



# Modélisation de l'ionosphère pour les utilisateurs Galileo simple fréquence

*Benoît Bidaine*

*Aspirant F.R.S.-FNRS*

*Université de Liège (Unité de Géomatique)*

*21 janvier 2010*

*Centre Géosciences – 1<sup>ère</sup> Journée des Doctorants  
(Liège, Belgique)*

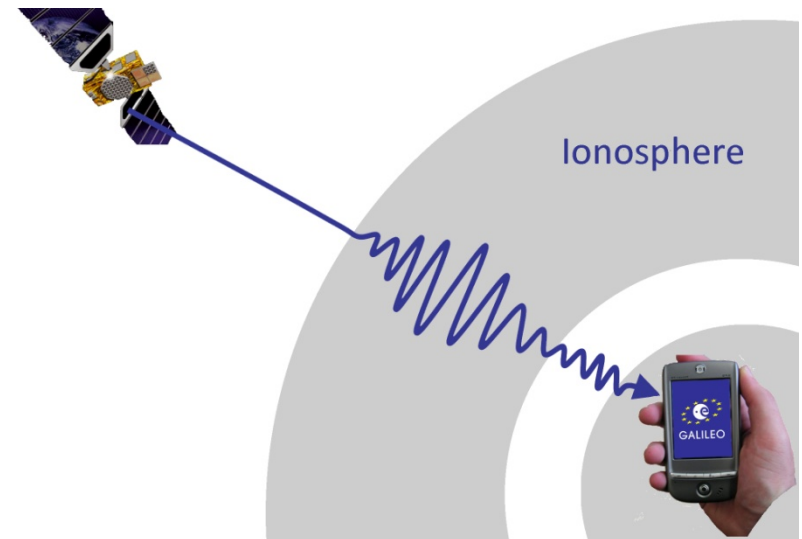
**fnrs**  
LA LIBERTÉ DE CHERCHER



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



C'est pourquoi l'Europe lance Galileo!



# L'ionosphère reste un challenge pour les GNSS.

- Utilisation de signaux électromagnétiques
  - Propagation dans un milieu matériel
    - vitesse différente  
de celle de la lumière
- Elimination de l'effet ionosphérique en utilisant plusieurs fréquences
- Comment faire avec une seule fréquence ?

Les récepteurs Galileo  
simple fréquence atténueront  
l'effet ionosphérique en le modélisant.

1. Galileo

2. Ionosphère

3. Influence

4. Modélisation



**1. Galileo**

2. Ionosphère

3. Influence

4. Modélisation

# 1. Galileo

Galileo permettra différents types d'applications grâce à son infrastructure remarquable.

- Segment spatial : **30 satellites** transmettant des signaux sur 3 fréquences
  - Segment sol : stations collectant des mesures et générant les informations à transmettre
  - 5 services dont **Open Service**
- Utilisation la plus courante simple-fréquence

## 1. Galileo

# Galileo présente de nombreux avantages.

- Système **civil**
- **Interopérabilité** : utilisation conjointe des satellites GPS et Galileo
- Précision garantie : signal d'**intégrité** fourni

## 1. Galileo

Son développement en cours  
s'achèvera en 2014.

- 2 satellites expérimentaux en orbite :  
GIOVE-A en décembre 2005 et GIOVE-B en avril 2008
- Budget de 3,4 M€ dégagé en juillet 2007
- Conclusion des contrats pour le déploiement en cours
- Phase de validation en orbite (IOV) :  
4 satellites fin 2010, début 2011
- Déploiement complet (FOC) :  
26 satellites supplémentaires d'ici 2014



1. Galileo

2. Ionosphère

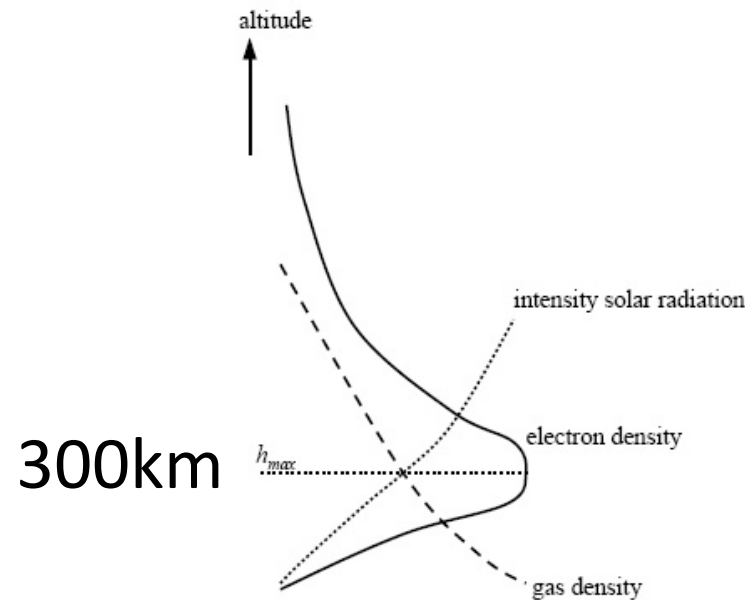
3. Influence

4. Modélisation

## 2. Ionosphère

L'atmosphère est ionisée par le rayonnement solaire.

- Couche comprenant une certaine densité d'électrons



- Intégrale (verticale ou oblique) : **TEC**  
→ 1 **TECu** =  $10^{16}$  el.  $m^{-2}$  ~ 0.16 m (L1)

## 2. Ionosphère

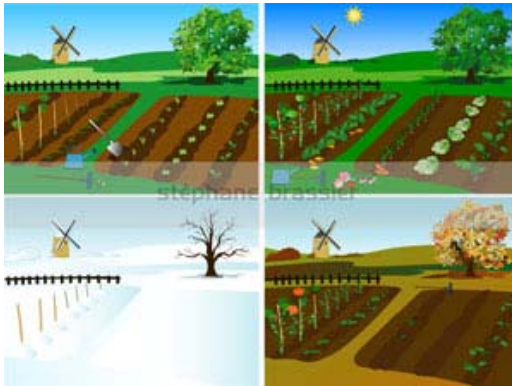
L'influence du rayonnement solaire suit certaines variables.



→ lat, long



→ UT



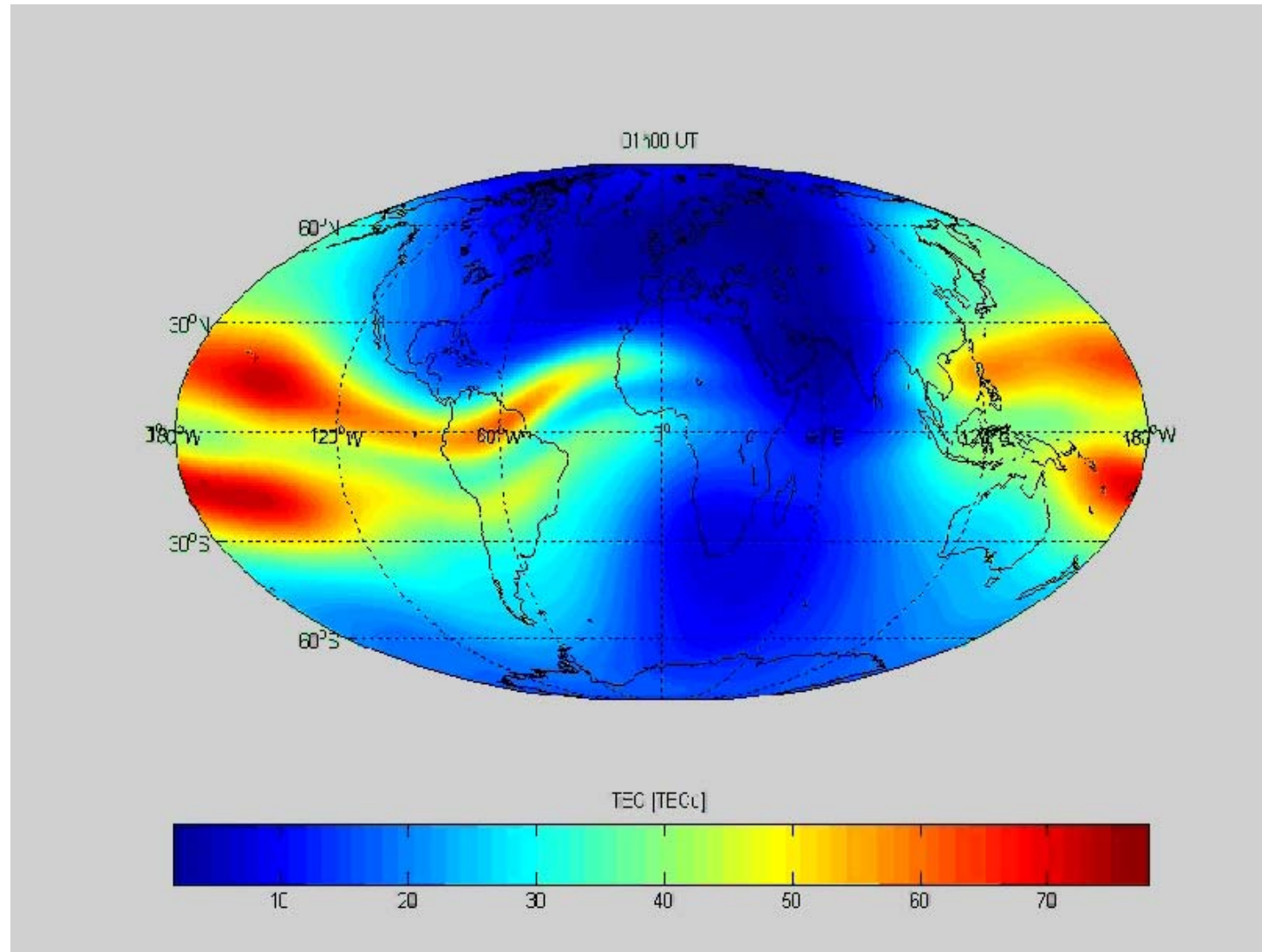
→ mth



→ F10.7/R

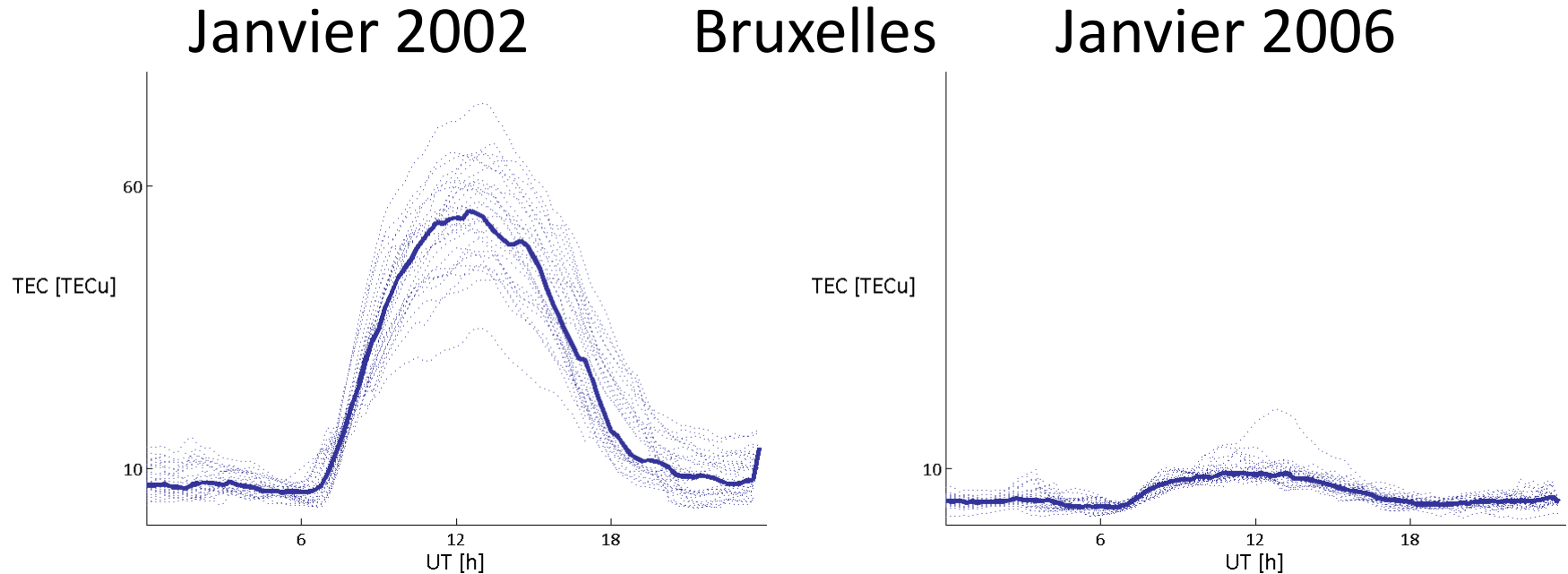
## 2. Ionosphère

L'ionosphère suit la forme du champ magnétique terrestre.



## 2. Ionosphère

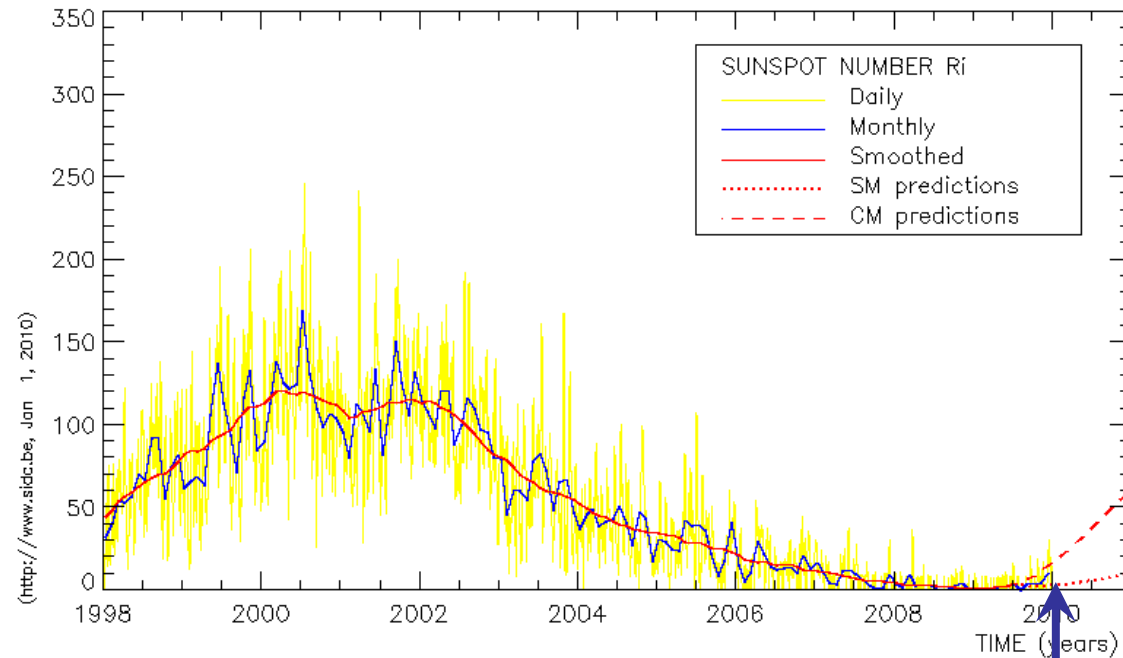
L'ionosphère suit l'évolution temporelle du rayonnement solaire.



- Variation au cours de la journée  
→ différences journalières autour d'une médiane mensuelle
- Variation saisonnière
- Variation en fonction de l'activité solaire
- Ordre de grandeur du TEC vertical : 60 TECu → 10m

## 2. Ionosphère

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



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

1. Galileo

2. Ionosphère

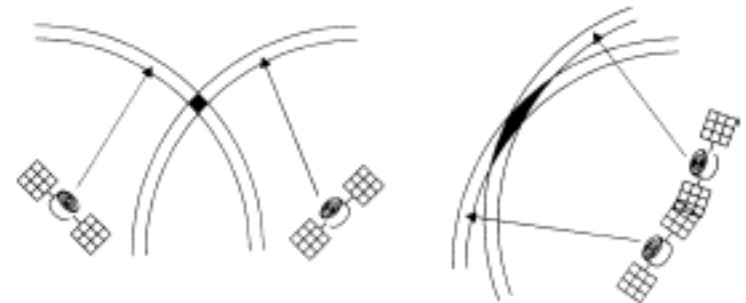
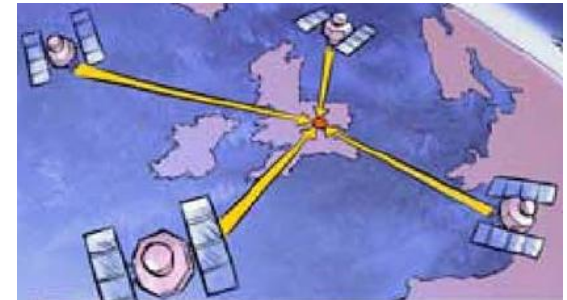
3. Influence

4. Modélisation

### 3. Influence

Le positionnement simple-fréquence exploite des mesures de temps.

- Distance satellite-récepteur =  
temps de parcours \* vitesse de la lumière
- Position par **trilatération**  
(+ synchronisation)  
→ minimum 4 satellites
- **Précision** =  
combinaison délais  
et géométrie (DOP)





### 3. Influence

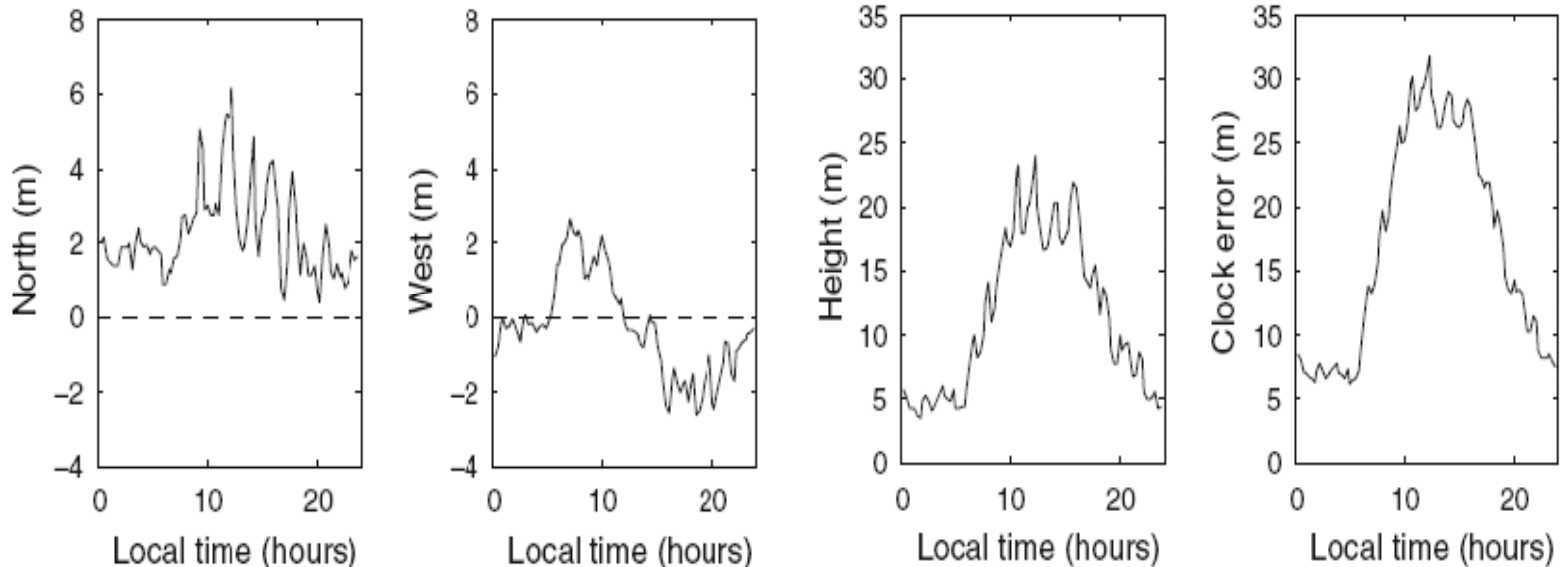
## Le délai ionosphérique dépend du TEC et de la fréquence.

- Délai ionosphérique = différence entre **temps de parcours** du signal dans l'ionosphère et dans le vide
- Ionosphère **ionisée et dispersive**
  - Erreur ionosphérique :  $I = \frac{40.3}{f^2} sTEC$
  - Utilisation de **plusieurs fréquences** pour éliminer ou mesurer l'erreur ionosphérique
  - TEC à **modéliser** pour les utilisateurs simple fréquence

### 3. Influence

Il se traduit en coordonnées en fonction de la géométrie.

Bruxelles, mars 2002

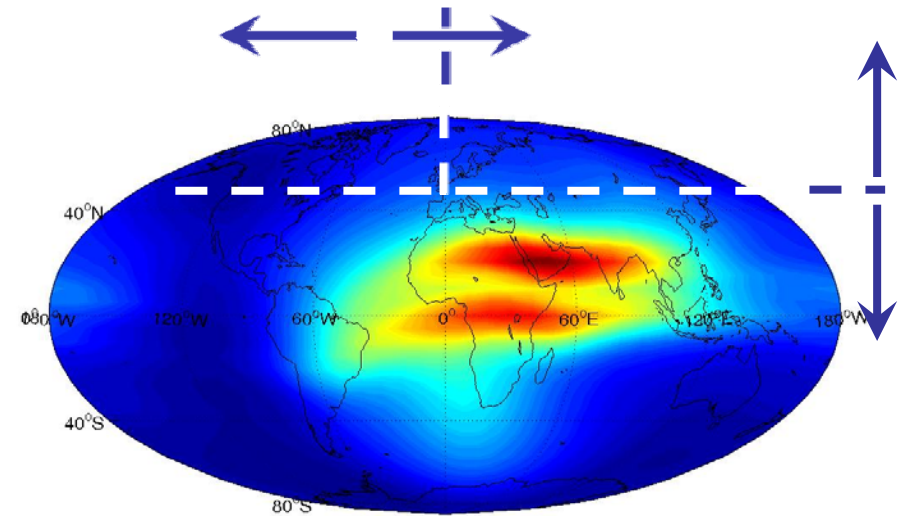
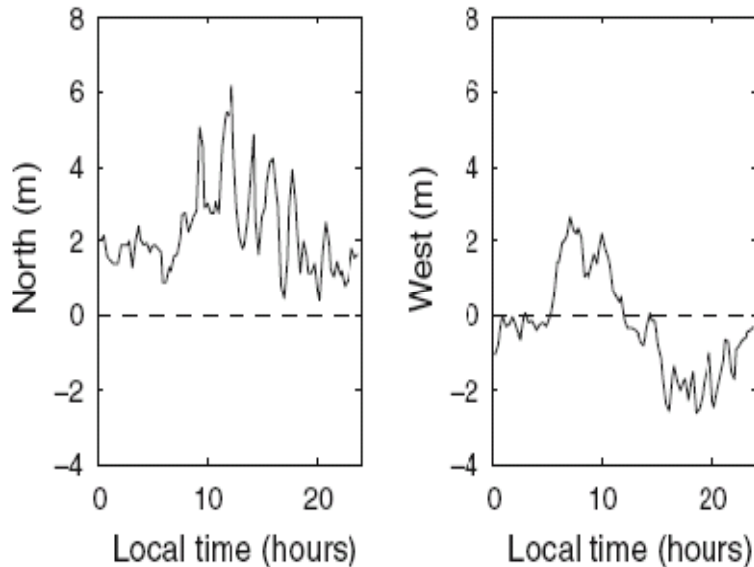


- Erreur non-aléatoire de **plusieurs mètres**
- **Oscillations** dues à l'évolution de la géométrie

### 3. Influence

Il se traduit en coordonnées en fonction de la géométrie.

Bruxelles, mars 2002



- Influence des **gradients de TEC**

1. Galileo

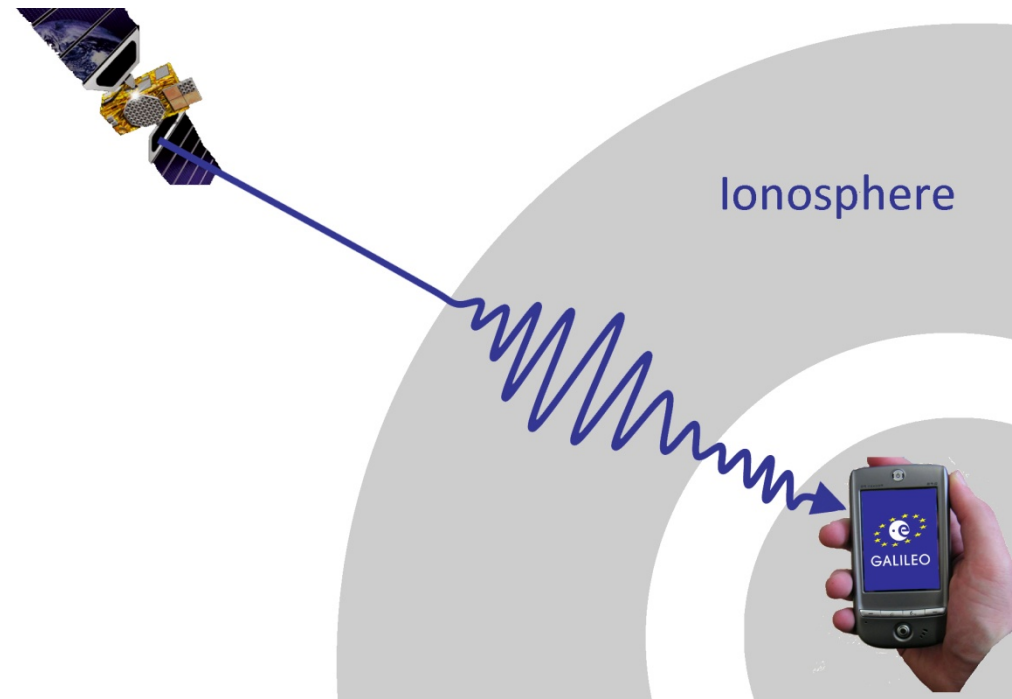
2. Ionosphère

3. Influence

4. Modélisation

## 4. Modélisation

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

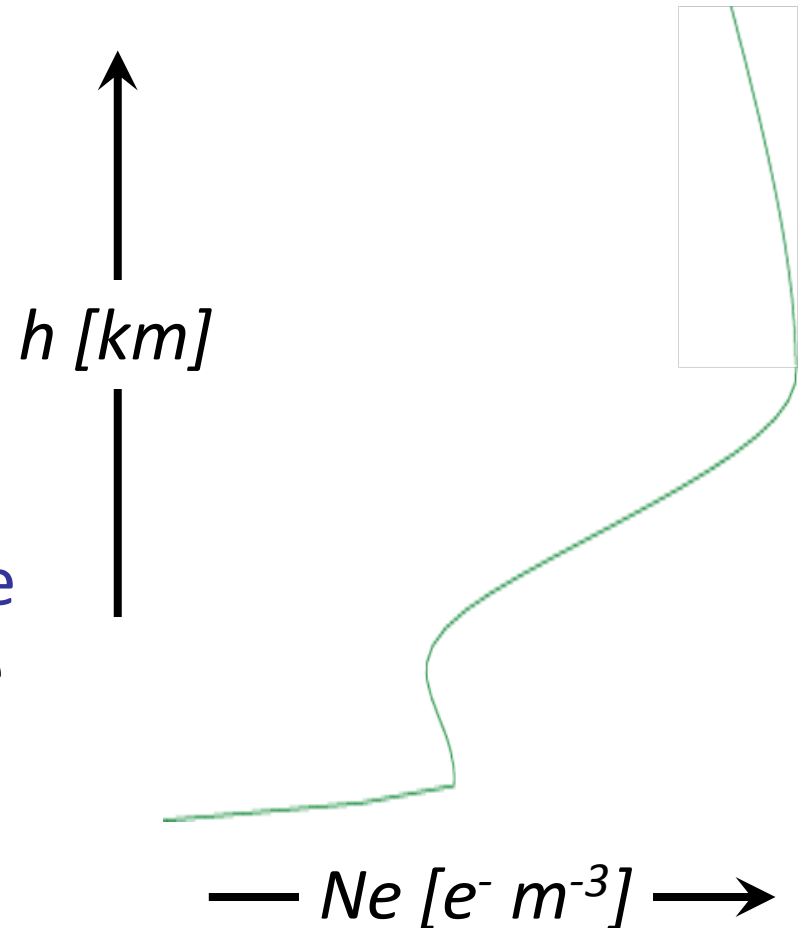


$$I = \frac{40.3}{f^2} sTEC \quad \rightarrow \quad sTEC ?$$

## 4. Modélisation

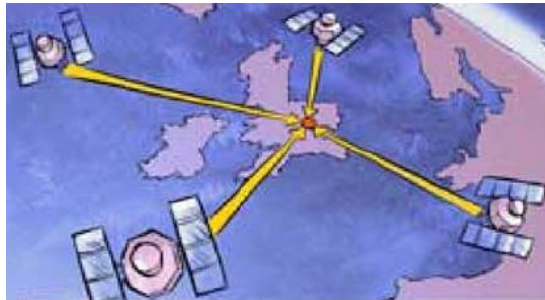
NeQuick est un « profileur » empirique.

- **Output** =  $Ne$ 
  - $TEC$  avec intégration
- **Input** = variables ionosphériques
  - Utilisation d'un **flux solaire effectif**  $A_z$  comme paramètre d'optimisation



## 4. Modélisation

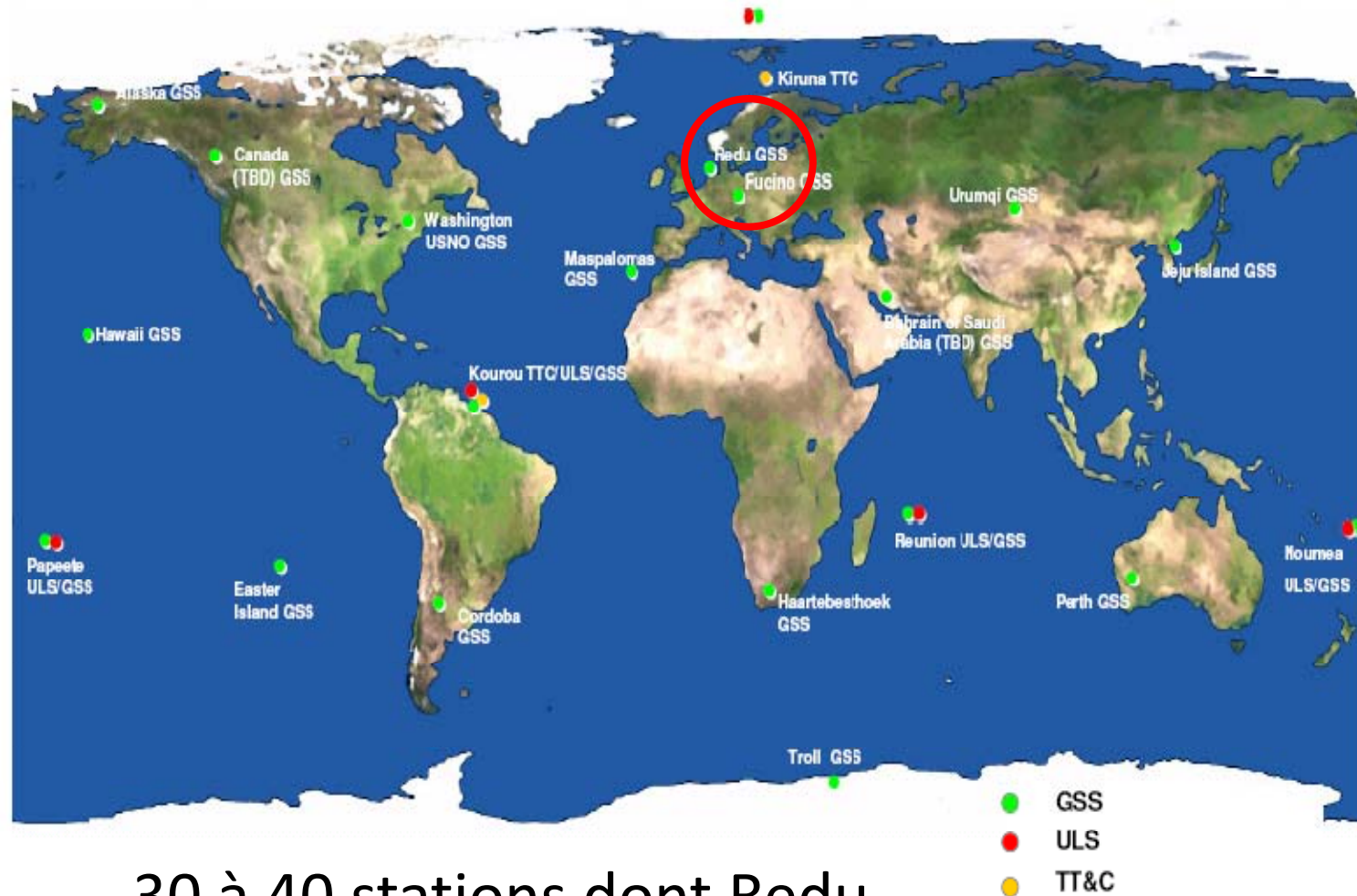
Les récepteurs Galileo utiliseront des informations transmises par Galileo.



Mesurer  
sTEC

## 4. Modélisation

Le segment sol du système effectuera des mesures de TEC.

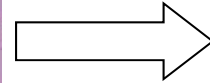
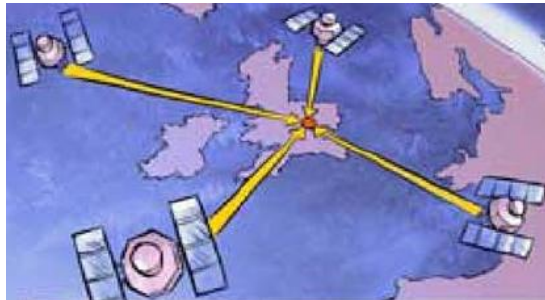


30 à 40 stations dont Redu



## 4. Modélisation

Les récepteurs Galileo utiliseront des informations transmises par Galileo.



Optimiser  
Az

Mesurer  
sTEC

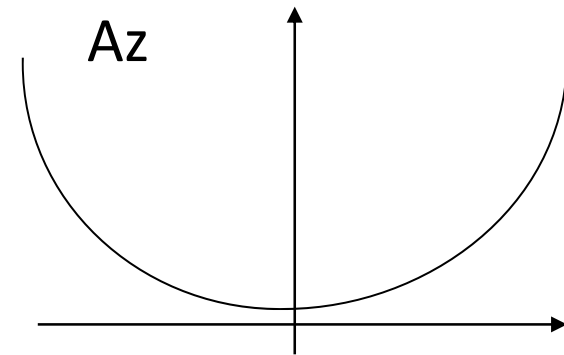
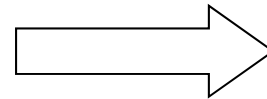
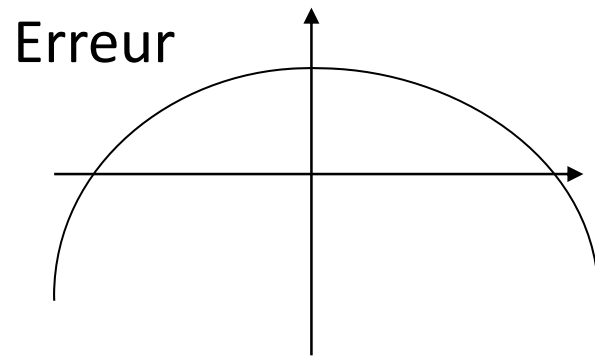
## 4. Modélisation

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

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

→ ajustement **parabolique** :

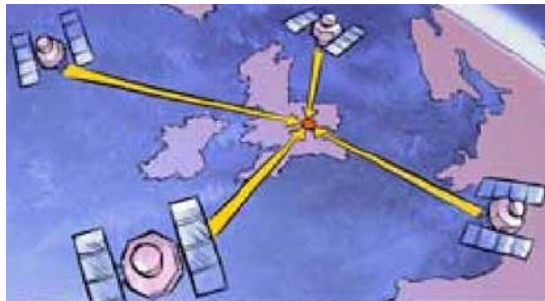
$$Az = a_0 + a_1 \mu + a_2 \mu^2$$



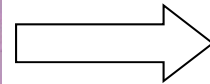
- **3 paramètres** intégrés au message de navigation (8 pour le GPS)

## 4. Modélisation

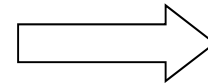
Les récepteurs Galileo utiliseront des informations transmises par Galileo.



Mesurer  
sTEC



Optimiser  
Az



Utiliser  
NeQuick

→ correction de 70% RMS

Les récepteurs Galileo  
simple fréquence atténueront  
l'effet ionosphérique en le modélisant.

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

# L'ionosphère reste un challenge pour les GNSS.

- Amélioration de son **observation** grâce aux nouveaux signaux  
→ ex mesure du TEC triple fréquence
  - Prise en compte de son influence sur le **positionnement**  
→ ex alarmes RTK
- Recherche en cours grâce à 2 récepteurs déployés en novembre 2009 dans le cadre du **projet SWANS**

Collaborations :



Et vous ? Comment envisagez-vous le futur avec Galileo ?



12





# Modélisation de l'ionosphère pour les utilisateurs Galileo simple fréquence

*Benoît Bidaine*

*Aspirant F.R.S.-FNRS*

*Université de Liège (Unité de Géomatique)*

*21 janvier 2010*

*Centre Géosciences – 1<sup>ère</sup> Journée des Doctorants  
(Liège, Belgique)*

**fnrs**  
LA LIBERTÉ DE CHERCHER



# 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](http://www.thalesaleniaspace-media.com/Galileo_fr/index.html)