

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

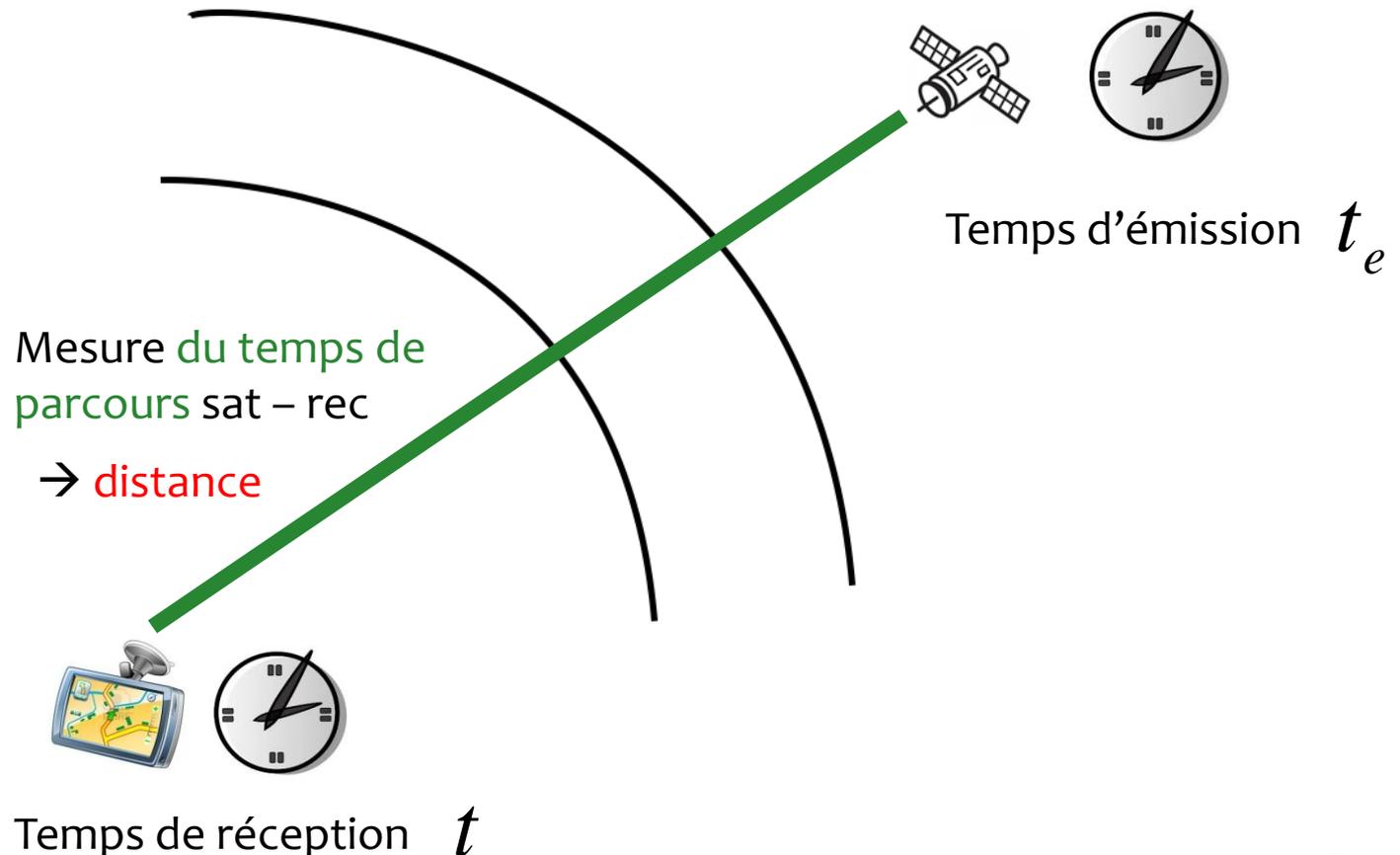
Guide de bonne pratique

Positionnement absolu
Principes et sources d'erreurs

Positionnement RTK
Modes différentiel et relatif

Limiter l'impact
Guide de bonne pratique

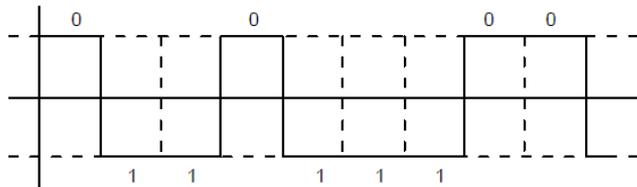
La mesure de position par GNSS requiert la mesure de **distances entre le récepteur** et minimum **4 satellites**



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

Codes

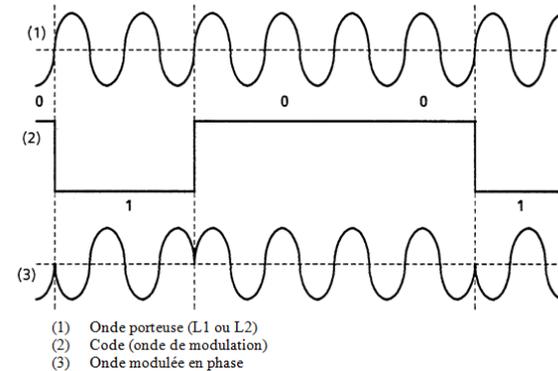
Code binaire



Précision **métrique**

Phases

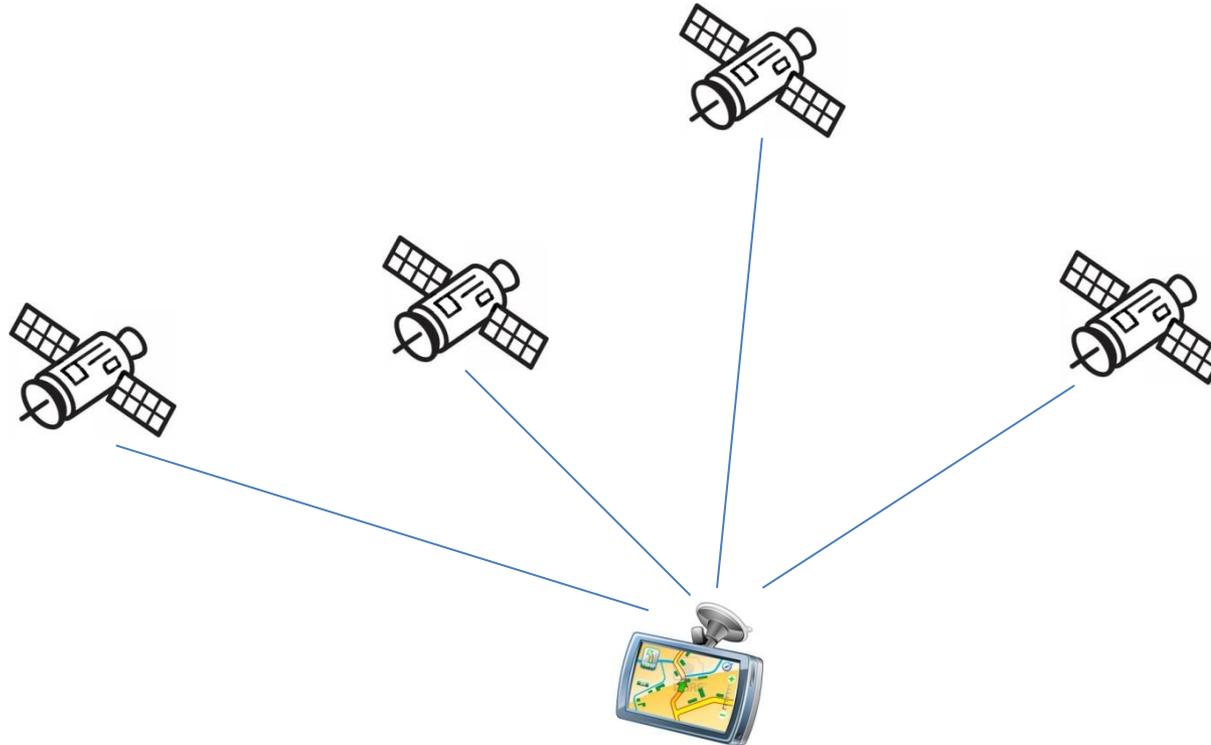
Fréquence porteuse



Précision **millimétrique**

Mesures **ambigües**

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



4 inconnues

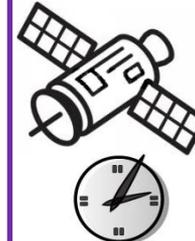
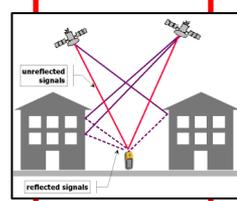
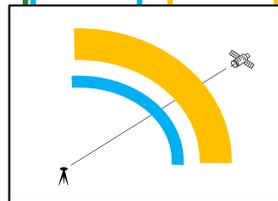
XYZT

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**

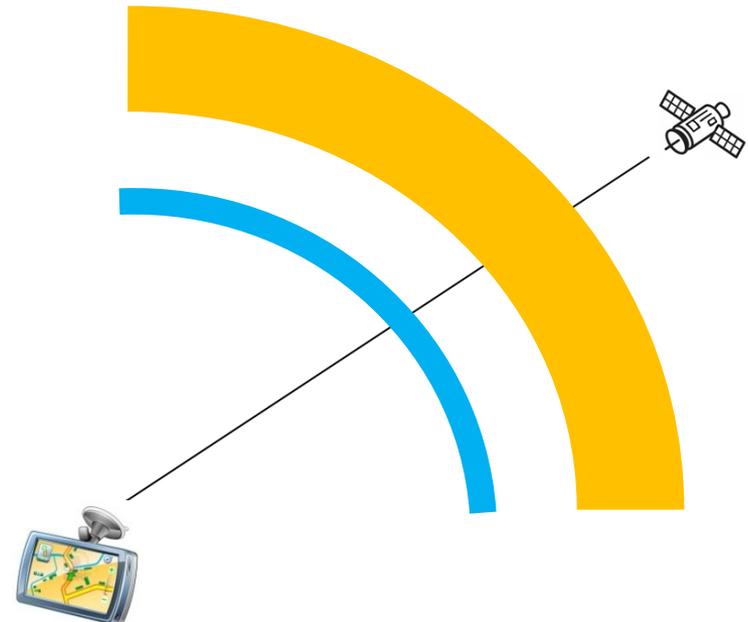
Traversée de l'atmosphère neutre
(0 – 30 km)

Délai $\approx 2,4$ m

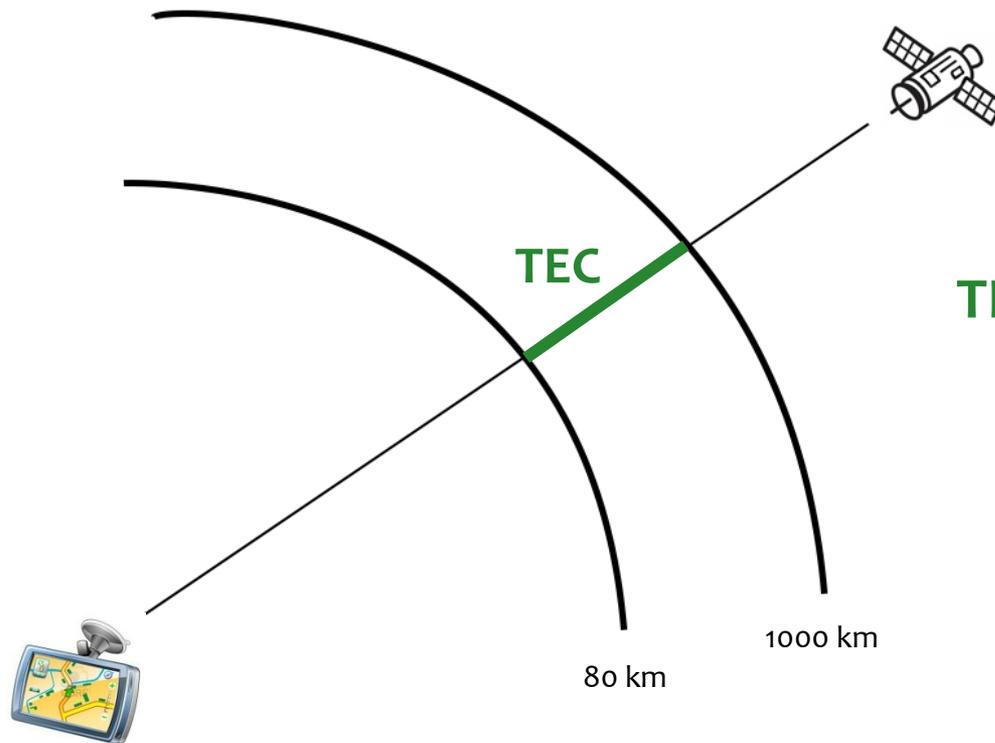
■ Effet **ionosphérique**

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

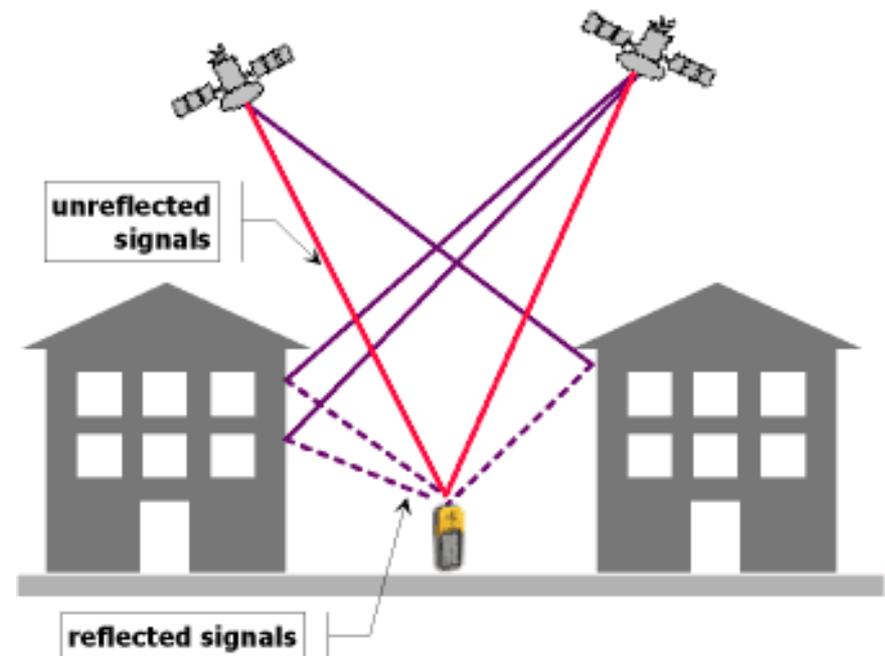


TEC = Total Electron Content

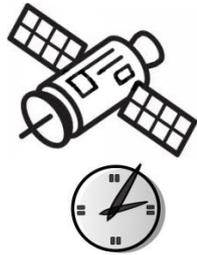
$$\text{TEC} = \int N_e ds$$

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 : ≈ 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**



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

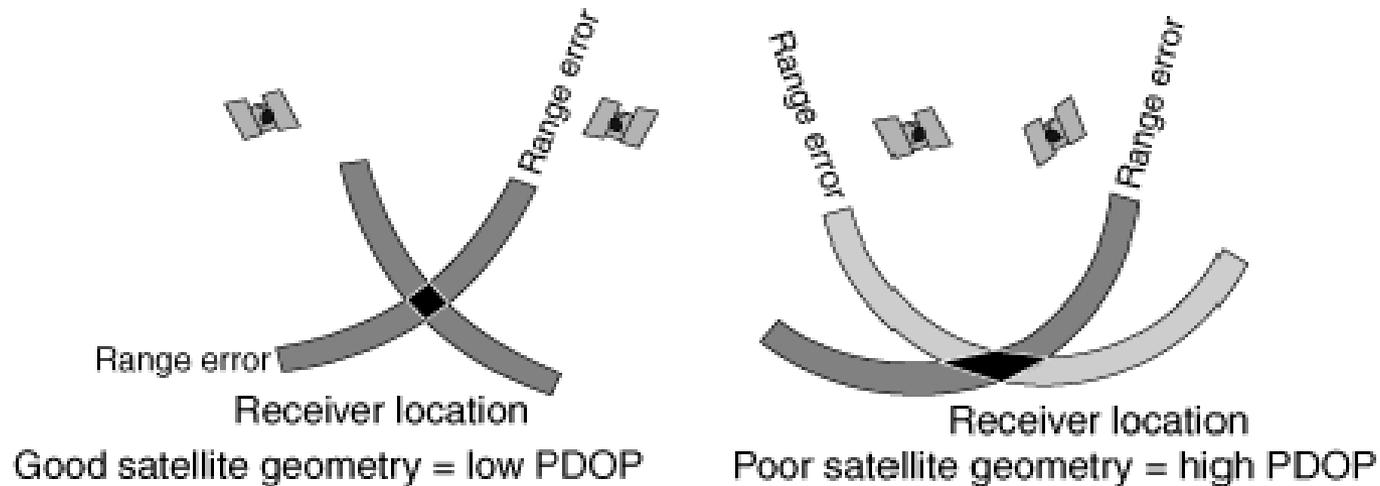
Horloge récepteur de mauvaise qualité

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

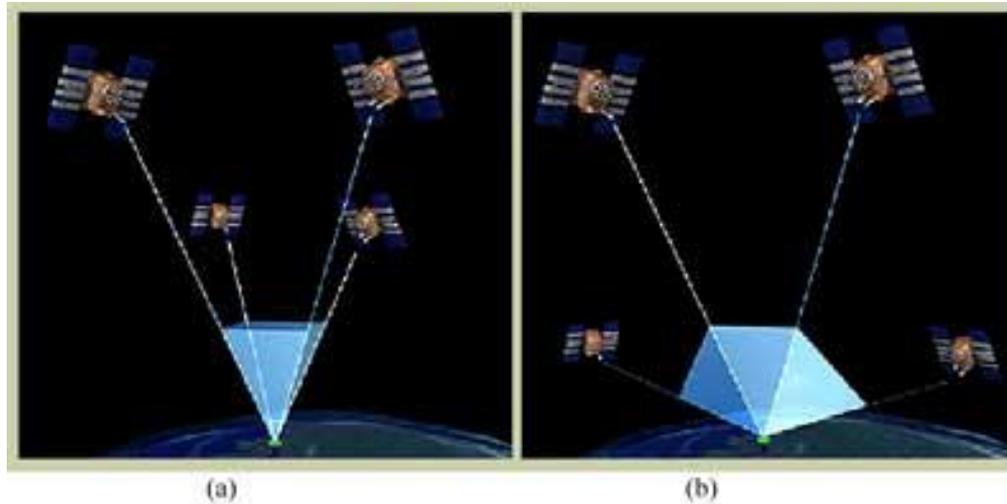
Contribution des différentes sources d'erreur

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

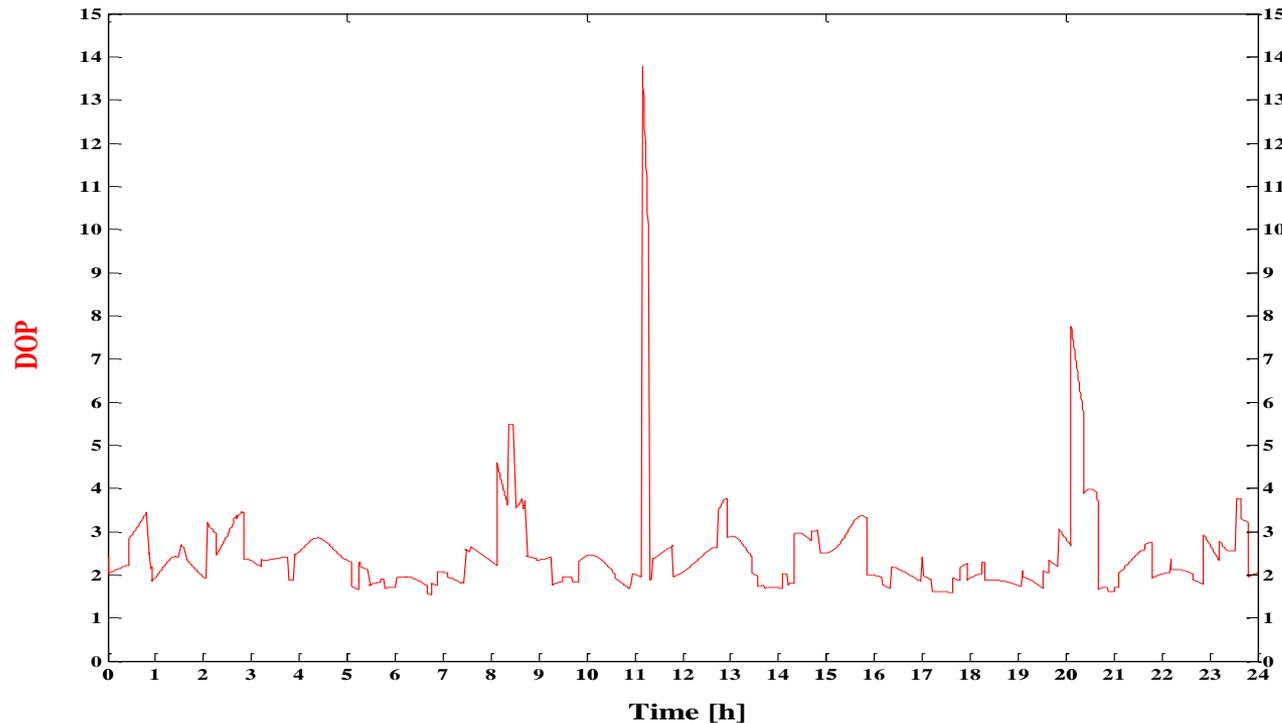
VDOP : précision de la position dans la direction verticale

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

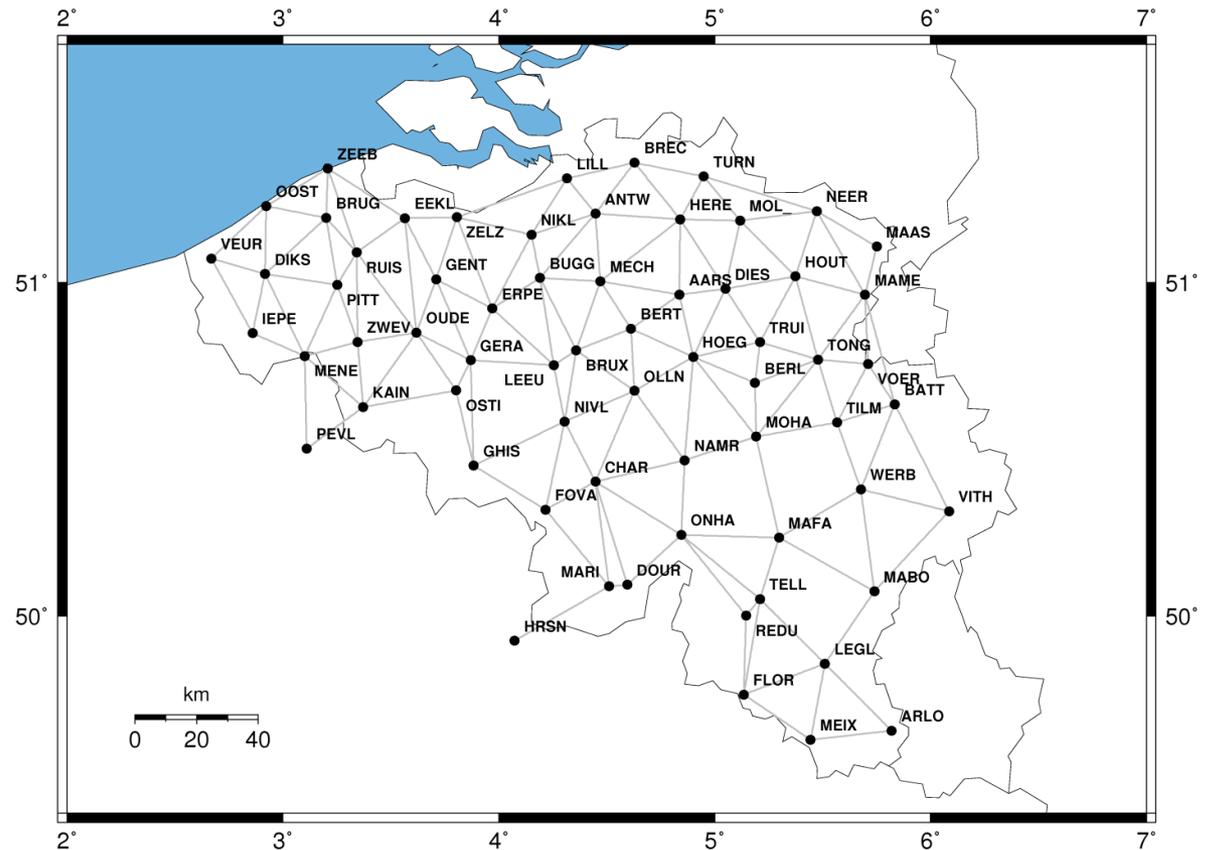
Guide de bonne pratique

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

Différentiel

ou

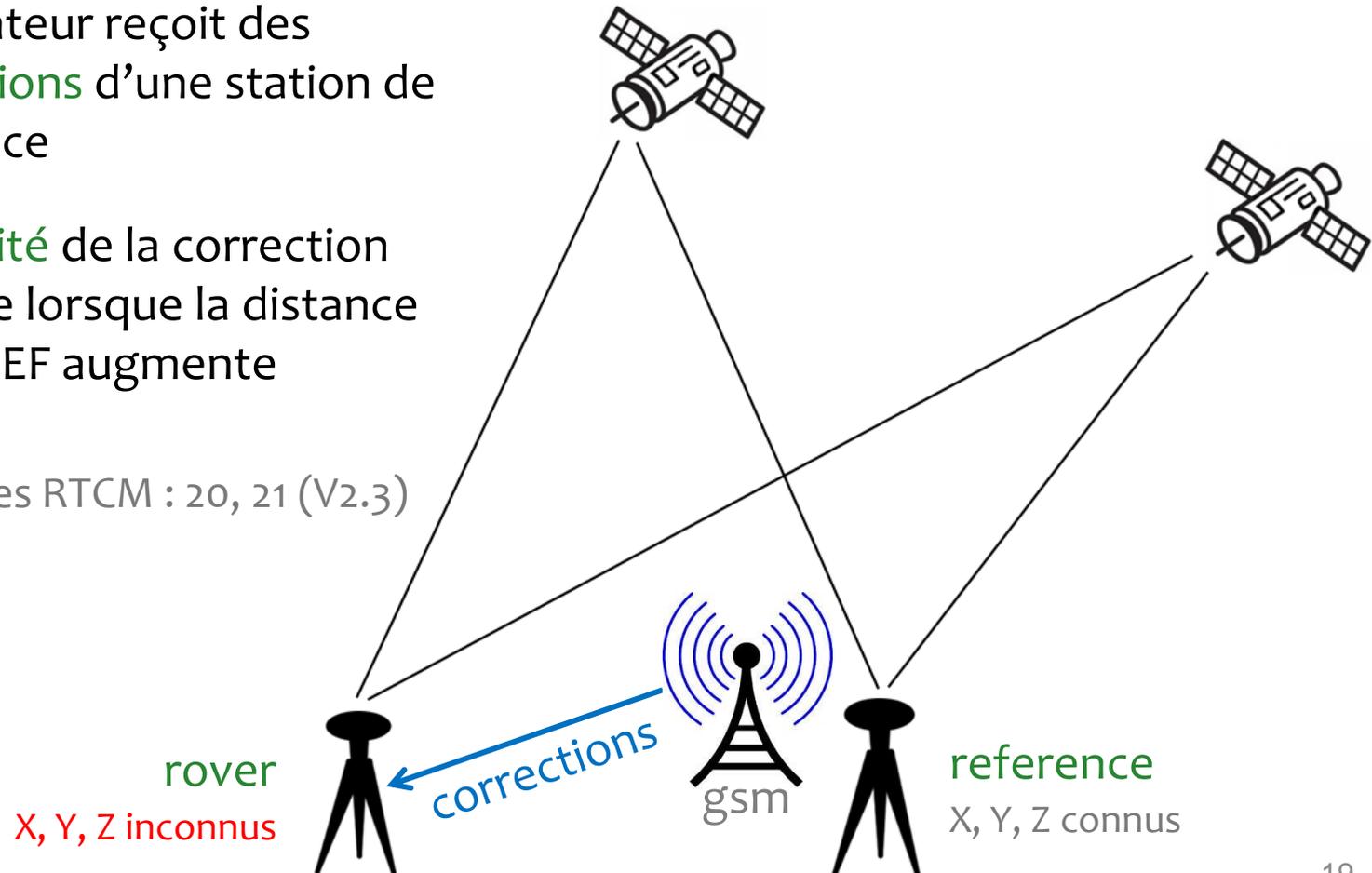
relatif



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

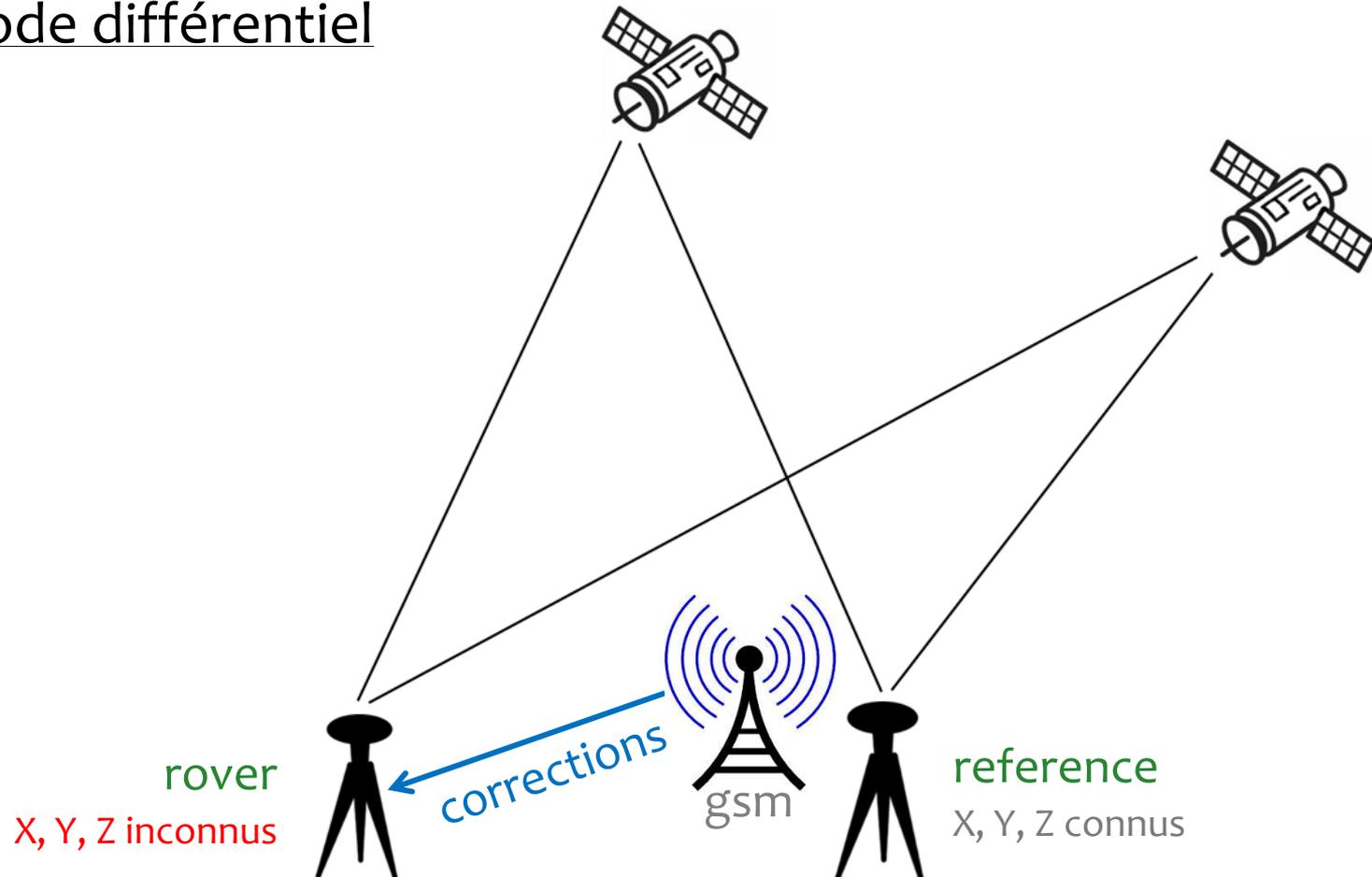
- L'utilisateur reçoit des **corrections** d'une station de référence
- La **qualité** de la correction diminue lorsque la distance rover-REF augmente

Messages RTCM : 20, 21 (V2.3)



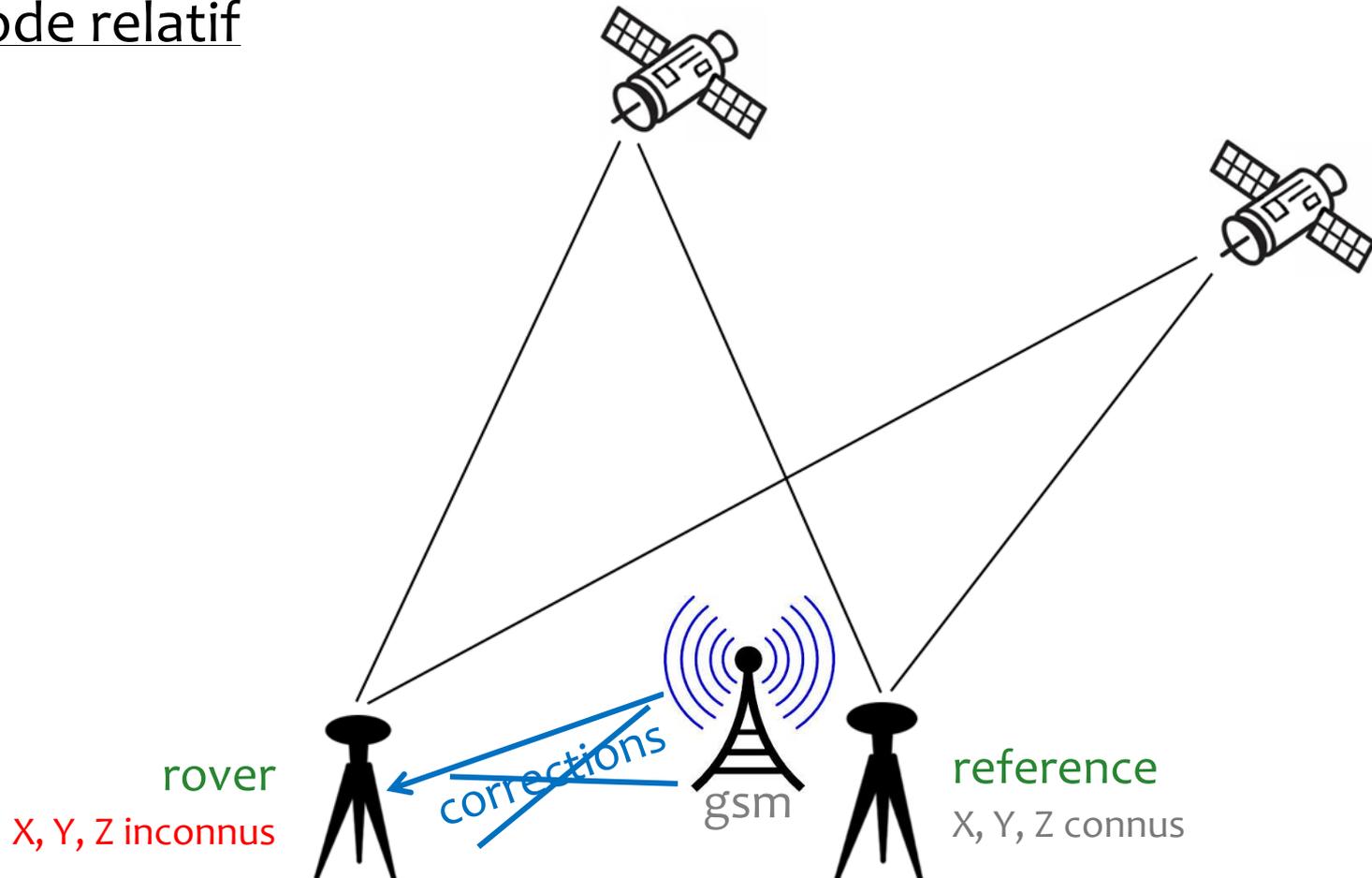
Le mode relatif se base sur des différences d'**observations brutes** entre les deux stations

Mode différentiel



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

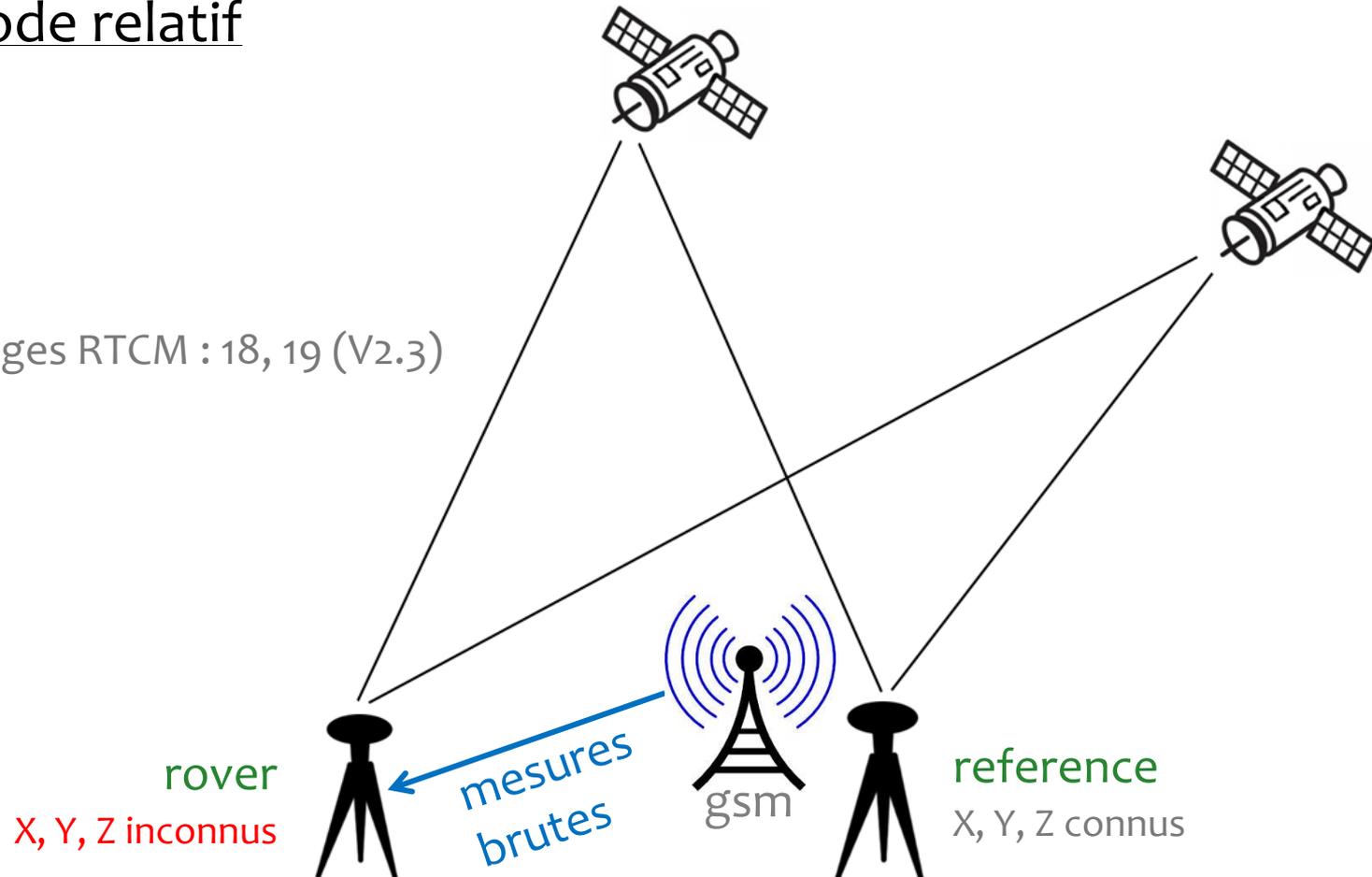
Mode relatif



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

Mode relatif

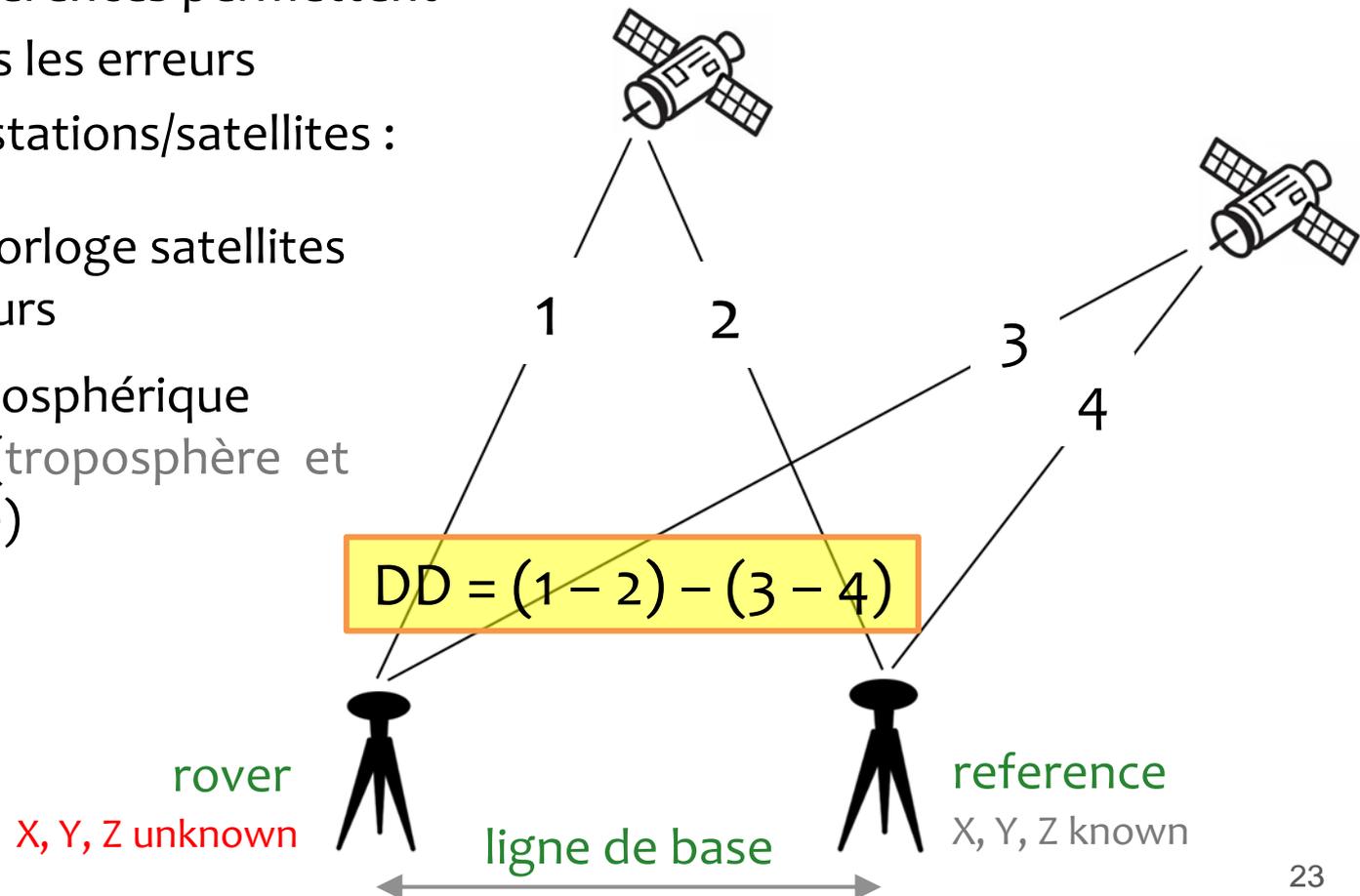
Messages RTCM : 18, 19 (V2.3)



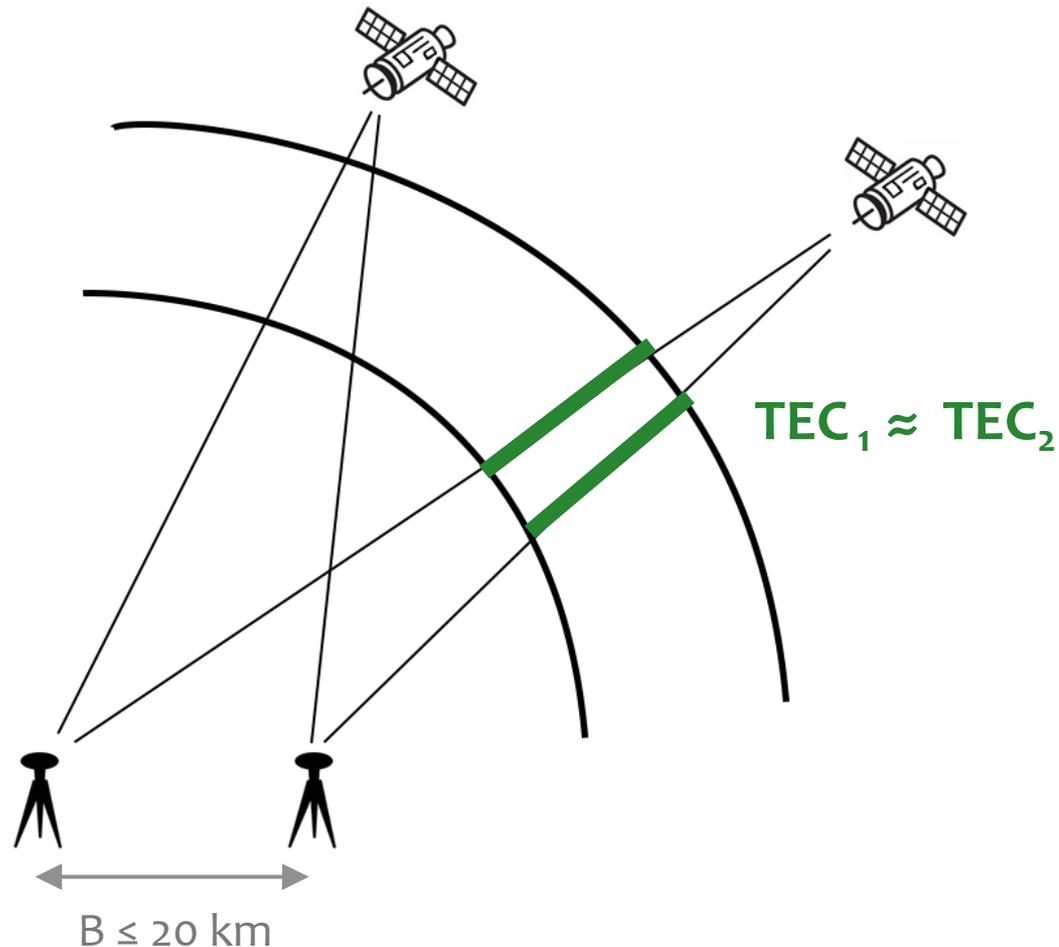
Le positionnement relatif est basé sur la mesure de la **ligne de base** entre stations

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

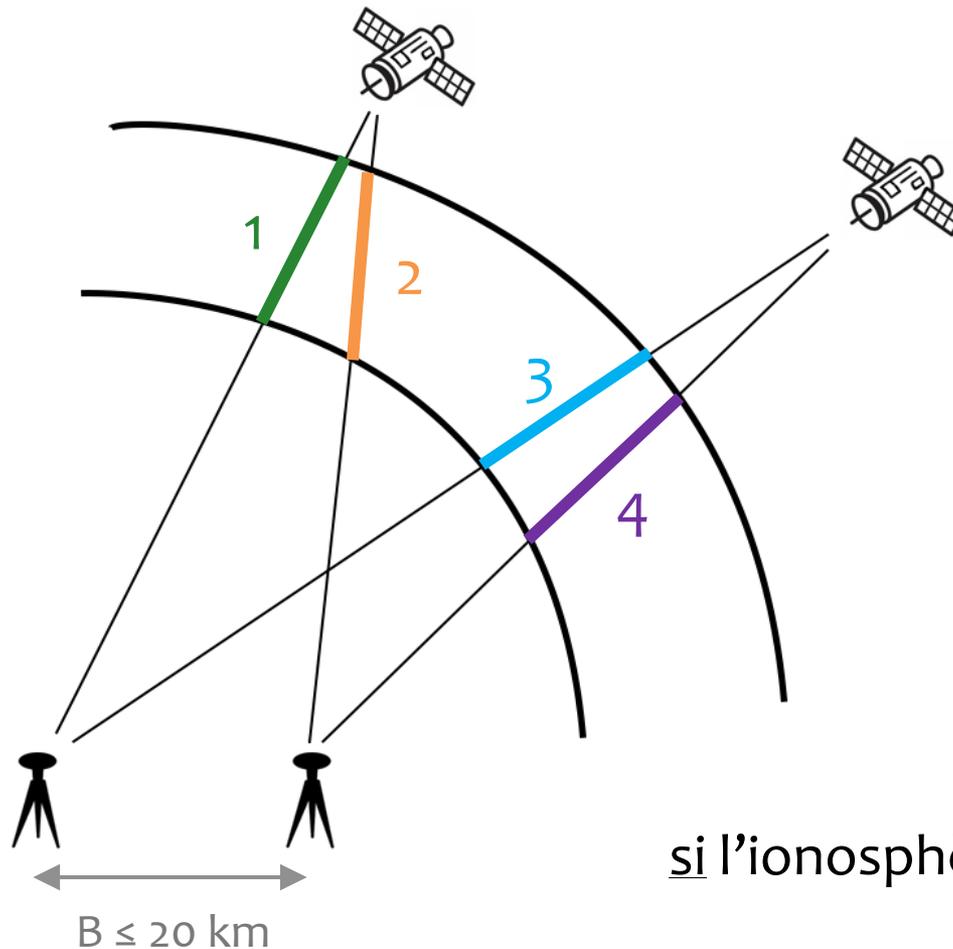
- erreurs d'horloge satellites ET récepteurs
- erreur atmosphérique commune (troposphère et ionosphère)



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



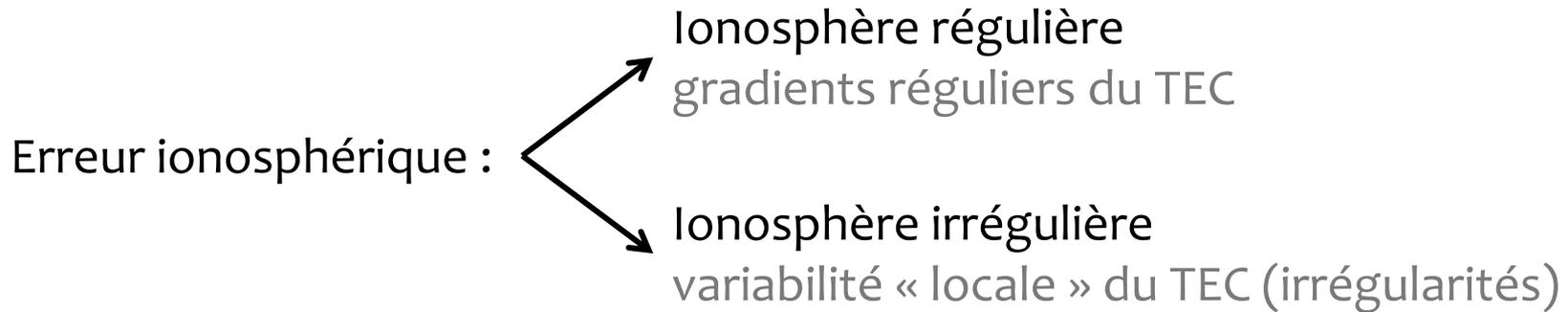
En mode relatif, le terme ionosphérique est généralement considéré comme **négligeable**



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

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**

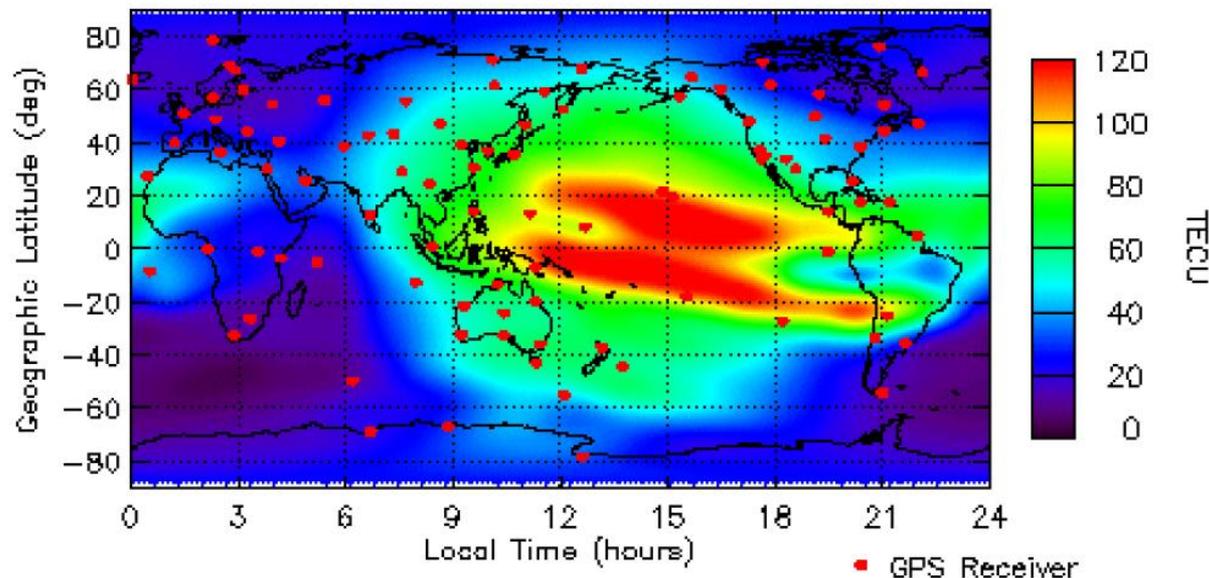
Erreur ionosphérique :

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



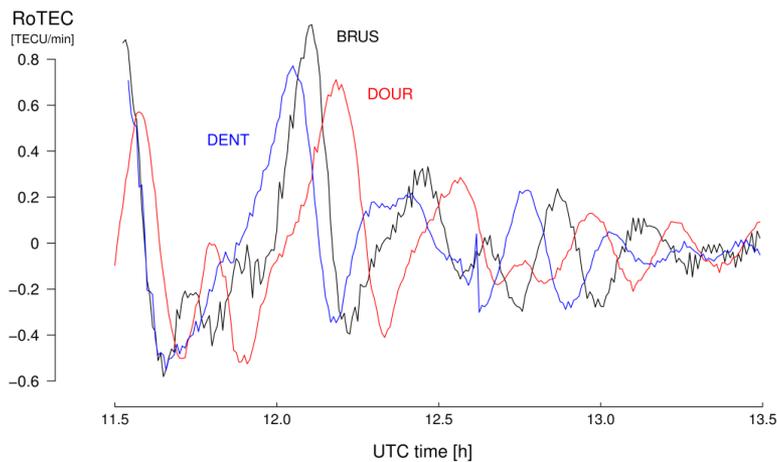
L'erreur ionosphérique peut être responsable d'erreurs de position de **plusieurs décimètres**

Erreur ionosphérique :

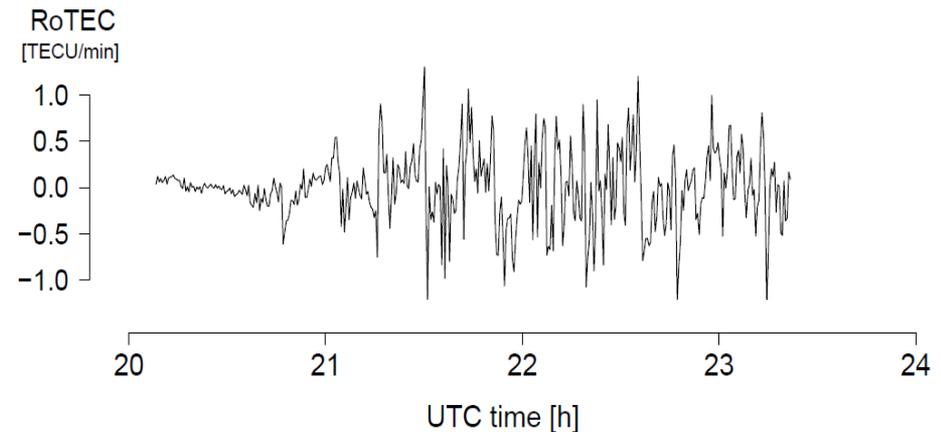
Ionosphère régulière
gradients réguliers du TEC

Ionosphère irrégulière
variabilité « locale » du TEC (irrégularités)

Traveling ionospheric disturbances (TIDs)

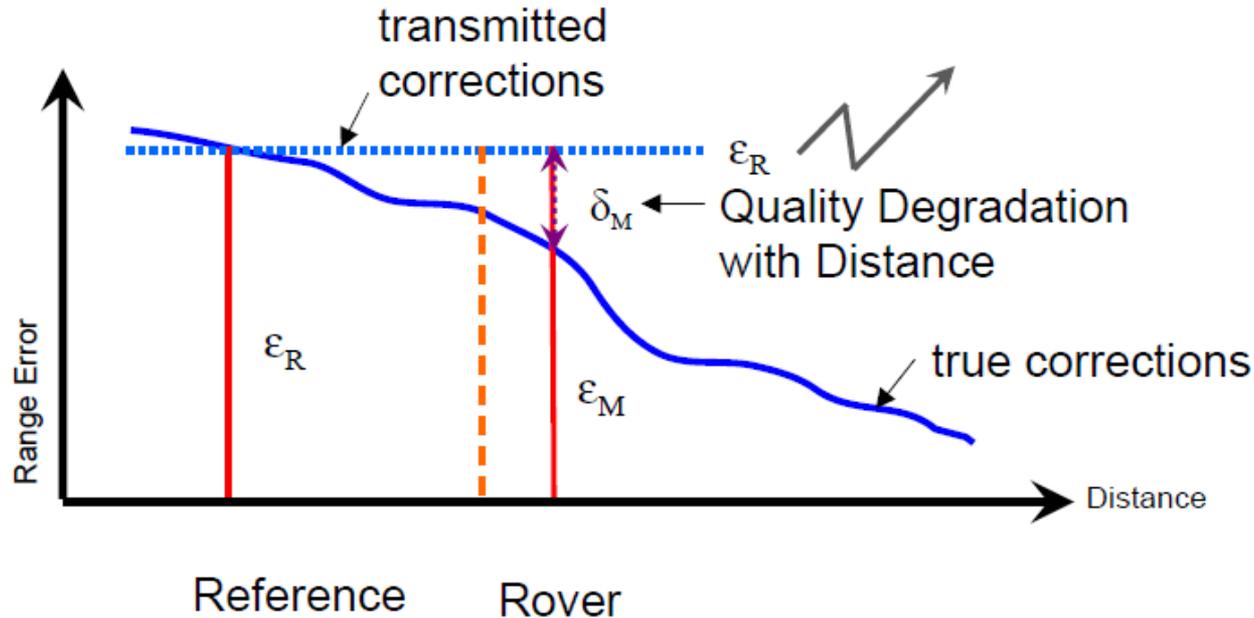


Tempêtes géomagnétiques



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

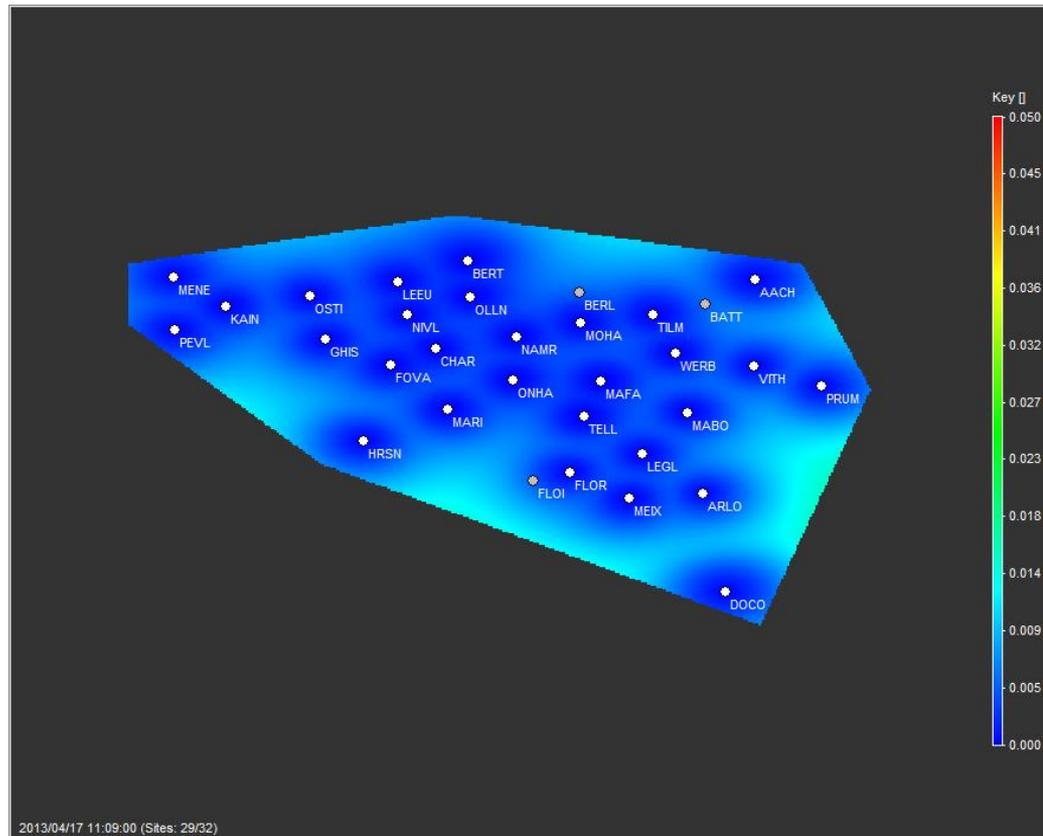
- **SANS** paramètres de correction réseau (FKP, VRS, MAC)



Les gradients ionosphériques ne sont pas modélisés

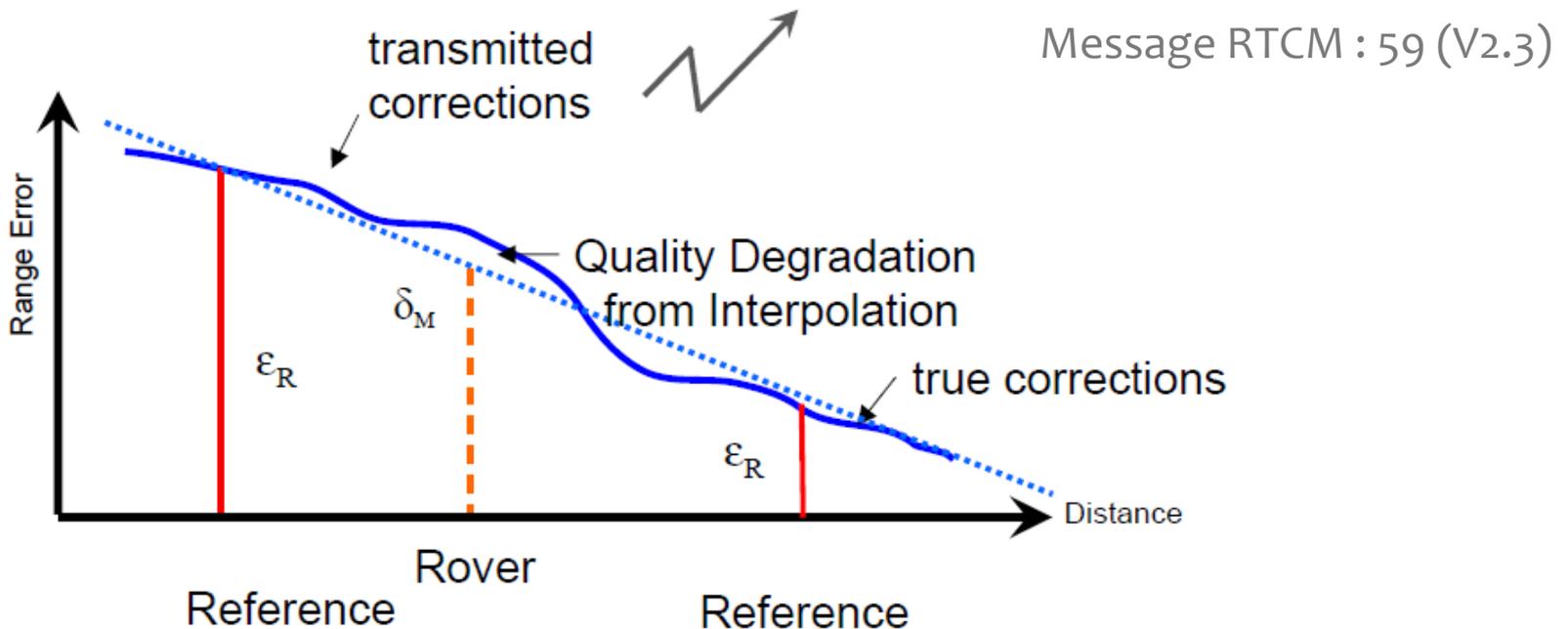
En mode **différentiel**, l'utilisateur reçoit des **corrections** par liaison radio (GSM)

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



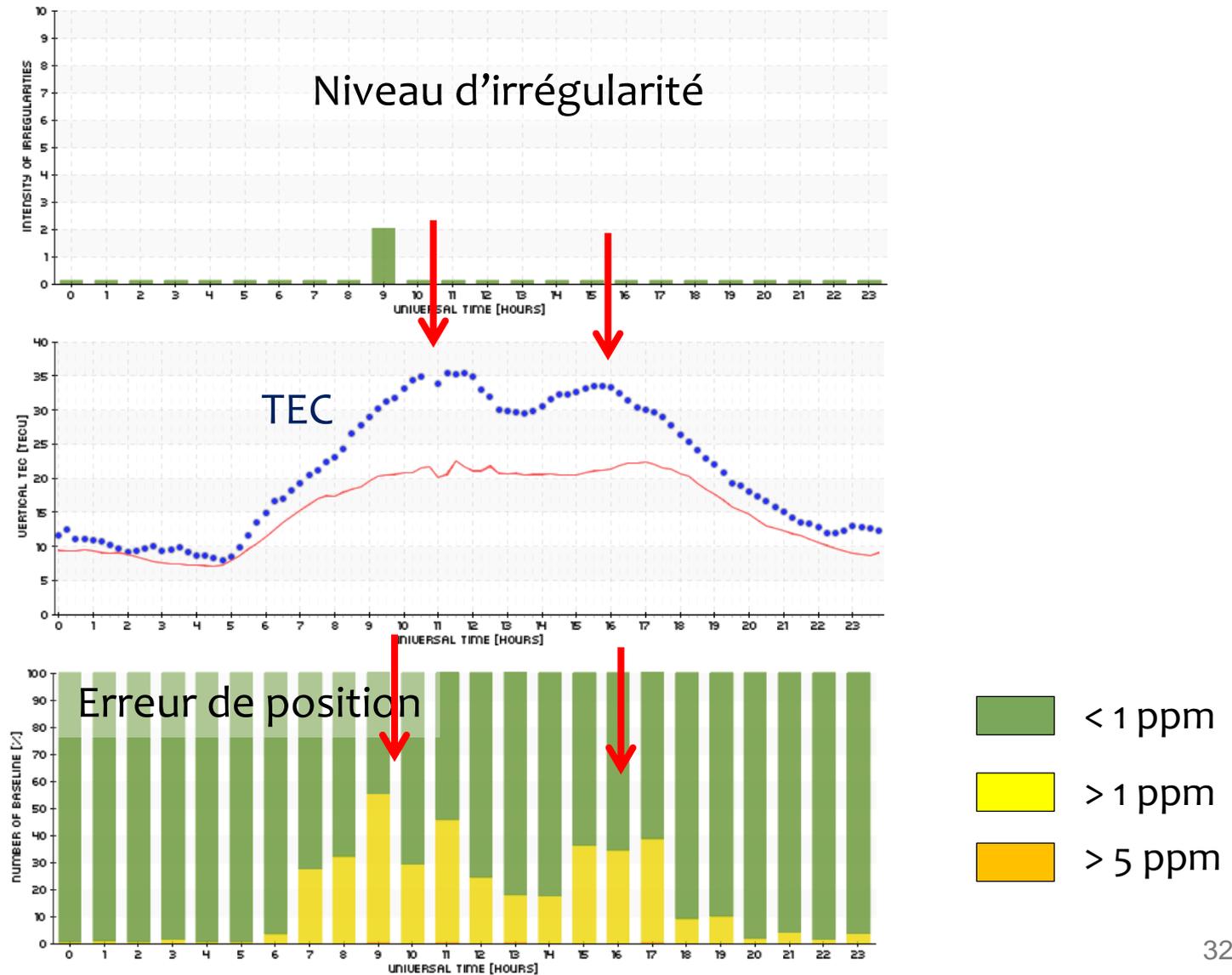
En mode **différentiel**, l'utilisateur reçoit des **corrections** par liaison radio (GSM)

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

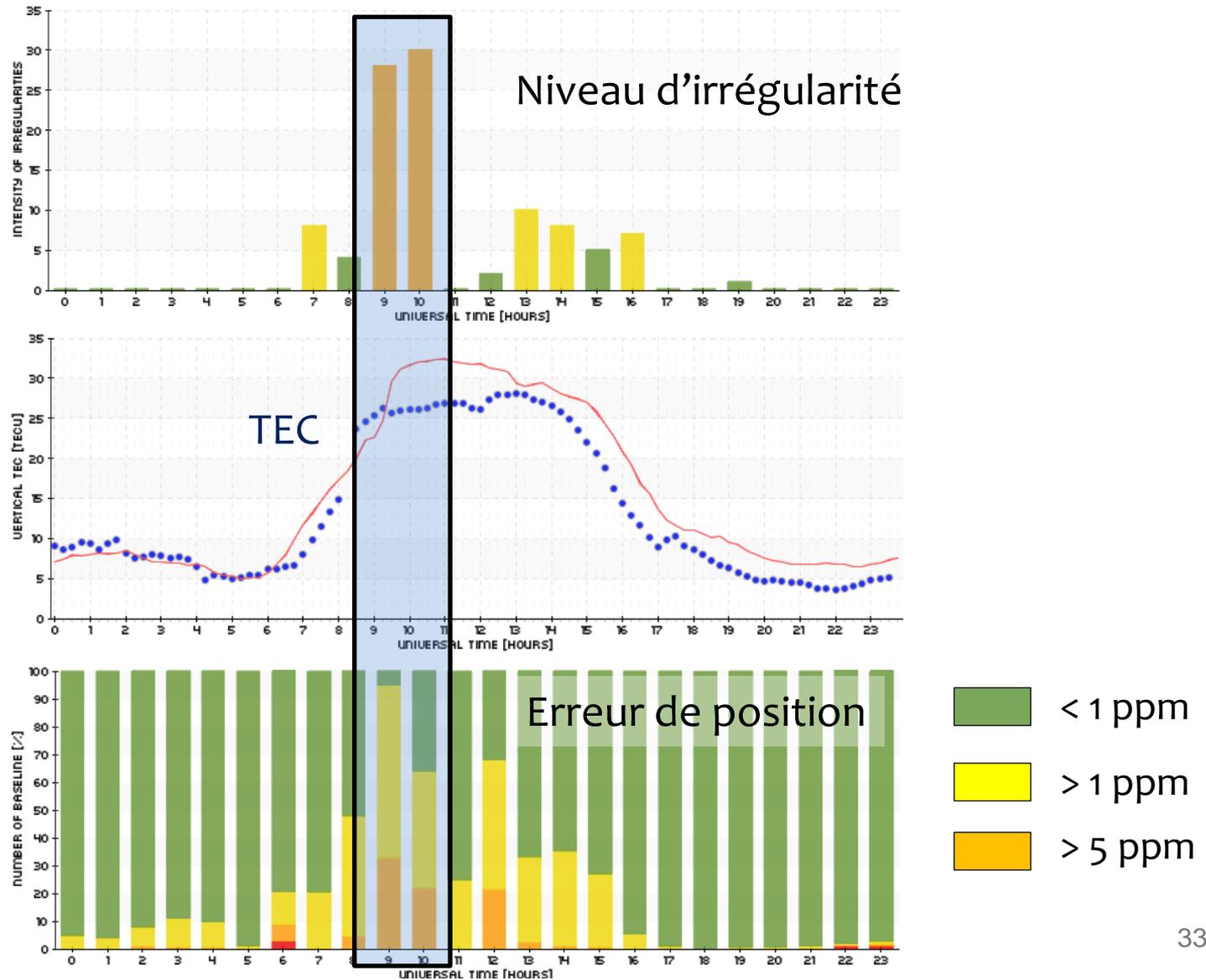


➔ Les gradients ionosphériques sont en partie modélisés

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

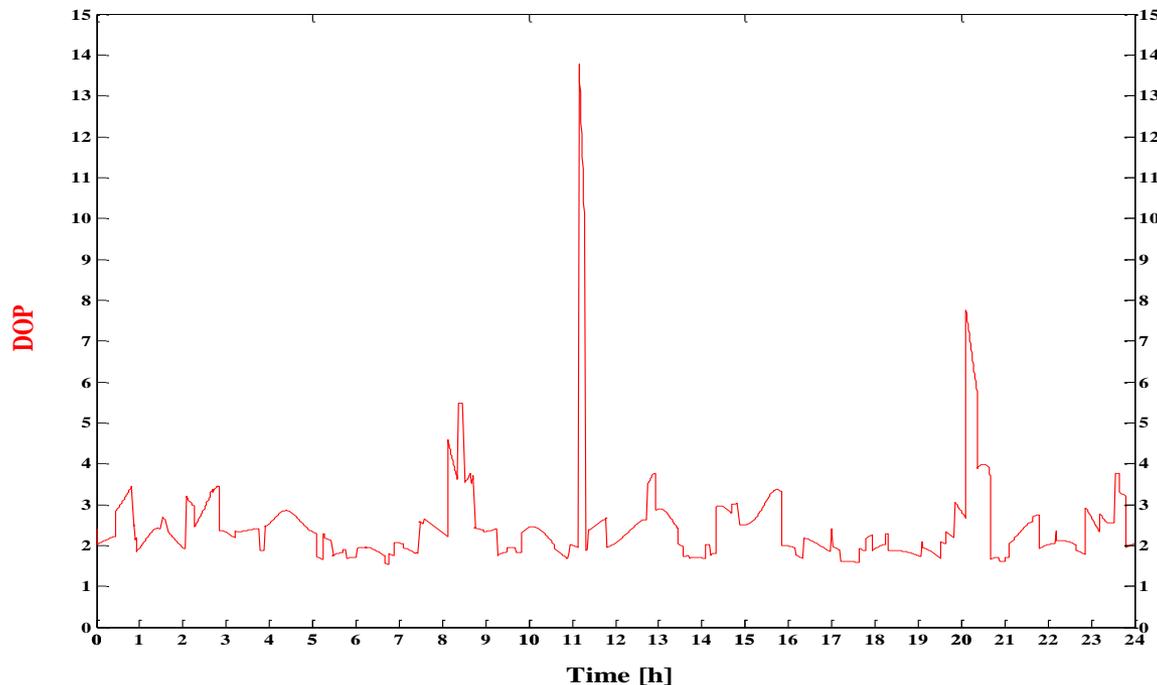


Effet des **gradients + irrégularités** sur le positionnement relatif



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?

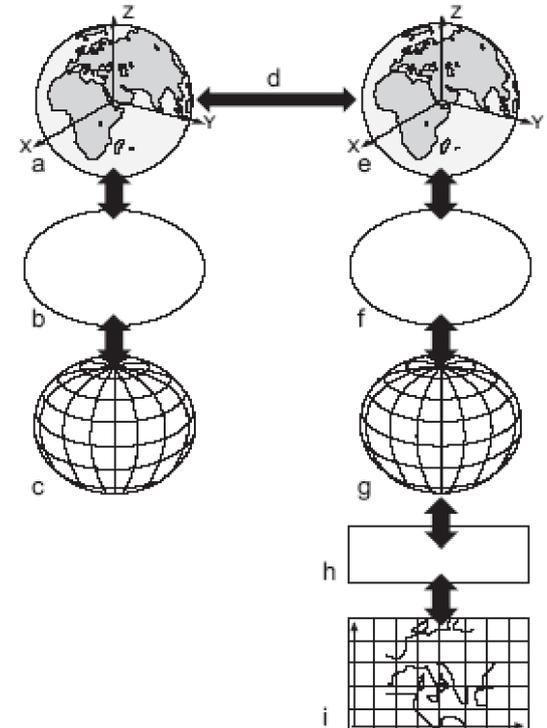
Annoncée : Horizontal : 1cm + 1ppm
Vertical : 2cm + 1ppm

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

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



La transformation GLOBAL → 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

