

# Éléments affectant la précision du GPS RTK

Gilles Wautelet

Unité de géomatique



Formation continuée ARGELg

Liège, le 18 avril 2013



# Quelle est la précision de la technique GPS-RTK?

- Annoncée : Horizontal : 1cm + 1ppm  
Vertical : 2cm + 1ppm
- Cette précision est-elle réaliste?
- Cette précision est-elle garantie en toutes circonstances?
- Comment atténuer les erreurs qui affectent la précision des mesures?

## **Positionnement absolu**

Principes et sources d'erreurs

## **Positionnement RTK**

Modes différentiel et relatif

## **Limiter l'impact**

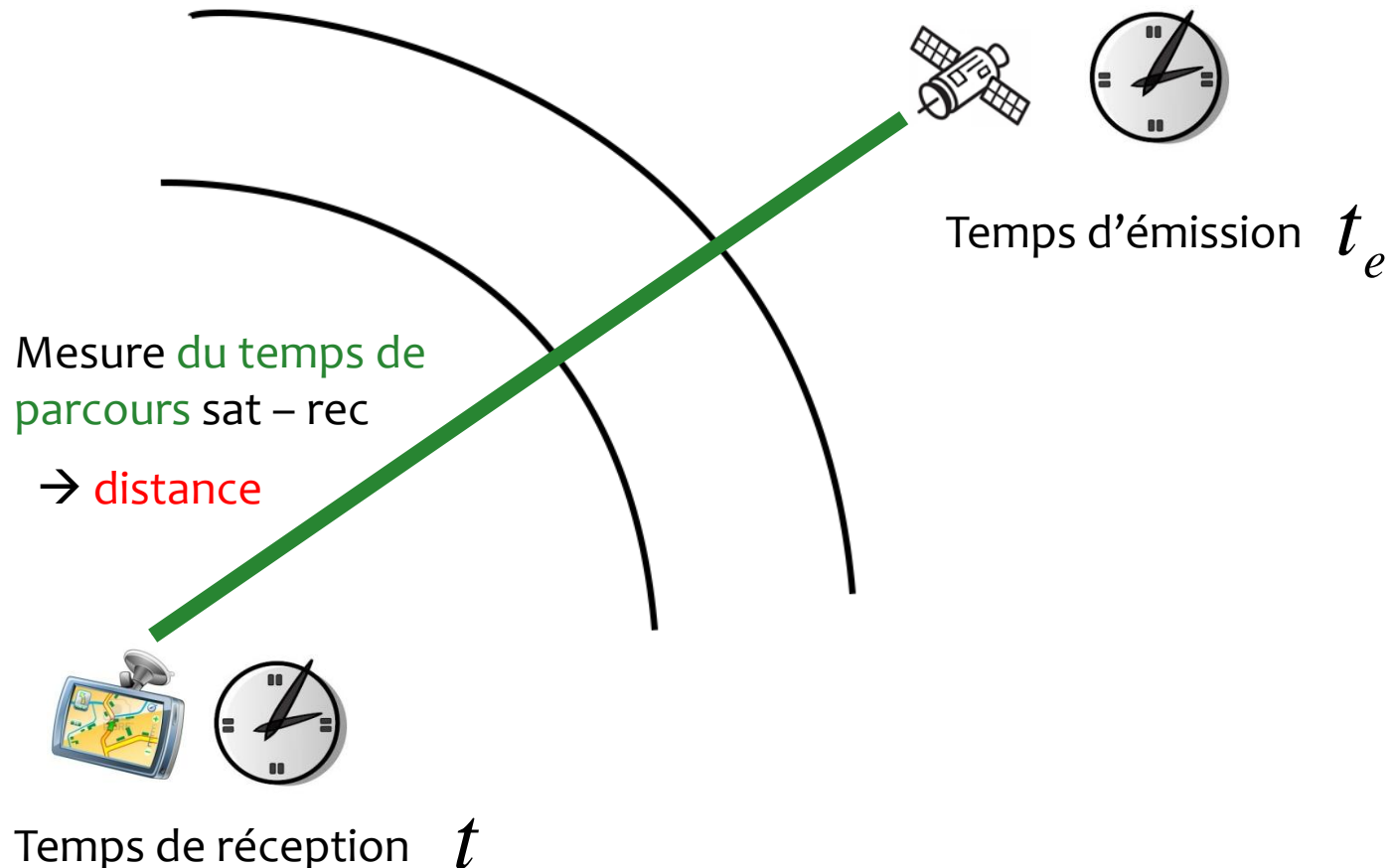
Guide de bonne pratique

**Positionnement absolu**  
Principes et sources d'erreurs

**Positionnement RTK**  
Modes différentiel et relatif

**Limiter l'impact**  
Guide de bonne pratique

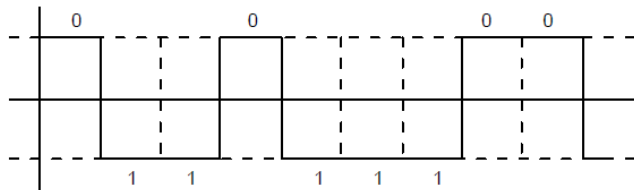
La mesure de position par GNSS requiert la mesure de **distances entre le récepteur** et minimum **4 satellites**



# Les deux types d'observables GNSS sont les codes et les phases

## Codes

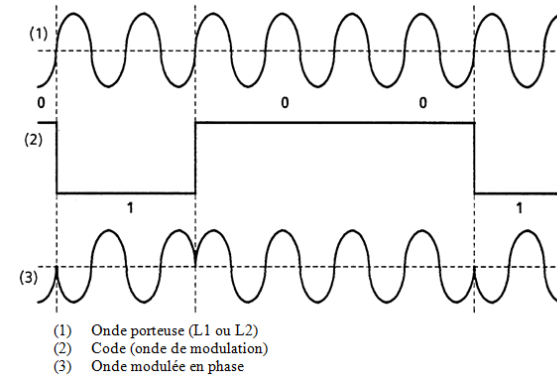
Code binaire



Précision **métrique**

## Phases

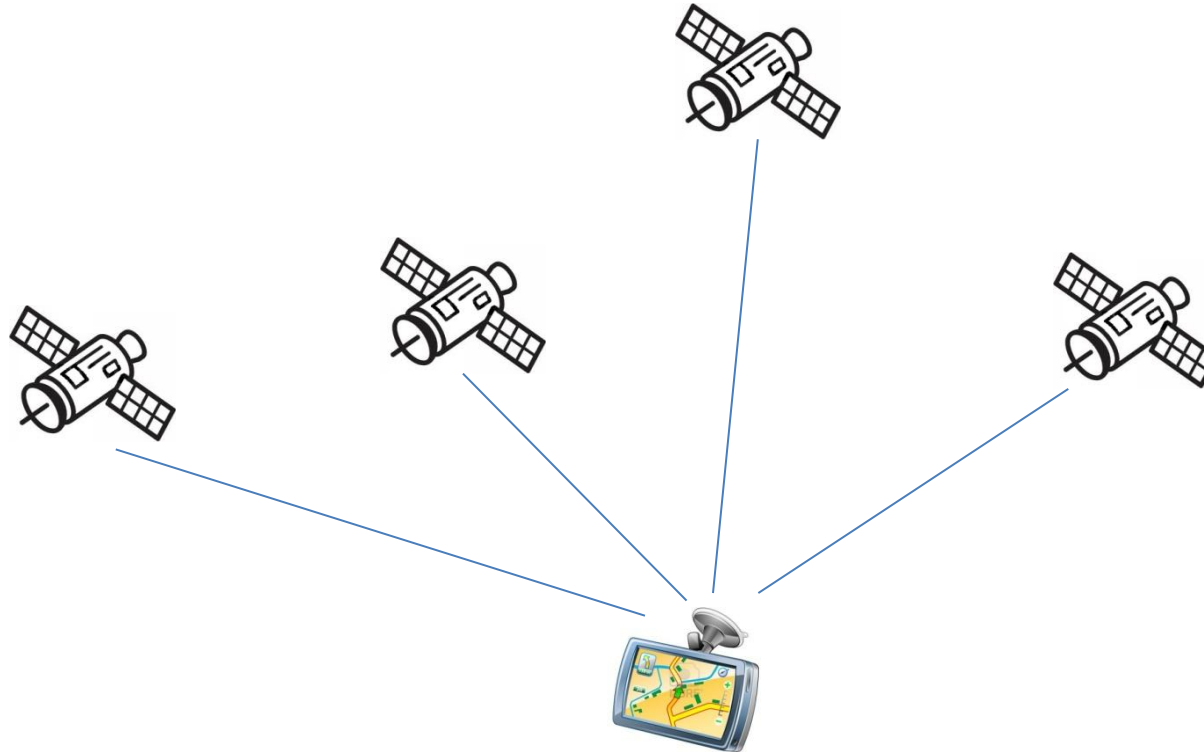
Fréquence porteuse



Précision **millimétrique**

Mesures **ambigües**

Le positionnement **absolu** ne nécessite qu'un récepteur GNSS et propose une précision métrique



XYZT

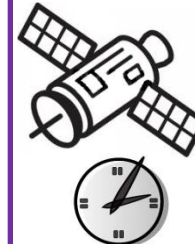
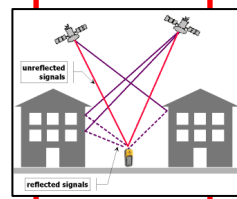
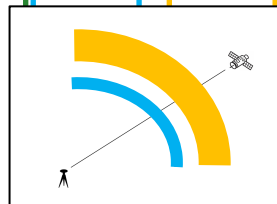
4 inconnues

Ellipsoïde de  
référence : **WGS84**

# Equations d'observation pour les mesures de codes et phases

## Codes

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



## Phases

$$\Phi_{p,k}^i(t) = D_p^i + T_p^i - I_{p,k}^i + M_{p,k,\phi}^i + c(\Delta t^i(t_e) - \Delta t_p(t)) + \lambda_k N_{p,k}^i$$

erreurs



# La traversée de l'**atmosphère** retarde les signaux GNSS

## ■ Effet **troposphérique**

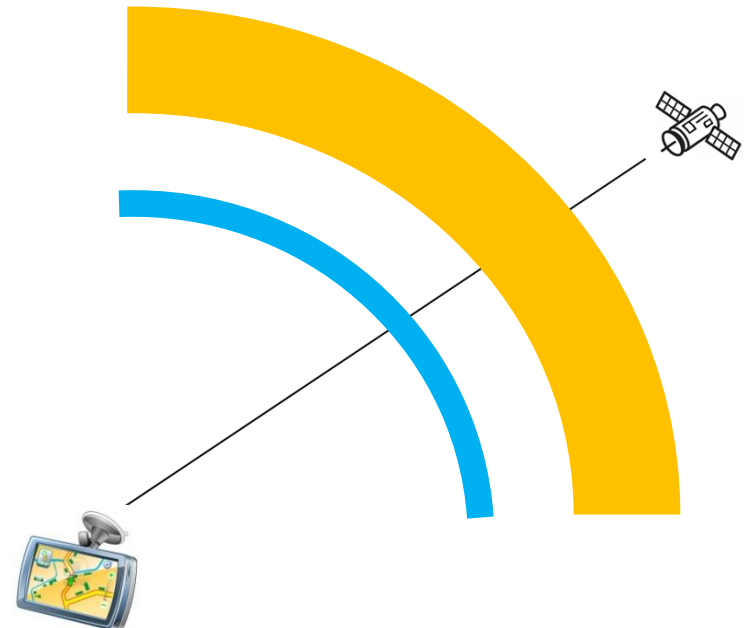
Traversée de l'atmosphère neutre  
( 0 – 30 km)

Délai  $\approx 2,4$  m

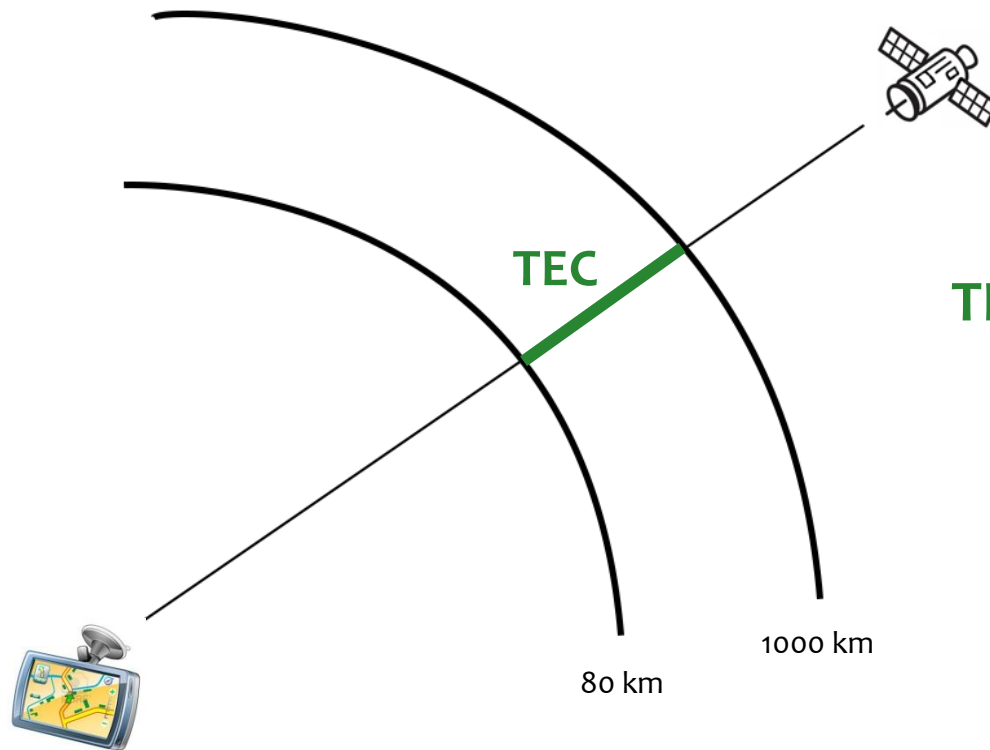
## ■ Effet **ionosphérique**

Traversée de l'atmosphère ionisée  
( 80 – 1000 km)

Délai très variable : 1 – 50 m



L'erreur **ionosphérique** est proportionnelle au nombre total d'électrons situés le long de la ligne de visée satellite - récepteur

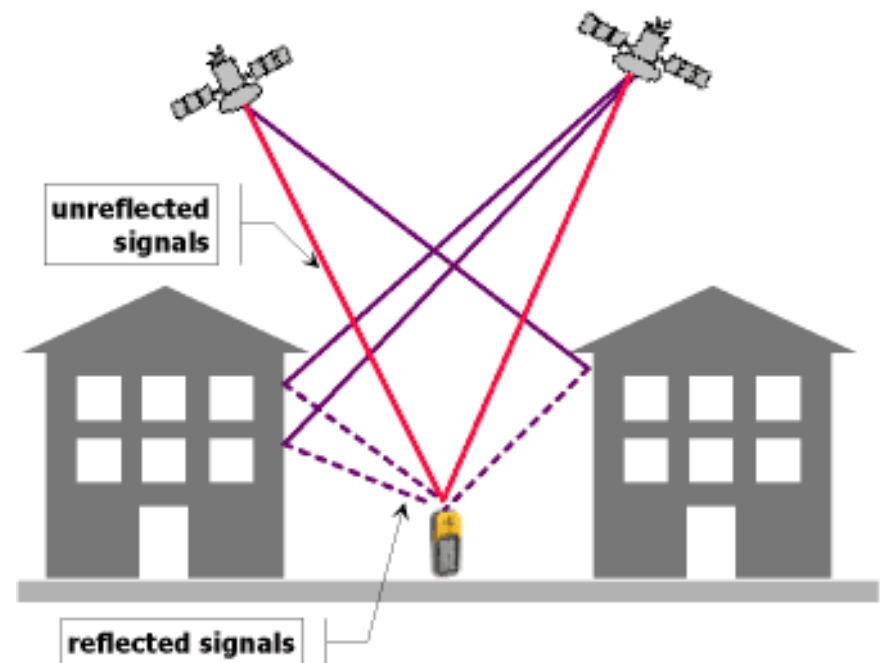


**TEC** = Total Electron Content

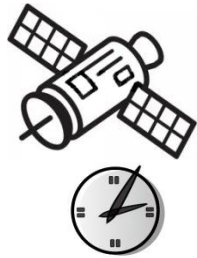
$$\text{TEC} = \int N_e ds$$

# Le **multi-trajets** est un effet lié à l'environnement autour du récepteur

- Un ou plusieurs signaux réfléchis atteignent l'antenne en même temps que le signal direct
- Codes :  $\approx 1$  m  
Phases : 1 – 5 cm
- Dépend de la fréquence du signal ( $L_1 / L_2 / L_5$ )



Les horloges des satellites et du récepteur ne sont pas **synchronisées** avec le temps officiel GPS



$$t_e = t_{e,GPS} + \Delta t^i(t_e)$$

Modèle de dérive d'horloge → précision **1 – 2 m**



$$t = t_{r,GPS} + \Delta t_p(t)$$

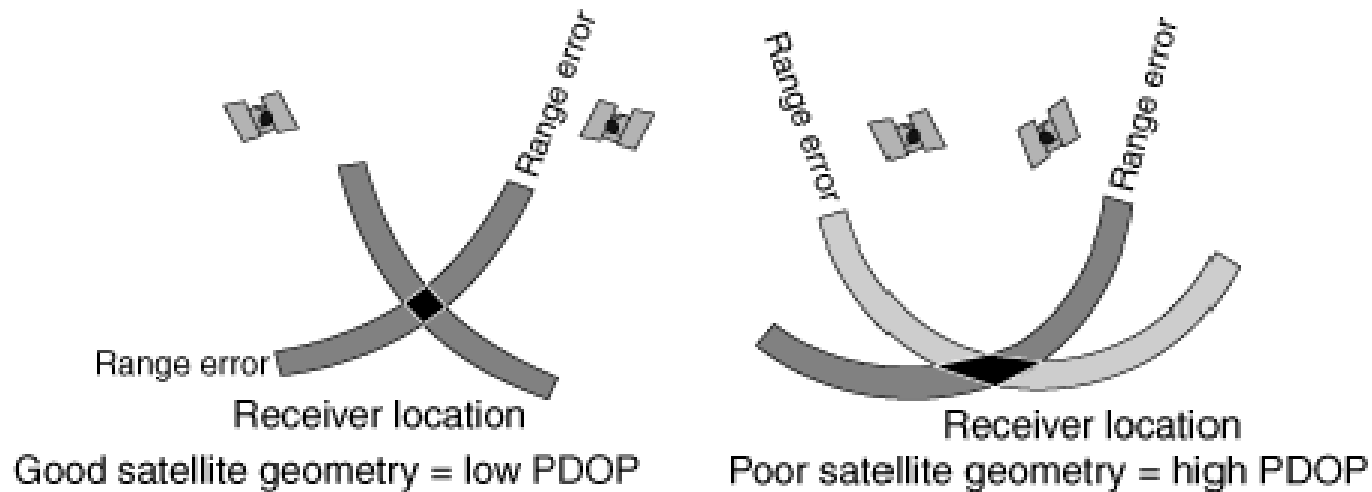
Horloge récepteur de mauvaise qualité

- plusieurs dizaines (centaines) de mètres
- considérée comme une **inconnue** du système

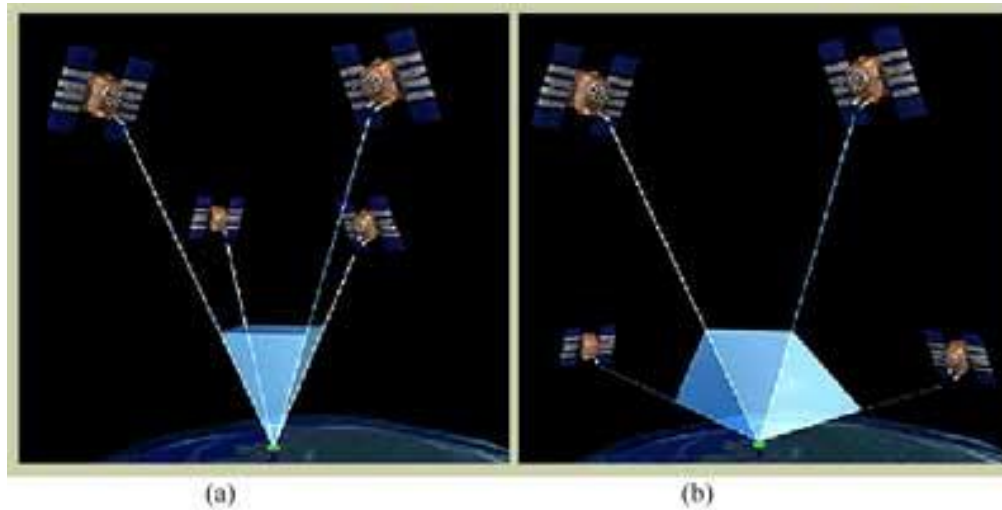
# Contribution des différentes sources d'erreur

Source d'erreur	
<u>Satellite</u>	
- orbite	1 – 2 m
- horloge	1 – 2 m
<u>Propagation du signal</u>	
- ionosphère (modèle, meilleur cas)	1 – 2 m
- ionosphère (modèle, moyen)	5 – 10 m
- ionosphère (modèle, pire cas)	10 – 50 m
- troposphère (modèle)	dm
- multi-trajets code	1 – 2 m
- multi-trajets phase	1 – 5 cm
<u>Récepteur</u>	
- bruit mesure code	0.2 – 1 m
- bruit mesure phase	0.2 – 2 mm

La **géométrie de la constellation** est un facteur d'amplification des erreurs existantes



La **géométrie de la constellation** est un facteur d'amplification des erreurs existantes



$$\sigma_{\text{pos}} = \text{DOP} \sigma_{\text{obs}} \quad \text{DOP} \propto \frac{1}{V}$$

**HDOP** : précision de la position dans le plan horizontal

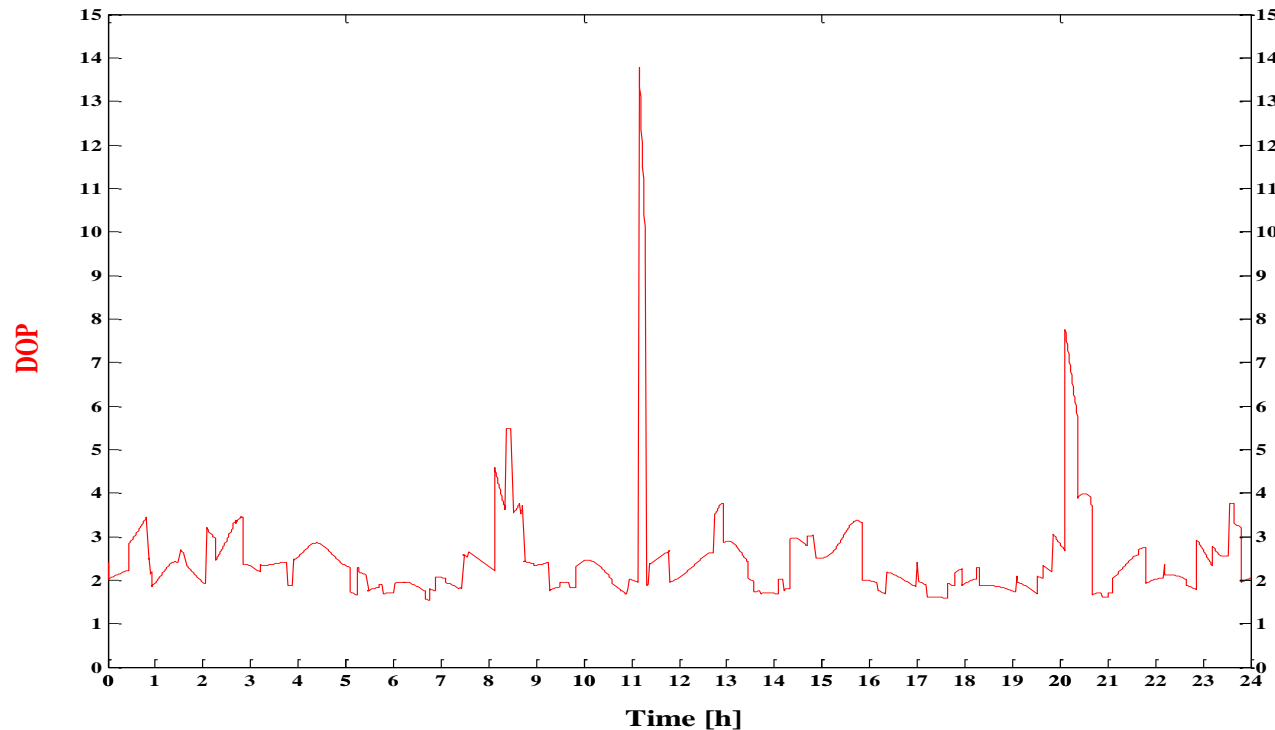
**VDOP** : précision de la position dans la direction verticale

**PDOP** : précision de la position en 3-D

**GDOP** : précision de la position et du temps

# La géométrie de la constellation est un facteur d'amplification des erreurs existantes

ex : PDOP à Bruxelles



Si PDOP = 2,5 et  $\sigma_{\text{obs}} = 5\text{m}$  :

- $\sigma_{\text{POS}} = 12,5\text{ m}$  dans 68% des cas
- $\sigma_{\text{POS}} = 25\text{ m}$  dans 95% des cas



**Positionnement absolu**  
Principes et sources d'erreurs

**Positionnement RTK**  
Modes différentiel et relatif

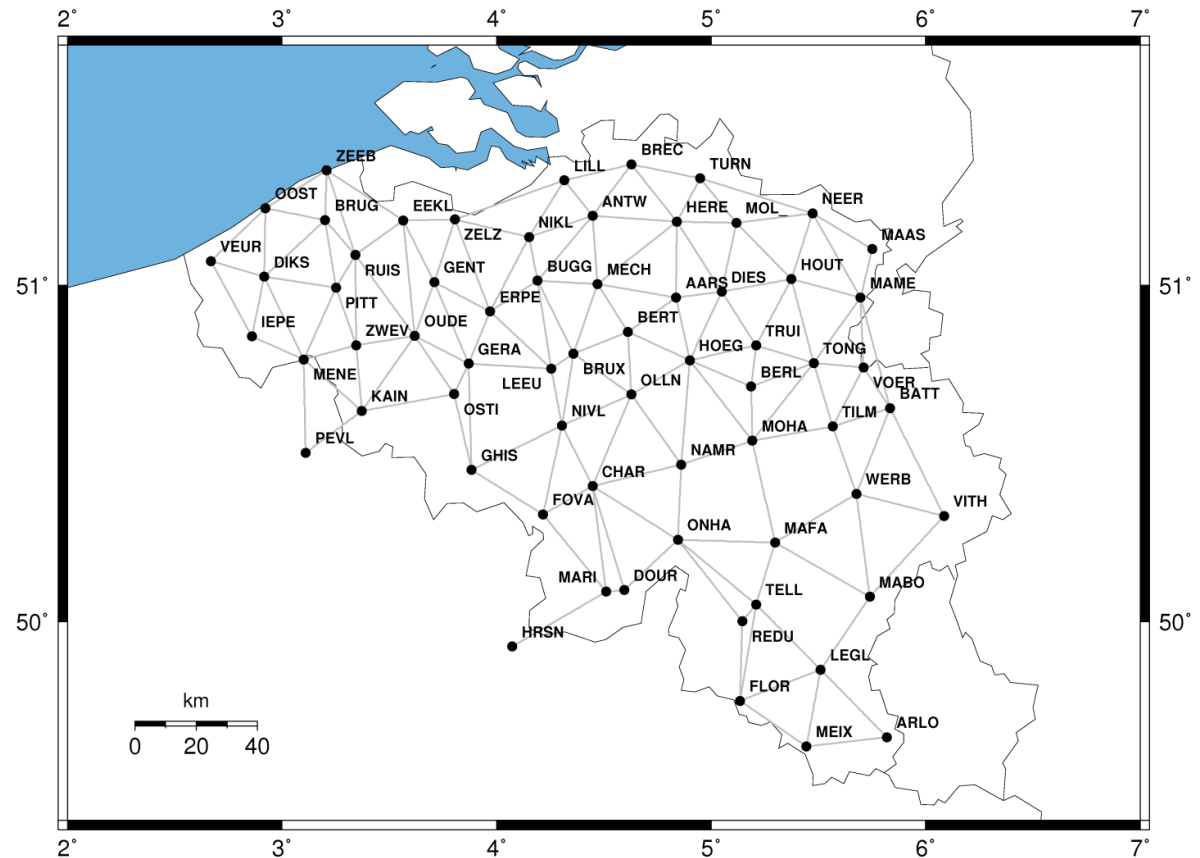
**Limiter l'impact**  
Guide de bonne pratique

Pour le positionnement de haute précision, le mode **RTK** est d'application

Différentiel

ou

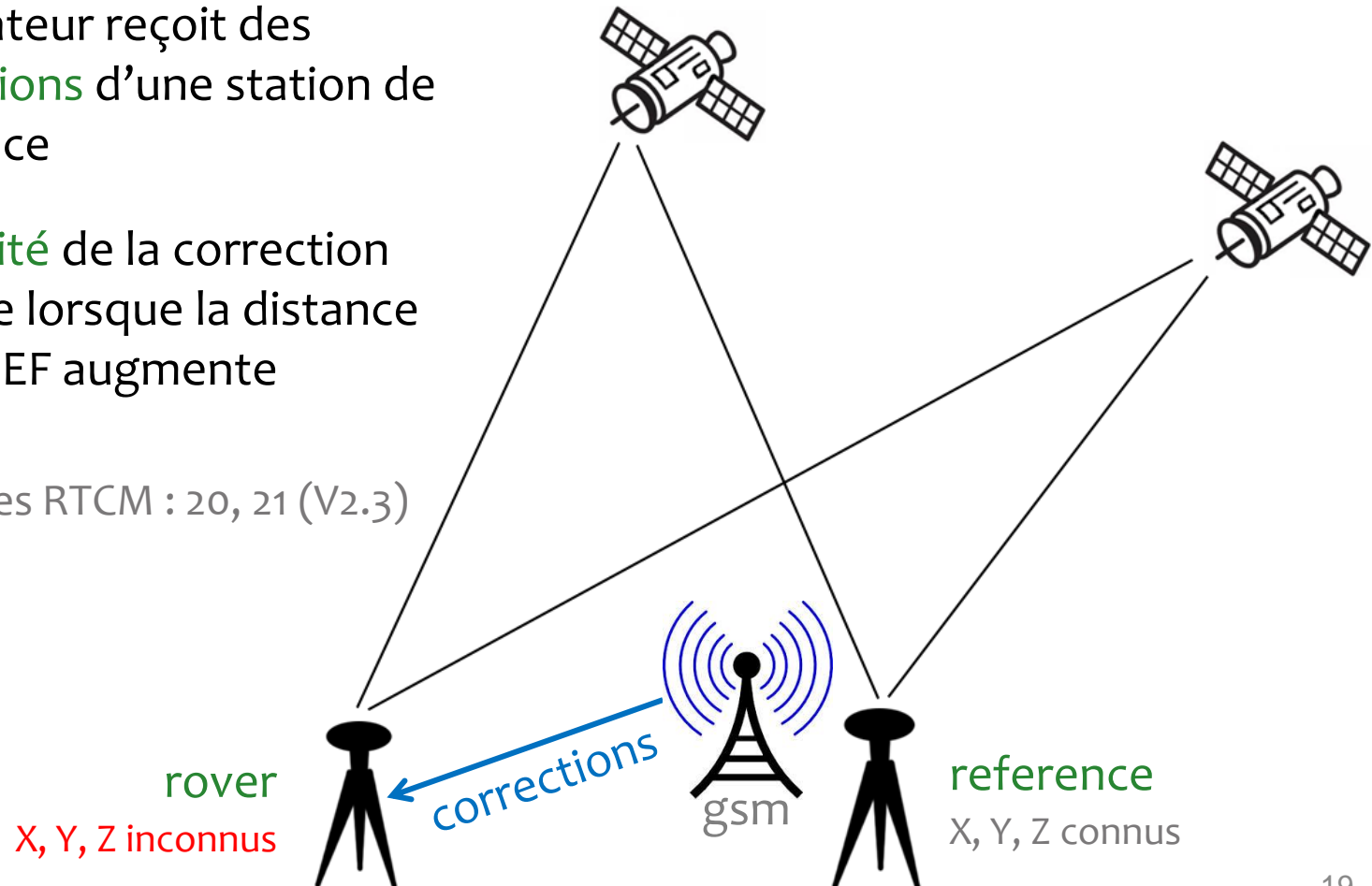
relatif



# Le mode **différentiel** peut être considéré comme un cas particulier du positionnement absolu

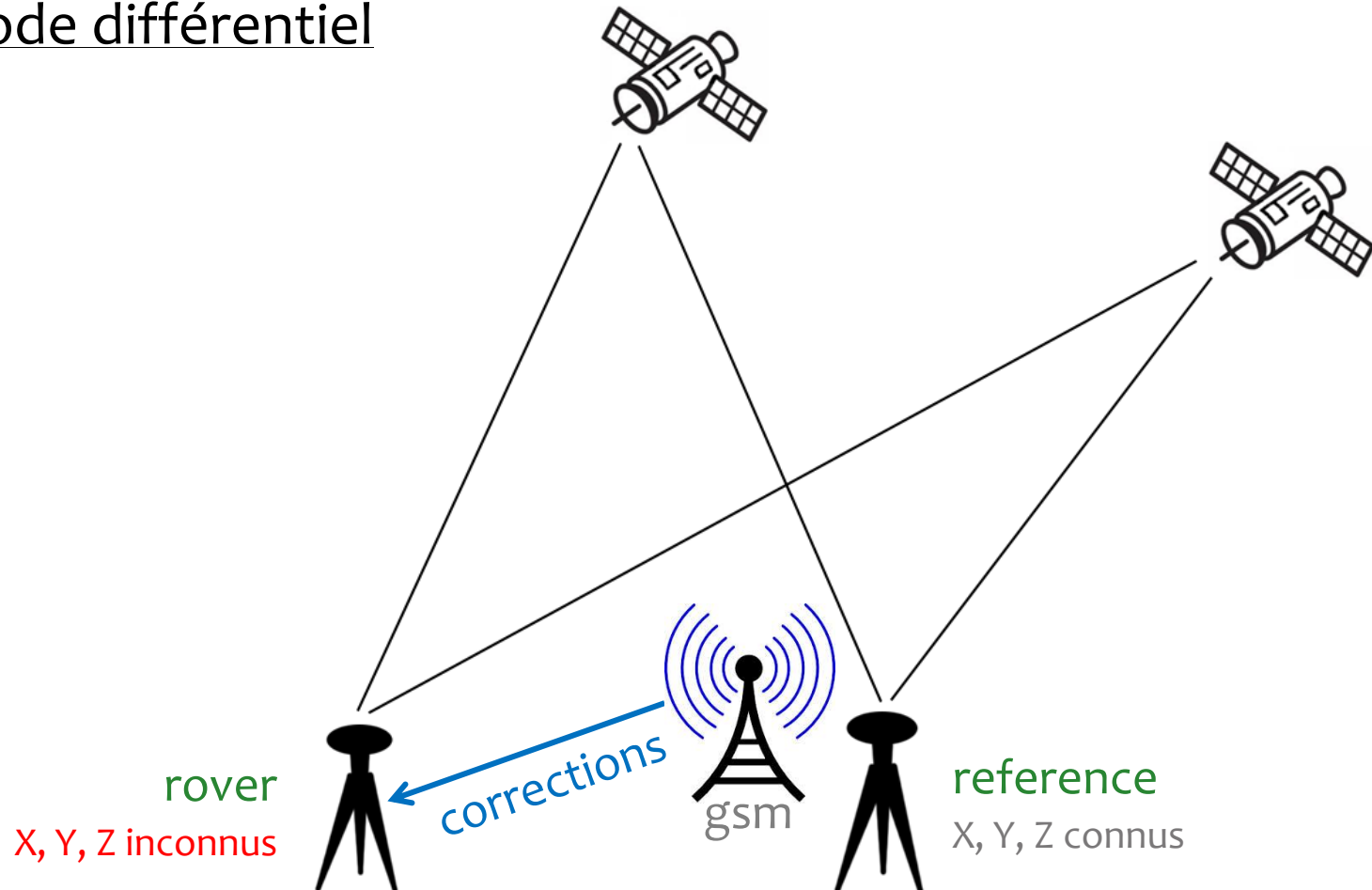
- L'utilisateur reçoit des **corrections** d'une station de référence
- La **qualité** de la correction diminue lorsque la distance rover-REF augmente

Messages RTCM : 20, 21 (V2.3)



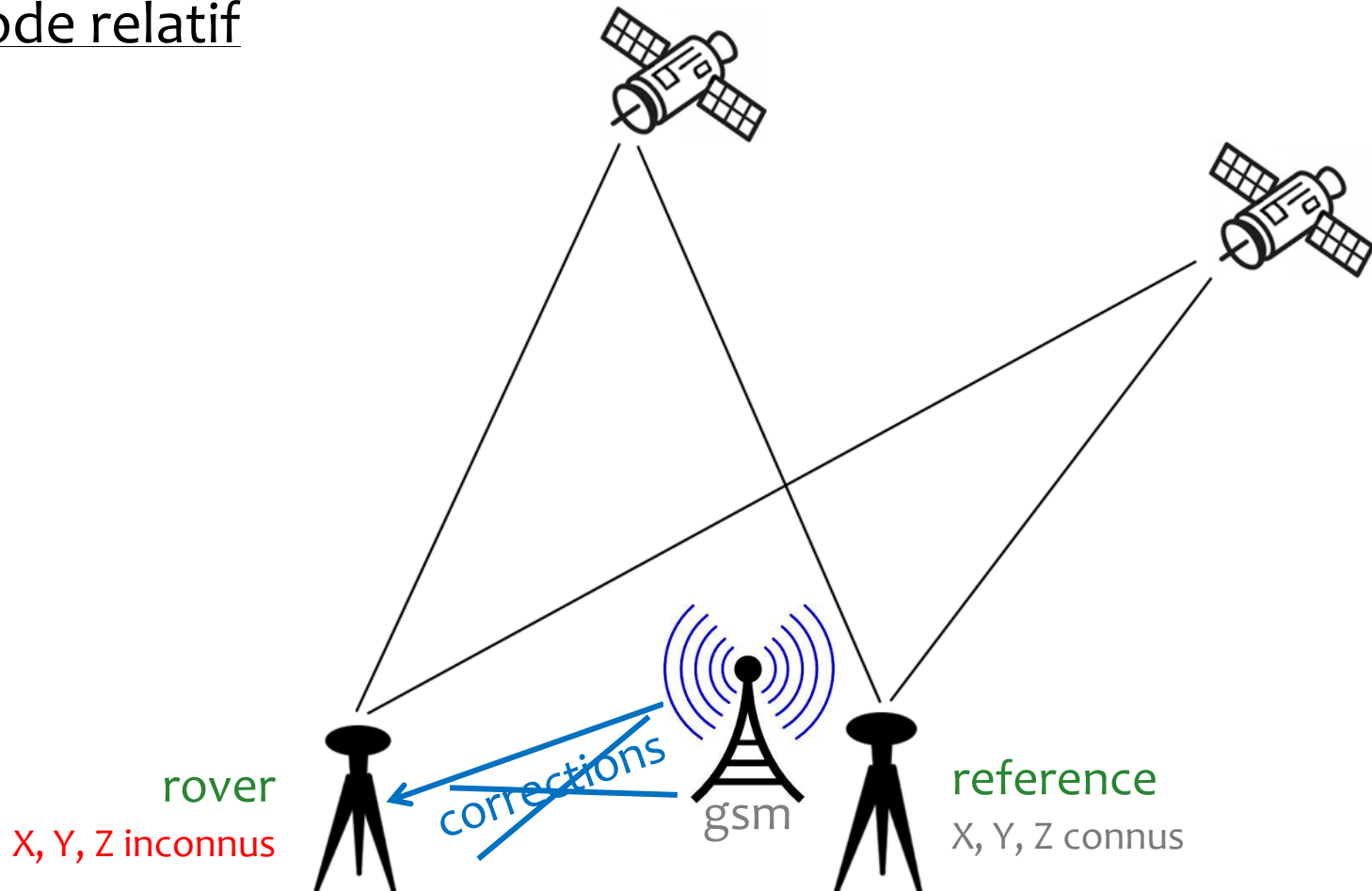
Le mode relatif se base sur des différences d'**observations brutes** entre les deux stations

### Mode différentiel



Le mode relatif se base sur des différences d'**observations brutes** entre les deux stations

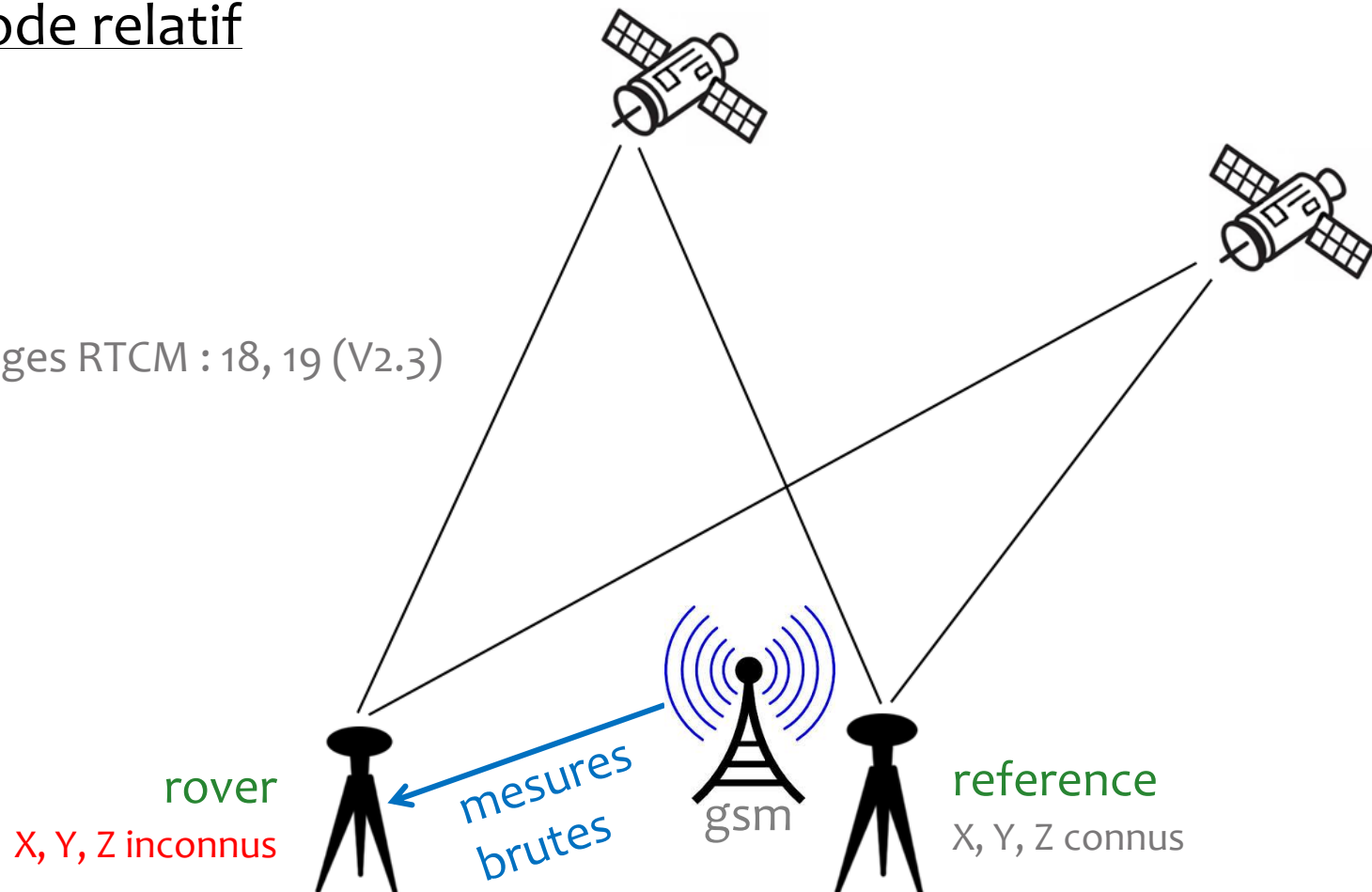
### Mode relatif



Le mode relatif se base sur des différences d'**observations brutes** entre les deux stations

## Mode relatif

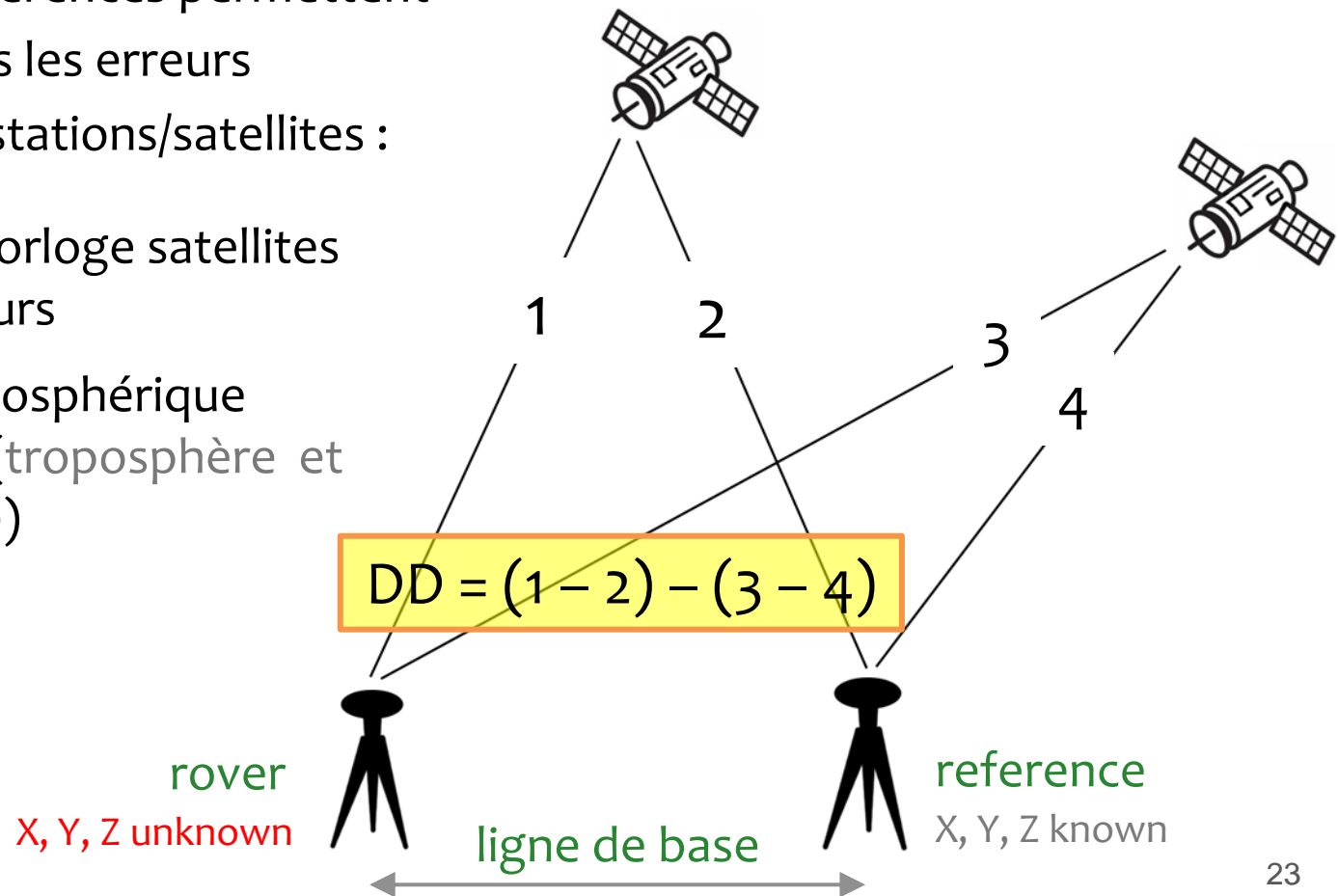
Messages RTCM : 18, 19 (V2.3)



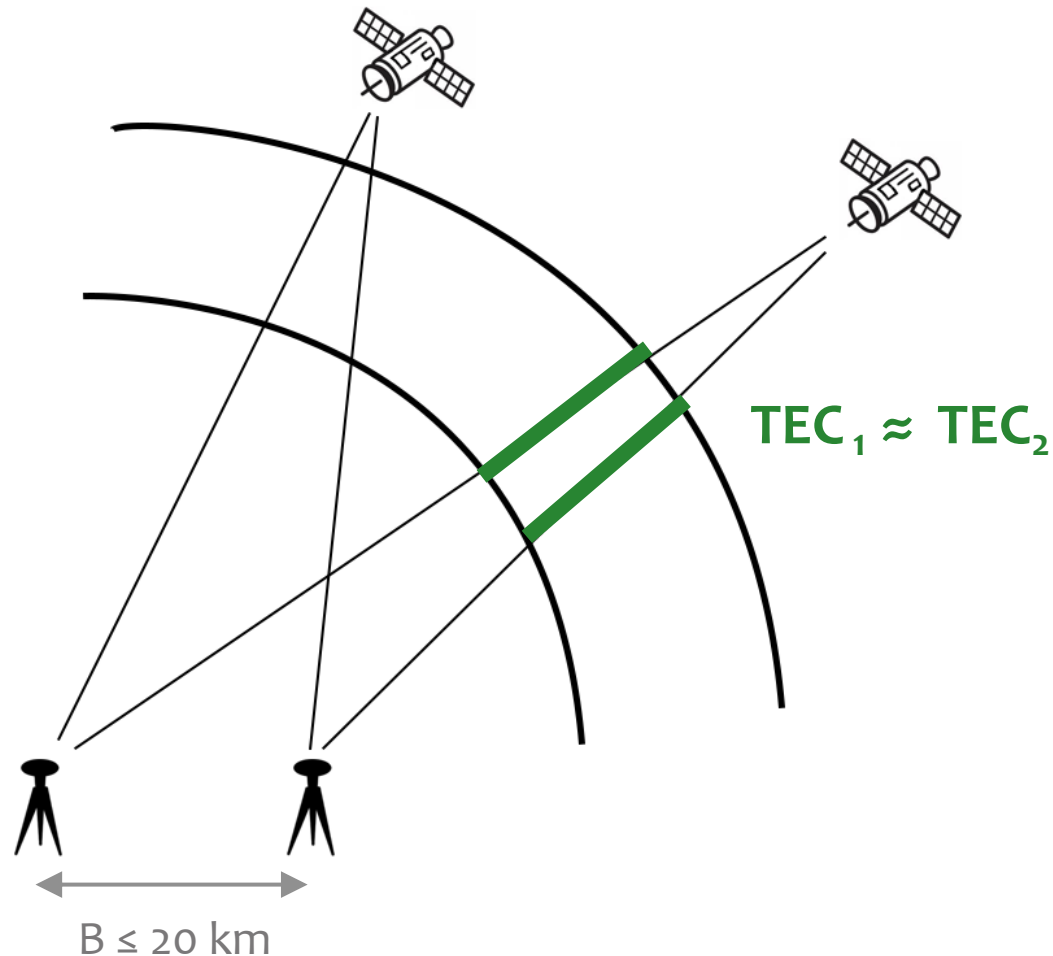
# Le positionnement relatif est basé sur la mesure de la **ligne de base** entre stations

Les **D**oubles **D**ifférences permettent d'éliminer toutes les erreurs communes aux stations/satellites :

- erreurs d'horloge satellites ET récepteurs
- erreur atmosphérique commune (troposphère et ionosphère)

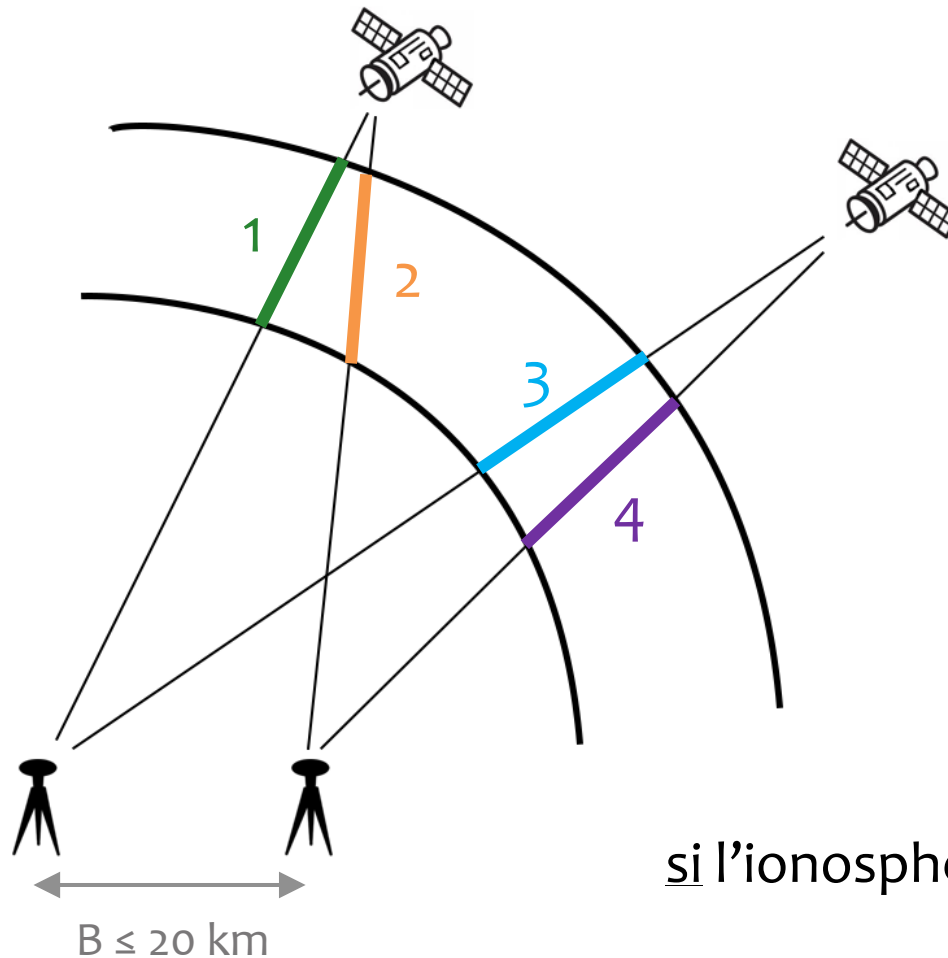


Les lignes de visées presque **parallèles** sont affectées de la même manière par l'ionosphère





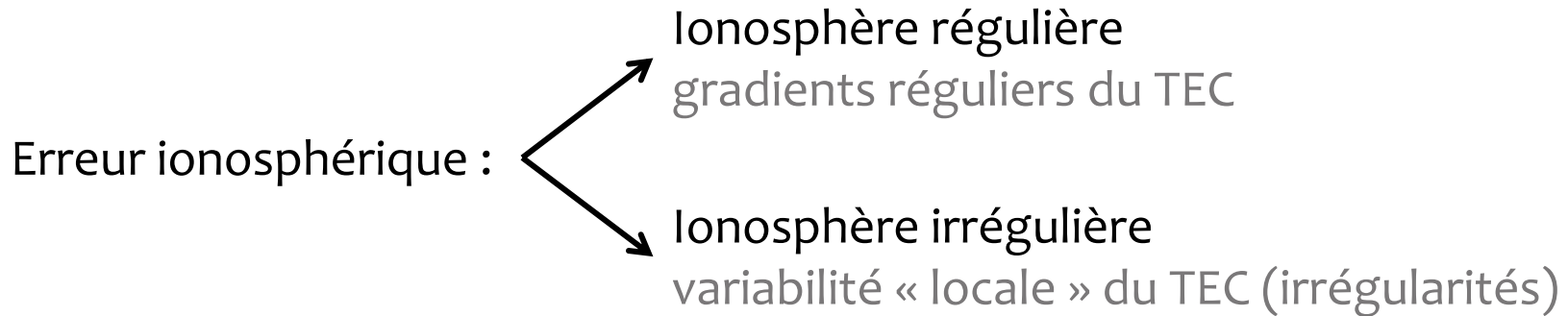
En mode relatif, le terme ionosphérique est généralement considéré comme **négligeable**



$$\begin{aligned} \text{TEC}_{\text{DD}} &= (\text{TEC}_1 - \text{TEC}_2) \\ &\quad - \\ &\quad (\text{TEC}_3 - \text{TEC}_4) \\ &\approx 0 \end{aligned}$$

si l'ionosphère est **calme** et **régulière**

L'erreur ionosphérique peut être responsable d'erreurs de position de **plusieurs décimètres**



L'erreur ionosphérique peut être responsable d'erreurs de position de **plusieurs décimètres**

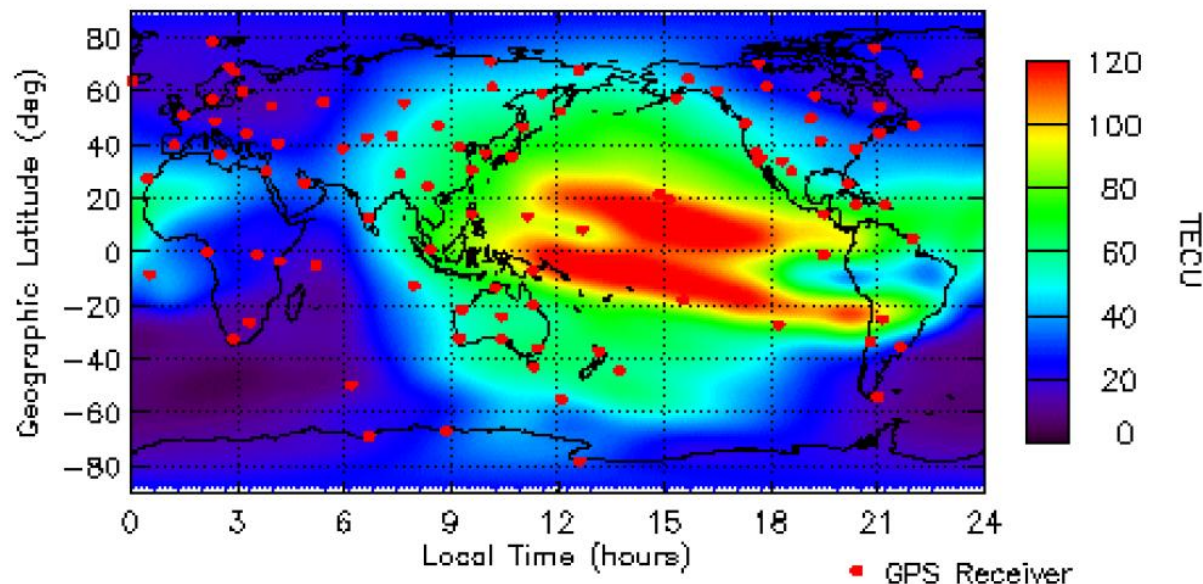
Erreur ionosphérique :

Ionosphère régulière  
gradients réguliers du TEC

Ionosphère irrégulière  
Variabilité « locale » du TEC (irrégularités)

04/17/02  
01:00 - 02:00 UT

Global Ionospheric TEC Map



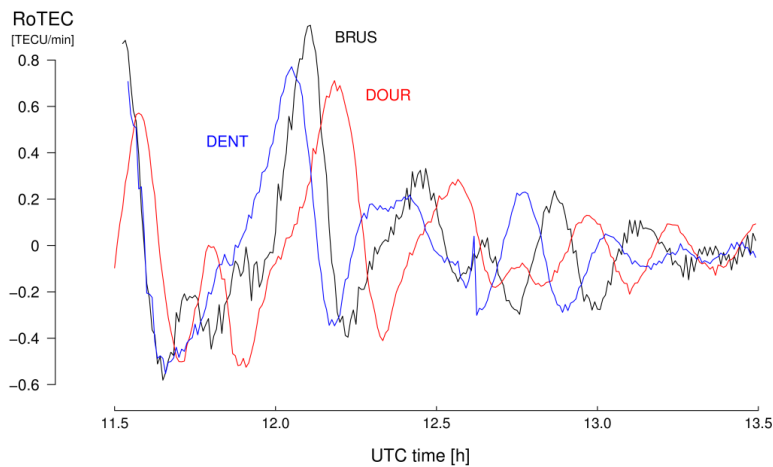
# L'erreur ionosphérique peut être responsable d'erreurs de position de **plusieurs décimètres**

Erreur ionosphérique :

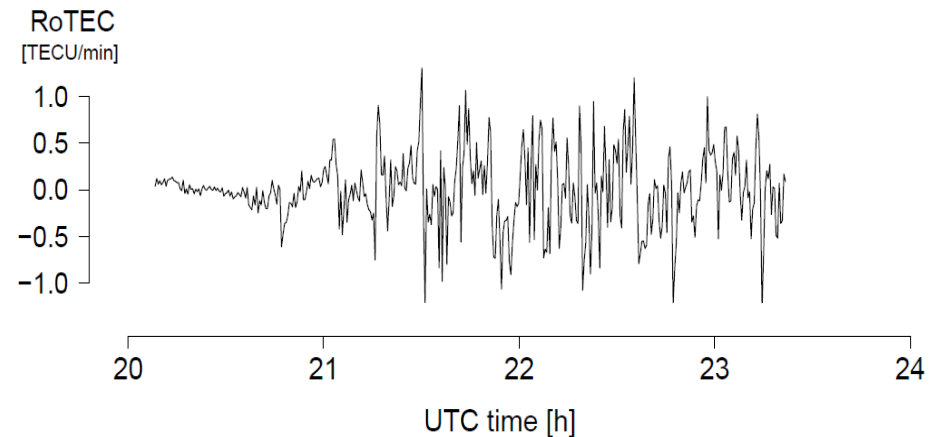
Ionosphère régulière  
gradients réguliers du TEC

Ionosphère irrégulière  
variabilité « locale » du TEC (irrégularités)

Traveling ionospheric disturbances (TIDs)

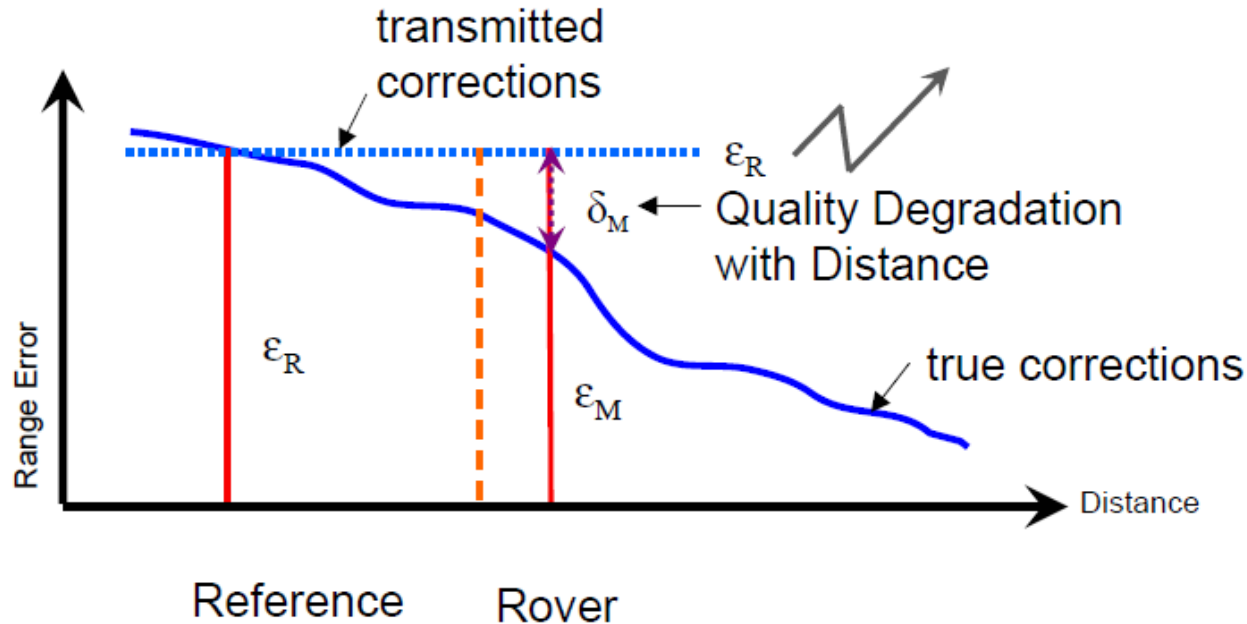


Tempêtes géomagnétiques



En mode **différentiel**, l'utilisateur reçoit des **corrections** par liaison radio (GSM)

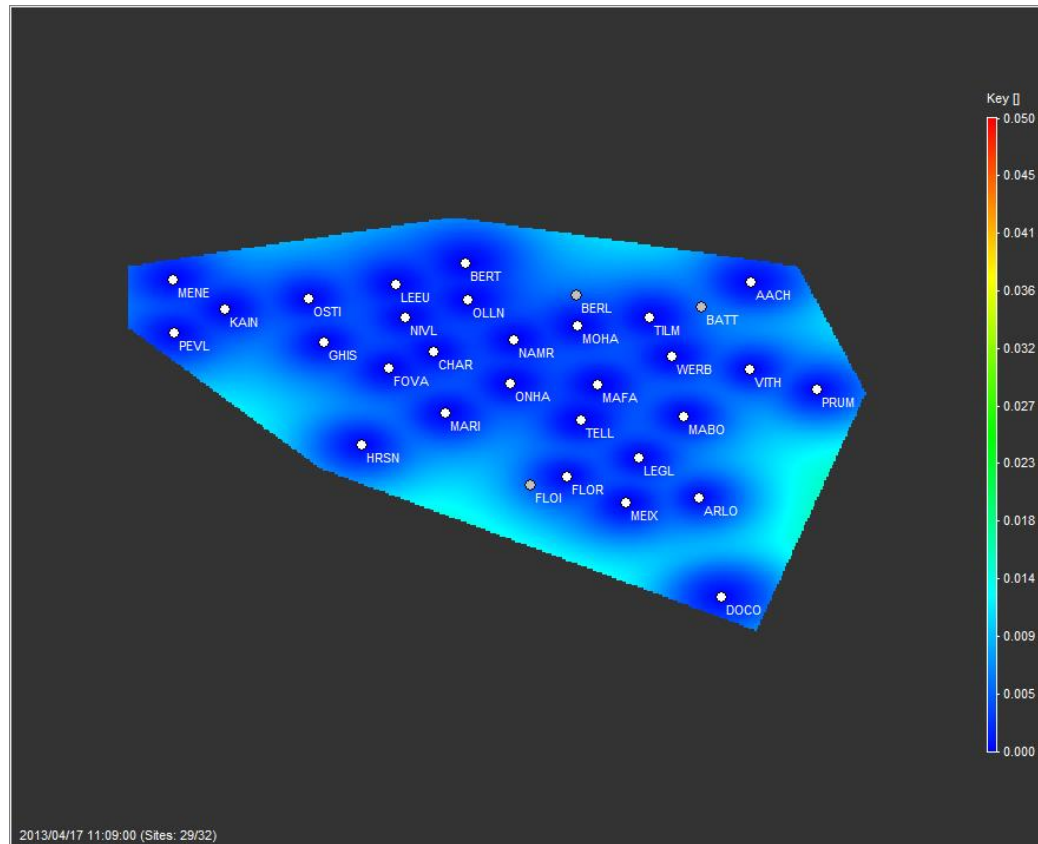
- **SANS** paramètres de correction réseau (FKP, VRS, MAC)



Les gradients ionosphériques ne sont pas modélisés

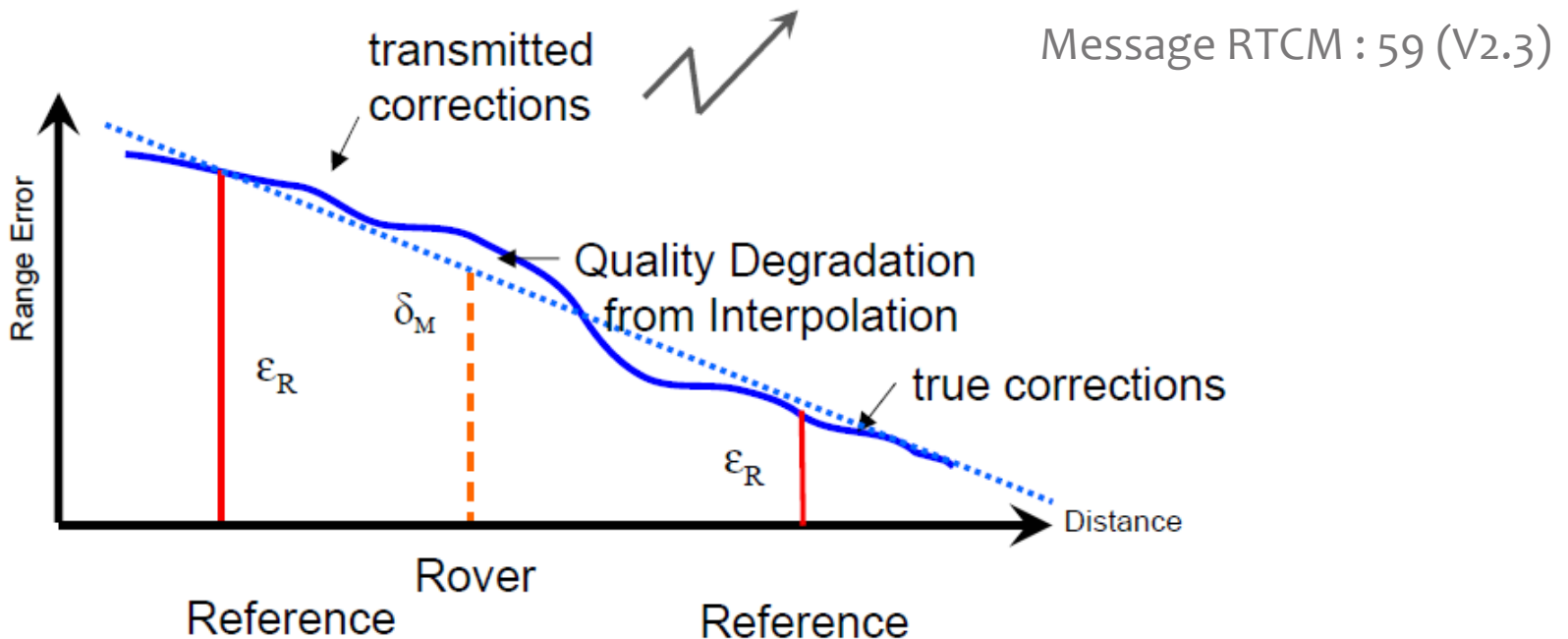
En mode **différentiel**, l'utilisateur reçoit des **corrections** par liaison radio (GSM)

- **AVEC** paramètres de correction réseau (FKP, VRS, MAC)



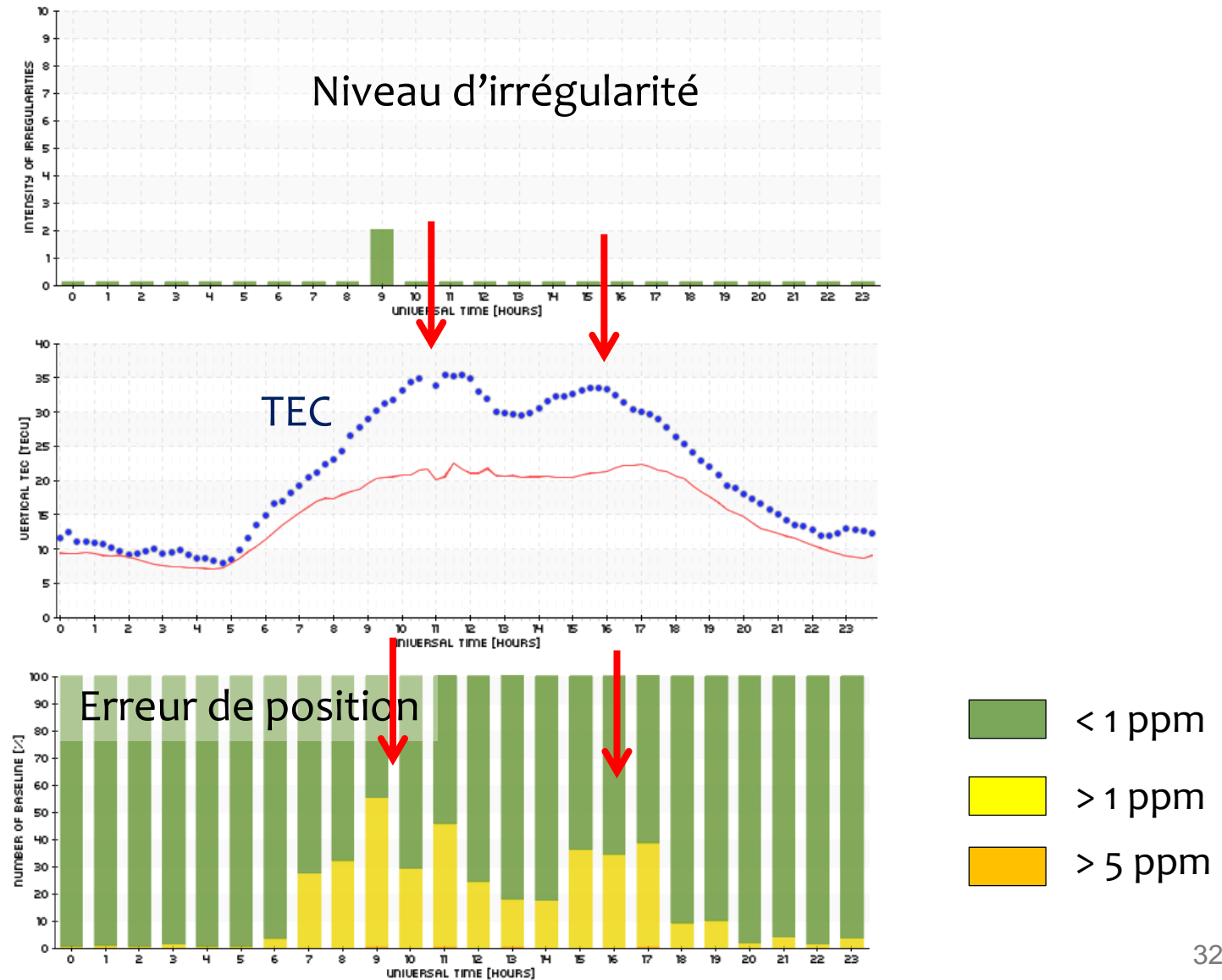
En mode **différentiel**, l'utilisateur reçoit des **corrections** par liaison radio (GSM)

■ **AVEC** paramètres de correction réseau (FKP, VRS, MAC)



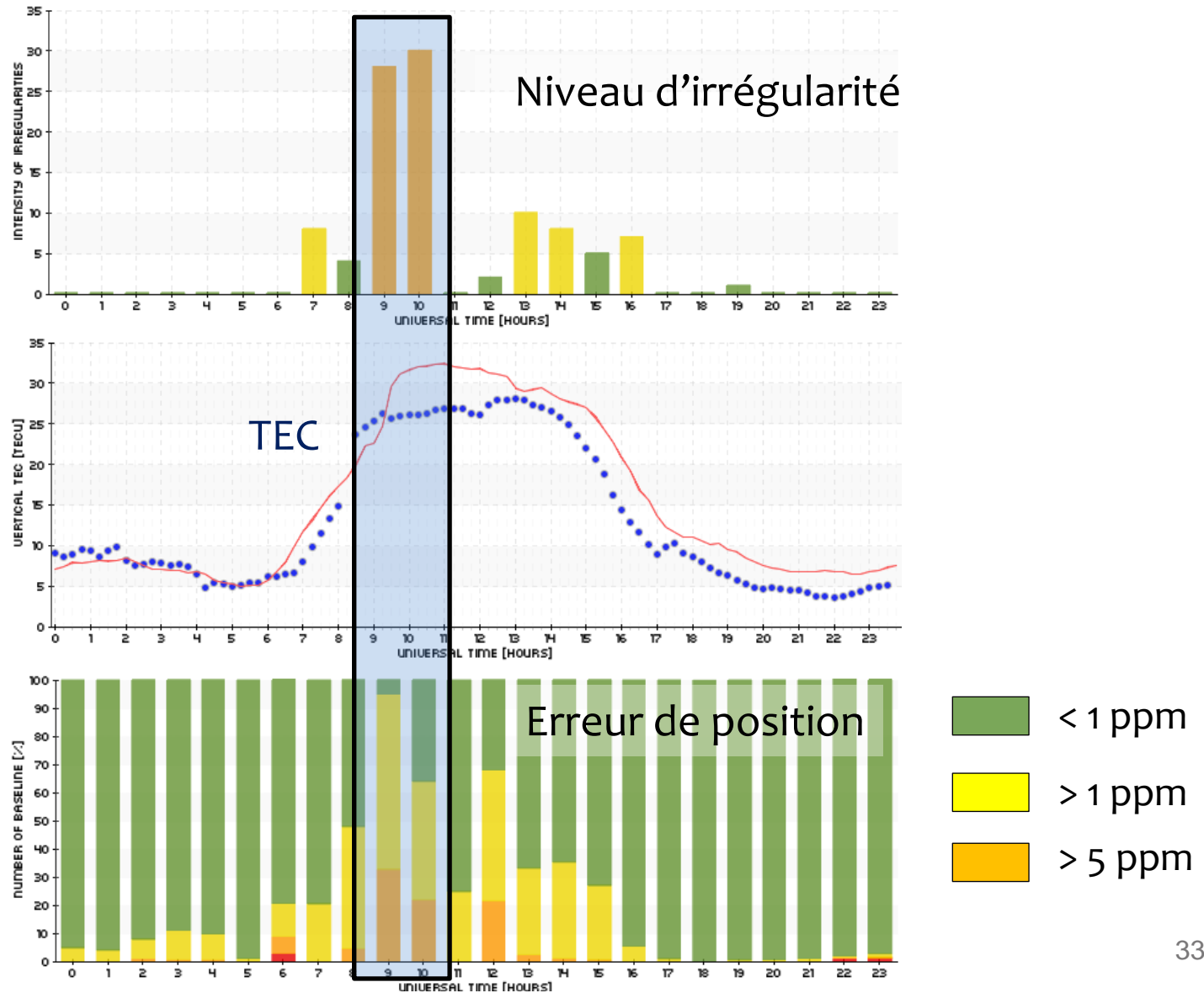
➔ Les gradients ionosphériques sont en partie modélisés

# Effet des **gradients** réguliers du TEC sur le positionnement relatif



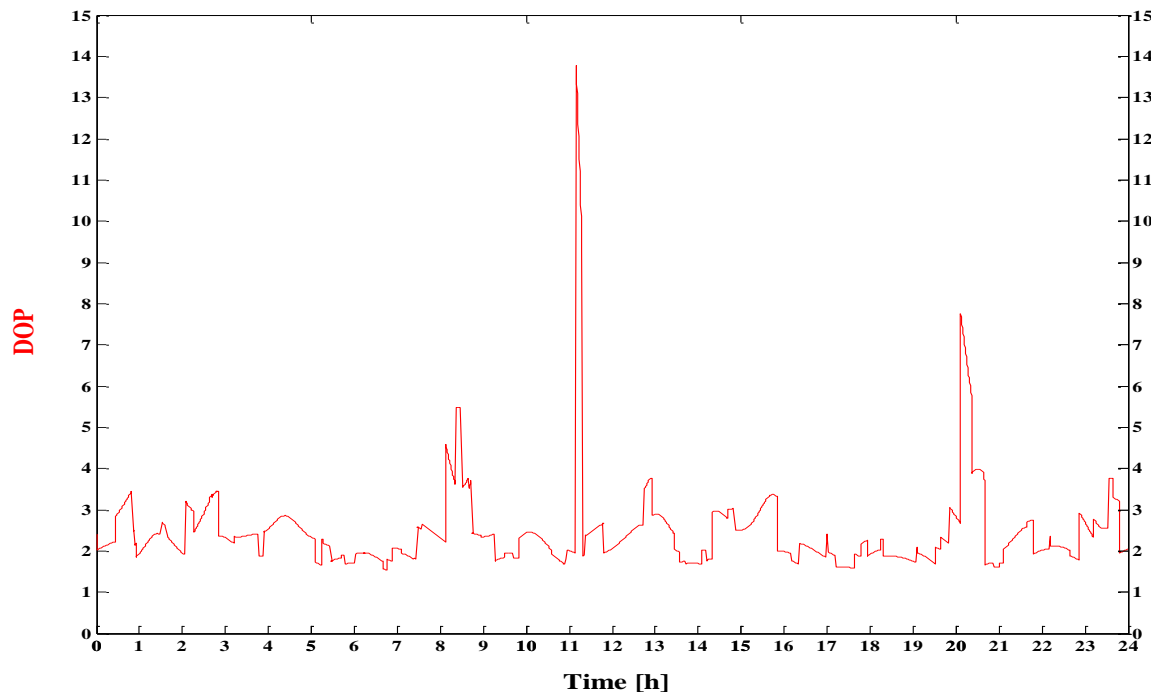


# Effet des **gradients + irrégularités** sur le positionnement relatif



En RTK, la **géométrie** agit également comme un amplificateur de la précision des mesures

ex : PDOP à Bruxelles



Si PDOP = 2,5 et  $\sigma_{\text{obs}} = 1\text{cm}$  :

- $\sigma_{\text{POS}} = 2,5 \text{ cm}$  dans 68% des cas
- $\sigma_{\text{POS}} = 5 \text{ cm}$  dans 95% des cas

La précision de la mesure GPS-RTK dépend donc de quatre sources d'erreur

Erreurs atmosphériques  
(principalement iono) + Multi-trajets + Bruit

× Géométrie de la constellation (DOP)



Comment limiter/contrôler leur impact sur la précision de la position?

**Positionnement absolu**  
Principes et sources d'erreurs

**Positionnement RTK**  
Modes différentiel et relatif

**Limiter l'impact**  
Guide de bonne pratique

# Limiter l'impact du bruit de mesure et de l'effet multi-trajets

## ■ Bruit de mesure

- Masque d'élévation (min 10 – 15°)
- Récepteur récent
- Moyenner sur plusieurs époques

## ■ Muti-trajets

- Masque d'élévation (min 10 – 15°)
- Ré-occupation (change configuration géométrique)
- Moyenner sur plusieurs époques
- Antenne de qualité (choke ring)
- Mesurer en terrain dégagé

# Limiter l'impact de l'ionosphère et de la géométrie

## ■ Ionosphère

- Limiter la longueur de la ligne de base (< 10 km)
- Utiliser les corrections réseau (si disponible)
- Surveiller l'état de l'ionosphère (site web ULg, à venir)
- Allonger la durée des observations
- Ré-occupation

## ■ Géométrie

- Mesurer en terrain dégagé
- Eliminer données pour lesquelles PDOP > seuil (3?)
- Ré-occupation
- Planifier sa campagne

## **Positionnement absolu**

Principes et sources d'erreurs

## **Positionnement RTK**

Modes différentiel et relatif

## **Limiter l'impact**

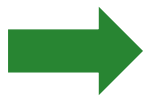
Guide de bonne pratique

# Quelle précision pour le RTK?

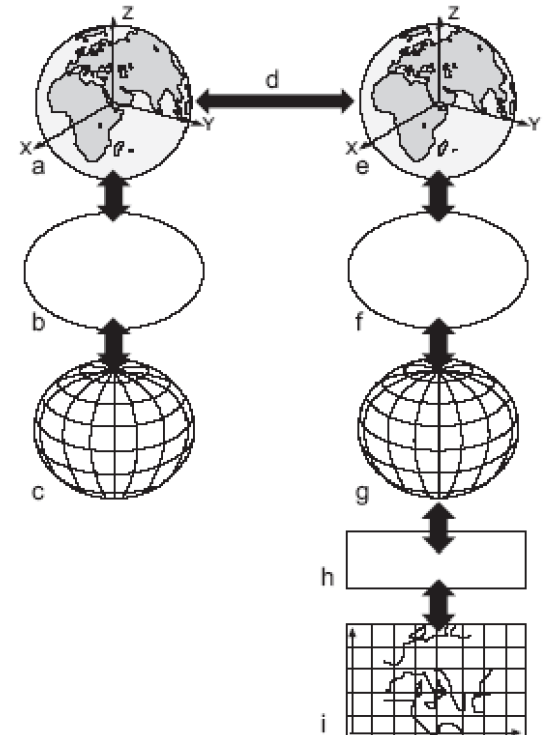
Annoncée : Horizontal : 1cm + 1ppm  
Vertical : 2cm + 1ppm

$$\sigma_{3-D} \approx 3,6 \text{ cm pour } \lambda = 10\text{km}$$

- OK**
- si bonne pratique professionnelle (contrôle des erreurs)
  - si coordonnées dans un système GLOBAL (WGS84)



La transformation GLOBAL  $\rightarrow$  LOCAL va introduire de nouvelles erreurs (cf. suite)





**Merci!**

# Éléments affectant la précision du GPS RTK

Gilles Wautelet

Unité de géomatique



Formation continuée ARGELg

Liège, le 18 avril 2013

