

A diagram of the Galileo satellite constellation. It features a central Earth globe with several satellite orbits around it. Each orbit contains multiple satellites, represented by small satellite icons with solar panels. The orbits are shown as white lines connecting the satellites.

# 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*

*18 mars 2009*



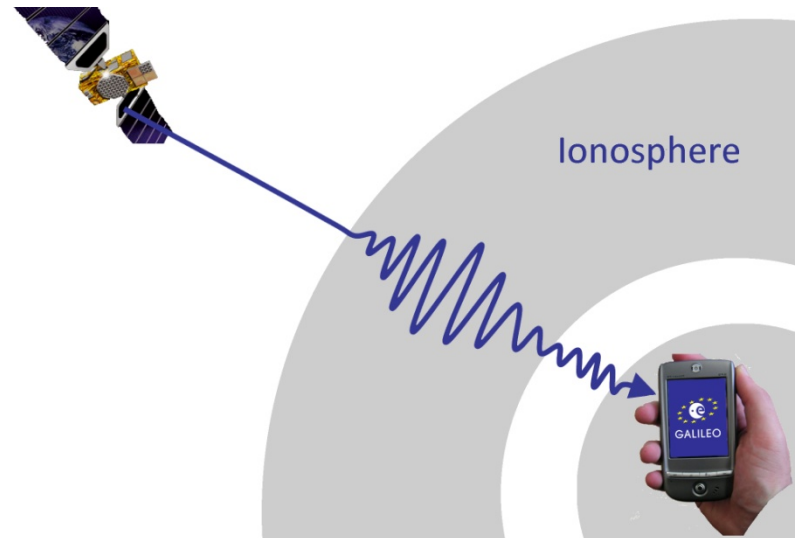
Le GPS est de plus en plus utilisé de nos jours!



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. Positionnement

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

1. Caractéristiques

2. Positionnement

3. Influence

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

1. Caractéristiques

2. Positionnement

3. Influence

4. Modélisation



1. **Caractéristiques**

2. Positionnement

3. Influence

4. Modélisation

# 1. Caractéristiques

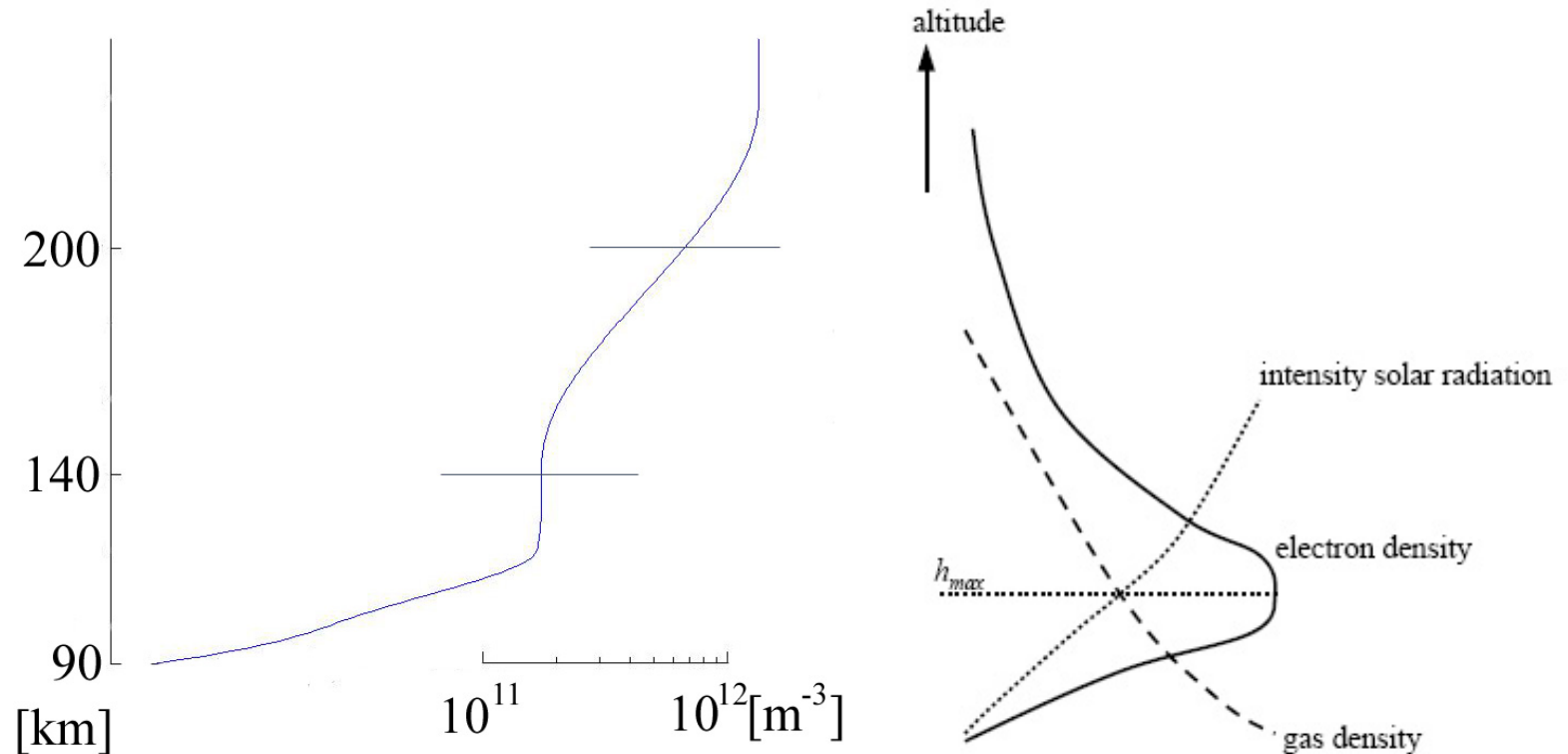
## L'atmosphère est ionisée par le rayonnement solaire.

- Couche comprenant une certaine densité d'électrons

- F2

- F1

- E





## 1. Caractéristiques

Différents paramètres sont couramment utilisés.

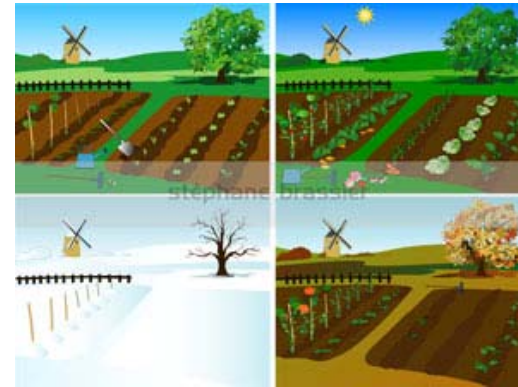
- Fréquences critiques :  $f_oE$ ,  $f_oF_1$ ,  $f_oF_2$ 
  - liées aux pics des couches
- Intégrale (verticale ou oblique) de Ne : TEC
  - 1 TECu =  $10^{16}$  el. m<sup>-2</sup> ~ 0.16 m (L1)

# 1. Caractéristiques

## L'influence du rayonnement solaire suit certaines variables.



→ lat, long



→ mth



→ F10.7/R



→ UT

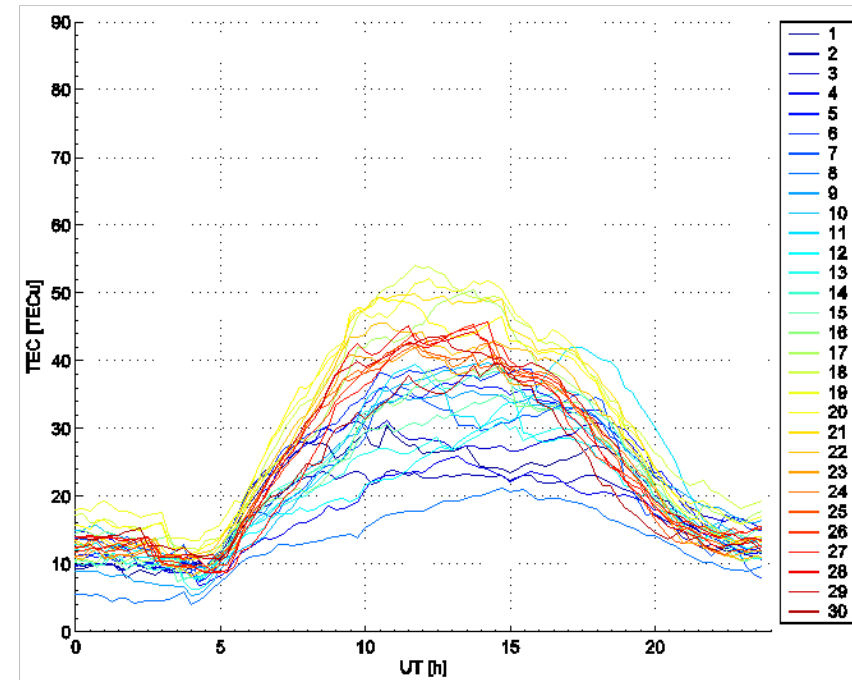
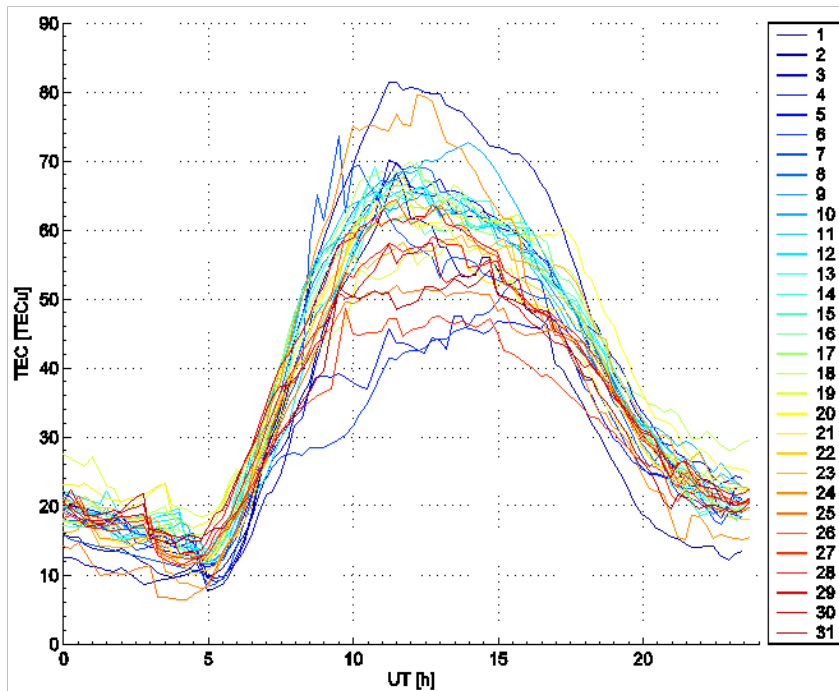
# 1. Caractéristiques

## 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

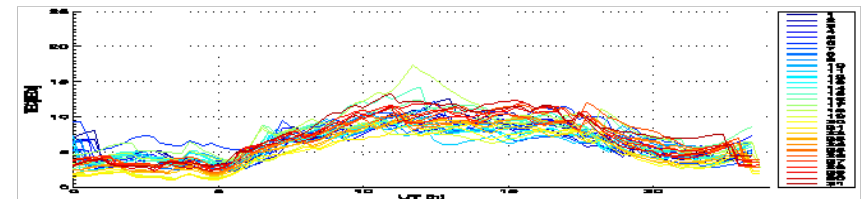
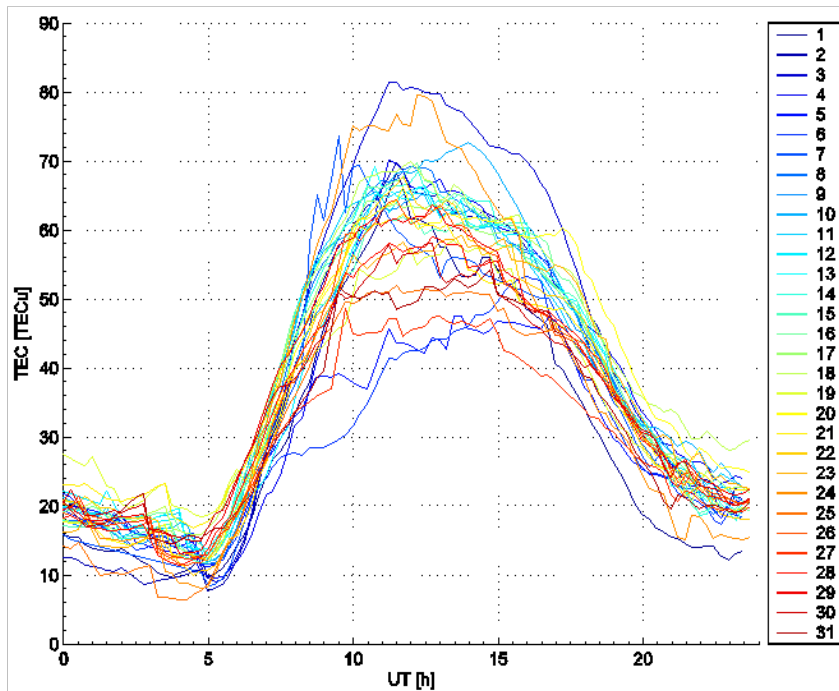
# 1. Caractéristiques

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

Janvier 2002

Bruxelles

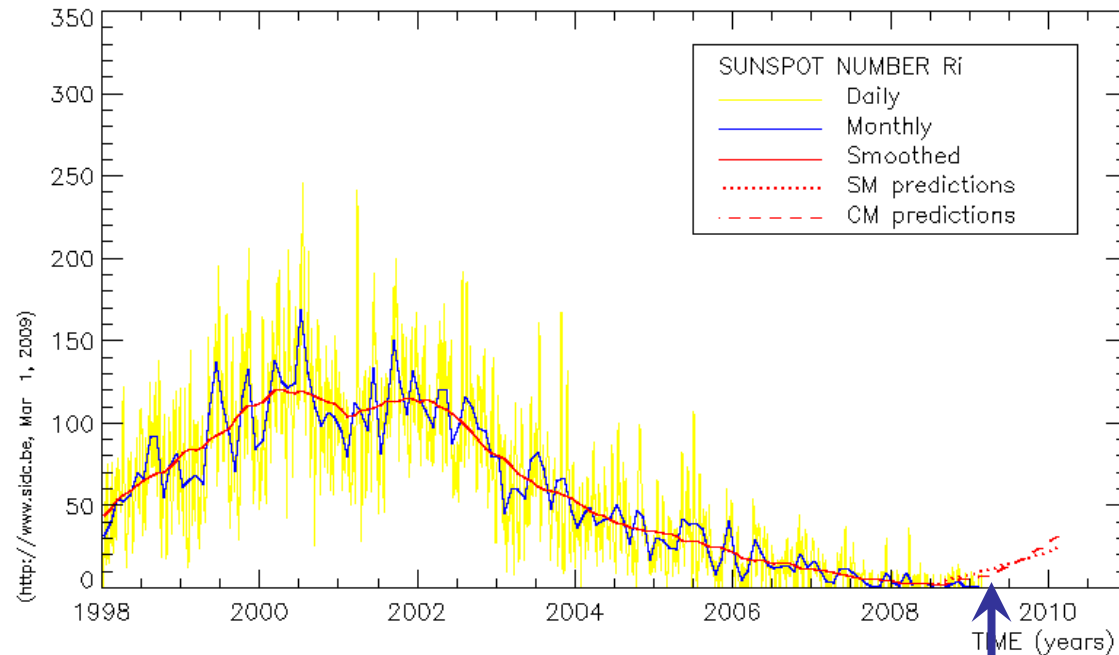
Janvier 2006



- Variation en fonction de l'activité solaire
- Ordre de grandeur du TEC vertical : 60 TECu

# 1. Caractéristiques

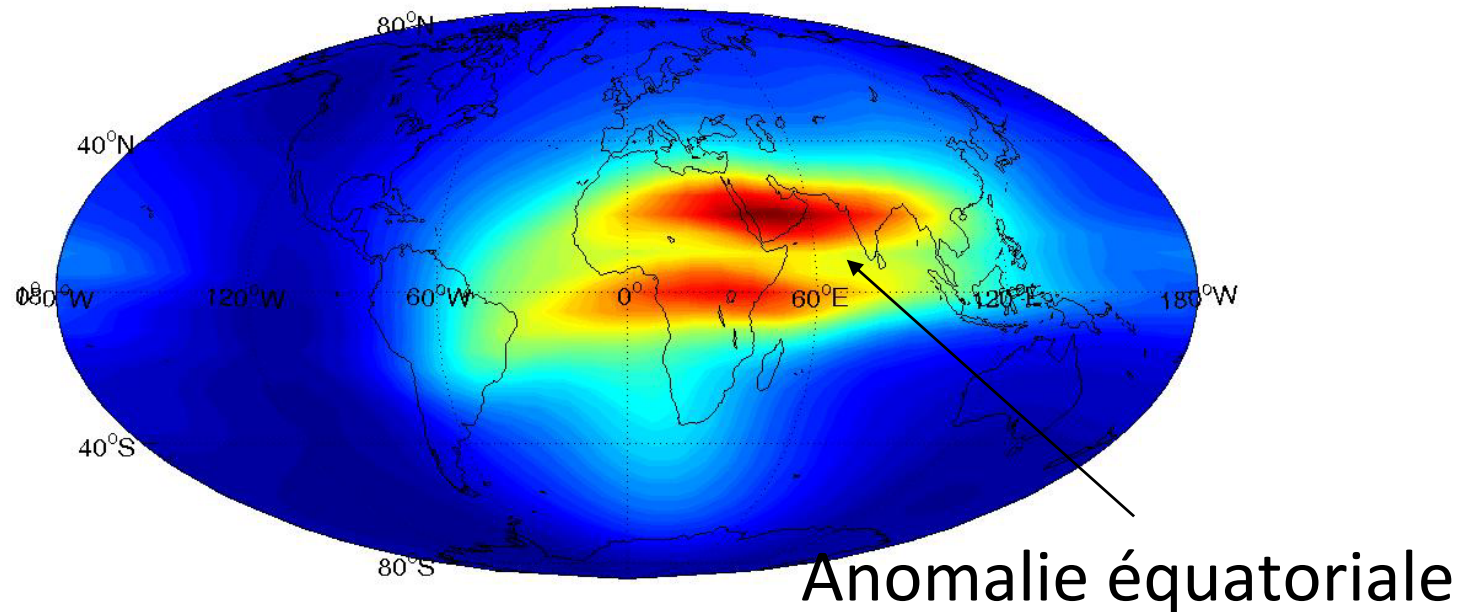
## L'ionosphère suit l'évolution temporelle du rayonnement solaire.



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

# 1. Caractéristiques

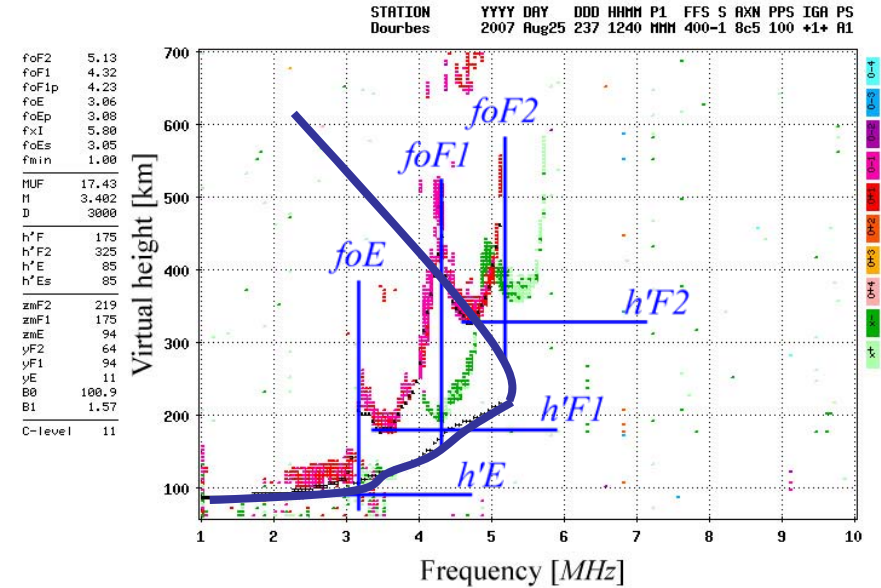
L'ionosphère suit la forme du champ magnétique terrestre.



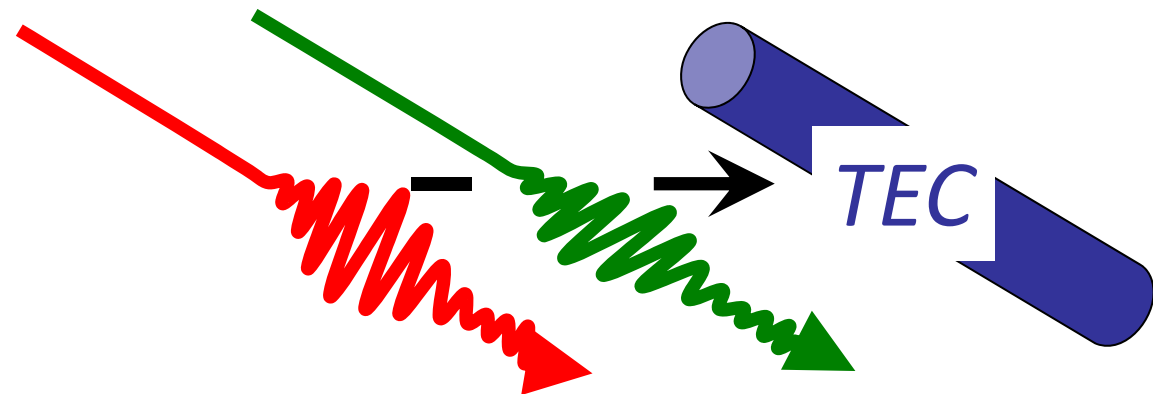
# 1. Caractéristiques

## Différentes mesures peuvent être effectuées.

- Sondages verticaux
  - paramètres (scaling)
  - profils Ne (inversion)



- Combinaisons GPS « geometric free »
  - TEC





1. Caractéristiques

2. Positionnement

3. Influence

4. Modélisation



## 2. Positionnement

Les récepteurs simple fréquence utilisent des mesures de code.

$$P_p^i = D_p^i + T_p^i + I_p^i + M_{p,m}^i + c(\Delta t^i - \Delta t_p)$$

Récepteur p, satellite i

$P_p^i$  Pseudo-distance

$D_p^i$  Distance géométrique

$T_p^i$  Effet de l'atmosphère neutre

$I_p^i$  Effet de l'ionosphère

$M_{p,m}^i$  Multi-trajets

$c$  Vitesse de la lumière

$\Delta t^i$  Erreur d'horloge du satellite i

$\Delta t_p$  Erreur d'horloge du récepteur p

## 2. Positionnement

Les récepteurs calculent des positions absolues par moindres carrés.

- Inconnues ?

- Modèles :  $T_p^i$ ,  $I_p^i$ ,  $\Delta t^i$ , ( $M_{p,m}^i$  négligé)

- Distance :  $D_p^i = \sqrt{(X^i - X_p)^2 + (Y^i - Y_p)^2 + (Z^i - Z_p)^2}$

- 4 inconnues : position du récepteur  $X_p, Y_p, Z_p$   
erreur d'horloge du récepteur  $\Delta t_p$ .

- minimum 4 équations

## 2. Positionnement

Les récepteurs calculent des positions absolues par moindres carrés.

- Linéarisation

- Valeur a priori de la position du récepteur :  $(X_{p,0}, Y_{p,0}, Z_{p,0})$

- Taylor : 
$$f(X_p, Y_p, Z_p) = f(X_{p,0}, Y_{p,0}, Z_{p,0}) + \frac{\partial f(X_{p,0}, Y_{p,0}, Z_{p,0})}{\partial X_{p,0}} \Delta X_p + \frac{\partial f(X_{p,0}, Y_{p,0}, Z_{p,0})}{\partial Y_{p,0}} \Delta Y_p + \frac{\partial f(X_{p,0}, Y_{p,0}, Z_{p,0})}{\partial Z_{p,0}} \Delta Z_p$$

- Equations d'observation :

$$P_p^i - P_{p,0}^i = -\frac{(X^i - X_{p,0})}{D_{p,0}^i} \Delta X_p - \frac{(Y^i - Y_{p,0})}{D_{p,0}^i} \Delta Y_p - \frac{(Z^i - Z_{p,0})}{D_{p,0}^i} \Delta Z_p - c \Delta t_p$$

## 2. Positionnement

Les récepteurs calculent des positions absolues par moindres carrés.

- Résolution

– Modèle :  $\underline{l} + \underline{v} = A \underline{x}$

$$\underbrace{l^i = P_p^i - P_{p,0}^i}$$

mesure  
et modèles

$$A = \begin{pmatrix} d^1 & e^1 & f^1 & -c \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d^N & e^N & f^N & -c \end{pmatrix}$$

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

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

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

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} \Delta X_p \\ \Delta Y_p \\ \Delta Z_p \\ \Delta t_p \end{pmatrix}$$

géométrie

## 2. Positionnement

Les récepteurs calculent des positions absolues par moindres carrés.

- Résolution

- Solution :  $\underline{\hat{x}} = (A^T A)^{-1} A^T \underline{l}$

→ Intervention du délai ionosphérique et de sa modélisation via  $\underline{l}$

→ Influence de la géométrie via  $(A^T A)^{-1} A^T$



1. Caractéristiques

2. Positionnement

- 3. Influence**

4. Modélisation

# 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 :  $n_g = 1 + 40.3 \frac{N_e}{f^2}$

# 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



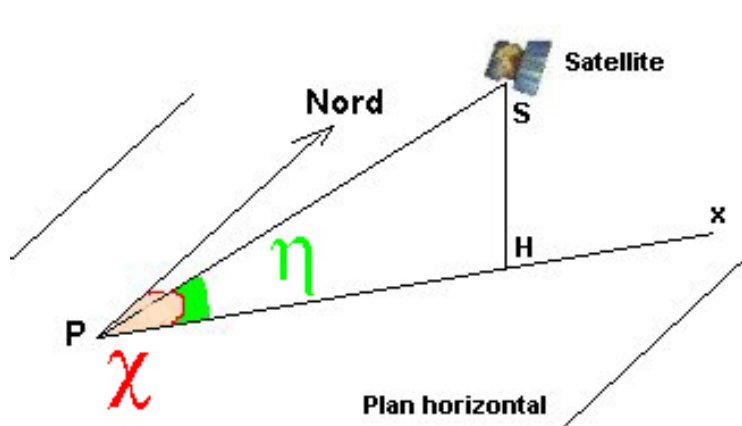
### 3. Influence

# Voyons comment il se traduit en coordonnées.

- Solution (linéaire) des moindres carrés

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

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



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

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

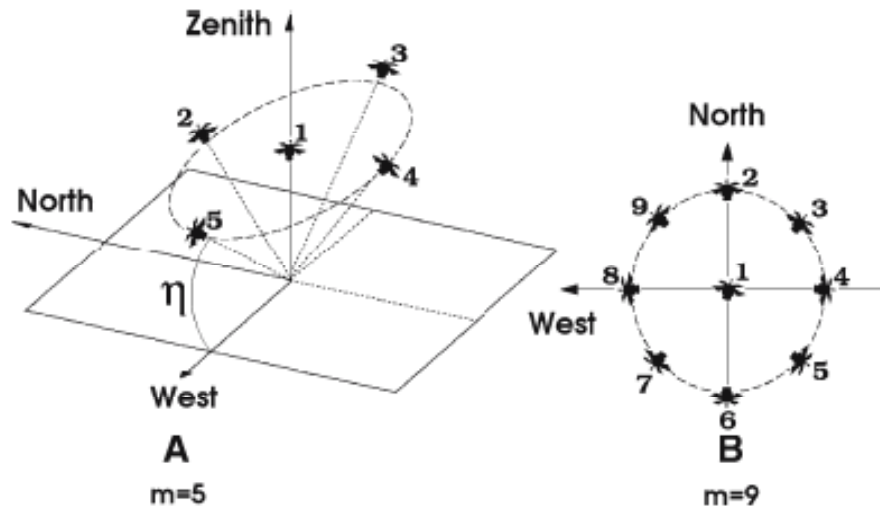
$$f^i = -\frac{(Z^i - Z_{p,0})}{D_{p,0}^i}$$

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

### 3. 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

### 3. Influence

# Les matrices caractéristiques se simplifient.

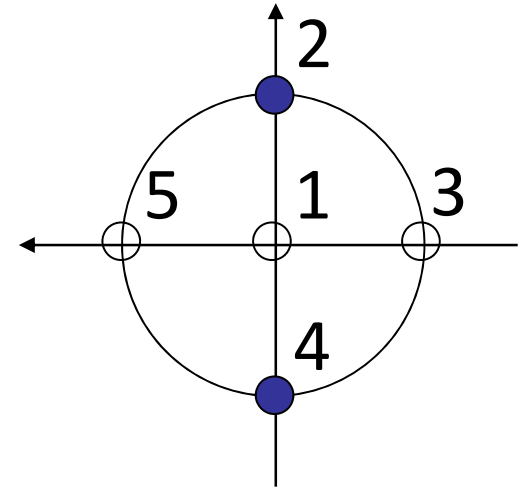
$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ -\cos \eta & 0 & -\sin \eta & 1 \\ 0 & \cos \eta & -\sin \eta & 1 \\ \cos \eta & 0 & -\sin \eta & 1 \\ 0 & \cos \eta & -\sin \eta & 1 \end{vmatrix}$$

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

### 3. 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 :

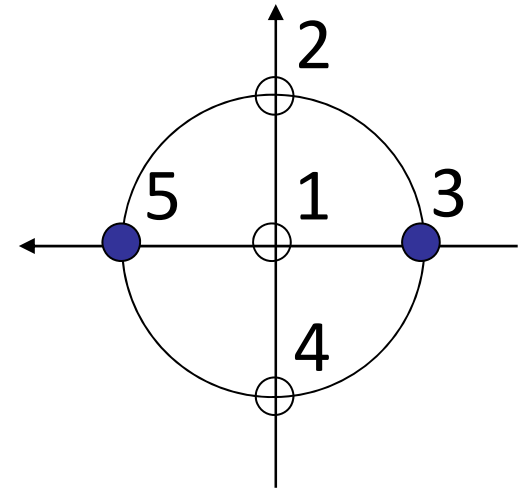
TEC plus élevé au sud

→ Erreur attendue positive vers le nord

### 3. Influence

La composante ouest est sensible aux gradients E-O.

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



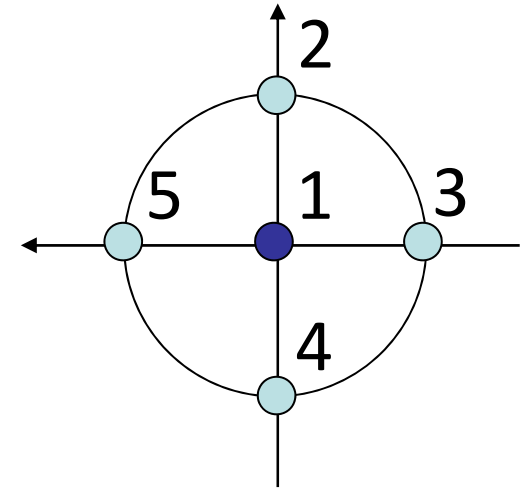
- TEC plus élevé à l'est le matin  
→ Erreur attendue positive vers l'ouest
- TEC plus élevé à l'ouest l'après-midi  
→ Erreur attendue positive vers l'est

### 3. Influence

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

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

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

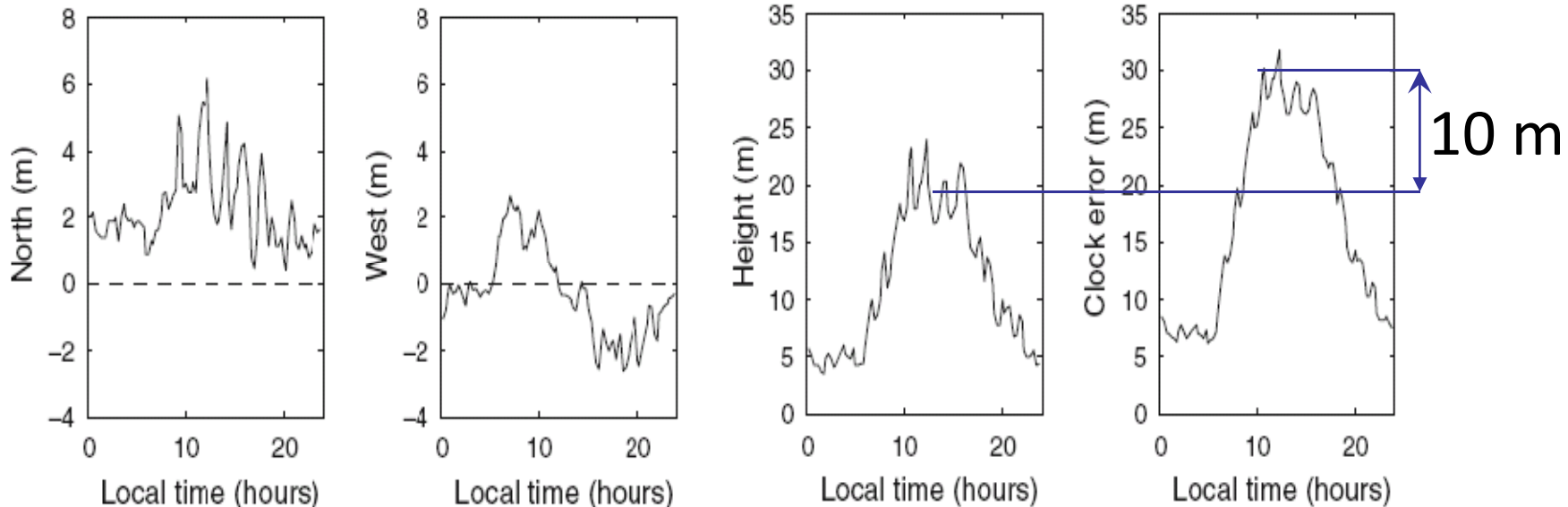


- Termes communs à la composante verticale et à l'erreur d'horloge
- Différence des deux = délai vertical

### 3. Influence

# Les mesures confirment ces interprétations.

Bruxelles, mars 2002



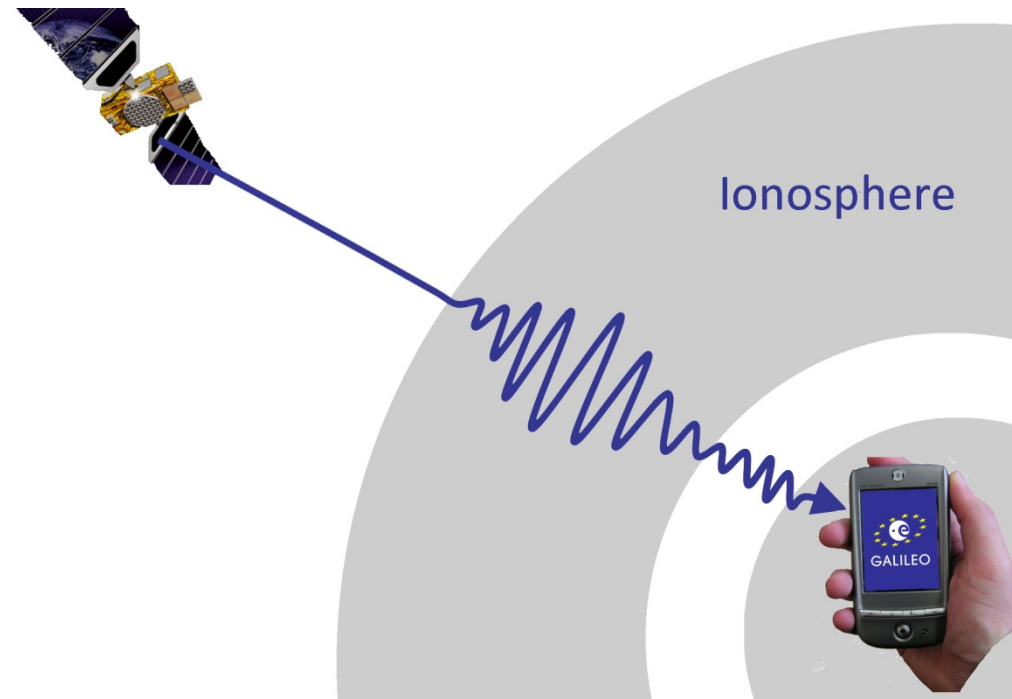
- Oscillations dues à l'évolution de la géométrie
- Ordre de grandeur du TEC vertical : 60 TECu

1. Caractéristiques
2. Positionnement
3. Influence
4. Modélisation



## 4. Modélisation

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

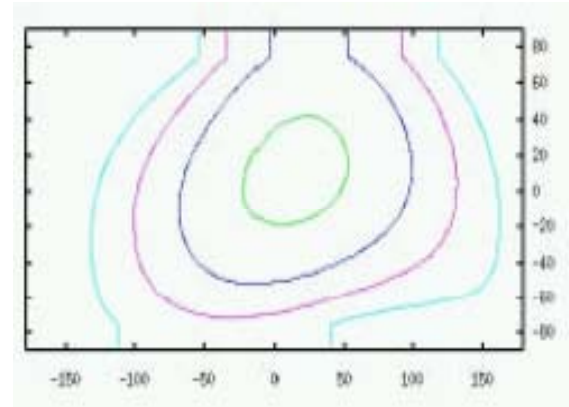


$$I = \frac{40.3}{f^2} sTEC \quad \rightarrow \quad sTEC ?$$

## 4. Modélisation

# Différentes stratégies ont été élaborées.

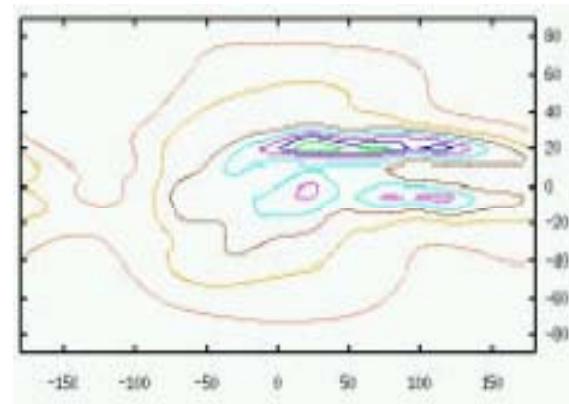
GPS : Klobuchar



vTEC  
et facteur d'obliquité

→ correction de  
50% RMS

Galileo : NeQuick



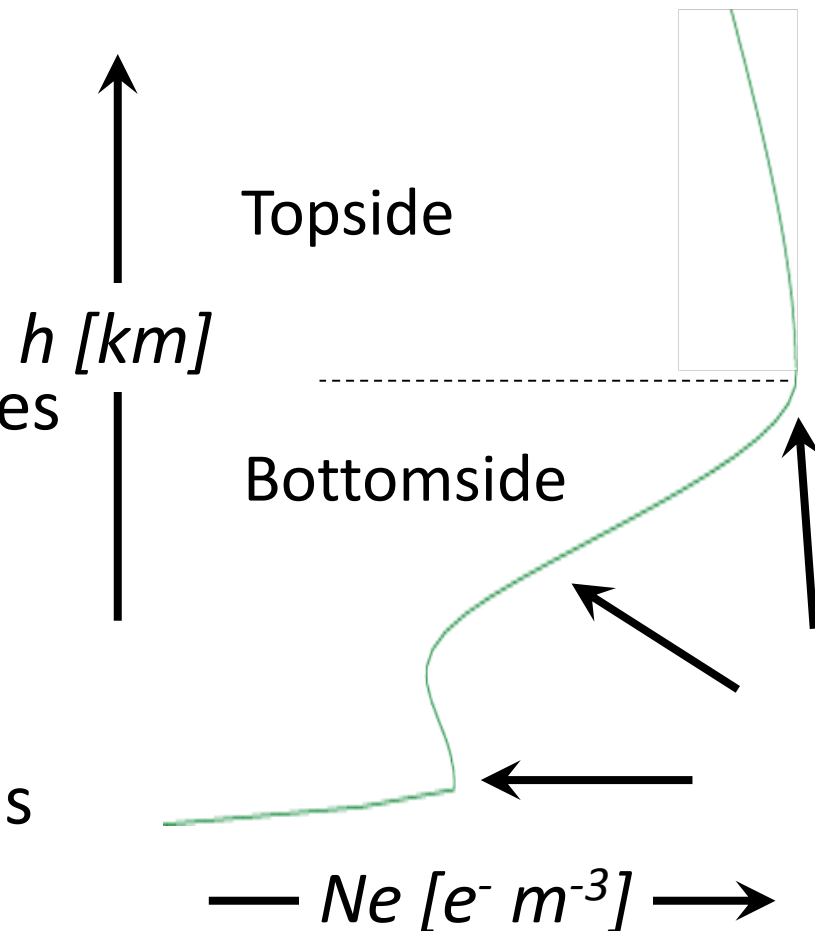
sTEC

→ correction de  
70% RMS ?

## 4. 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



## 4. Modélisation

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

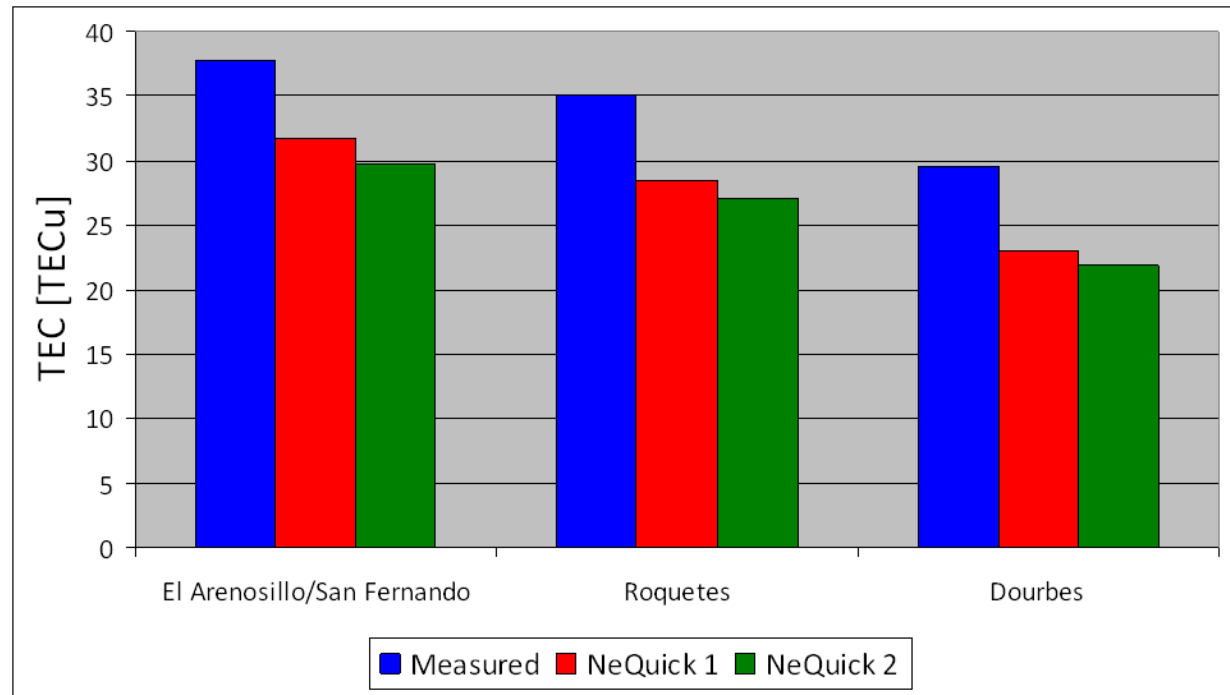
- Mesures **réelles** à la place des cartes mensuelles médianes  
→ contrainte au moyen des données d'ionosonde
- Comparaison du TEC vertical modélisé avec le TEC GPS  
→ ionosonde et récepteur GPS **co-localisés**
- Trois exemples en Europe présentant une **digisonde** et une station **IGS/EUREF** (nearly)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



## 4. Modélisation

# La modélisation du TEC s'améliore sur base annuelle.

### TEC moyen annuel

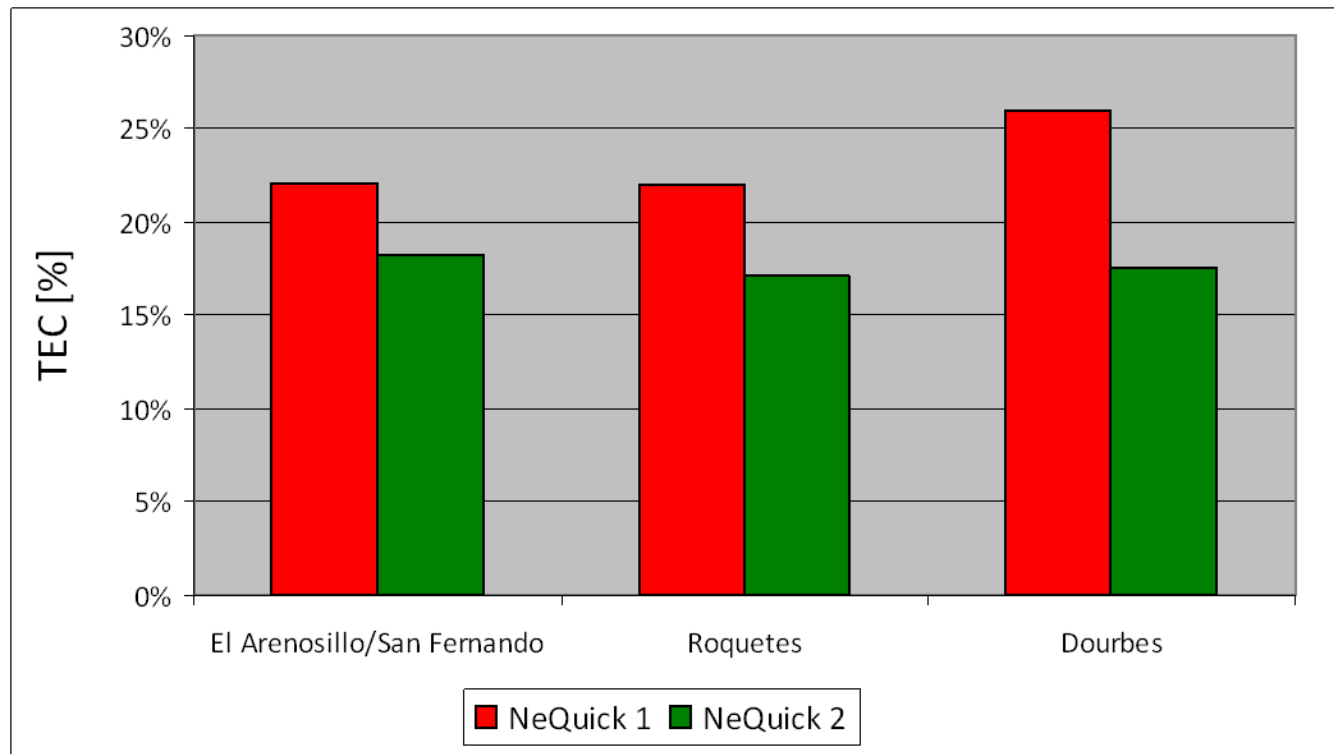


- TEC sous-estimé en moyenne
- Plus grande (environ 20%) sous-estimation avec NeQuick 2

## 4. Modélisation

# La modélisation du TEC s'améliore sur base annuelle.

### Ecart-type relatif annuel du TEC

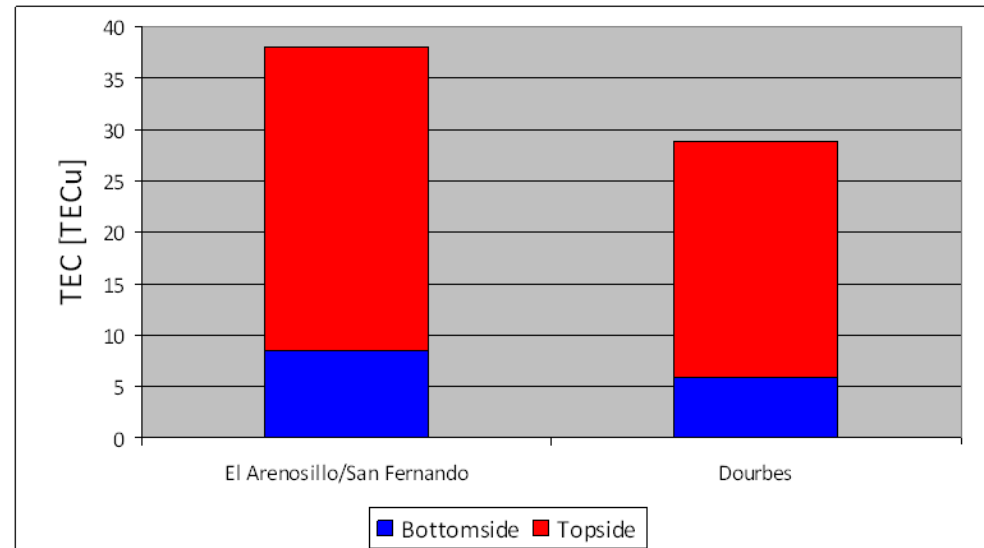


- Plus faible (environ 20%) écart-type avec NeQuick 2

## 4. Modélisation

# Le topside joue un rôle important.

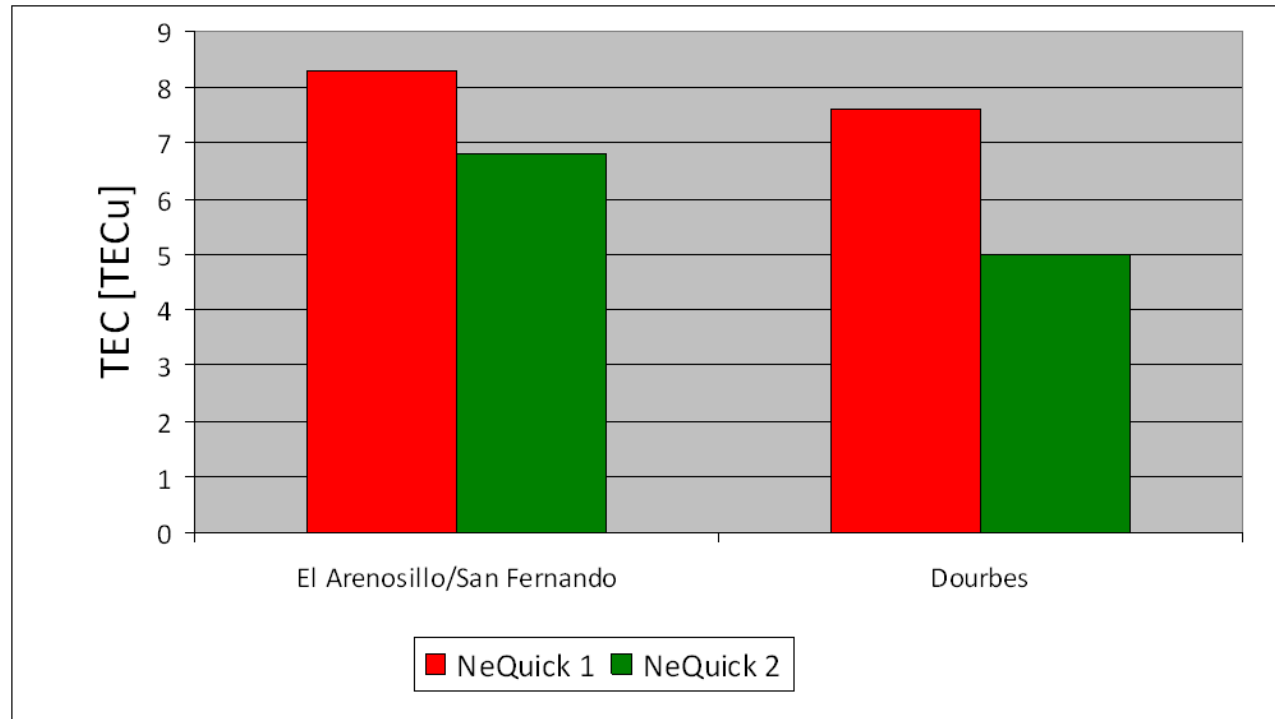
- Intégrer le profil de  $N_e$  du **bottomside** de la digisonde  
→ TEC du bottomside
- Soustraire au TEC GPS → TEC du topside
- Grande proportion du TEC dans le topside (3/4, 1/4)



## 4. Modélisation

L'amélioration vient principalement de la modification du topside.

Ecart-type relatif annuel du TEC



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





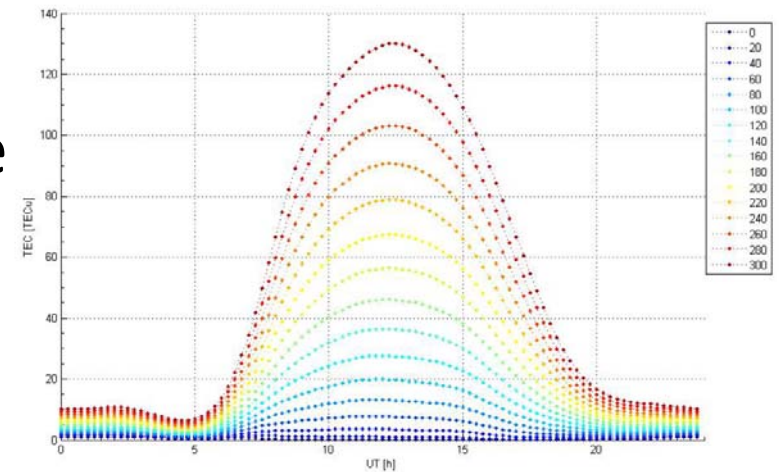
## 4. Modélisation

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

- Dépendance 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

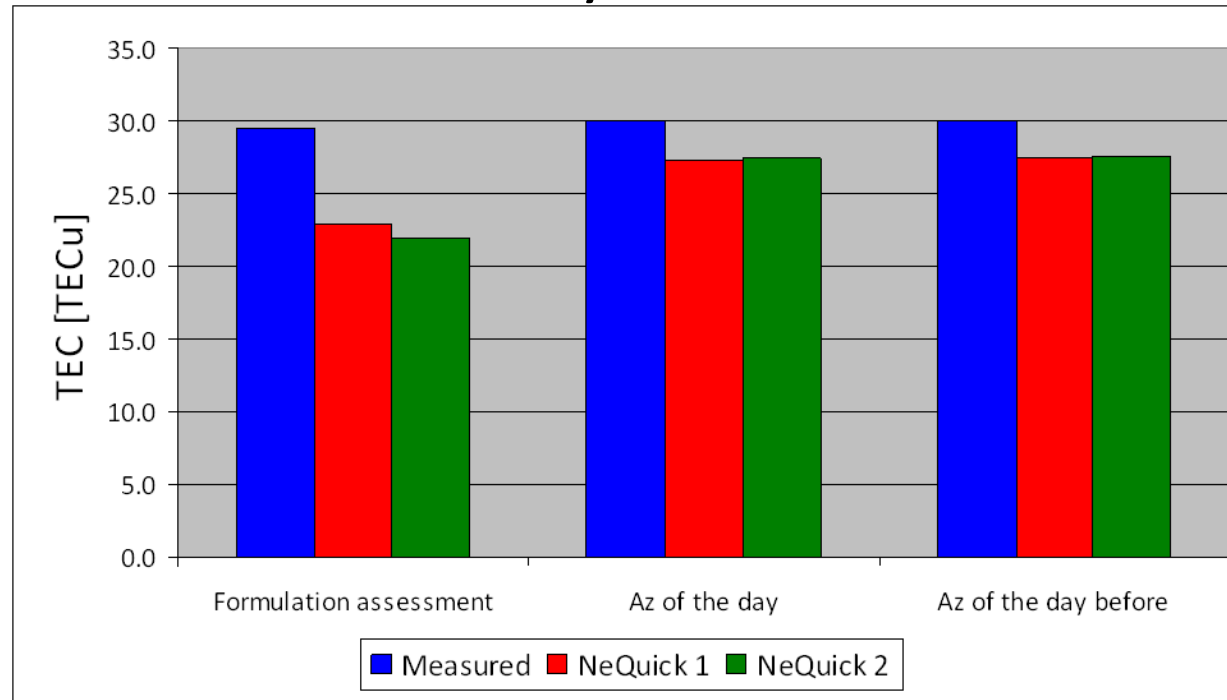


vTEC (Dourbes – Novembre)

## 4. Modélisation

L'ingestion absorbe le biais.

TEC moyen annuel

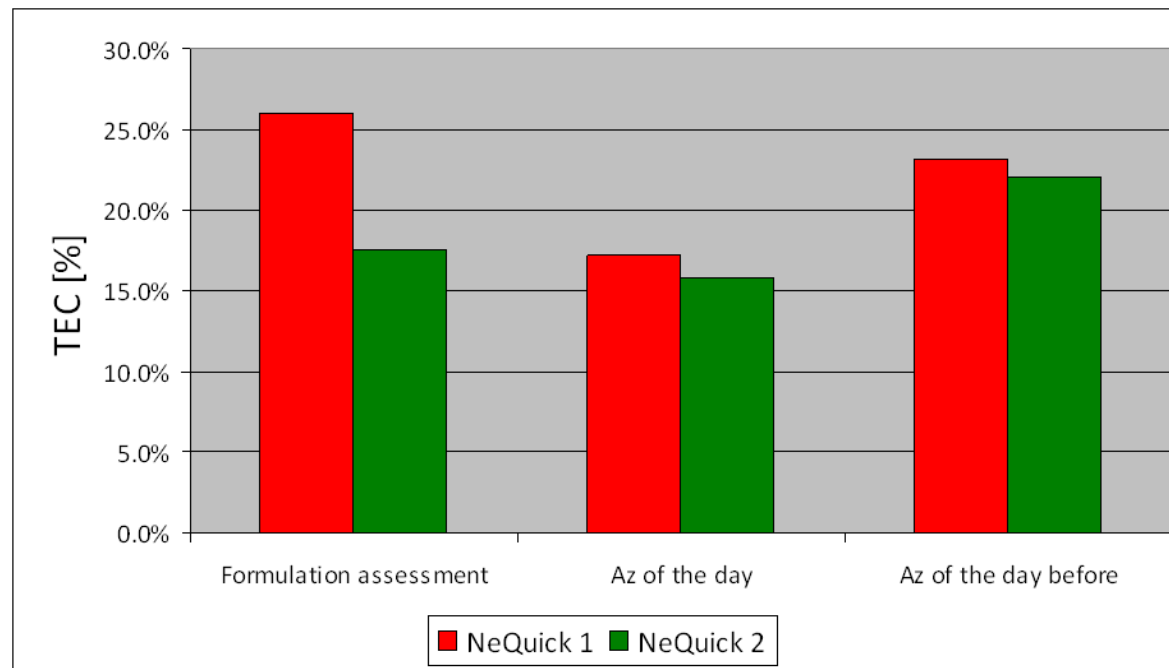


- Biais environ **trois fois plus faible**
- **Diminuant** même avec NeQuick 2 (15%)

## 4. Modélisation

Utiliser Az du jour précédent a d'important conséquences.

### Ecart-type relatif annuel du TEC



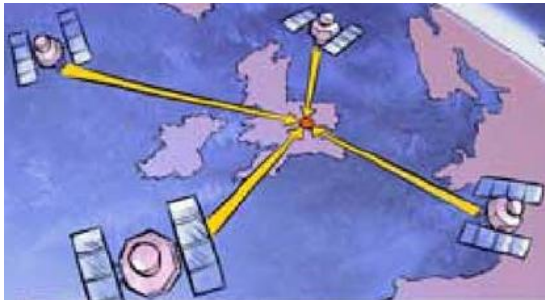
- Az du jour : écart-type plus faible
- Az du jour précédent : écart-type plus élevé (environ 35%)

# Nous étudions certaines questions intéressantes.

- Impact sur d'autres paramètres (foF2, TEC du bottomside)
- Utilisation d'Az du jour précédent
  - pendant des tempêtes ionosphériques
  - aux limites entre mois

## 4. Modélisation

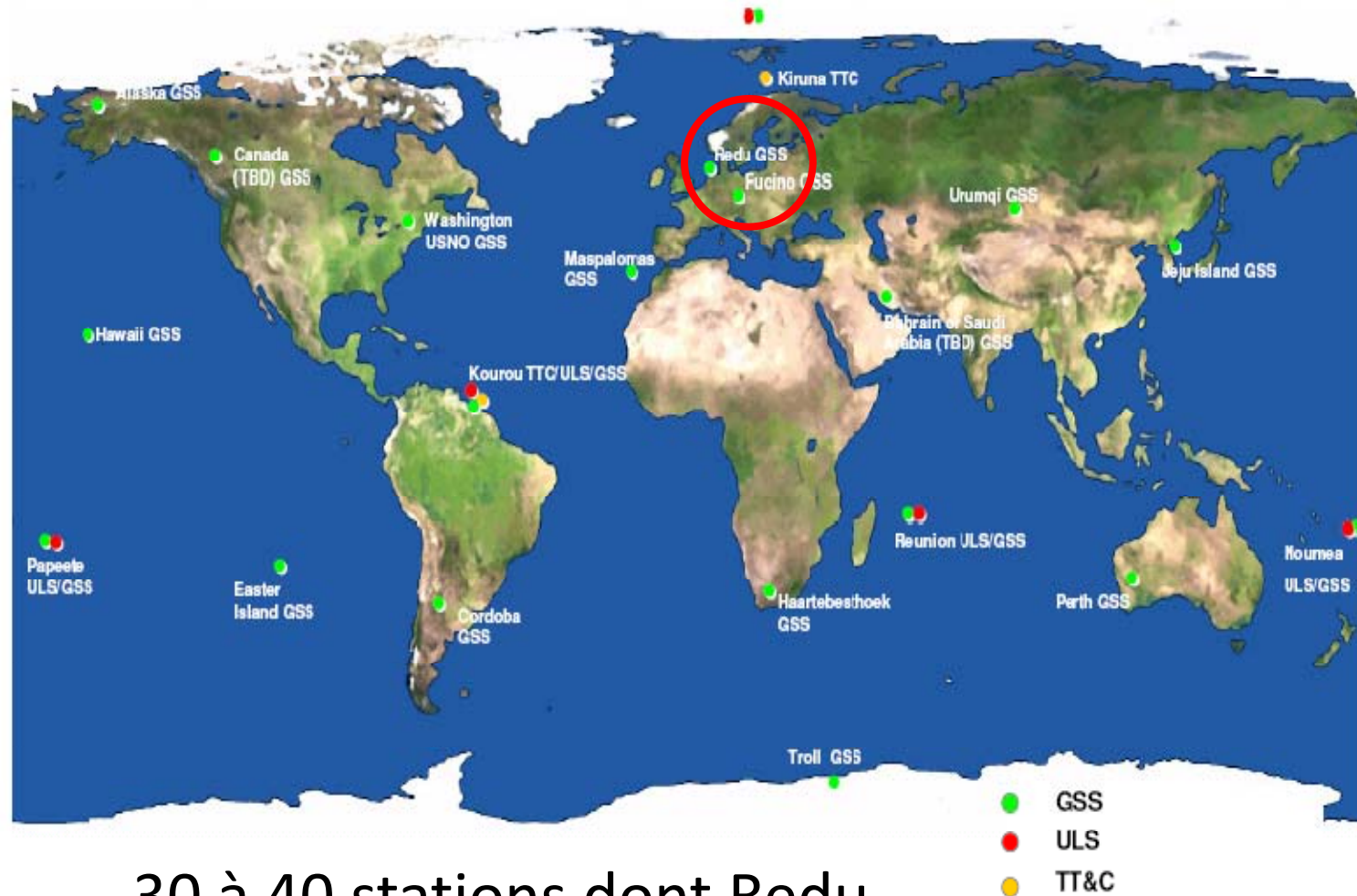
Galileo utilisera l'ingestion pour calculer l'information à transmettre aux récepteurs.



Mesurer  
sTEC

## 4. Modélisation

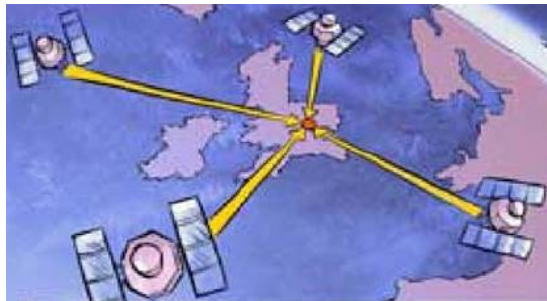
Le segment sol du système effectuera des mesures de TEC.



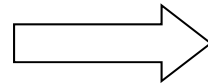
30 à 40 stations dont Redu

## 4. Modélisation

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



Mesurer  
sTEC



Optimiser  
Az

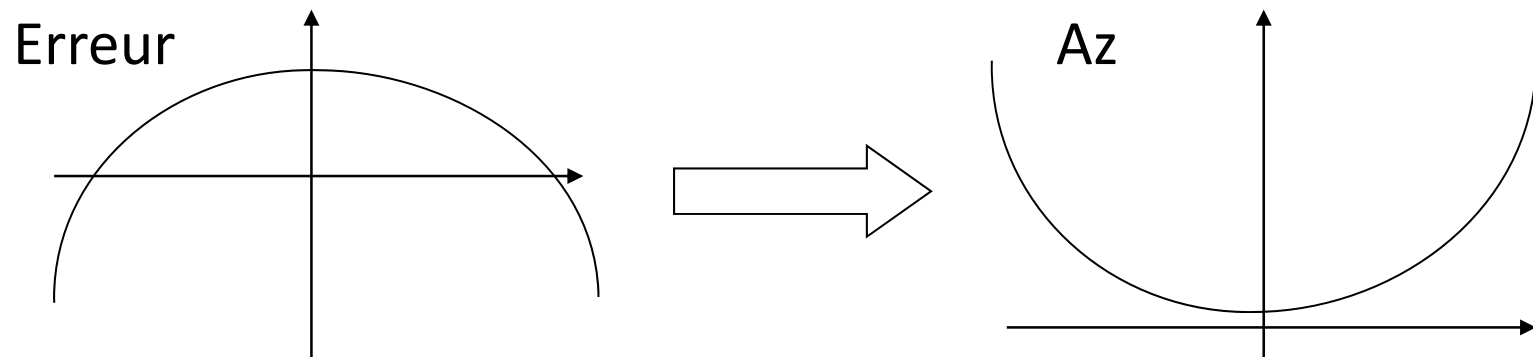


## 4. Modélisation

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)

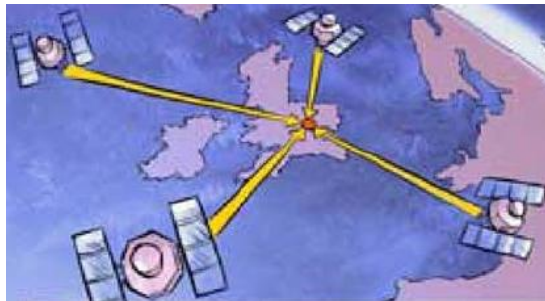
→ ajustement **parabolique** :  $Az = a_0 + a_1 \mu + a_2 \mu^2$



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

## 4. 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 : temps, lieu, 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 ?



# Bibliographie

- Bidaine, B. *Ionosphere Crossing of Galileo Signals*. Liège : ULg, 2006. Travail de fin d'études.  
<http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/682>
- 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)
- Warnant, R. *Systèmes de positionnement par satellites*. Liège : ULg, 2005. Cours GEOG0625.
- *The Free Earth Space 4-D; Visualizing the Ionosphere using Google Earth* ©. Space Environment Technologies, Space Environment Corporation.  
[http://sol.spacenvironment.net/~ionops/ES4Dintro\\_public.html](http://sol.spacenvironment.net/~ionops/ES4Dintro_public.html)
- *Galileo. La boussole du futur*. Thales Alenia Space.  
[http://www.thalesgroup.com/extra/space/Galileo\\_fr/](http://www.thalesgroup.com/extra/space/Galileo_fr/)

A diagram of the Galileo satellite constellation. It shows a central Earth globe with several satellite orbits around it. Each orbit contains multiple satellites, represented by small satellite icons with solar panels. The orbits are depicted as white lines with small yellow and purple markers indicating satellite positions.

# 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*

*18 mars 2009*

