

Ecole d'Eté 2012

Localisation précise par moyens spatiaux

Modélisation des mesures GNSS

Félix Perosanz François Fund

Doc: http://igsac-cnes.cls.fr/documents/gins/GPS/GINSdocGPS 1 0.pdf











Equation des mesures de pseudo-distance et de phase GNSS

$$\begin{split} P &= c(t_r - t_e) &<- \operatorname{Code} \\ L(cycles) &= \frac{1}{(2\pi)} (\Phi_r - \Phi_e) = f(t_r - t_e) + N &<- \operatorname{Phase \ en \ cycles} \\ L(m) &= \lambda L(cycles) = c(t_r - t_e) + \lambda N &<- \operatorname{Phase \ en \ mètres} \\ (t_r - t_e) &= \tau + \Delta t_r - \Delta t_e &<- \operatorname{décalages \ d'horloges} \end{split}$$

f,λ: fréquence et longueur d'onde du signal

c : vitesse de la lumière

t_r, t_e: instant de réception et d'émission du signal

 Δt_r , Δt_e : erreur d'horloge récepteur et satellite

T distance géométrique satellite-récepteur

Equation des mesures de pseudo-distance et de phase GNSS

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

$$\begin{split} &P(\boldsymbol{f}_{i}) \!\!=\!\! c \left(\boldsymbol{\tau}_{geom} \!\!+\! \boldsymbol{\tau}_{iono}(\boldsymbol{f}_{i}) \!\!+\! \boldsymbol{\tau}_{tropo} \!\!+\! \boldsymbol{\tau}_{relat}\right) \!\!+\! c \, \Delta t_{r} \!\!-\! c \, \Delta t_{e} \!\!+\! \boldsymbol{\sigma}_{P} \\ &L(\boldsymbol{f}_{i}) \!\!=\! c \left(\boldsymbol{\tau}_{geom} \!\!-\! \boldsymbol{\tau}_{iono}(\boldsymbol{f}_{i}) \!\!+\! \boldsymbol{\tau}_{tropo} \!\!+\! \boldsymbol{\tau}_{relat}\right) \!\!+\! c \, \Delta t_{r} \!\!-\! c \, \Delta t_{e} \!\!+\! \boldsymbol{\lambda}_{i} \boldsymbol{N}_{i} \!\!+\! \boldsymbol{\sigma}_{L} \end{split}$$

- + DCB
- + IFB
- + ISB

PLAN

Mesure =	Position du récepteur
+	Position satellite
+	centre de phase recepteur
+	centre de phase satellite
+	horloge récepteur
+	horloge satellite
+	Ionosphère
+	troposphère
+	relativité
+	Ambiguité
+	phase "wind-up"
+	Biais electronique récepteur
+	Biais electronique satellite

Corrections 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 émetrice

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

X : vecteur CDM - CDP

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

Position du Centre De Masse des satellites GNSS

2 options:

- Paramètre que l'on veut estimer :
 - Voir cours du Prof. Beutler
 - Identifier/estimer les paramètres nécessaires : vecteur d'état, paramètres dynamiques,...
- Utilisation des orbites précises de l'IGS
 - Directement dans le système terrestre
 - Format SP3

Corrections de centre de phase satellite

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

Xecc : Partie constante de l'eccentricité de l'antenne (dans le repére satellite).

Χπερ : 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 émetrices 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.

Corrections de centre de phase satellite

$$X_{CDP} = M.(PCO+PCV)$$

PCO :

- Phase Center Offset
- Vecteur constant [centre de masse point de référence de l'antenne]
- Exprimé dans le repère satellite

• PCV:

- Phase Center Variations
- Vecteur variable suivant la direction de visée [point de référence d'antenne – centre de phase]
- Exprimé dans le repère satellite
- Pour chaque fréquence

• M:

- Matrice de passage du repère satellite au repère de calcul
- Directement liée à l'attitude des satellites

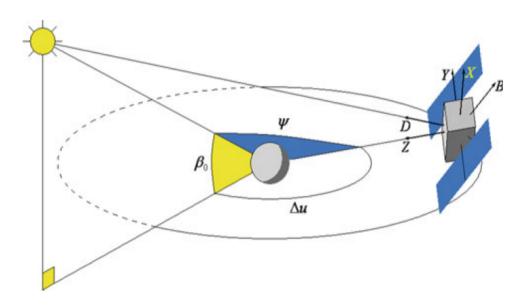
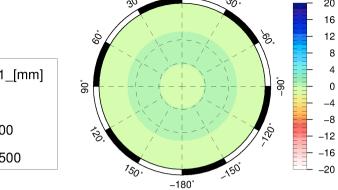


Fig. 1 Relative geometry of Sun, Earth and GPS satellite

PCO/PCV

- Les valeurs de PCO et de PCV peuvent être estimées (très lourd) ou appliquées à partir de valeurs publiées par l'IGS
- Les valeurs IGS sont issues d'un calcul et non d'un étalonnage de l'antenne avant lancement
- Les PCO et le facteur d'échelle du système de référence terrestre calculé avec des données GNSS sont parfaitement corrélés
- d'où l'indetermination du scale GNSS
- Les valeurs publiées par l'IGS sont au format ANTEX.
- La version actuelle (igs08.atx)
- il est important d'utiliser des produits orbite/horloge et ANTEX cohérents !

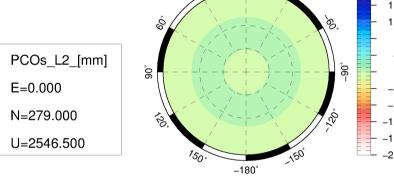
PCO/PCV



 $PCVs_IIA_G10_L1_[\rlap{mm}]_Cutoff_72_GPS$

PCOs_L1_[mm] E=0.000 N=279.000 U=2546.500

 $PCVs_IIA_G10_L2_[mm]_Cutoff_72_GPS$ PCOs_L2_[mm] E=0.000 N=279.000 U=2546.500

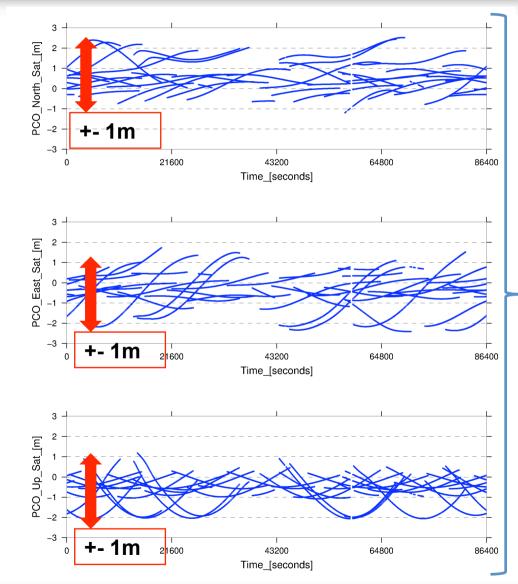


 $PCVs_IIA_G10_L3_[mm]_Cutoff_72_GPS$ 20 16 PCOs_L3_[mm] .06 N=279.000 U=2546.500

-180°

E=0.000

PCO/PCV (igs08.atx)

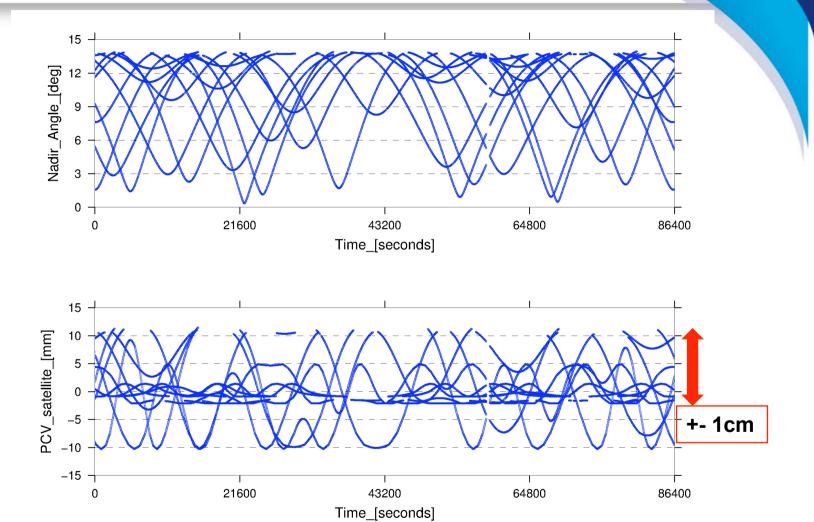


Séries temporelles des corrections de PCO satellites d'un point de vue récepteur

/!\ fonction de

- l'attitude du satellite
- l'angle d'élévation du satellite

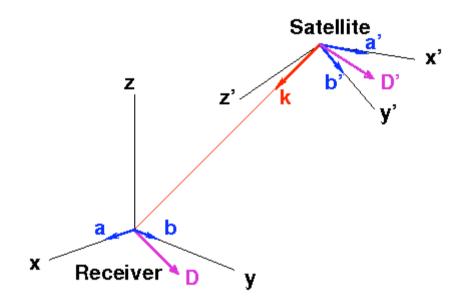
PCO/PCV de la constellation GPS vus d'une station



Des travaux en cours montrent qu'il existe une dépendance azimutale des PCV satellites qui peut être observée par traitement (Cf. T. Springer IGS workshop 2012)

Phase-Wind-Up (PWU)

PWU : effet de rotation relatif entre le satellite et le récepteur



$$\Delta\Phi = 2n\pi + \delta\varphi$$

$$\mathbf{avec}:$$

$$\delta\varphi = sign(\xi). \arccos\left(\frac{\overrightarrow{D'}.\overrightarrow{D}}{\left\|\overrightarrow{D'}\right\|.\left\|\overrightarrow{D}\right\|}\right)$$

$$\mathbf{et}:$$

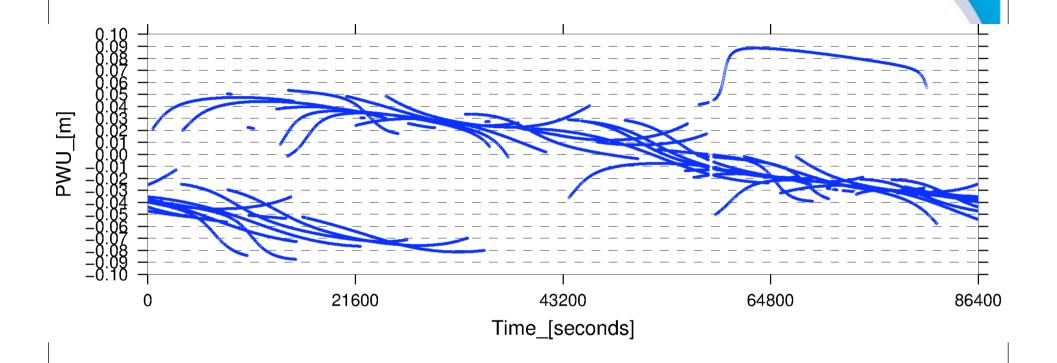
$$\xi = \hat{k}. \left(\overrightarrow{D' \times D} \right)$$

N est un compteur de cycle pouvant être initialisé à zéro

$$n = nint\left(\frac{\Delta\Phi_{t-1} - \Delta\Phi_t}{2\pi}\right)$$

Calculé sur L1, L2 et éventuellement sur les combinaisons de fréquences

Phase-Wind-Up (PWU)



Séries temporelles de l'effet de Phase-Wind-Up /!\ Max 1 Cycle de NL (~10.7cm)

Phase-Wind-Up (PWU)

Cas d'un récepteur mobile :

L'effet de PWU est aussi fonction de la rotation relative du récepteur par rapport à la surface terrestre.

Cette rotation affecte chaque mesure GNSS en fonction de la direction du vecteur [antenne émettrice – antenne réceptrice].

En l'absence d'information sur l'attitude de l'antenne réceptrice, l'effet de PWU récepteur est absorbé par le paramètre d'horloge récepteur.

Dans tous les cas, il n'est pas d'estimer des paramètres supplémentaires.

Traversée de l'atmosphère terrestre : la troposphère

S'étend de 0 à 10/12 km d'altitude Milieu électroniquement neutre

Indice de réfraction dépend seulement de pression partielle air sec, température et pression partielle vapeur d'eau :

$$n = k_1 \cdot \frac{P_S}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2}$$



Troposphère = milieu non dispersif

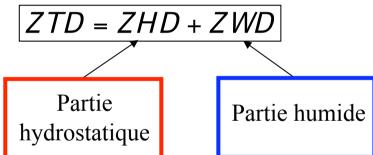
Au zénith : effets troposphériques valent : $ZTD = 10^{-6} \cdot \int n.ds$

Peuvent atteindre 2/3 m au zénith et jusqu'à 30 m à basses élévations !!

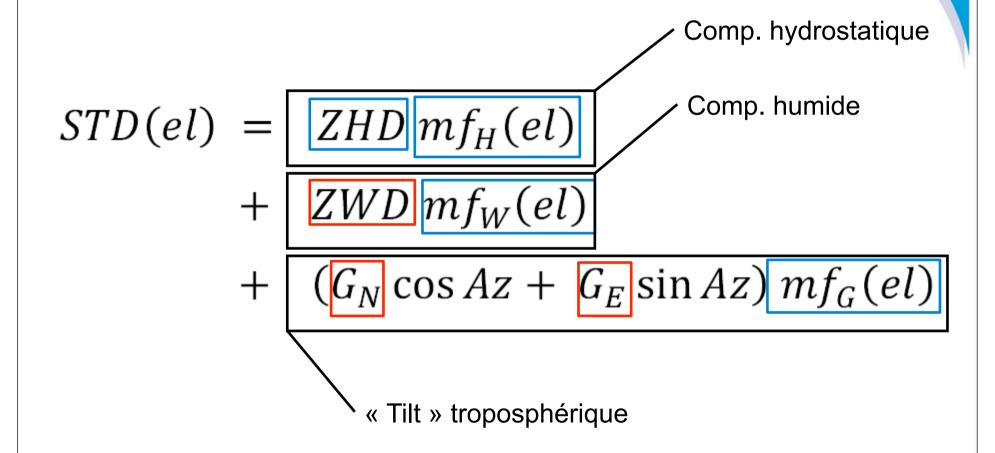
Problème principal: détermination de la contribution humide

Biais troposphérique

- La modélisation de la composante humide est difficile (Cf. cours Prof. Kasser)
- •A ce jour, il est nécessaire d'ajuster des paramètres spécifiques pour connaitre ce biais
- une autre option consiste a éliminer le biais par différentiation entre deux récepteurs proches



Modèle et paramètres du biais troposphérique



Herring et al. (2006)

Modèle et paramètres du biais troposphérique

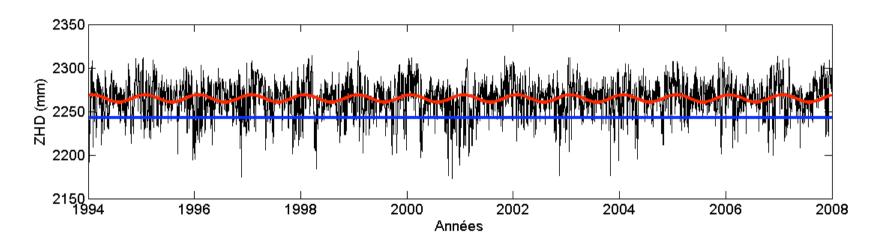
$$mf_{H/W}(el) = \frac{1 + \frac{a_{H/W}}{1 + \frac{b_{H/W}}{1 + c_{H/W}}} A \text{ estimer}}{\sin(el) + \frac{a_{H/W}}{\sin(el) + \frac{b_{H/W}}{\sin(el) + c_{H/W}}}}$$

Boehm et al. (2004)

$$mf_G(el) = \frac{1}{\sin(el)\tan(el) + 0.003}$$

Chen and Herring (1997)

Allongements troposphériques

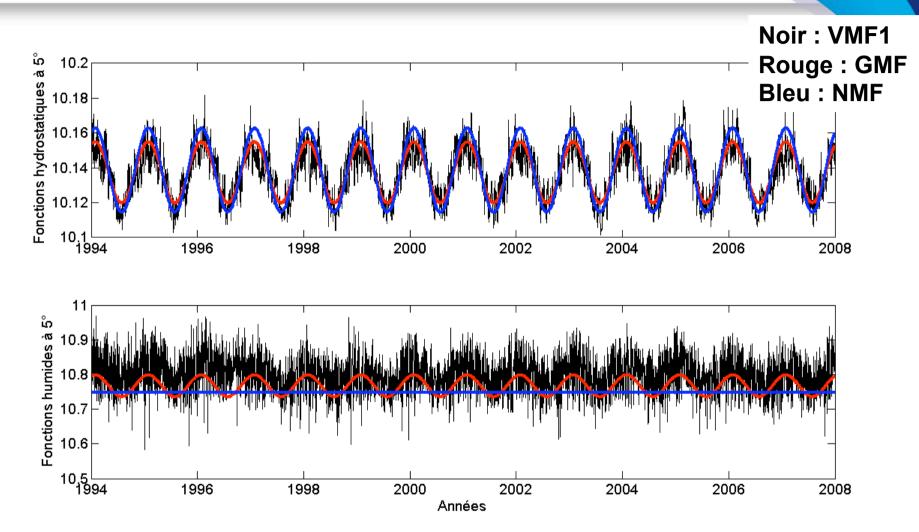


ZHD au Mans entre 1994 et 2008

Noir : ZHD tirés de VMF1 Rouge : ZHD tirés de GPT

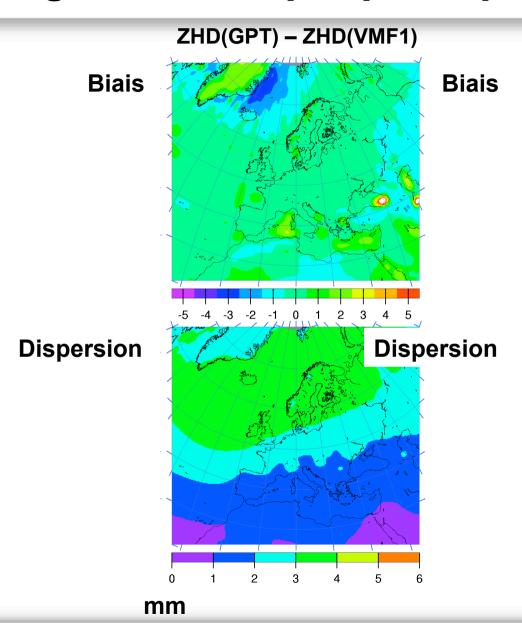
Bleu : ZHD tirés de pressions et températures standards (SPT)

Allongements troposphériques



MF hydro./humides à 5° d'élévation au Mans entre 1994 et 2008

Allongements troposphériques



Impacts d'une erreur de ZHD sur la détermination de la hauteur Cutoff: 5°

Perspectives modélisation biais troposphérique

- Raffinements des modèles numériques météo
- Raffinement des modèles de correction

• Reste un problème !... Et nécessite l'ajustement de paramètres

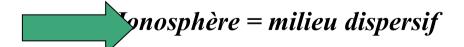
Biais ionosphérique

Indice de réfraction modélisé par un développement polynomial :

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \approx 1 + \frac{c_2}{f^2}$$
 r les ondes porteuses (L1 et L2)

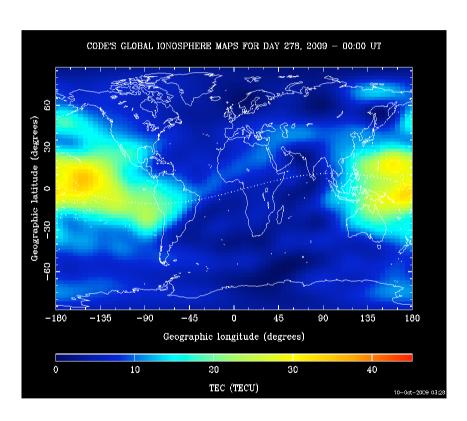
$$\left| n_{gr} \approx 1 - \frac{c_2}{f^2} \right|$$
 pour les ondes modulées (C/A et P)

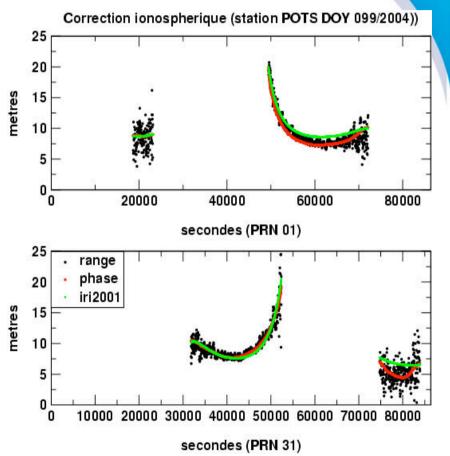
Les ondes L1 et L2 sont accélérées (phase sous-estimée) es ondes de code sont ralenties (pseudo-distance surestimée) Effets iono dépendent donc de la fréquence du signal



De l'ordre de 0 à 15 m au zénith et jusqu'à 45 m à basse élévation !!

Biais ionosphérique





Biais ionosphérique

- La prise en compte des termes de deuxième et troisième ordre est a présent recommandée par l'IGS
- Le formalisme est décrit E. Petrie (2010) :

A Review of Higher Order Ionospheric Refraction. Effects on Dual Frequency GPS. Elizabeth J. Petrie, Manuel Hernandez-Pajares, Paolo Spalla, Philip Moore, Matt A. King. Surv Geophys DOI 10.1007/s10712-010-9105-z

Pas d'ajustement de paramètres supplémentaires nécessaire

Effet relativistes sur les mesures GNSS

Relat. restreinte

Relat. générale

Satellite clock in Earth-Centered Inertial (ECI) frame of reference $t = \text{coordinate time read by clocks of the coordinate time read by clocks o$

$$\Delta t = \int_{A}^{B} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{v^{2}}{c^{2}} + \frac{1}{c^{2}} (U - W_{0}) \right\} dt$$
time dilation redshift

t =coordinate time read by clocks on the geoid

 τ = proper time read by satellite clock

 $v = \text{satellite velocity}, 0.5 \, v^2 \, / \, c^2 \cong 7.2 \, \mu \text{s/day}$

 $U = \text{gravitational potential}, U / c^2 \cong 14.4 \,\mu\text{s/day}$

 W_0 = geopotential, W_0 / $c^2 \cong 60.2 \,\mu\text{s/day}$

Light signal in rotating Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) frame of reference

$$\Delta t = \frac{D}{c} + \frac{2 \omega A}{c^2}$$

t = coordinate time read by clocks on the geoid

D = geometric distance from satellite to receiver at coordinate time of transmission

 ω = angular velocity of Earth

Rotation référentieL terrestre vs inertiel

Sagnac effect

A = equatorial projection of triangle formed by satellite, receiver, and center of Earth

Relativistic effects incorporated in the GPS (satellite clock – geoid clock)

Relat. restreinte orbite circulaire

→ Time dilation:

 7.2 μs per day + 45.8 μs per day

Gravitational redshift: Net secular effect: + 38.6 μs per day

Relat restreinte effet d'excentricité Residual periodic effect: Sagnac effect:

46 ns amplitude for excentricity e = 0.02133 ns maximum for receiver at rest on geoid



Termes relativistes constants

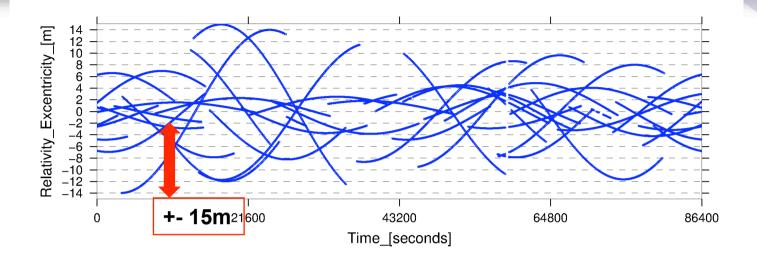
- L'effet constant (« net secular effect ») de 38,6 µs est équivalent a un décalage de fréquence
- Les satellites GNSS émettent à des fréquences qui sont décalées de leurs fréquences nominales pour corriger cet effet
- Exemple GPS:
 - Fréquence nominale utilisée dans les traitements: 10.23 MHz
 - Fréquence réelle d'émission :
 - Facteur: $38,6 \cdot 10^{-6} / 86400 = 4.465 \cdot 10^{-10}$
 - $f = 10.23 \text{ MHz} \times (1 4.465 \cdot 10^{-10})$ = 10.22999999543 MHz
- La partie constante des corrections de relativité restreinte et générale (orbite circulaire, Terre sphérique) sont prises en compte par défaut et ne doivent pas être corrigés par l'utilisateur

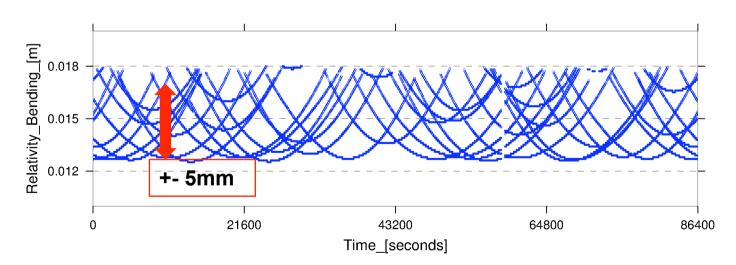
Termes relativistes variables

- Residual periodic effect: 46 ns amplitude for excentricity e = 0.02
- 2. La correction relativiste liée à la courbure du trajet sous l'action gravitationnelle de la Terre est calculée selon:

$$d_{relat} = 2\frac{GM^{0.5}}{c^2} \log \left(\frac{||\vec{Pos_1}|| + ||\vec{Pos_2}|| + d_{geom}}{||\vec{Pos_1}|| + ||\vec{Pos_2}|| - d_{geom}} \right)$$
(2.13)

Relativité





Pas d'ajustement de paramètres supplémentaires nécessaire

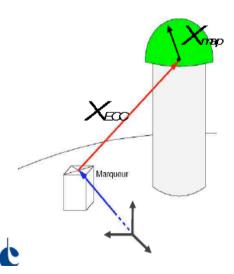
Corrections de centre de phase récepteur

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

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

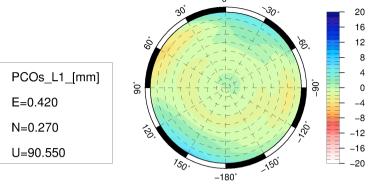
X_{mo}: Correction de centre de phase variant avec l'azimut et l'élévation du signal émis. Exprimées dans le repère local (North-East-Up). Depuis 2006, l'IGS recommande l'utilisation de valeurs absolues de corrections. Cf. igs-mail

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



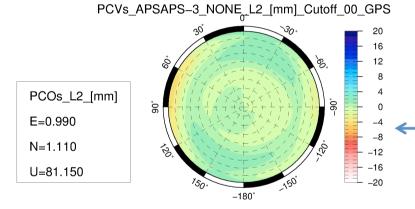
La connaissance de l'historique des eccentricités (déplacement ou changement de l'antenne) et des corrections de centre de phase (changement d'antenne, mise en place ou suppression d'un radôme) est essentielle.

PCO/PCV (igs08.atx) PCVs_APSAPS-3_NONE_L1_[mm]_Cutoff_00_GPS



L1

LC



Antenne: GPS L2

Modèle: APSAPS-3

Radôme: aucun

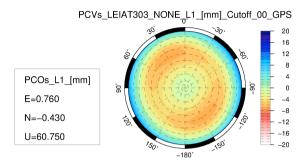
PCVs_APSAPS-3_NONE_L3_[mm]_Cutoff_00_GPS PCOs L3 [mm] E = -0.461N = -1.028U=105.080

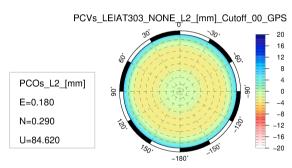
Les antennes de récepteurs géodésiques ont été étalonnées.

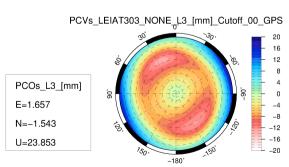
Il n'est pas nécessaire d'ajuster des paramètres supplémentaires

PCO/PCV (igs08.atx)

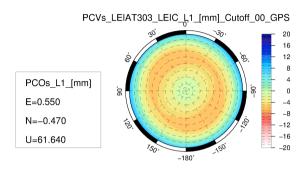
Antenne: GPS; Modèle: LEIAT303

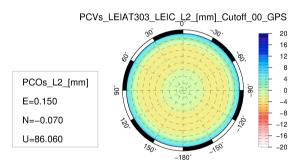


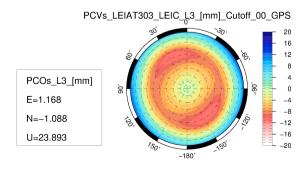








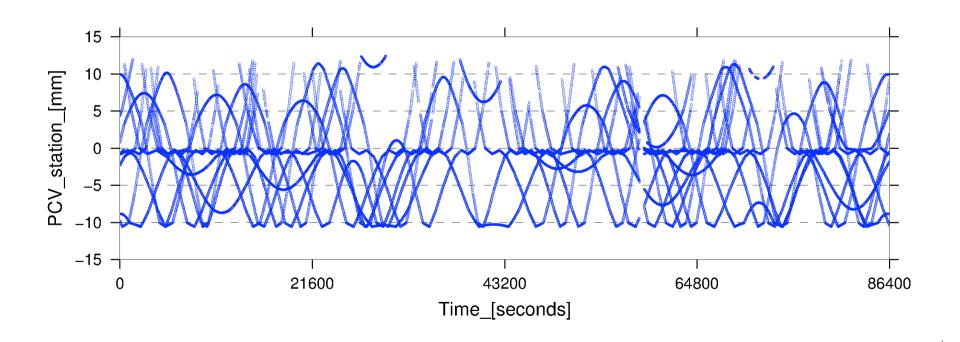




Radôme: LEIC

PCO/PCV (igs08.atx)

Séries temporelles des PCV stations (fonction de l'ange d'élévation du satellite)



Pas d'ajustement de paramètres supplémentaires nécessaire

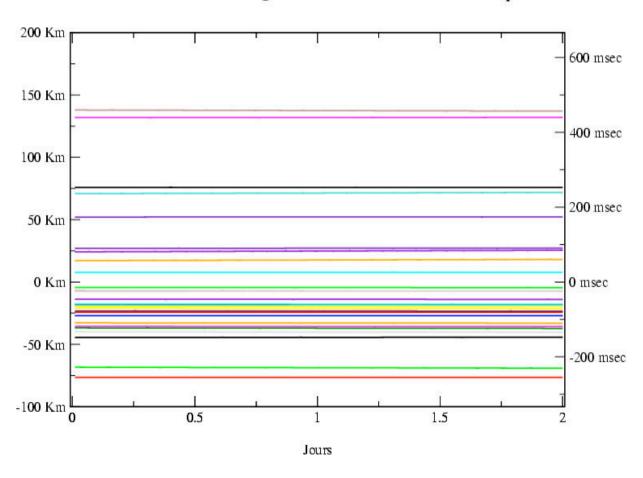
Biais d'horloge et ambiguïtés

LES HORLOGES seront ESTIMEES (à partir des mesures) ou ELIMINEES (via des combinaisons de mesures)

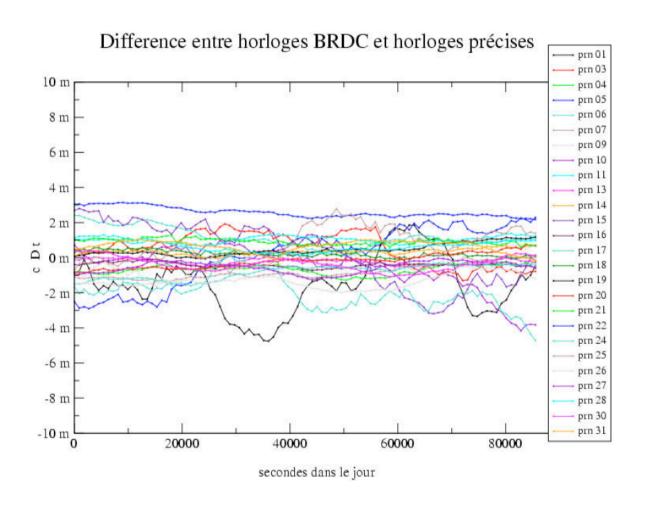
$$\begin{split} &P(f_i) \!=\! c \left(\tau_{geom} \!+\! \tau_{iono}(f_i) \!+\! \tau_{tropo} \!+\! \tau_{relat}\right) \!+\! c \, \Delta t_r \!-\! c \, \Delta t_e \!+\! \sigma_P \\ &L(f_i) \!=\! c \left(\tau_{geom} \!-\! \tau_{iono}(f_i) \!+\! \tau_{tropo} \!+\! \tau_{relat}\right) \!+\! c \, \Delta t_r \!-\! c \, \Delta t_e \!+\! \lambda_i \! \! \! N_i \!+\! \sigma_L \end{split}$$

- Commun à toutes les mesures du satellite e
- Commun à toutes les mesures du récepteur r
- Commun à toutes les mesures du passage

Différences entre horloges des satellites GPS et Temps GPS

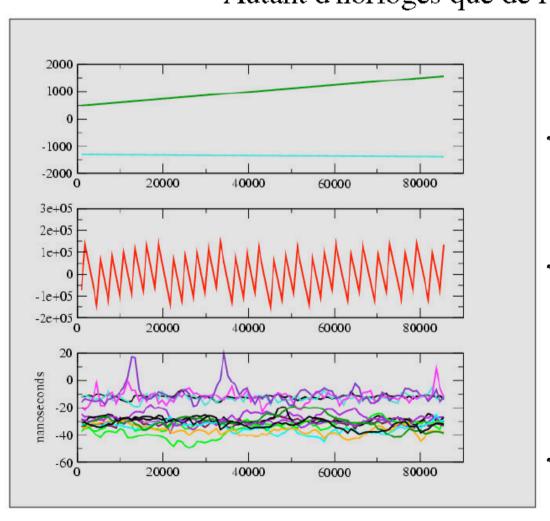


Horloges radio-diffusées



Comportement d'horloges de récepteurs géodésiques

Autant d'horloges que de récepteurs :



<--- Dérives et biais

<--- Dérives et recalage régulier

<---- Horloges "calées" sur TGPS

« Hardware biases »

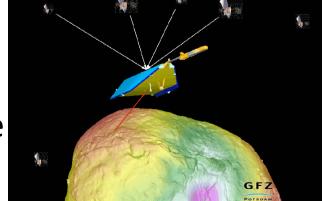
Cf. cours Rolf Dach

- DCB : Differential Code Bias
 - Lié à la technique de mesure de la pseudo-distance du récepteur
 - En DD ne s'elimine pas entre deux récepteurs ayant des startegie differentes!
 - En ZD biaise les ambiguités (qui ne sont plus entières !)
 - Correction : cc2noncc
- ISB : Inter System Bias
 - Par exemple entre GPS et GLONASS
 - Aujourd'hui des ISB sont estimés par type de récepteur et par satellite
- IFB: Inter frequency bias
 - Par exemple entre les mesures GPS : L1, L2, L5
 - Cf. O. Montunbruck et al. 2012

Mesure	=		Position du récepteur
		+	Position satellite (Cf. Cours G. Beutler)
		+	centre de phase recepteur
		+	centre de phase satellite
		+	horloge récepteur
		+	horloge satellite
		+	Ionosphère
		+	troposphère
		+	relativité
		+	Ambiguité
		+	phase "wind-up"
		+	Biais electronique récepteur
		+	Biais electronique satellite

Applications

- Étude de la cinématique terrestre :
 - Cf. cours Zuheir Altamimi
 - Estimation simultanée des orbites, du réseau et des EOPs
- modèles globaux de champ de gravité terrestre
 - Cf. cours Adrian Jaggi
 - Estimation simultanée d'orbites
 LEO et des paramètres du modèle



Applications de temps/fréquence

- Un traitement rigoureux des mesures GNSS permet de calculer le Δt récepteur avec une précision de quelque dizaines de picosecondes!
- Les horloges de deux récepteurs « indépendants » peuvent être comparées à ce niveau de précision
- Les laboratoire temps/fréquence utilisent des oscillateurs atomiques comme horloges de récepteurs GNSS :
- Le comportement d'horloges atomiques peuvent etre comparées en permanence, partout dans le monde



Les GNSS sont un outil essentiel dans les laboratoires

GNSS = sondeur atmosphérique

A partir d'un réseau de récepteurs GNSS géodésiques de coordonnées connues et de satellites LEO il est possible de mesurer :

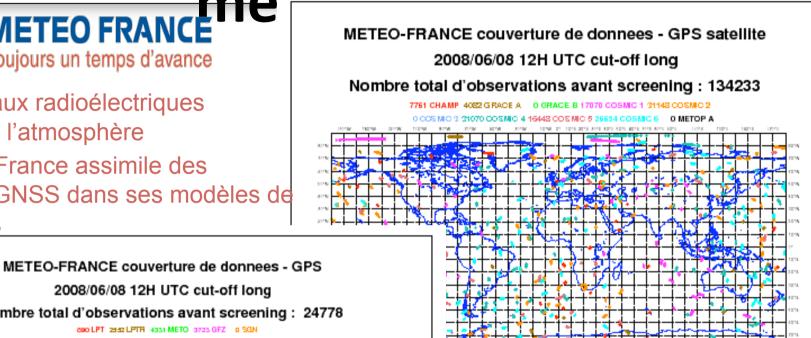
l'état de l'ionisation de l'atmosphère

- l'indice de réfraction dans la transcabhara (Т/D/Ц) Referencing GPS GPS satellites าta CHAMP Gradient ďu bending angle Gradient vertica horizonte COSMIC, CHAMP, GRACE, METOP. Occulting GPS GPS receivers GFZ

L'utilisation des GNSS pour la



- les signaux radioélectriques traversent l'atmosphère
- MFTFO France assimile des données GNSS dans ses modèles de prévisions



2008/06/08 12H UTC cut-off long Nombre total d'observations avant screening : 24778 890 LPT 2552 LPTR 4331 METO 3723 GFZ 0 SQN 832 COP In ASI I BER KNAM I 850 KHM1 230 IEEC

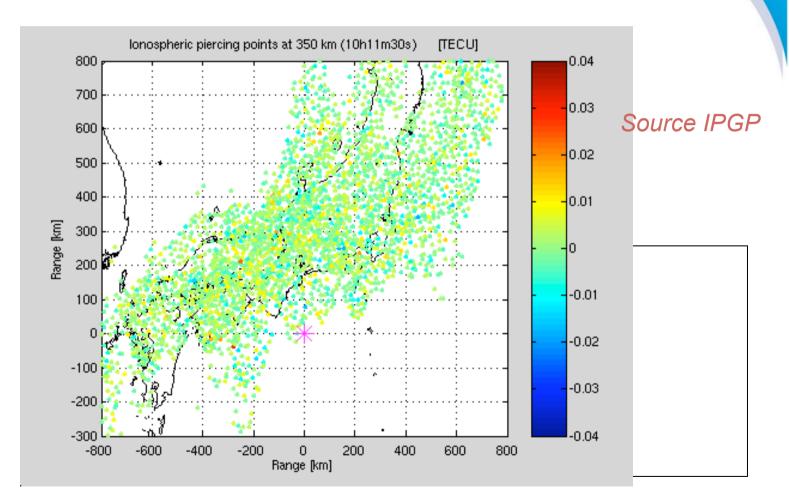
Données de sondage au limbe

Données sol

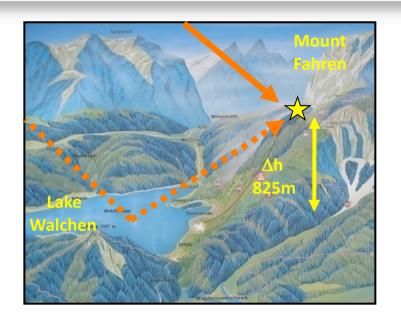
Courtesy Jean PAILLEUX, Météo France

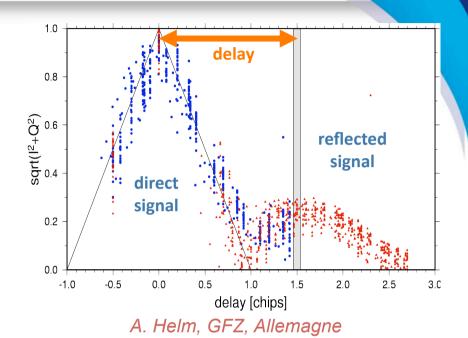
Tomographie GNSS de

- * Détection d'onde sismique dans l'ionosphère avec des mesures GNSS
- Recherche de signaux précurseurs

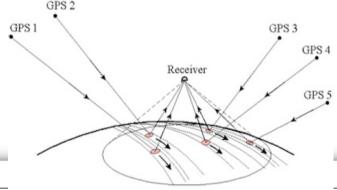


Principe et intérêt de la réflectométrie



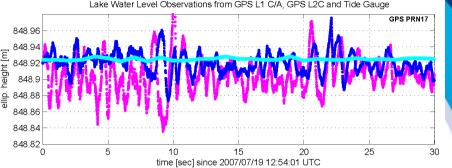


- Exploitation des multi-trajets
- Le signal réfléchi par l'eau liquide, solide ou le sol permet de mesurer :
 - La hauteur du récepteur par rapport à la surface
 - l'humidité des sols
 - salinité
 - courants, rugosité,...

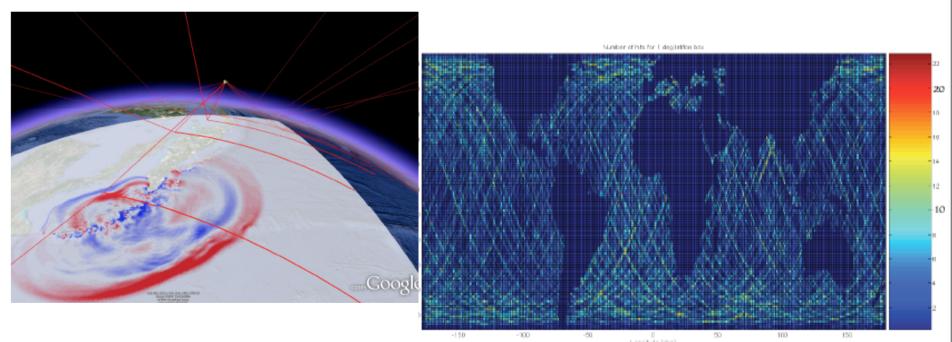


Mesure Altimétrique par GNSS-R (Réfléchi)

- Infrastructure au sol pour l'altimétr E
 - océanique en zone côtière
 - des lacs



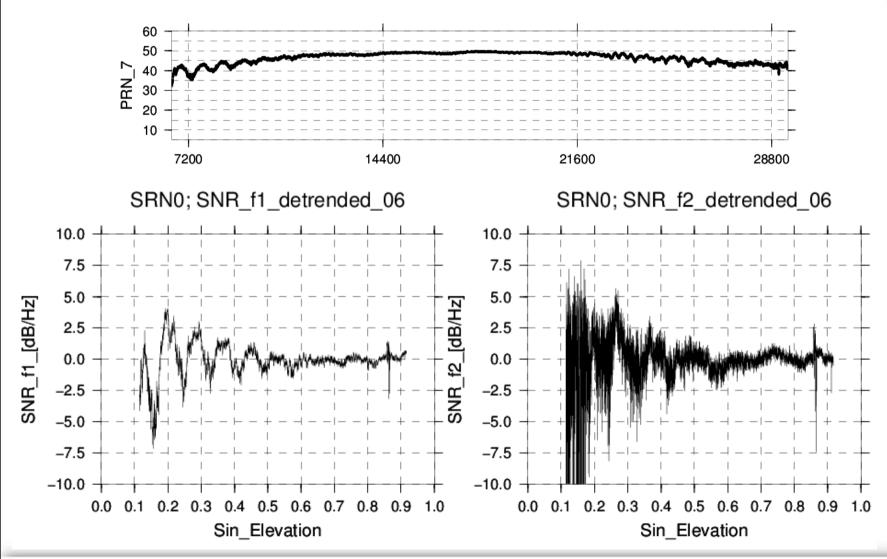
• Constellation de LEO pour une surveillance globale et instantanée des océans (courants, niveau moyen, surveillance des tsunamis,...)



Simulation de couverture sur une période de 4h et une constellation de 10 satellites.

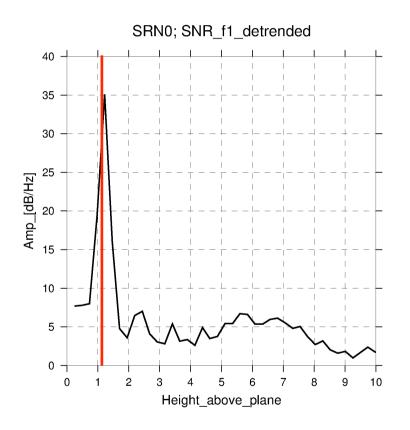
R. Stosius 2009, GFZ

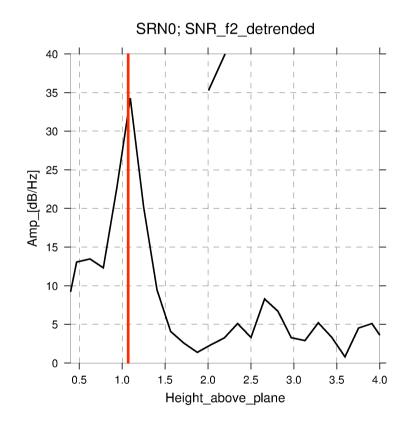
Utilisation du SNR pour la réflectométrie par GNSS



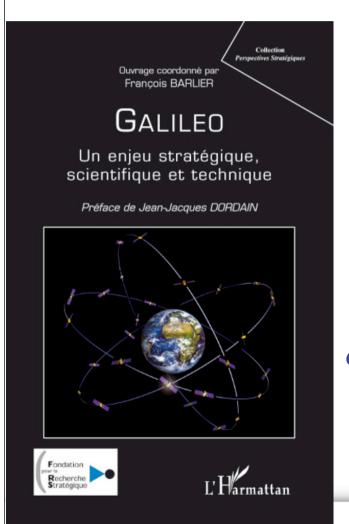
Utilisation du SNR pour la réflectométrie par GNSS

Utilisation du SNR pour la réflectométrie par GNSS Ex : antenne fixe au-dessus de l'Amazone





Hauteur « vraie » : 1.06 m Exactitude fonction de la durée du passage et de la méthode d'analyse spectrale



« La construction d'un repère spatio-temporel sur la Terre et dans son environnement, en faisant appel aux techniques spatiales, n'est pas une entreprise occasionnelle ; c'est une évolution majeure et irréversible du système technique sur lequel repose le fonctionnement de notre société ; dans une perspective historique, c'est la solution ultime d'un problème auquel l'homme est confronté depuis les origines de la civilisation : connaître, dans l'espace et dans le temps, sa position et celle des engins qu'il fabrique »