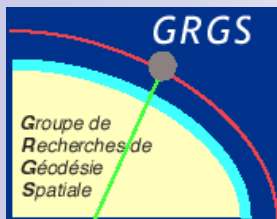


Observations géodésiques: exemple des mesures GPS

Félix Perosanz, Sylvain Loyer, Jean-Charles Marty, Richard Biancale, Stavros Melachroinos

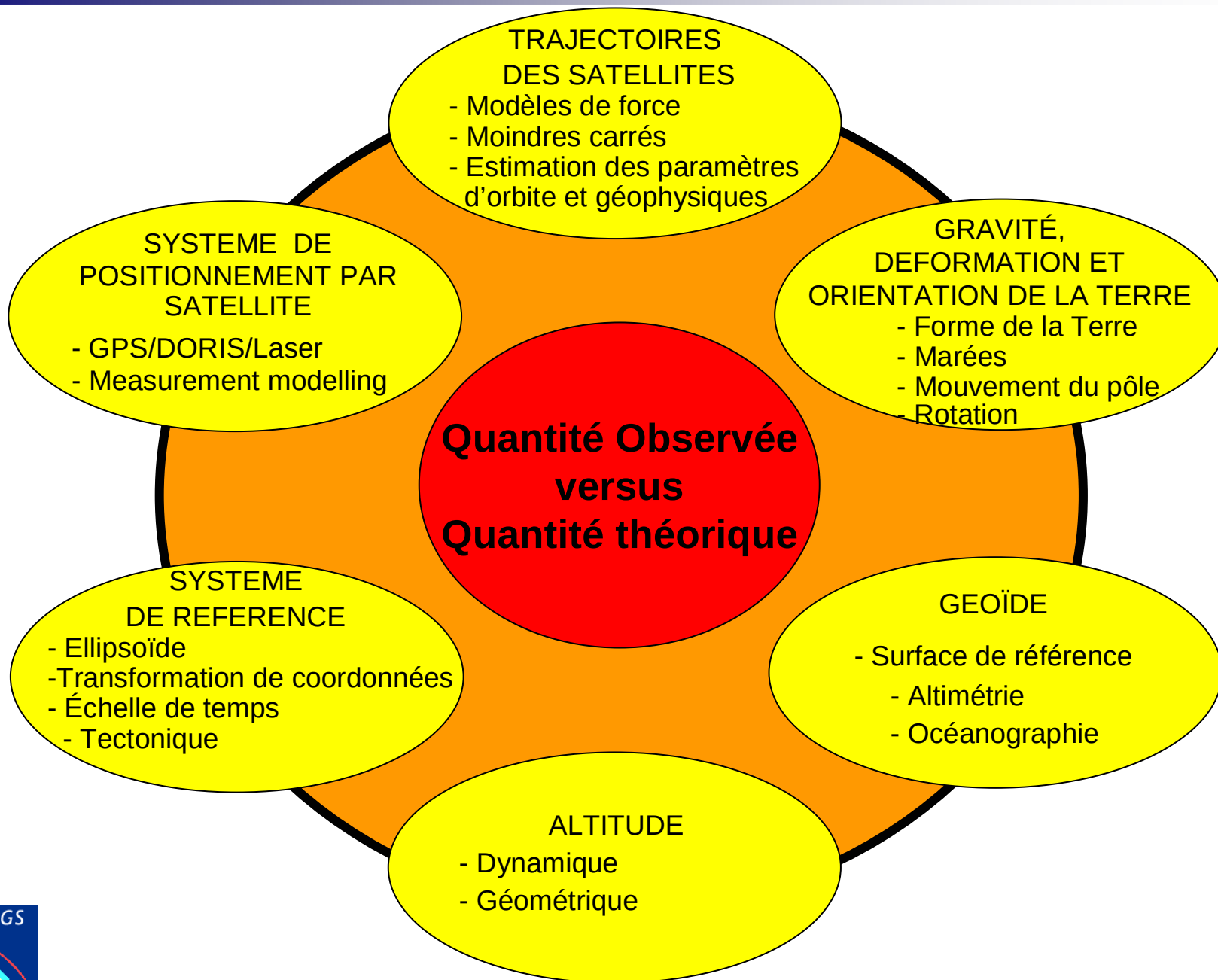
École d'été du GRGS 2008, Forcalquier



Objectif

- Illustrer le couplage géodésique au travers de l'équation de mesure GPS
- Confronter l'observation à la théorie





On cherche à minimiser les résidus Res :

$$Res = Q_{théo} - Q_{mes}$$

Soit :

$$Res = c. (|\bar{X}_{Sat} - M.\bar{X}_{Rec}| - \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c.\Delta t_r - c.\Delta t_e + \lambda_i.N_i + \sigma_L - L(f_i)$$

Et :

$\bar{X}_{Sat}$: position du centre de phase de l'antenne des satellites GPS

$\bar{X}_{Rec}$: position du centre de phase de l'antenne des récepteurs GPS

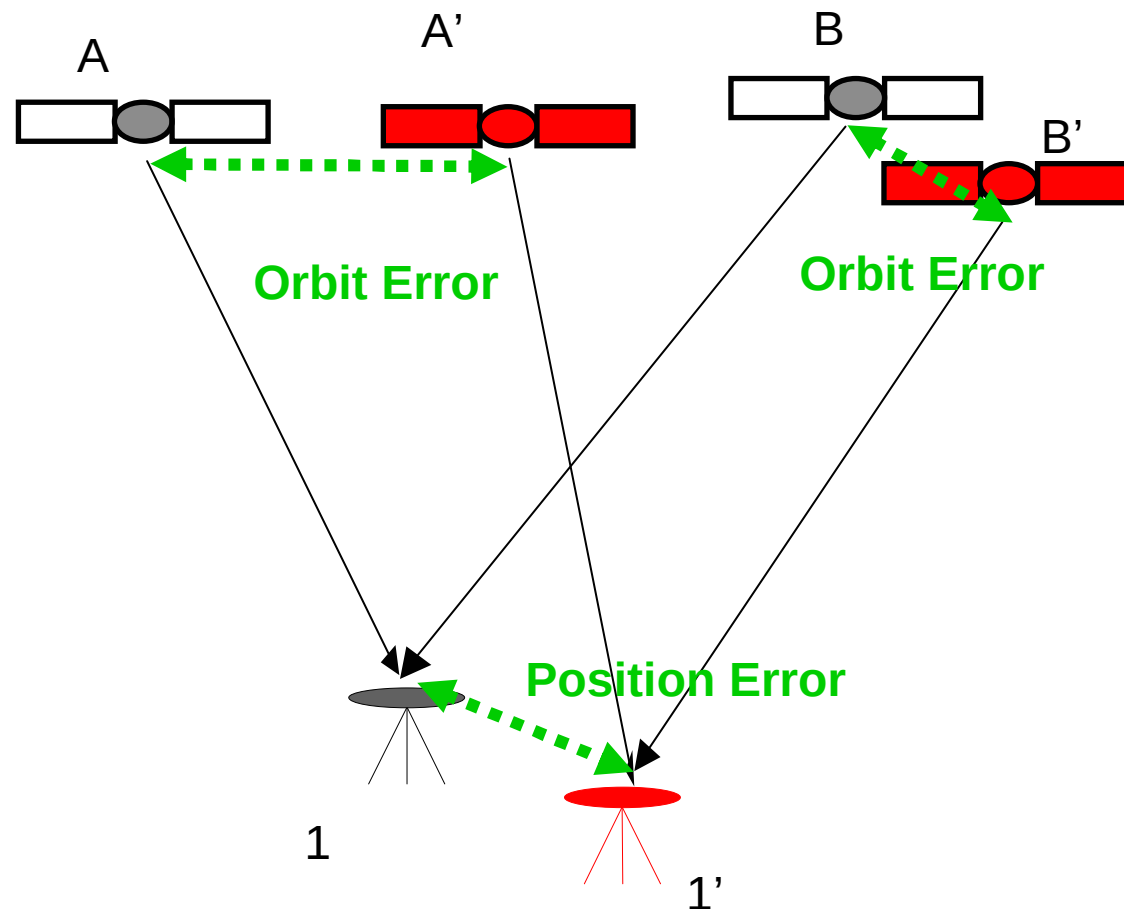
M : matrice de passage du repère récepteur au repère satellite

- Préambule : impact de l'erreur d'orbite
- Éphémérides des satellites
- Corrections de centre de phase satellite
- Équation de mesure
- Coordonnées du marqueur géodésique
- Corrections de centre de phase récepteur
- Déplacement du géocentre
- PPP versus Double-difference



Préambule : impact de l'erreur d'orbite

- Point Positioning : Orbit errors are projected onto position error



SISRE, DOP and orbit error

The User Navigation Error (UNE) can be approximated by

$$UNE(1\sigma) = GDOP \sqrt{SISRE^2 + UERE^2} \quad (1)$$

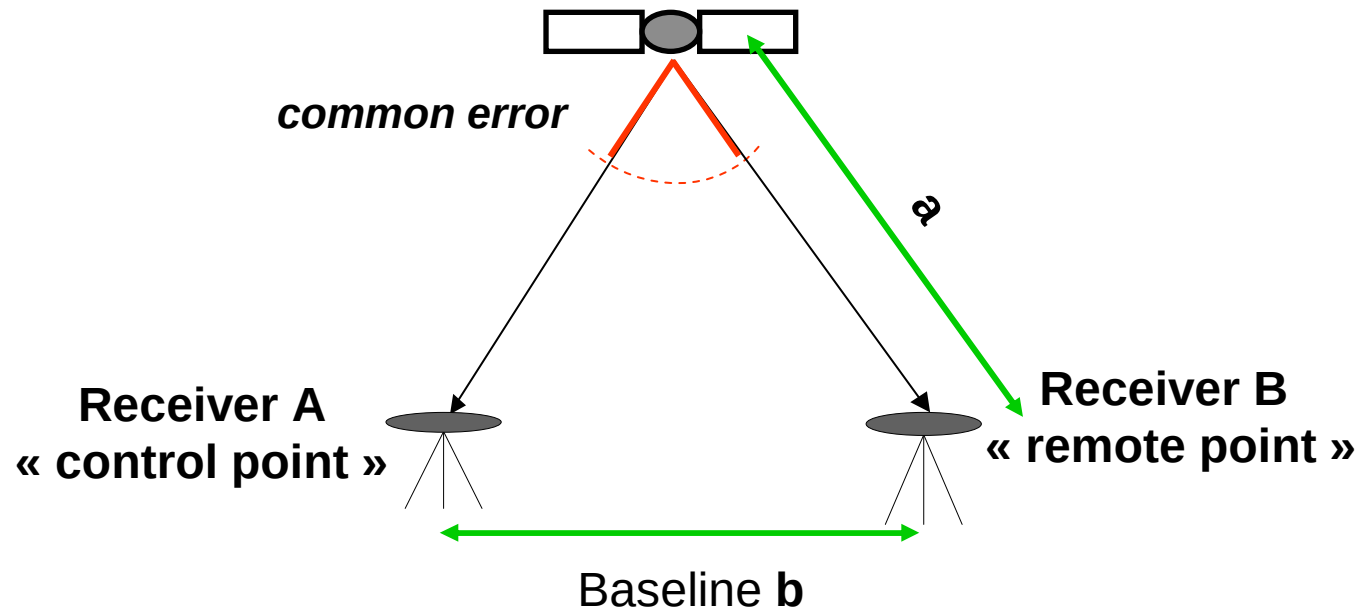
where *SISRE* is the RMS of many individual SISRE values approximated using Malys et al. (1997a)

$$SISRE = \sqrt{(R - CLK)^2 + \left(\frac{1}{49}\right)(A^2 + C^2)} \quad (2)$$

where

- R* = radial ephemeris error
- A* = along track ephemeris error
- C* = crosstrack ephemeris error
- CLK* = SV clock phase error (wrt GPS time)
- UERE* = composite of all UE range errors
- GDOP* = *Geometric Dilution Of Precision*

Differential positioning



$$\Delta a/a = \Delta b/b$$

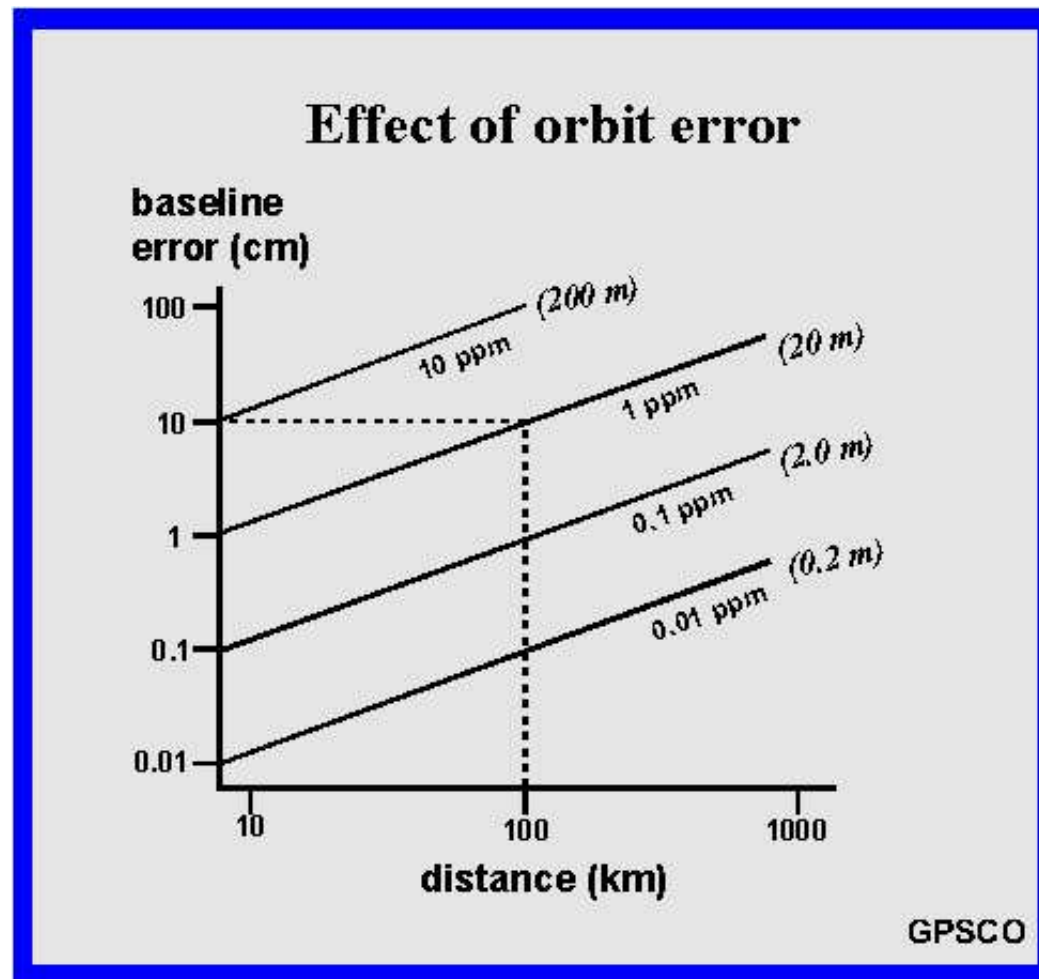
a ~20.000 km

Δa (radial) orbit error

b baseline

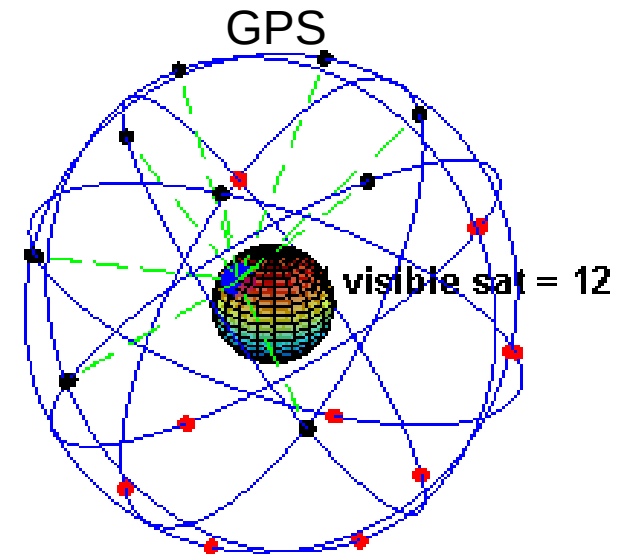
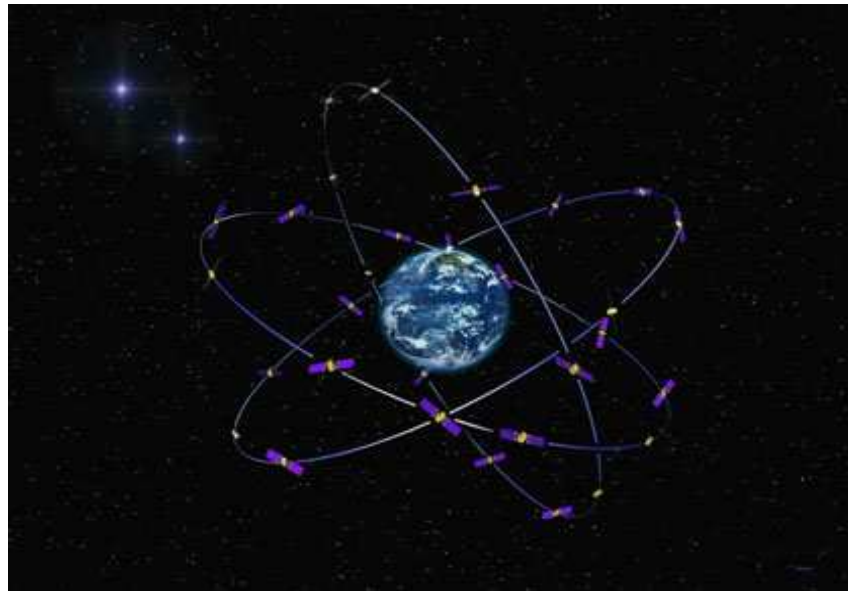
Δb position error

Differential positioning



Géométrie des satellites

Galileo (2013)



http://fr.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System#Le_segment_spatial

To scale



F. Perosanz Observations et traitements GPS

Ephémérides et correction de centre de phase satellite

Le signal est émis au centre de phase de l'antenne satellite.

Ainsi :
$$X_{SAT} = X_{CDM} + X_{CDP}$$

X_{SAT} : origine repère - Centre De Phase (CDP) de l'antenne émettrice

X_{CDM} : origine repère - Centre De Masse satellite (CDM)

X_{CDP} : vecteur CDM - CDP

La connaissance du vecteur X_{SAT} avec une « précision géodésique » est critique et délicat.



Trajectoire du centre de masse des satellites

Aujourd'hui, quelle que soit la source des orbites, les coordonnées des satellites sont issues de l'expression de la Relation Fondamentale de la Dynamique (RFD).

Pour une série d'époques l'ensemble des accélérations agissant sur les satellites sont calculées (à partir de modèles).

L'intégrale double de la RFD donne la position et la vitesse de chaque satellite à chaque pas d'intégration.

Dans la pratique, les erreurs de modèles sont compensées par l'ajustement (minimisation des résidus) de paramètres dynamiques.

Le repère d'intégration est un repère inertiel par exemple J2000.

=> La matrice de passage entre les repères céleste et terrestre doit être considérée avec précaution



Disponibilité des éphémérides des satellites GNSS

- Two kind of GNSS ephemeris exist today :
 - “BROADCAST EPHEMERIS” transmitted as part of satellite navigation message
 - “PRECISE EPHEMERIS” calculated by the International GNSS Service (IGS) and several space agencies, or institutions (NASA, ESA, GFZ, MIT, NOAA, AIUB,...)



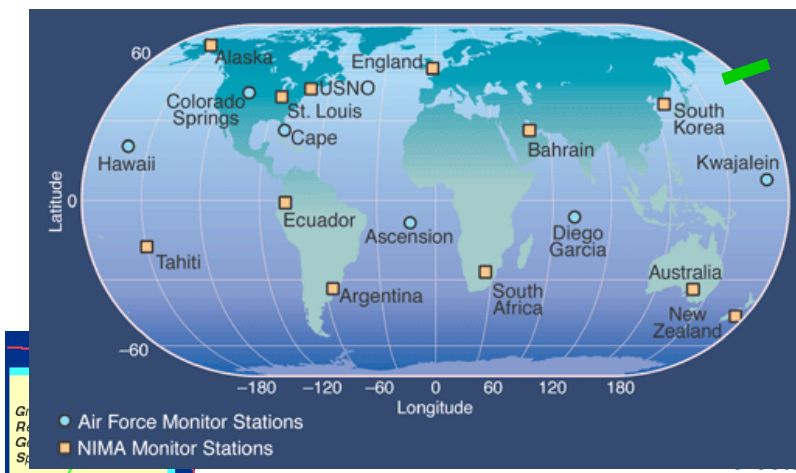
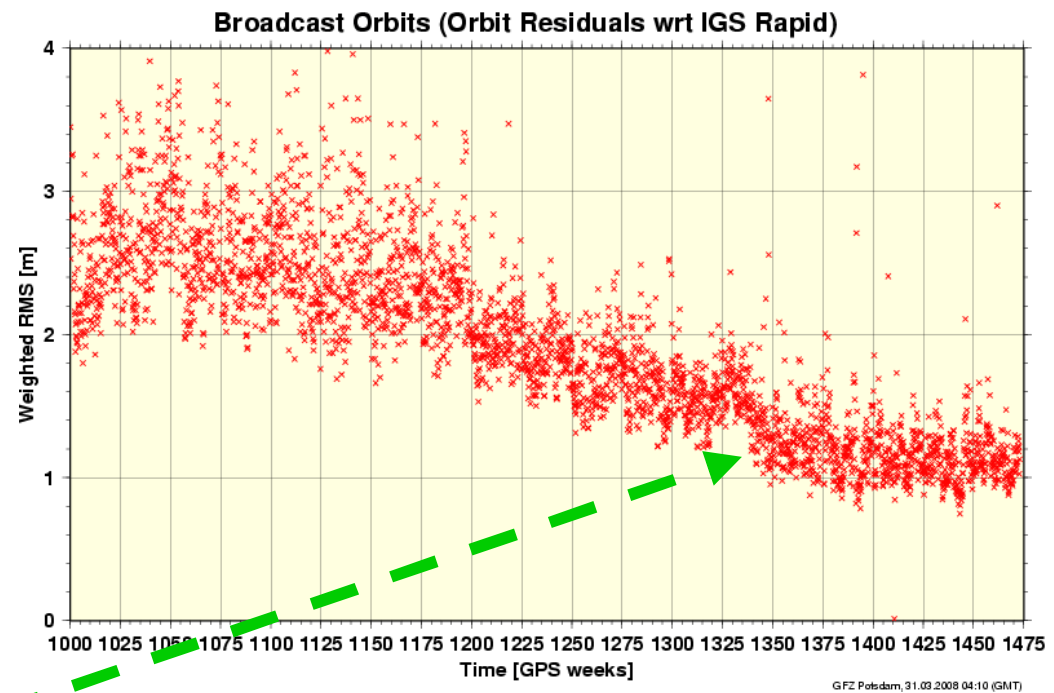
Broadcast Ephemeris

- The broadcast ephemeris is decoded by all GPS receivers
- It contains information that allow the GPS receivers to compute the Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) coordinates of each of the satellites relative to the WGS84 datum
- The Keplerian elements consist of positional information at a single reference time, and parameters related to the predicted rate of change in order to account for solar radiation and gravity perturbations
- Periodic terms are added for argument of perigee, geocentric distance and inclination
- The broadcast ephemeris is transmitted daily to the satellites via the Control Segment for future rebroadcast by the satellites.
- For geodetic receivers : a software converts the receiver binary file to an ASCII standard format output. Receiver INdependent EXchange format (RINEX). See: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/>



GPS Broadcast ephemeris accuracy

- Continuous improvement from ~20 m in the 80's to around 1 m today
- Starting September 2005, NIMA ground station are included in the tracking network

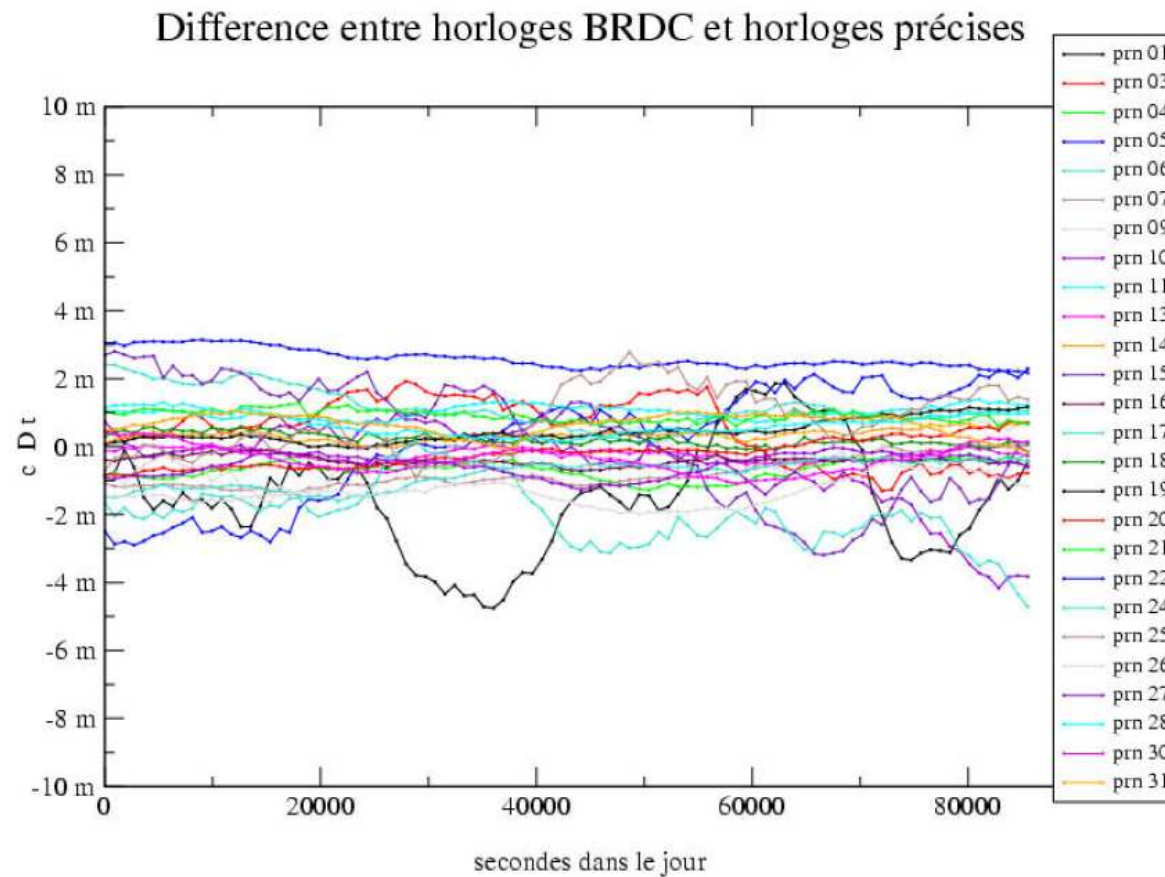


“Precise ephemeris” - Example of the IGS products

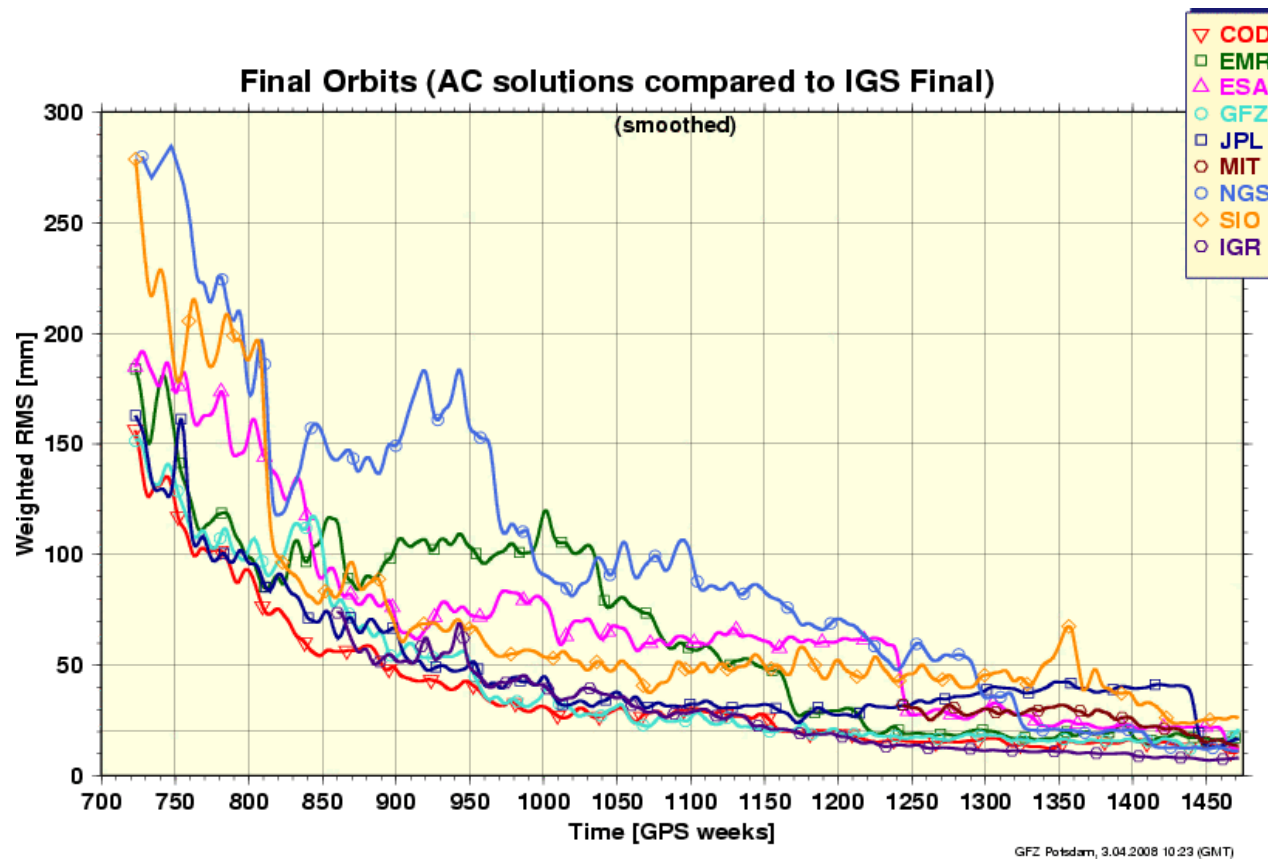
- The **Ultra Rapid Orbit** is a **real-time product**, and is published twice each day. The term "real time" means that it can be used much in the same way as the broadcast ephemeris, for real time applications. The stated accuracy of the Ultra Rapid Orbits is approximately **25 centimeters and 5 nanoseconds**. As more tracking stations make their data available on an hourly basis, **this accuracy could continue to improve**.
- The **Rapid Orbit** contains much the same information as the precise orbit, but is computed using a smaller data set. Rapid Orbits are generally available the **next day** and have a stated accuracy of **5 centimeters and 0.2 nanoseconds**.
- The **Precise Orbit** contains the ECEF coordinates for each satellite as related to the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) and includes clock corrections. This information is given for each satellite at regular epoch intervals of 15 minutes. Data is collected at tracking stations located around the world. The final precise orbits are available approximately **two weeks** after the data is collected and have a reported accuracy of **less than 5 centimeters, and 0.1 nanoseconds**.



Horloges radio-diffusées

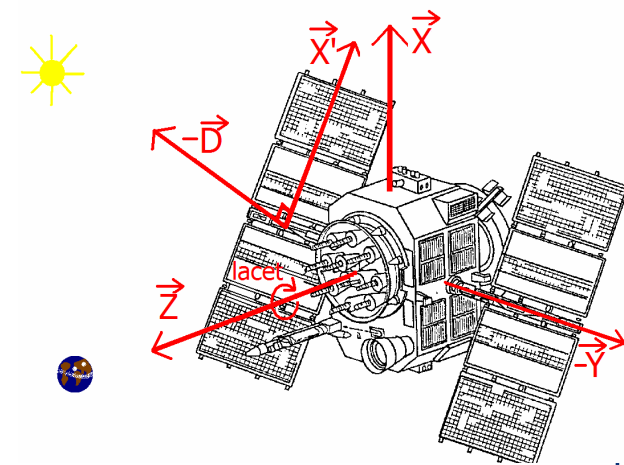


GPS precise ephemeris accuracy

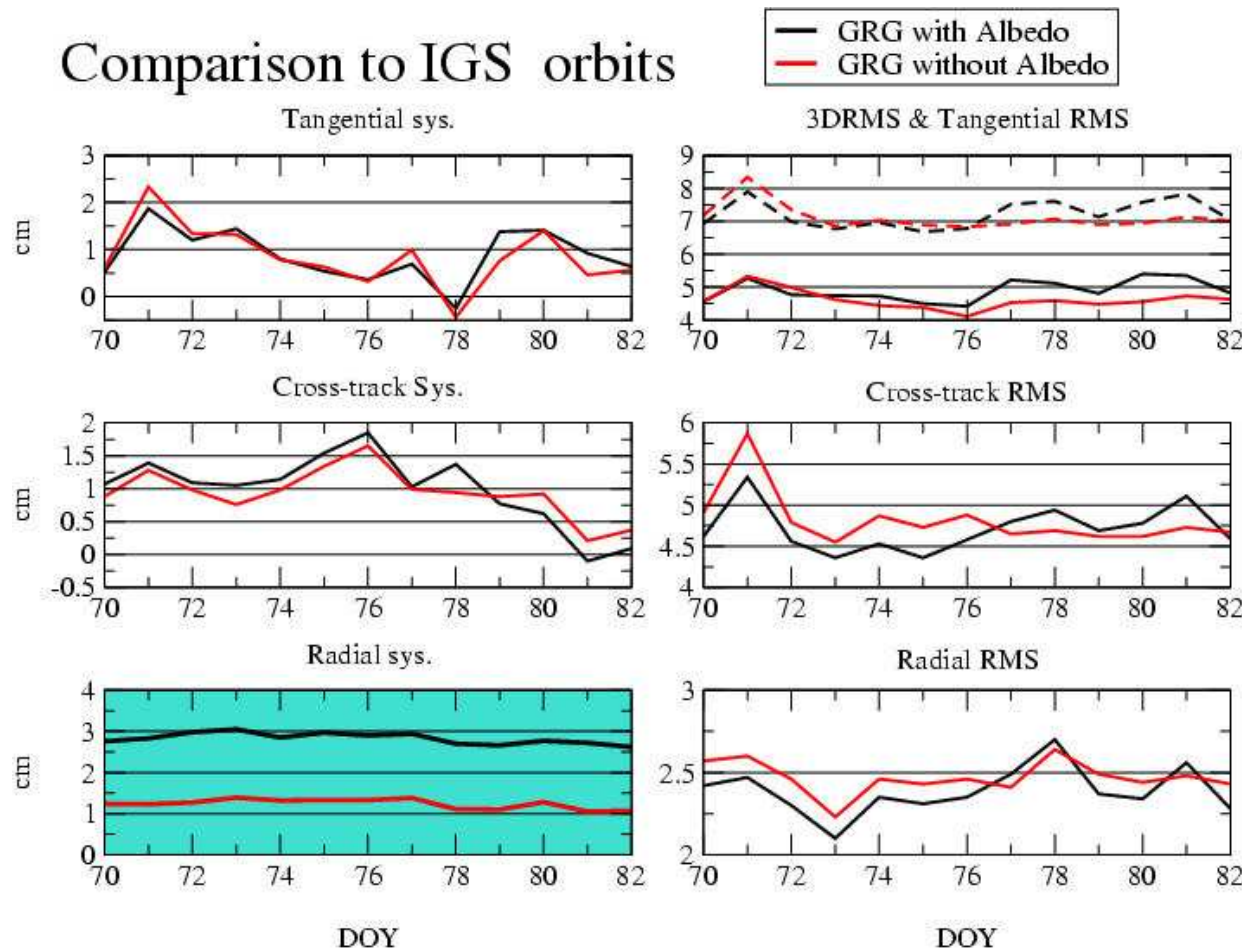


Dynamical model and processing strategy

- Full description available at :
<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/center/analysis/grg.acn>
- Main significant differences:
 - 48h Arc length ; 15mn data rate ; real ambiguities
 - Radiation pressure :
 - Solar direct + **Earth albedo and IR** flux
 - GINS Box and wing model (19 planar surfaces)
 - Nominal satellite attitude (no yaw steering model)
 - Empirical parameters (6+6 per arc) :
 - 1 scale/arc **in factor of solar pressure**
 - 1 **{Y}**-bias/arc
 - 1/rev. sin & cos in **{X'}** **{D}**
 - Albedo and IR :
 - Systematic $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ m/s/s mainly in **{Z}**
 - Flux from ECMWF 6h grids
 - Include overcast and umbra effects



Dynamic impact of Albedo force.



→ 1.6 cm (0.6 ppb) RADIAL bias



Correction de centre de phase satellite

$$X_{GP} = M(X_{ECC} + X_{trap}) + X_{PWU}$$

X_{ECC} : Partie constante de l'éccentricité de l'antenne (dans le repère satellite).

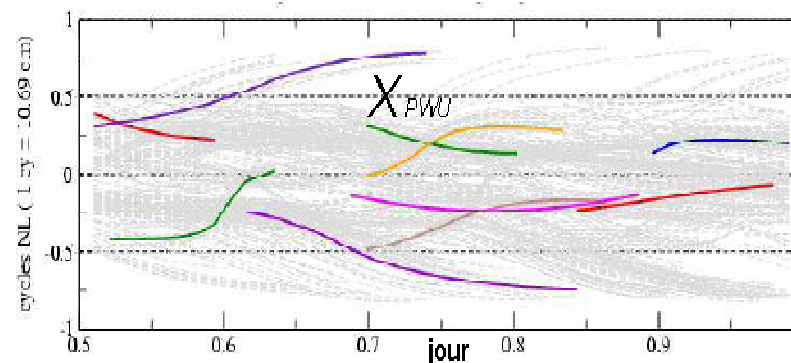
X_{trap} : Correction de centre de phase variant avec l'azimut et l'elevation du signal émis. Exprimées dans le repère satellite. Doivent être cohérentes entre les antennes émettrices et réceptrices. Depuis 2006, l'IGS recommande l'utilisation de valeurs absolues de corrections.

M : Matrice de passage du repère satellite au repère orbital. Directement fonction de l'attitude.

X_{PWU} : Correction de « Phase Wind Up ». La loi d'attitude du satellite impose un mouvement de lacet autour de l'antenne émettrice. Introduit une erreur de mesure de phase (de 1 cycle pour un tour complet).

<http://igsch.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2005/msg00111.html>

<http://igsch.jpl.nasa.gov/igsch/station/general/antex13.txt>



F. Perosanz Observations et traitements GPS

Equations de mesure GPS

$$P = c(t_r - t_e) \quad \leftarrow \text{Code}$$

$$L(\text{cycles}) = \frac{1}{(2\pi)} (\Phi_r - \Phi_e) = f(t_r - t_e) + N \quad \leftarrow \text{Phase en cycles}$$

$$L(m) = \lambda L(\text{cycles}) = c(t_r - t_e) + \lambda N \quad \leftarrow \text{Phase en mètres}$$

$$(t_r - t_e) = \tau + \Delta t_r - \Delta t_e \quad \leftarrow \text{décalages d'horloges}$$

$$P(f_i) = c(\tau_{geom} + \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c\Delta t_r - c\Delta t_e + \sigma_P$$

$$L(f_i) = c(\tau_{geom} - \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c\Delta t_r - c\Delta t_e + \lambda_i N_i + \sigma_L$$

**Attention au signe du “retard” ionosphérique.*

Biais d'horloge et ambiguïtés

LES HORLOGES seront ESTIMEES (à partir des mesures)

ou ELIMINEES (via des combinaisons de mesures)

$$P(f_i) = c(\tau_{geom} + \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + \boxed{c \Delta t_r} - \boxed{c \Delta t_e} + \sigma_P$$

$$L(f_i) = c(\tau_{geom} - \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + \boxed{c \Delta t_r} - \boxed{c \Delta t_e} + \lambda_i \boxed{N_i} + \sigma_L$$

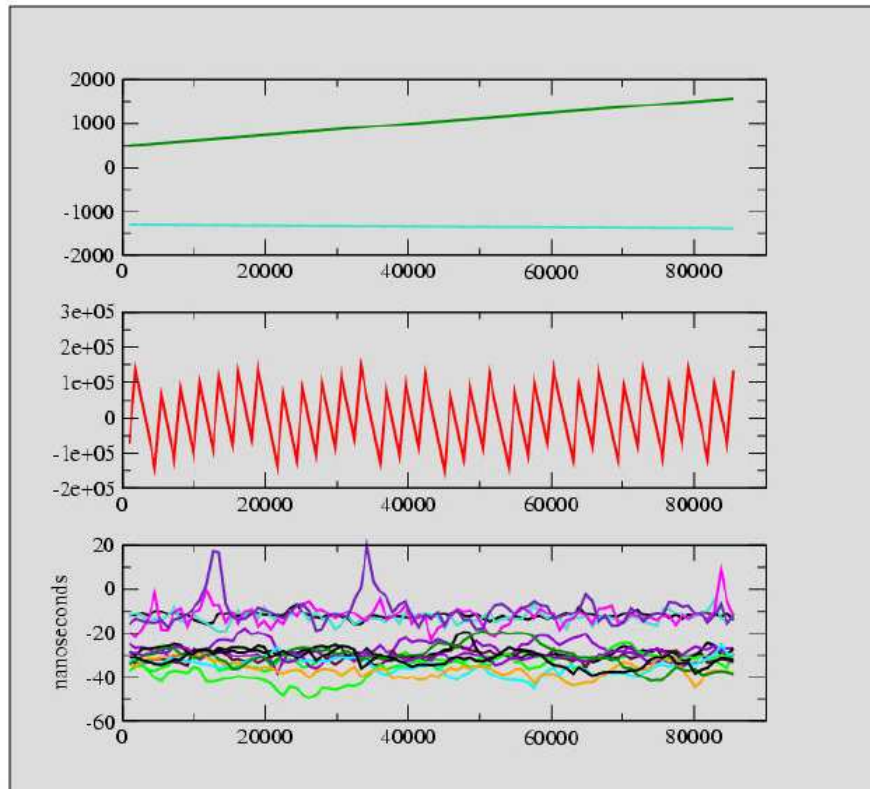
 Commun à toutes les mesures du satellite e

 Commun à toutes les mesures du récepteur r

 Commun à toutes les mesures du passage

Comportement d'horloges de récepteurs géodésiques

Autant d'horloges que de récepteurs :

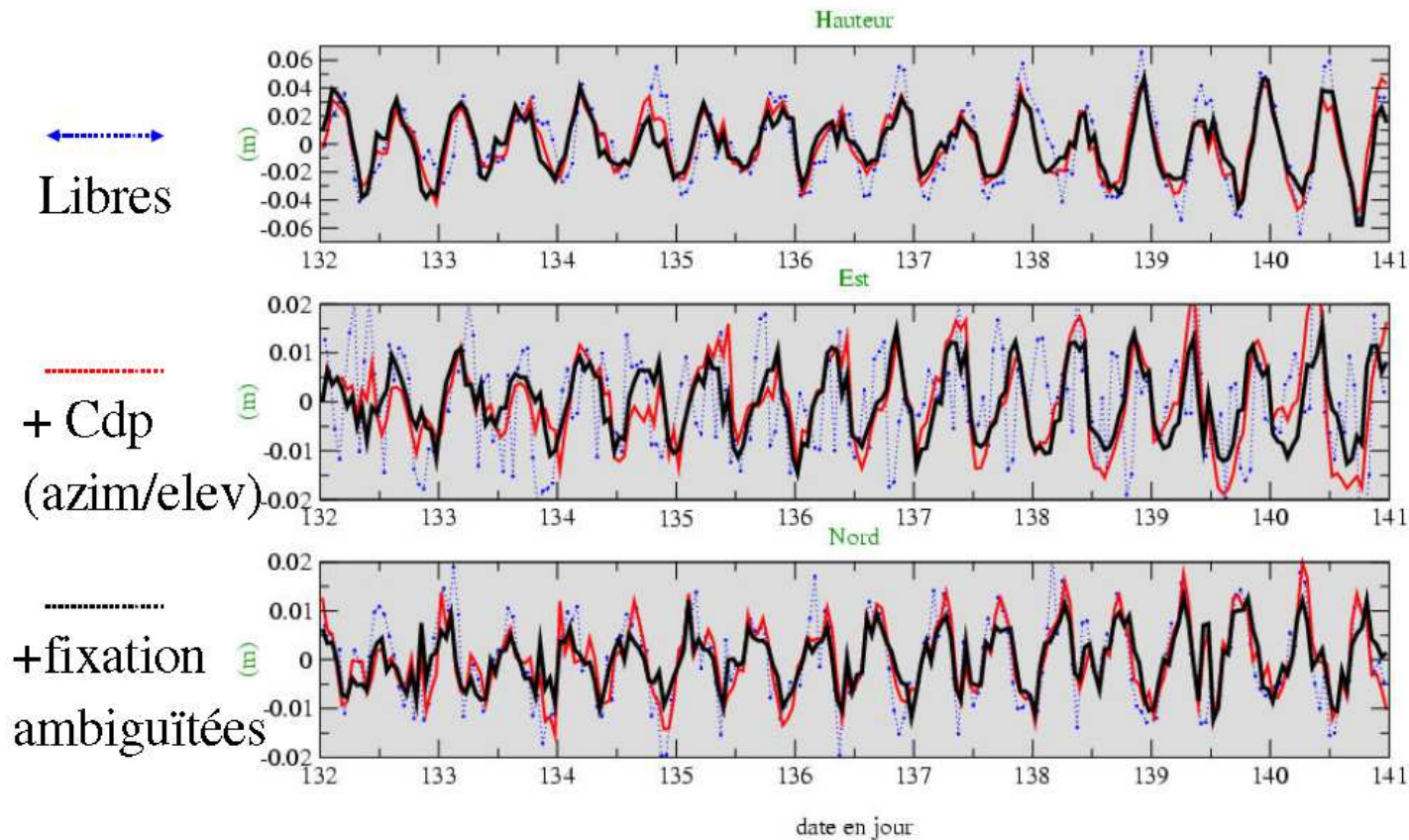


<---- Dérives et biais

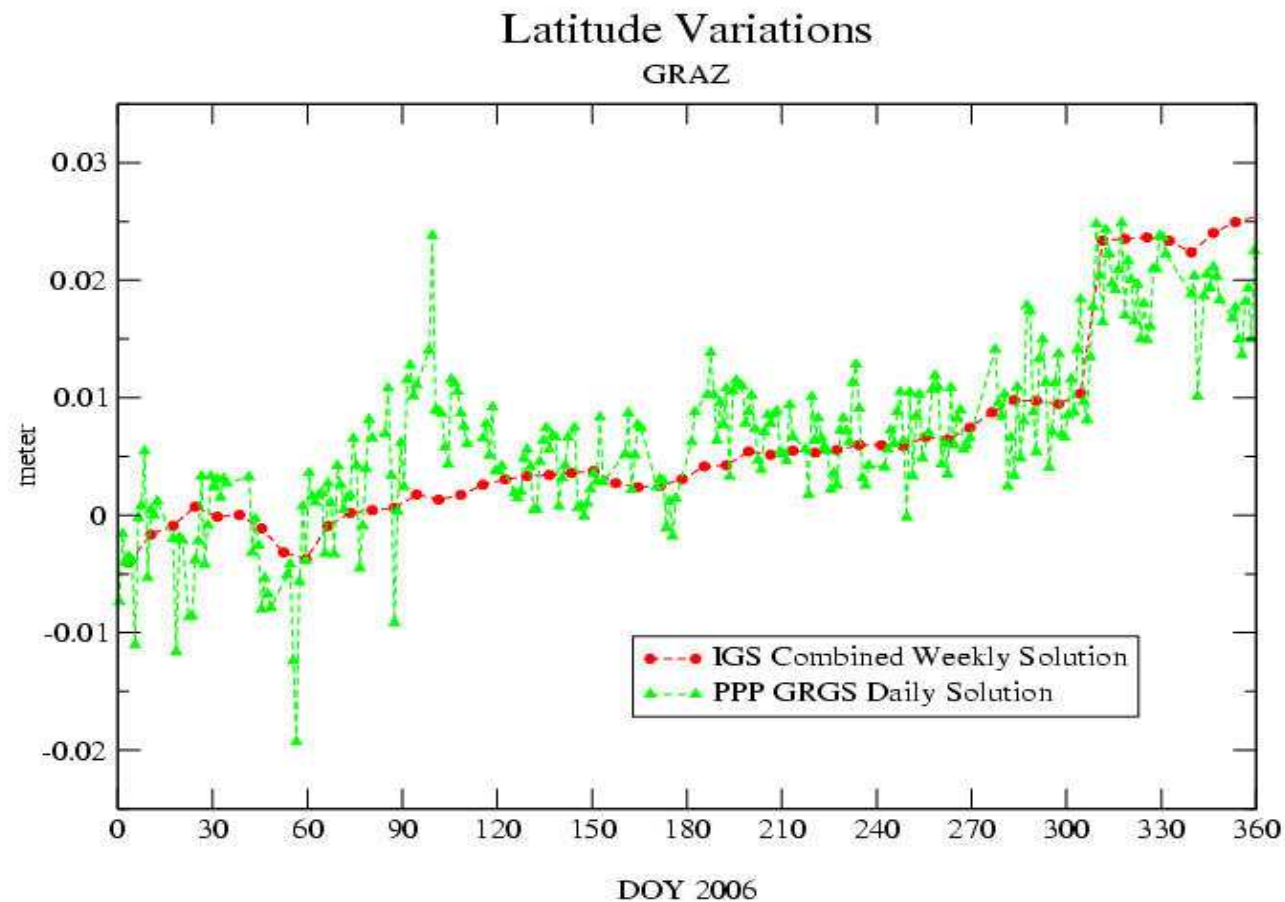
<---- Dérives et recalage régulier

<---- Horloges "calées" sur TGPS

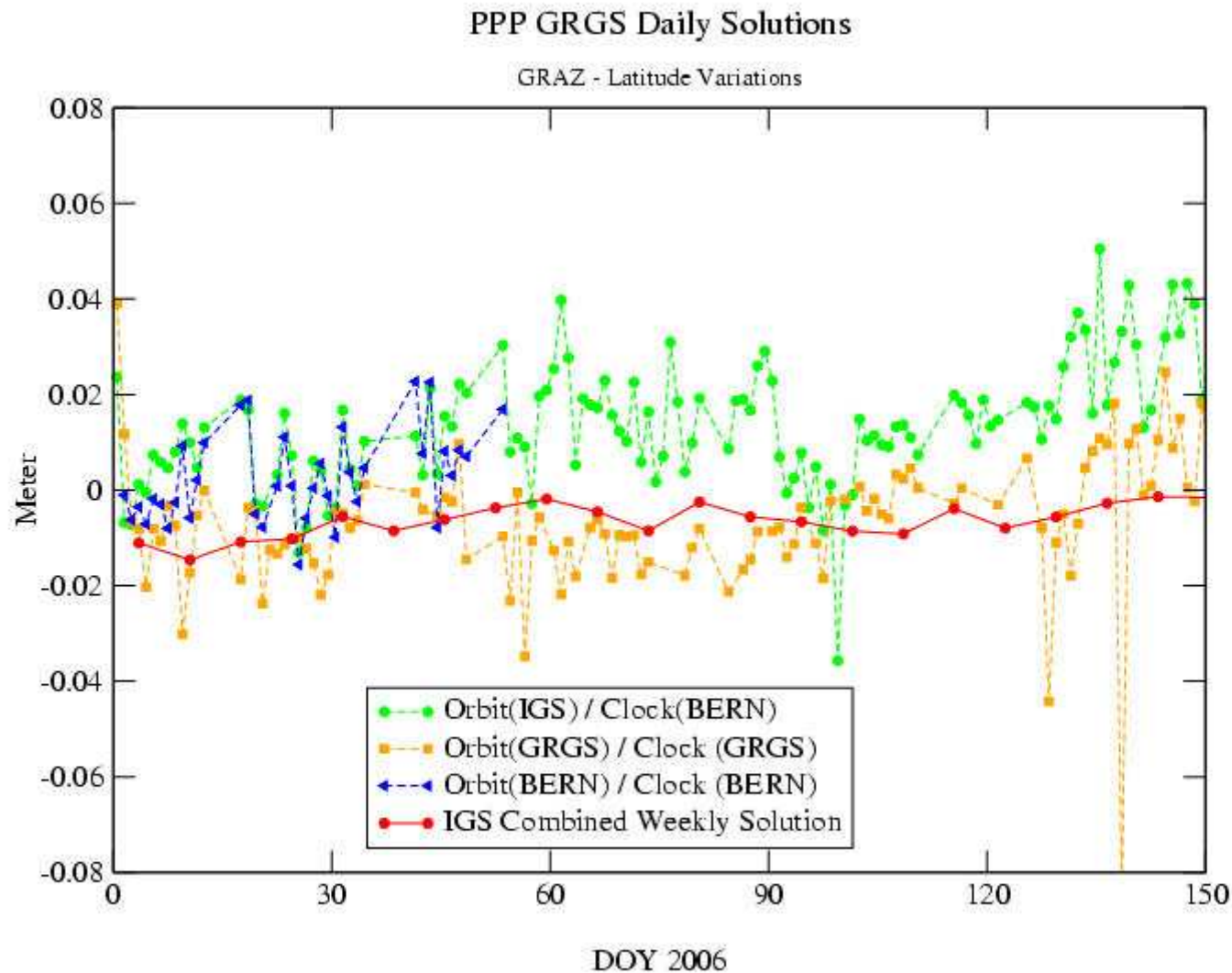
Impact des corrections de centre de phase et de résolution des ambiguïtés



Effet du changement de convention centre de phase sur les coordonnées



Effet des produits d'orbite et d'horloge sur les solutions PPP



Coordonnées du marqueur géodésique et corrections de centre de phase récepteur

Trois cas possibles dans le cadre des applications géodésiques :

- l'antenne est fixe sur terre par rapport à un marqueur géodésique
- l'antenne du récepteur est embarqué sur un satellite dont la trajectoire peut être modélisée
- l'antenne du récepteur est installée sur un mobile de trajectoire inconnue a priori (ex: bouée ou bateau géodésique)

Seul le premier cas sera développé ici.

Le signal est reçu au centre de phase du récepteur :

Ainsi :
$$X_{REC} = X_{Marqueur} + X_{CP}$$

$X_{Marqueur}$: position du marqueur géodésique associé à l'instrument

X_{CP} : vecteur marqueur - centre de phase de l'antenne



Le vecteur position du marqueur géodésique X_{marqueur} à l'époque de mesure t , est calculé dans un repère terrestre en tenant compte de tous les termes correctifs :

$$\begin{aligned}
 X_{\text{marqueur}} = & P_{ITRF}(t_0) && \text{Position du marqueur à } t_0 \\
 & + V_{ITRF}(t-t_0) && \text{Déplacement séculaire linéaire (tectonique, rebond post-glacière,...)} \\
 & + \Delta P_{\text{solid tide}}(t) && \text{Marée de la Terre solide} \\
 & + \Delta P_{\text{loading}}(t) && \text{Déplacement de Charge} \\
 & + \Delta m_{\text{geocenter}}(t) && \text{Déplacement du géocentre}
 \end{aligned}$$

Cf. les conventions de l'IERS pour le calcul de chacun de ces termes. <http://www.iers.org/MainDisp.csl?pid=46-25776>

Régulièrement, l'IERS produit de nouvelles réalisations de l'ITRS appelées ITRF. (Cf. <http://itrf.ensg.ign.fr/>)

L'ITRF2005 fournit un nouveau jeu de coordonnées et de vitesses pour un réseau mondial de marqueurs géodésiques pour l'époque de référence 2000.

Ces stations de référence sont essentielles pour la formation de lignes de base avec des stations de coordonnées inconnues et le rattachement de réseaux géodésiques.

Pour un point de coordonnées inconnues dans l'ITRF : les valeurs a priori de position (ex : solution géométrique pseudo-distance) et de vitesse (ex : modèle tectonique).

Un séisme peut introduire une discontinuité dans la série des positions d'un marqueur (déplacement co et post sismique).



Déformations de marées

D'après la théorie de Love, les déformations de marées (terrestres et polaires) de la Terre solide sont proportionnelles :

- au potentiel perturbateur
- au nombres de Love et de Shida de déplacement vertical et horizontal

Les marées terrestres sont induites par le potentiel gravitationnel perturbateur de la lune et du soleil.

La prise en compte de l'anélasticité du manteau introduit des corrections.

Les nombres de Love et de Shida (et donc le déplacement du marqueur) sont fonction :

- de la longitude et de la latitude de la station
- du degré (2 ou 3) du développement considéré
- de l'onde marée considérée



Marées polaires

Les marées polaires sont induites par les variations du potentiel centrifuge dues au mouvement du pôle.

Les changement de la vitesse de rotation terrestre produisent des marées polaires d'amplitude négligeables.

Les nombres de Love et de Shida sont dans ce cas constants.

La déformation varie en fonction des coordonnées du pôle et de la latitude et de longitude du marqueur.

	Vertical	Horizontal
Amplitude Maximale	25 mm	7 mm

Déformation de charge

La déformation visco-élastique de la croûte terrestre est proportionnelle

- au potentiel gravitationnel généré par une variation de masse à sa surface continentale
- aux nombres de Love

Les variations de masse peuvent être dues :

- aux marées océaniques
- à la pression atmosphérique
- à l'hydrologie

La déformation observée varie avec la distribution spatio-temporelle de la charge



Charge hydrologique

Les variations de distribution des masses d'eau (et de neige) sur Terre et dans les sous sols liées :

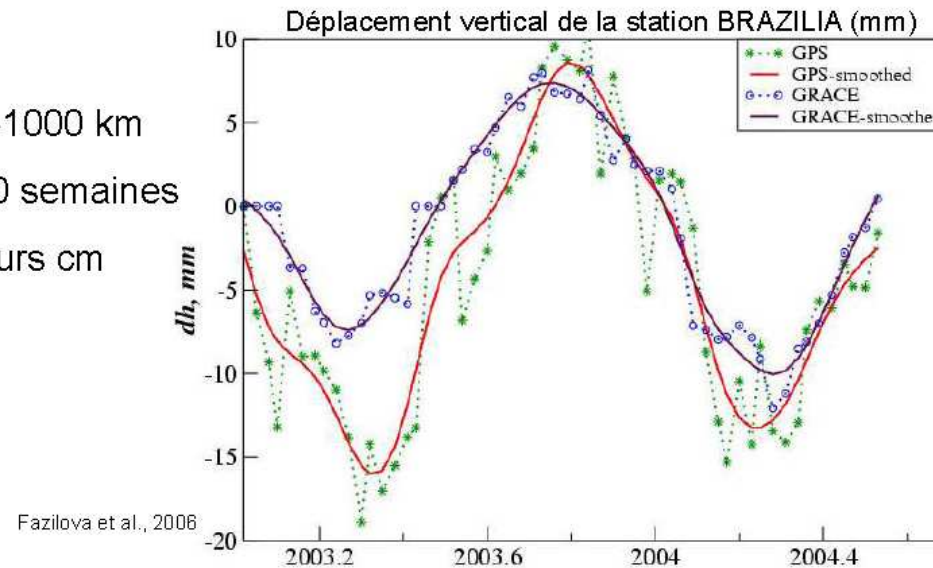
- au cycle saisonnier
- aux événements catastrophiques majeurs comme les crues, les inondations, la mousson, etc.

provoquent une charge et une déformation lithosphérique.

Echelles spatiales 100-1000 km

Echelle temporelle 1-10 semaines

Amplitude max : plusieurs cm



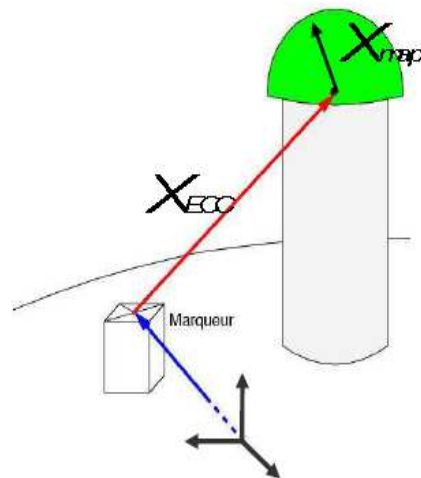
Corrections de centre de phase récepteur

$$X_{CDP} = M(X_{ECC} + X_{map})$$

X_{ECC} : Eccentricité du marqueur dans le repère local (North-East-Up)

X_{map} : Correction de centre de phase variant avec l'azimut et l'élévation du signal émis. Exprimées dans le repère local (North-East-Up). Depuis 2006, l'IGS recommande l'utilisation de valeurs absolues de corrections. Cf. igs-mail

M : Matrice de passage du repère local (North-East-Up) au repère terrestre



La connaissance de l'historique des eccentricités (déplacement ou changement de l'antenne) et des corrections de centre de phase (changement d'antenne, mise en place ou suppression d'un radôme) est essentielle.

Déplacement du géocentre

Les variations du géocentre reflètent les déformations de la croûte terrestre causées par des phénomènes de charge de degré 1.

Les satellites tournent autour du géocentre et ne sont pas sensibles à ces déplacements.

Le marqueur géodésiques est lié à la croûte terrestre dont la distance au géocentre varie.

Donc la mesure géométrique est sensible et doit être corrigée des variations du géocentre.

La réalisation du géocentre se fait par la détermination d'un mouvement d'ensemble (commun) à un réseau de stations.



New capability for GNSS : Precise Point Positioning (PPP)

- Single Point Positioning at the centimeter level (even isolated receivers)
- Powerful alternative to the “classical” network approach (global estimation of a common set of parameters)
- no baseline needed
- independent parameters processing
- GNSS satellite position and clock offsets are fixed to precise solutions (vs broadcast ephemeris)



GNSS PPP : Caution ! (*)

- Any cause of station displacement affects the solution (while they cancel in a baseline approach)
- Satellite position and satellite clock corrections :
 - ☐ must be consistent
 - ☐ Satellite clock corrections can not be interpolated and are needed at each observation epoch (product availability)
- Sensitive to *Reference Frame* and instrumental *Phase Center* conventions (**)
- Deal with the problem of convergence time (cinematic)
- Ambiguity fixing more challenging

(*) See J. Kouba 2003

(**) See G. Gendt and R. Schmid, 2004



$$Res = c. (|\overline{X}_{Sat} - M.\overline{X}_{Rec}| - \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c.\Delta t_r - c.\Delta t_e + \lambda.N_i + \sigma_L - L(f_i)$$

- vecteur d'état initial
- facteur d'échelle pression solaire
- Y-bias
- force stoch. éclipse

- coordonnées marqueur
- EOPs

-TEC

- contenu vapeur d'eau

- oscillateur récepteur

- oscillateur émetteur

- résolution des ambiguïtés