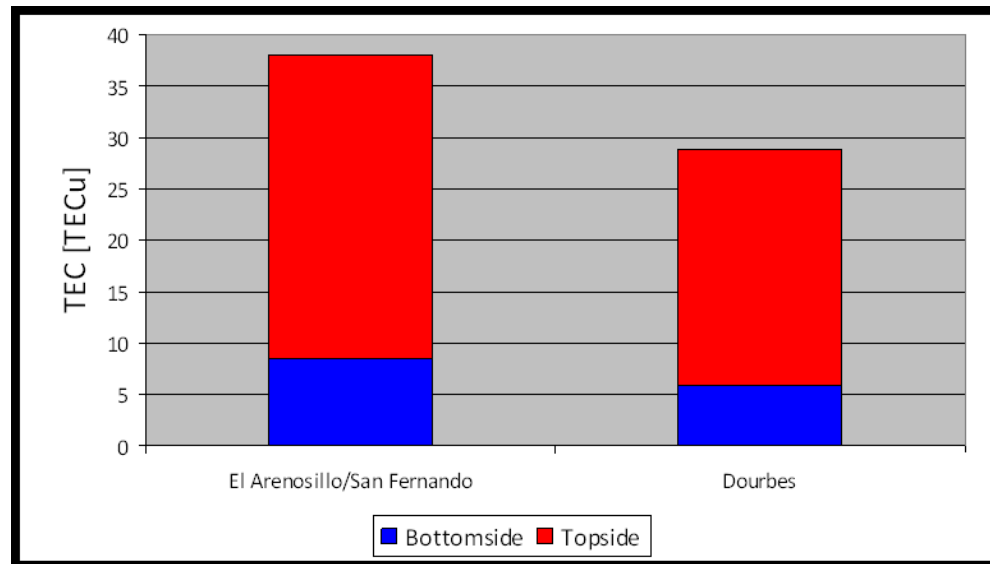


- Plus faible (environ 20%) écart-type avec NeQuick 2

3. Modélisation

Le topside joue un rôle important.

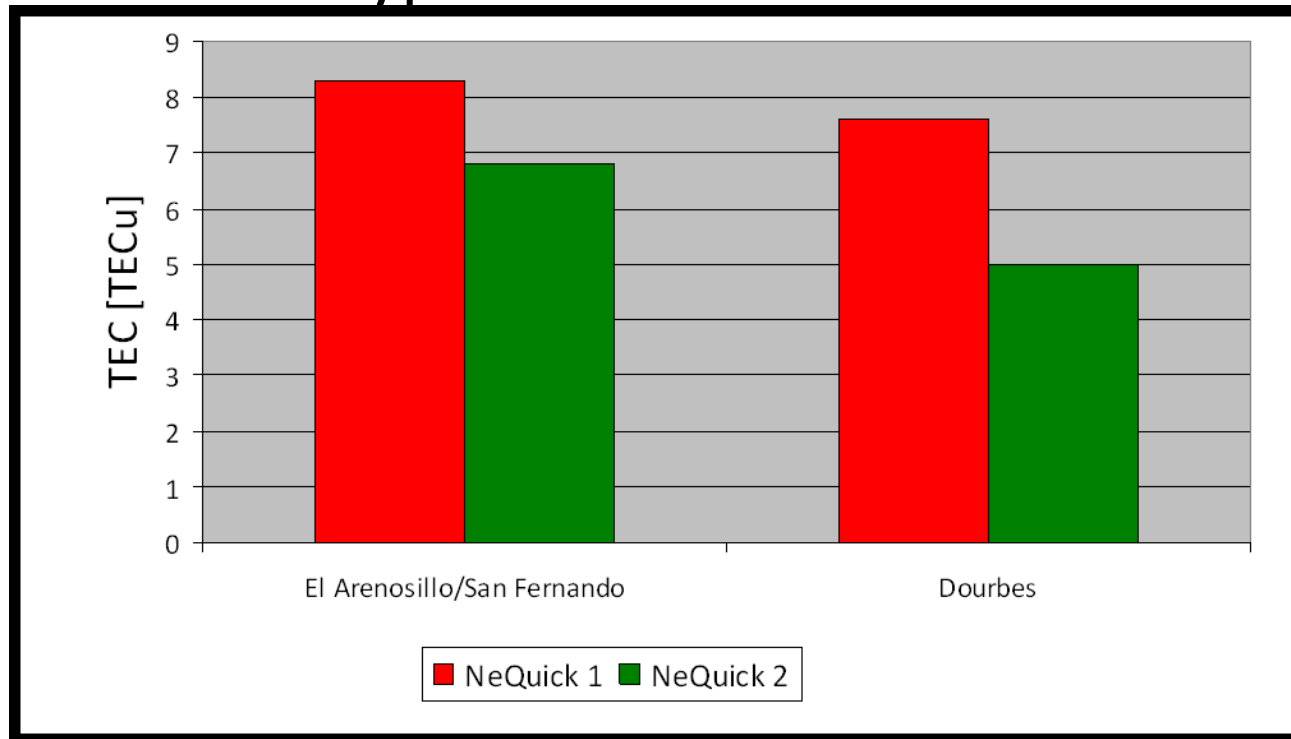
- Intégrer le profil de N_e du **bottomside** de la digisonde
→ TEC du bottomside
- Soustraire au TEC GPS → TEC du topside
- Grande proportion du TEC dans le topside (3/4, 1/4)



3. Modélisation

L'amélioration vient principalement de la modification du topside.

Ecart-type relatif annuel du TEC



- Evolution entre les versions de NeQuick des biais et écarts-types pour le **topside correspondant aux statistiques globales**

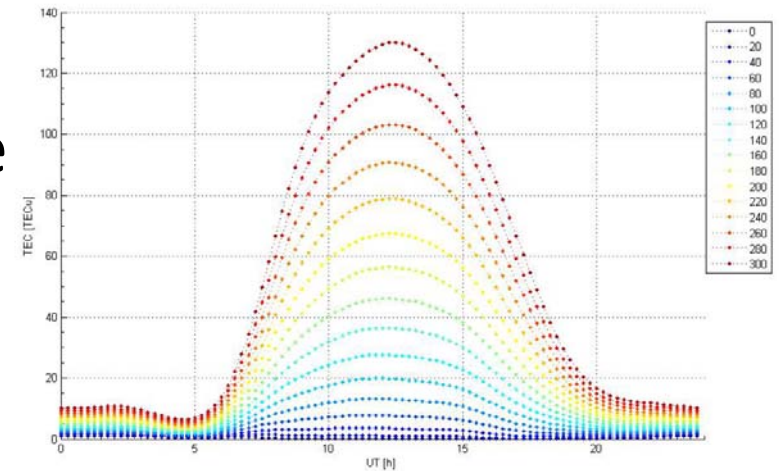
3. Modélisation

Nous utilisons l'ingestion pour compenser les faiblesses du modèle.

- Dépendence linéaire du TEC par rapport au flux solaire

→ calculer Az donnant la différence quadratique moyenne minimum du sTEC

- Stratégie pour Galileo
 - Az journalier
 - du jour précédent
- Dourbes – 2002

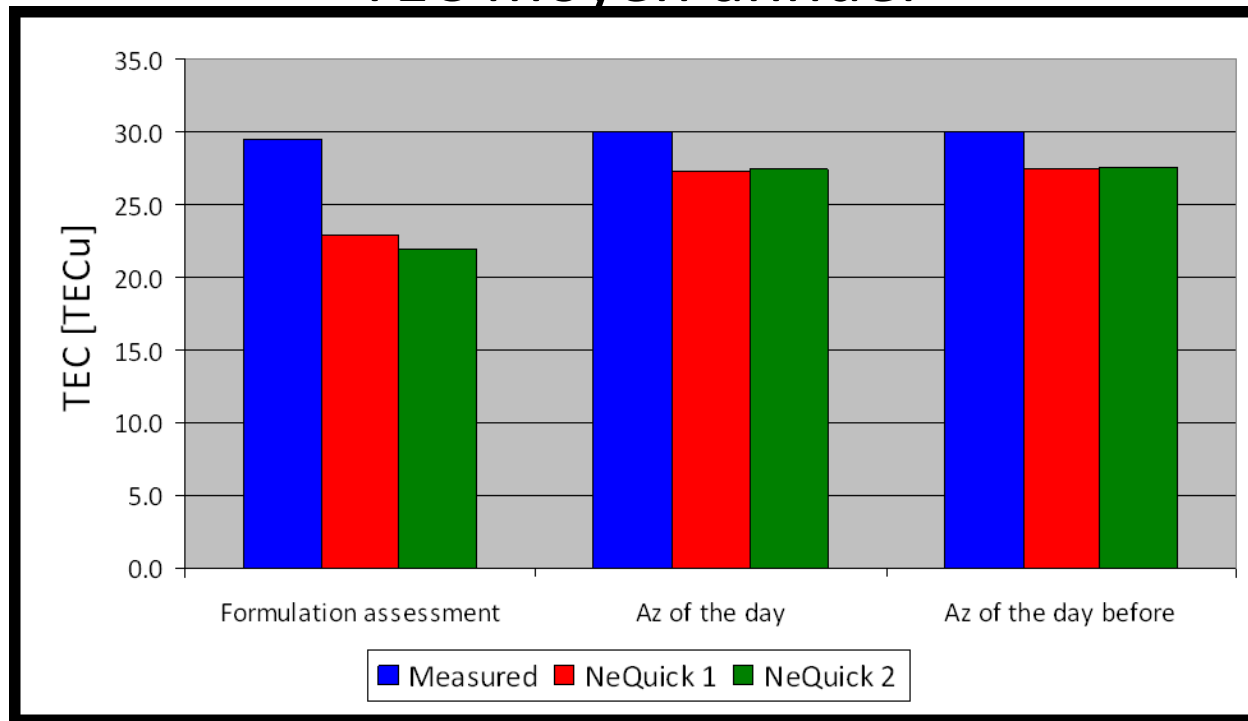


vTEC (Dourbes – Novembre)

3. Modélisation

L'ingestion absorbe le biais.

TEC moyen annuel

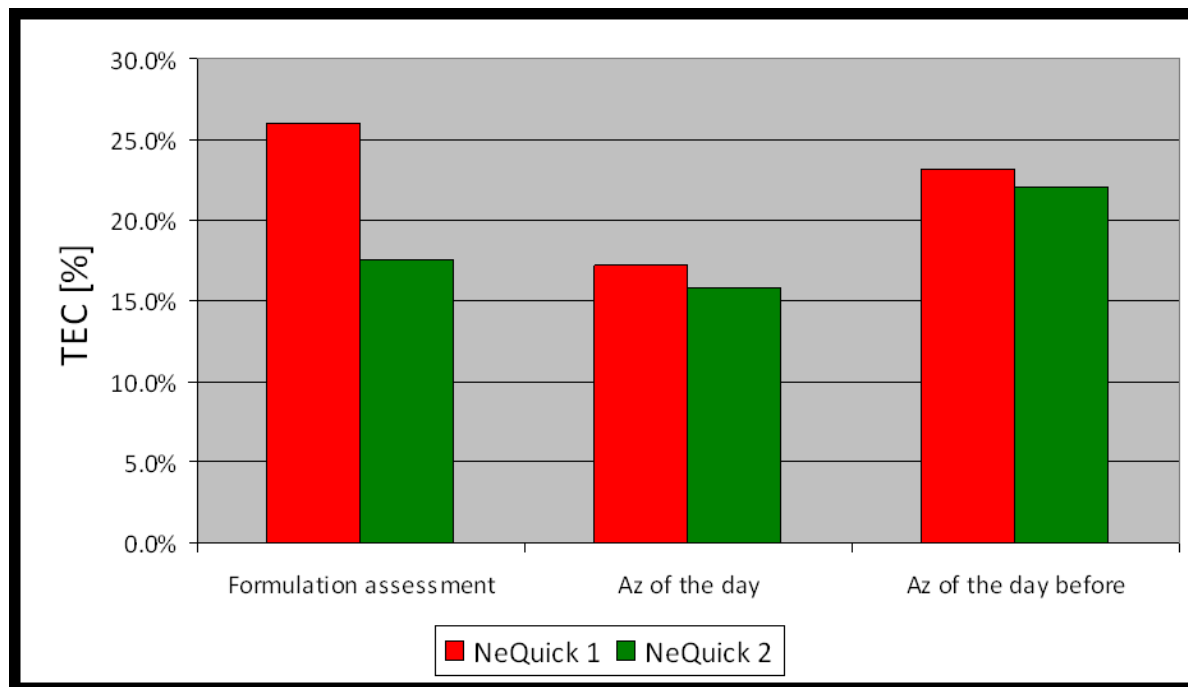


- Biais environ **trois fois plus faible**
- **Diminuant** même avec NeQuick 2 (15%)

3. Modélisation

Utiliser Az du jour précédent a d'important conséquences.

Ecart-type relatif annuel du TEC

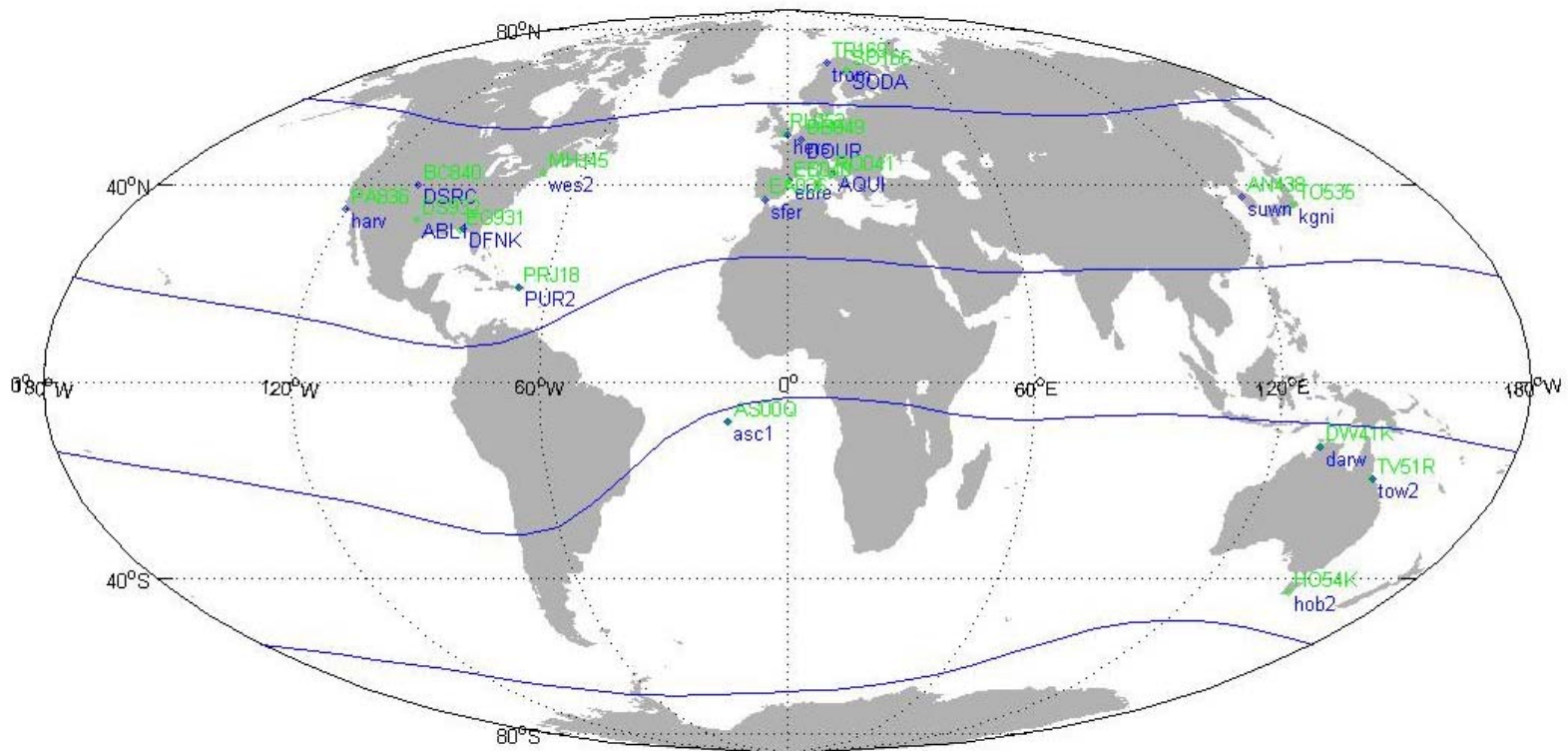


- Az du jour : écart-type plus faible
- Az du jour précédent : écart-type plus élevé (environ 35%)

3. Modélisation

Nous avons étendu l'étude à l'échelle mondiale.

12 stations avec une ionosonde
et un récepteur GPS co-localisés en 2002



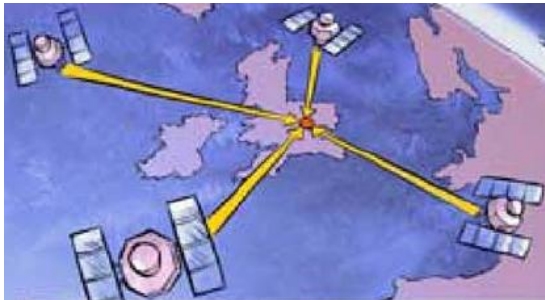
3. Modélisation

Nous étudions certaines questions intéressantes.

- Impact sur d'autres paramètres (ex foF2)
- Ingestion multiple (plusieurs Az simultanément)
- Traduction en différences de position
- Comparaison avec Klobuchar

3. Modélisation

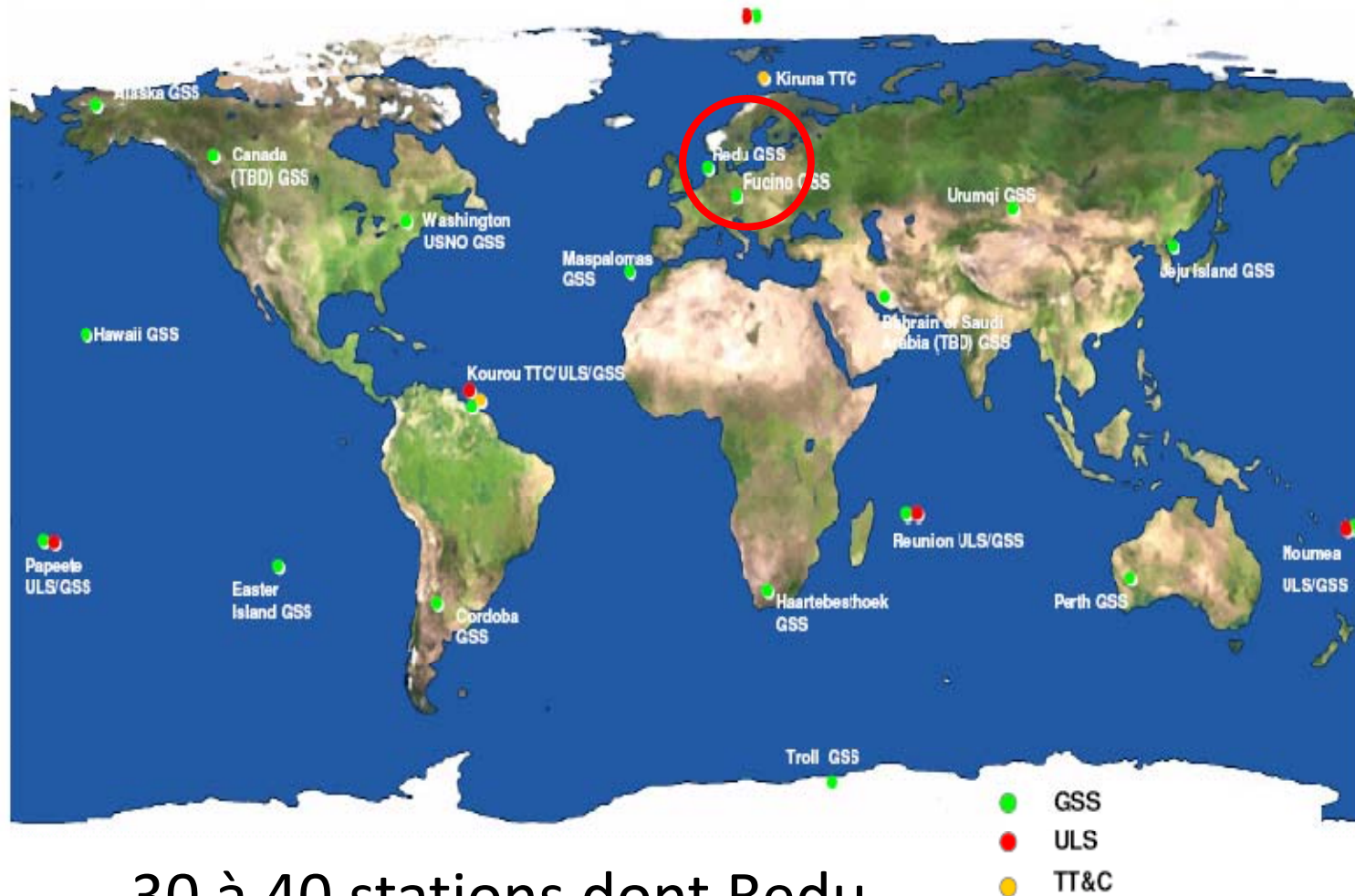
Galileo utilisera l'ingestion pour calculer l'information à transmettre aux récepteurs.



Mesurer
sTEC

3. Modélisation

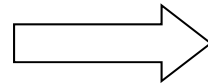
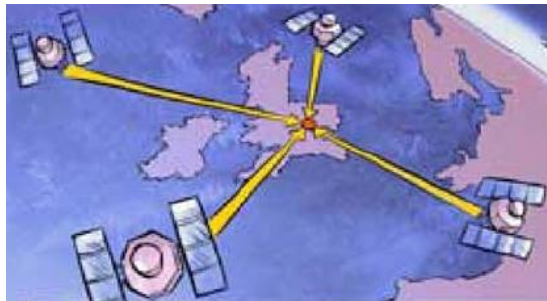
Le segment sol du système effectuera des mesures de TEC.



30 à 40 stations dont Redu

3. Modélisation

Galileo utilisera l'ingestion pour calculer l'information à transmettre aux récepteurs.



Optimiser
Az

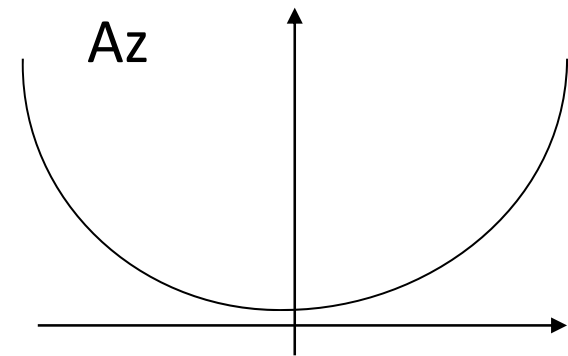
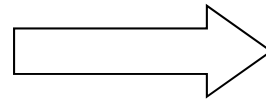
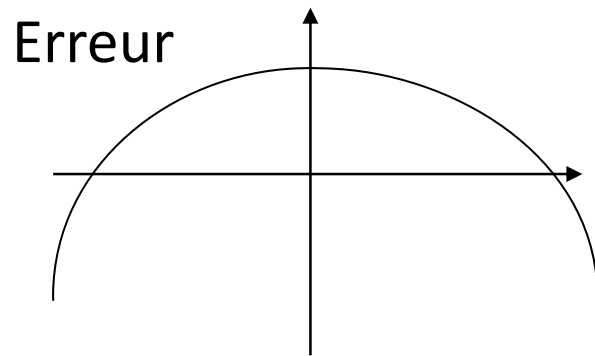
Mesurer
sTEC

3. Modélisation

Une procédure d'optimisation fournira l'information à transmettre aux récepteurs.

- 1 valeur de Az par station et **par jour**
- Erreur de modélisation du TEC dépendant principalement de la **latitude** (modip)

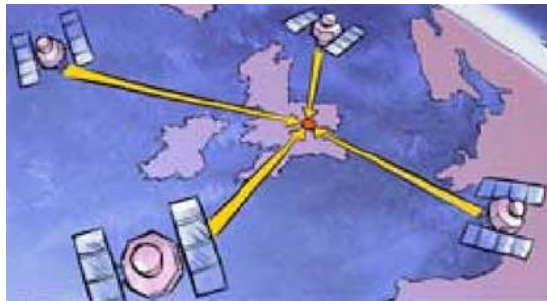
→ ajustement **parabolique** : $Az = a_0 + a_1 \mu + a_2 \mu^2$



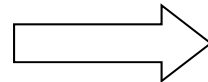
- **3 paramètres** intégrés au message de navigation (8 pour le GPS)

3. Modélisation

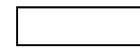
Galileo utilisera l'ingestion pour calculer l'information à transmettre aux récepteurs.



Mesurer
sTEC



Optimiser
Az



Utiliser
NeQuick

L'ionosphère doit être modélisée pour les récepteurs simple fréquence.

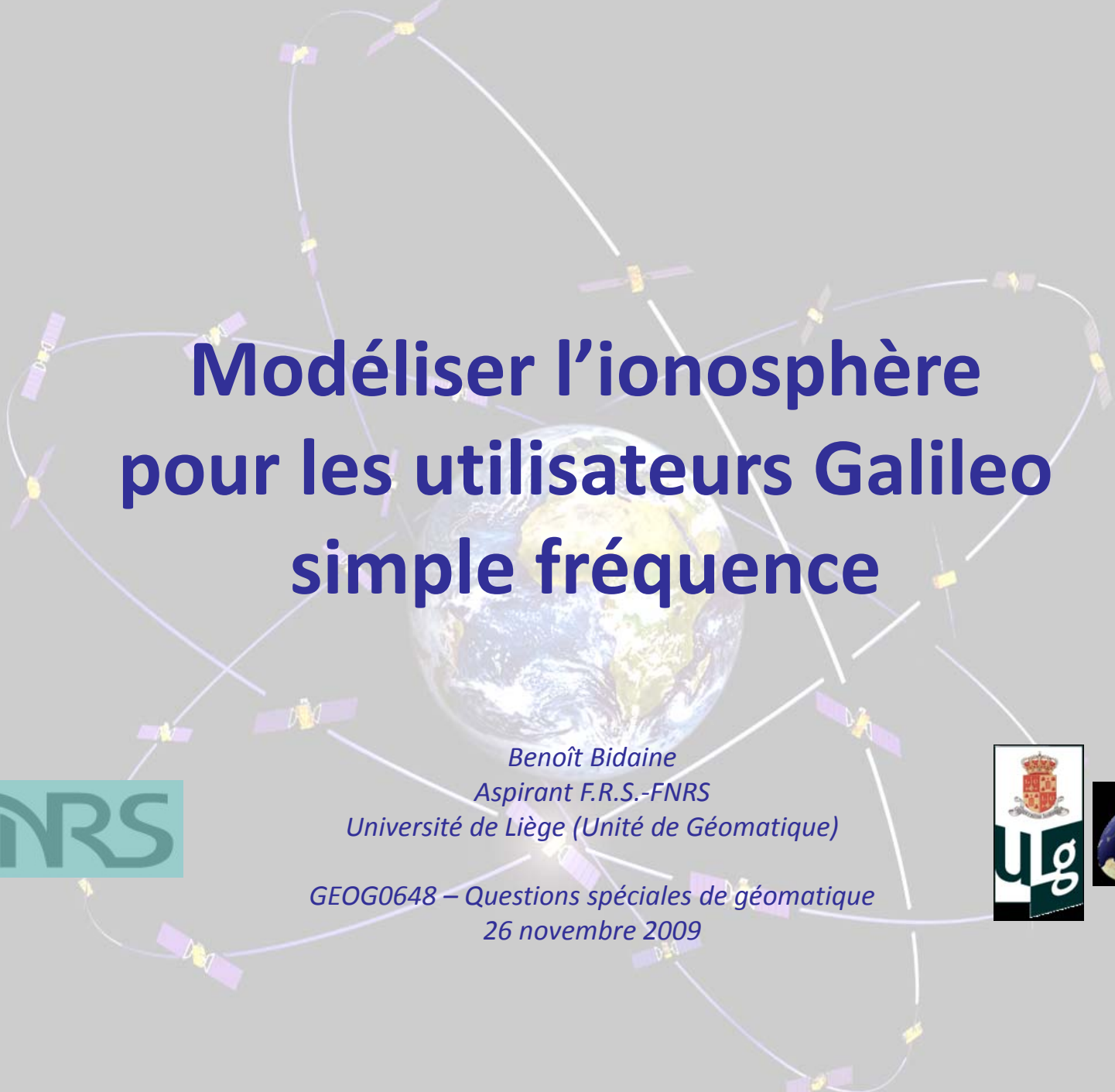
- Variables : lieu, temps, activité solaire
- Influence sur la position à travers la matrice modèle définie par la géométrie
- Modélisation utilisant
 - un modèle empirique simple,
 - des données récentes
 - et un algorithme d'optimisation

Et toi ? Comment
envisages-tu le
futur avec Galileo ?



12





Modéliser l'ionosphère pour les utilisateurs Galileo simple fréquence

Benoît Bidaine

Aspirant F.R.S.-FNRS

Université de Liège (Unité de Géomatique)

GEOG0648 – Questions spéciales de géomatique

26 novembre 2009



Bibliographie

- Arbesser-Rastburg, B. "The Galileo Single Frequency Ionospheric Correction Algorithm". Communication orale à la *Third European Space Weather Week*, Bruxelles, 2006.
- Bidaine, B. *Ionosphere Crossing of Galileo Signals*. Liège : ULg, 2006. Travail de fin d'études.
<http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/682>
- Bidaine, B., Warnant, R. "Assessment of the NeQuick model at mid-latitudes using GNSS TEC and ionosonde data". In *Recent Advances in Space Weather Monitoring, Modelling and Forecasting. Adv. Space Res.*, in press. doi: [10.1016/j.asr.2009.10.010](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.10.010)
- Gende, M., Mohíno Harris, E., Brunini, C., Radicella, S. M., Herraiz, M. "Ionospheric biases correction for coordinates derived from GPS single point positioning". *Ann. Geophys.*, 2005, Vol. 48, N°3, p. 439-444.

Bibliographie

- Klobuchar, J. A., "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1987, AES-23 (3), p. 325-331.
- Mohino, E. "Understanding the role of the ionospheric delay in single-point single-epoch GPS coordinates". J. Geod., 2008, Vol. 82, p. 31-45. doi: [10.1007/s00190-007-0155-z](https://doi.org/10.1007/s00190-007-0155-z)
- Thales Alenia Space. Galileo. La boussole du futur. http://www.thalesaleniaspace-media.com/Galileo_fr/index.html