

GPS pour la géodésie: La mesure géométrique

Félix Perosanz, CNES/GRGS, Toulouse

R. Biancale, Petits mouvements de stations, Ecole d'été du GRGS 2002

Définition de la mesure géométrique

On cherche à minimiser les résidus Res :

$$Res = Q_{théo} - Q_{mes}$$

Soit :

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

- 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

La position (du centre de phase de l'antenne) des satellites GPS

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

Ainsi :

$$\mathbf{X}_{SAT} = \mathbf{X}_{CDM} + \mathbf{X}_{CDP}$$

\mathbf{X}_{SAT} : origine repère - Centre De Phase (CDP) de l'antenne émettrice

\mathbf{X}_{CDM} : origine repère - Centre De Masse satellite (CDM)

\mathbf{X}_{CDP} : vecteur CDM - CDP

La connaissance du vecteur \mathbf{X}_{SAT} avec une « précision géodésique » est critique et délicat.

Ordre de grandeur (a : demi-grand axe ; b : base) :

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

Si $\Delta a = 5$ cm, alors $\Delta b = 2$ mm pour $b = 1000$ km ce qui peut être critique.

La connaissance de la position des satellites GPS à mieux que 5 cm est un problème délicat

La position du centre de masse des satellites GPS peut provenir de différentes sources.

En principe les décalages d'horloges des satellites associés sont aussi fournis.

Ephémérides	Délai	Précision	Format	Repère
radio-diffusés BRDC	Temps réel	~ 1.6 m En continue amélioration	RINEX Extrapolation polynomiale	Terrestre
Produits de l'IGS*	Prédite (t emps réel) Rapide (t + 17 h) Finale/Combinée (t + 13 j)	En continue amélioration ~ 10 cm < 5 cm < 5 cm	SP3 Séries temporelles X,Y,Z,t	Terrestre
Solution « utilisateur »	Post-traitement	Tend vers solution précise IGS	De préférence SP3	Inertiel

* <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

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.

Par analogie avec les coordonnées des stations terrestres, on peut dire que la détermination des coordonnées des satellites GPS « réalise » le repère d'intégration.

Vecteur CDM-CDP des satellites GPS

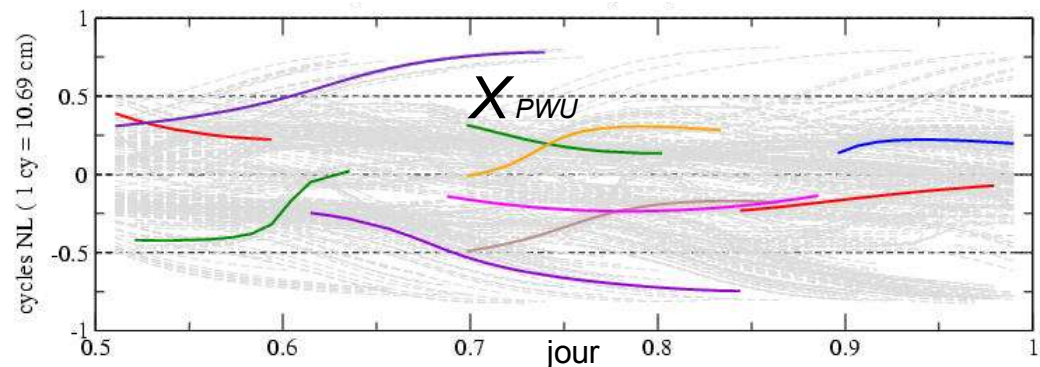
$$X_{ODP} = M(X_{ECC} + X_{trap}) + X_{PWU}$$

X_{ECC} : Partie constante de l'excentricité 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.

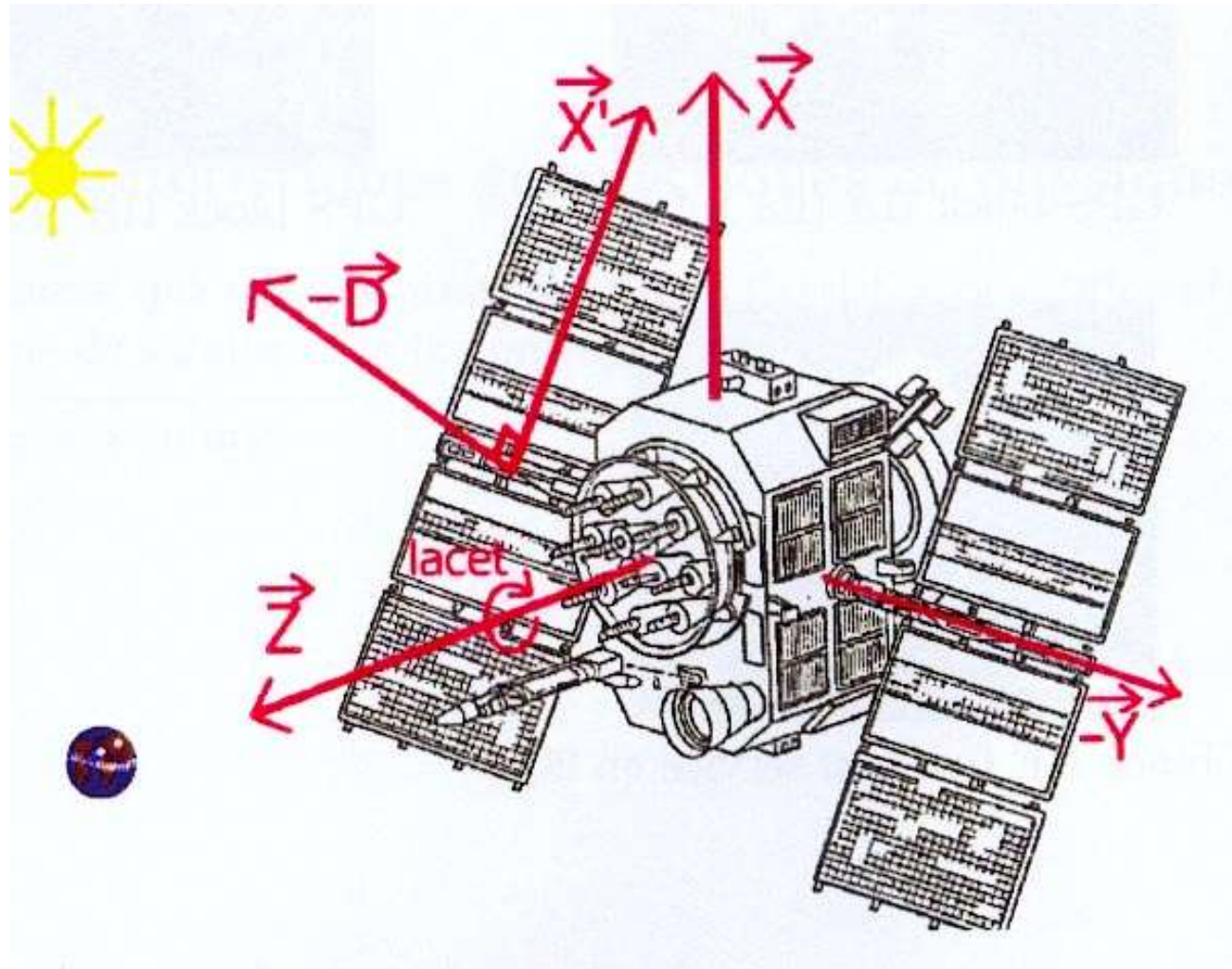
M : Matrice de passage du repère satellite au repère orbital. Directement fonction de l'attitude.

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://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2005/msg001111.html>
<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex13.txt>

Attitude des satellites GPS



La position (du centre de phase) des récepteurs GPS

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 :

$$\text{Ainsi :} \quad X_{REC} = X_{MARQUEUR} + X_{ODP}$$

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

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

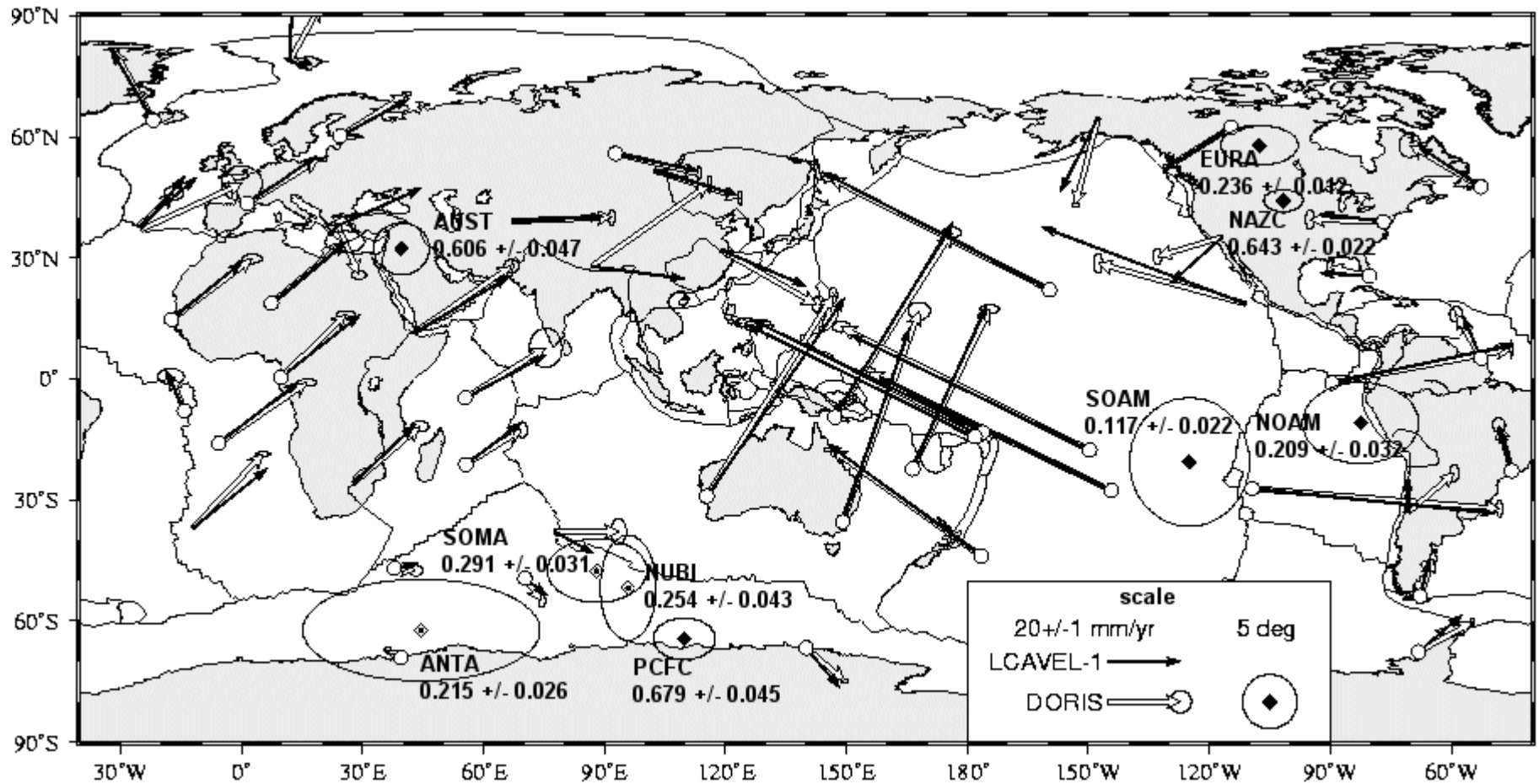
Les coordonnées des stations (marqueur géodésique)

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 :

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

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

Les vitesses des stations



L. Soudarin, J.F. Crétau, A. MODEL OF PRESENT-DAY TECTONIC PLATE MOTIONS FROM 12 YEARS OF DORIS MEASUREMENTS, Journal of Geodesy , DORIS special issue (in press)

DOI: 10.1007/s00190-006-0090-4

Coordonnées et vitesse ITRF

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

L'ITRF2005 fournira 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, des 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).

Déformation 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.

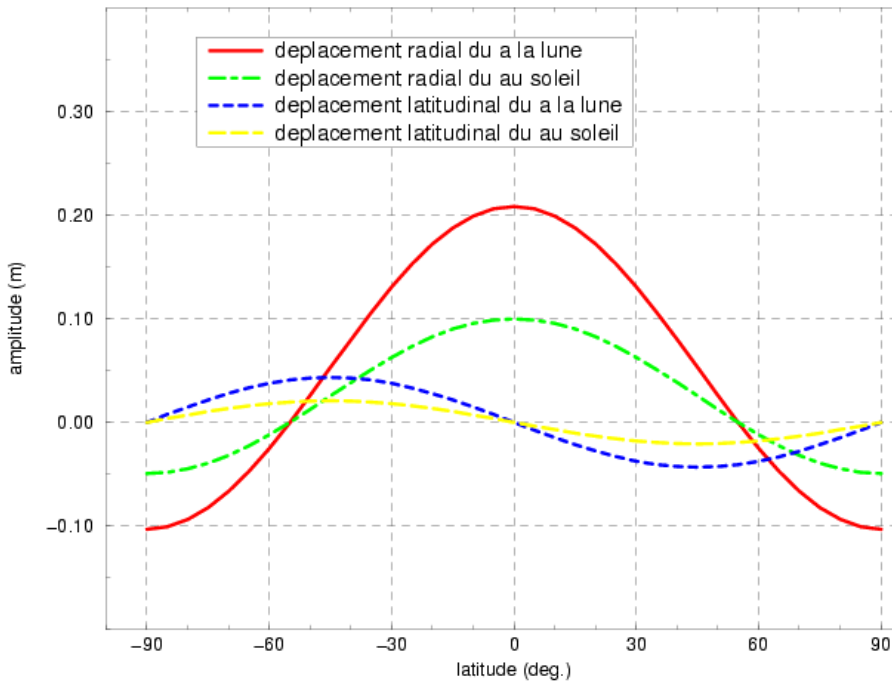
La prise en compte de l'anélasticité du manteau introduit des corrections.

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

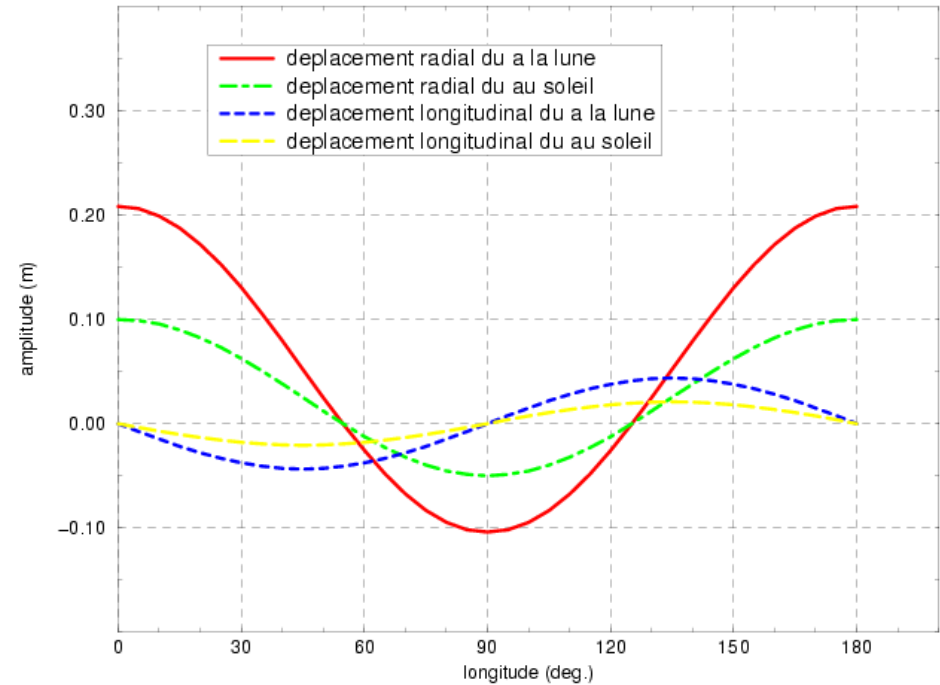
- de la longitude et de la latitude de la station
- du degré (2 ou 3) du développement considéré
- de l'onde marée considérée

Déformation de marées terrestres

déformations de marée terrestre de degré 2
en fonction de la latitude



déformations de marée terrestre de degré 2
à l'équateur, en fonction de la longitude



Déformation de marées polaires

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

Les changements 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

Les déformations 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 :

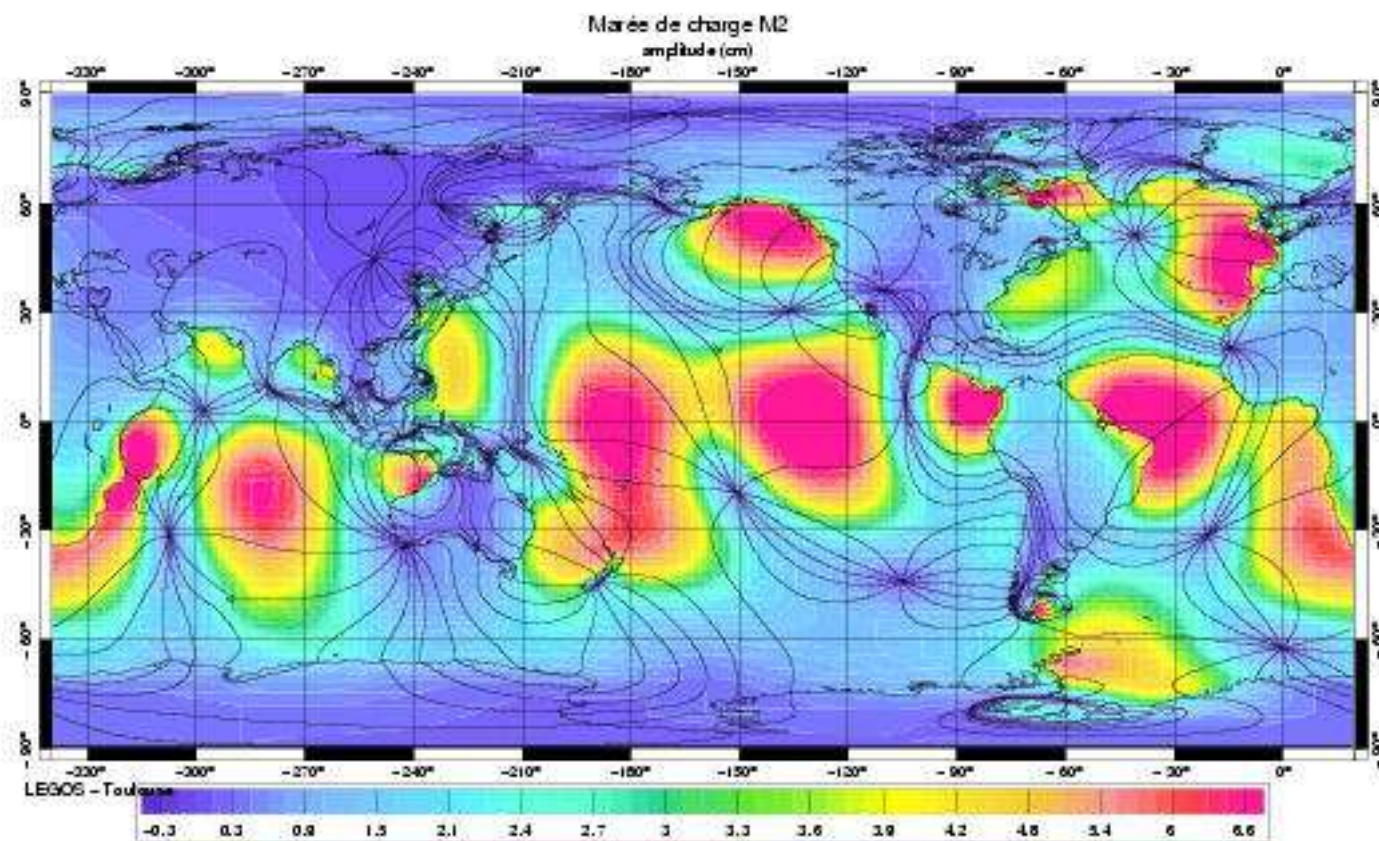
- aux marées océaniques
- à la pression atmosphérique
- à l'hydrologie

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

Charge océanique

Les 11 principales ondes de marées océaniques génèrent autant « d'ondes de charge océanique » le long des côtes continentales.

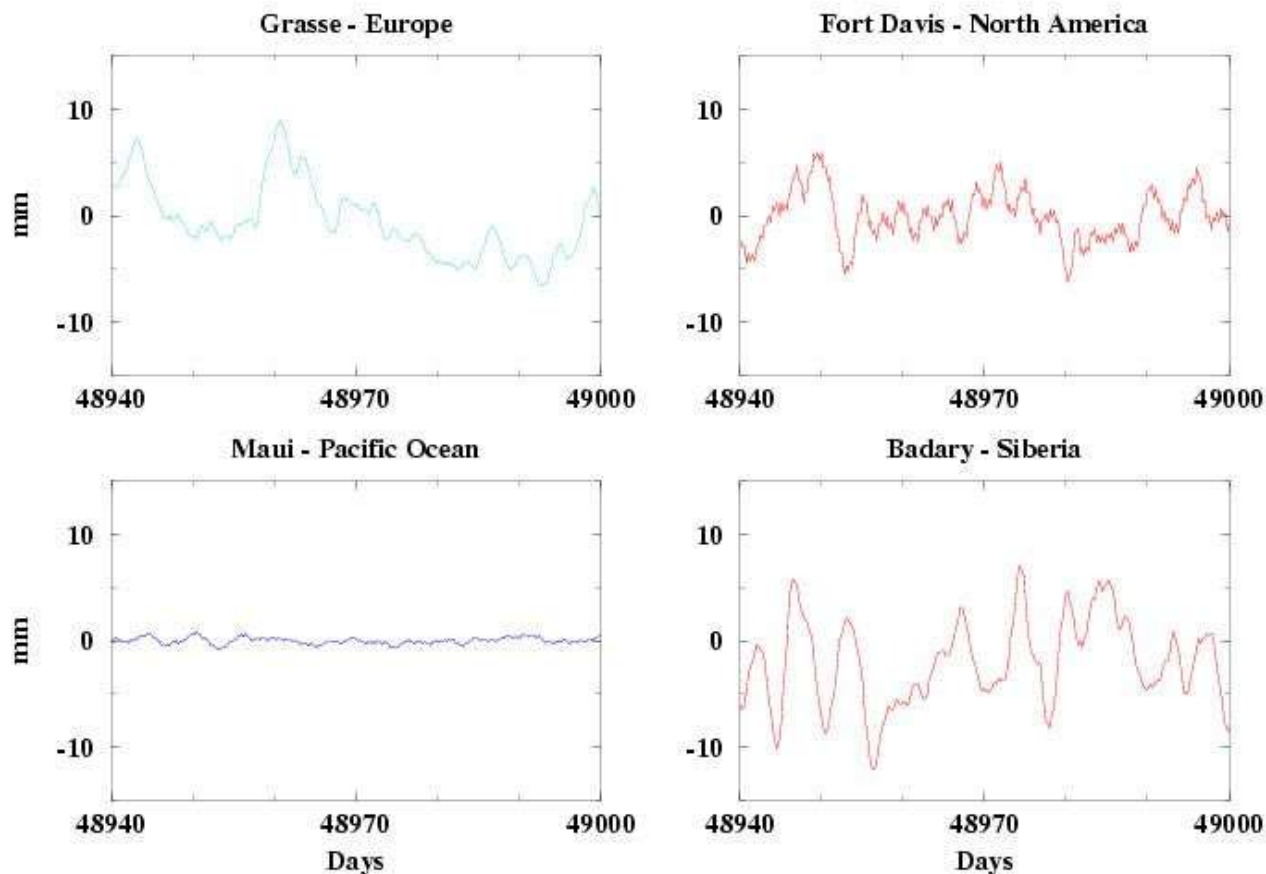
Les amplitudes de déformations associées, dépendent fortement de la position géographique de la station et peuvent atteindre 10 cm dans la direction verticale et 3 cm en horizontal.



Charge atmosphérique

Les effets dominants sont à des échelles spatiales de 1000-2000 km et plus importants aux hautes latitudes. L'amplitude des déformations peut atteindre 25 mm en vertical et 8 mm en horizontal.

Vertical Displacement induced by global atmospheric and oceanic loading



Charge hydrologique

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

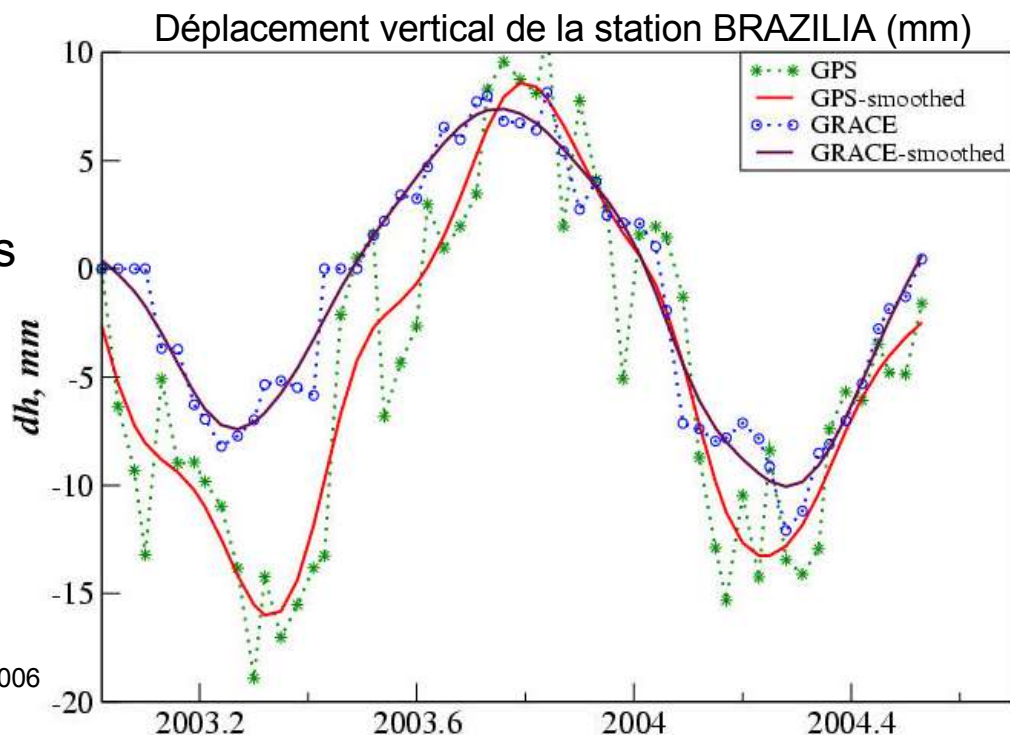
- au cycle saisonnier
- aux événements catastrophiques majeurs comme les crues, les inondations, la mousson, etc.

provoquent une charge et une déformation lithosphérique.

Echelles spatiales 100-1000 km

Echelle temporelle 1-10 semaines

Amplitude max : plusieurs cm



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.

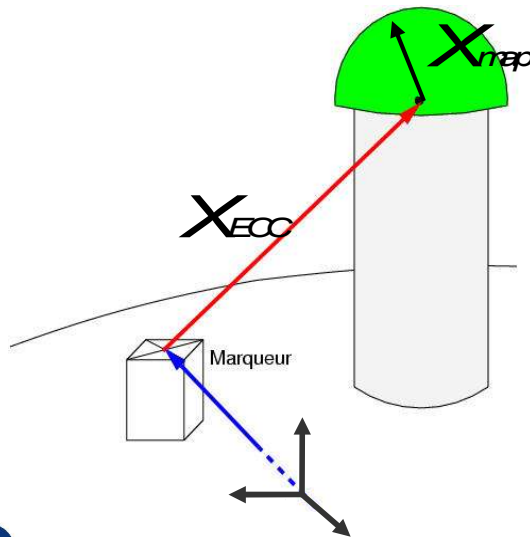
Position du centre de phase des récepteurs GPS

$$X_{ODP} = M(X_{ECC} + X_{rrep})$$

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

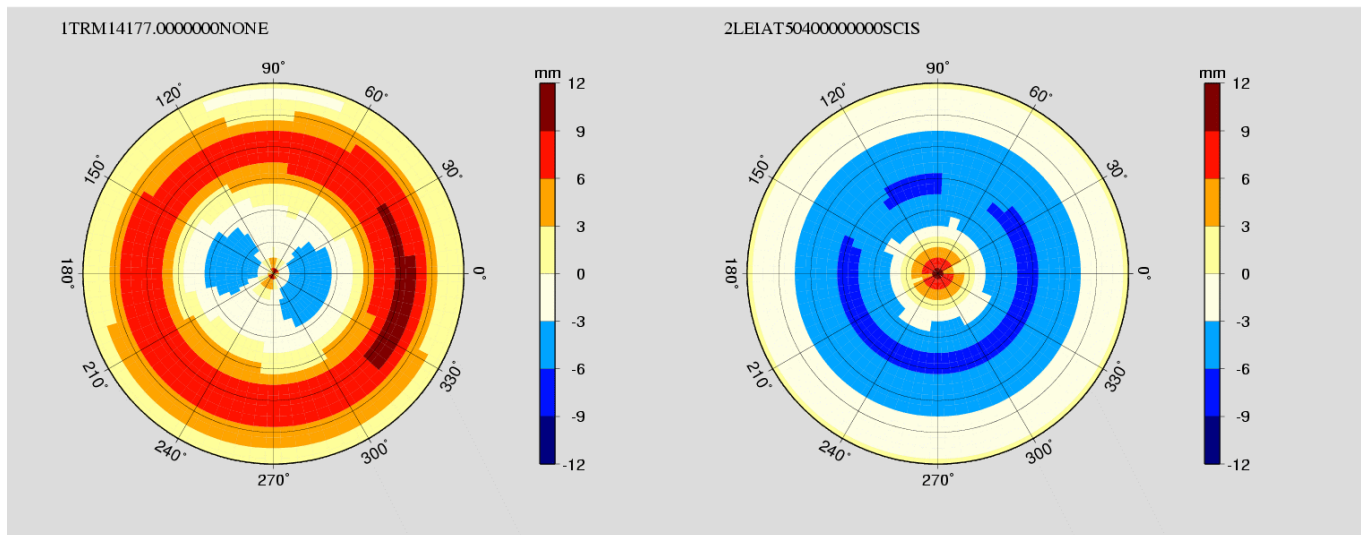
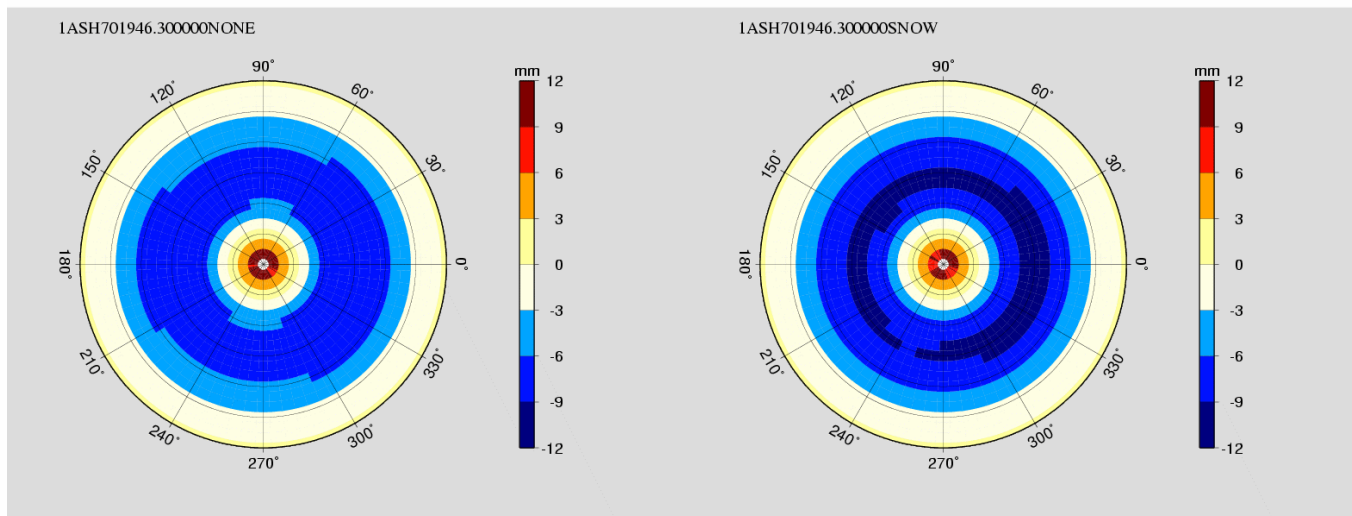
X_{rrep} : Correction de centre de phase variant avec l'azimut et l'élévation du signal émis. Exprimées dans le repère local (North-East-Up). Depuis 2006, l'IGS recommande l'utilisation de valeurs absolues de corrections. Cf. igs-mail

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 (mangement d'antenne, mise en place ou suppression d'un radôme) est essentielle.

Exemple de carte de correction d'antenne X_{map}



Synthèse : distance géométrique et applications

<i>Position satellite</i>	<i>Position station</i>	<i>Ex. d'application</i>
Figé	Estimé	PPP, réseaux locaux
Estimé	Figé	Orbitographie
Estimé	Estimé	Resaux globaux
Figé	Figé	Tomographie atmos.

Synthèse : paramètres et produits

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

- 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