



Retard troposphérique et paramétrisation du traitement GPS.

Marie-Noëlle Bouin

IGN/LAREG

Olivier Bock

SA



17-19/11/2004

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 1



Influence des paramètres de traitement GPS sur les résultats : ZTDs, positions

- Rappels :
 - effet de l'atmosphère sur les signaux GPS
 - modélisation de l'atmosphère dans les logiciels GPS et estimation des retards troposphériques (ZTD) - stratégies couramment utilisées dans les logiciels DD
- Corrélations ZTD / autres paramètres
- Exemples de résultats :
 - Impact des positions a priori des stations / contraintes sur les ZTD / positions finales de stations
 - Tests de cut off

17-19/11/2004

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 2



Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS

- modélisation

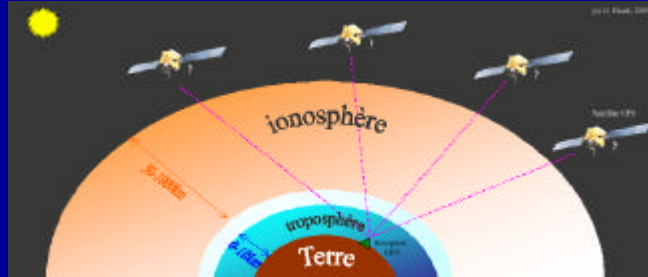
Corrélations
ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

17-19/11/2004



- Retard ionosphérique: dispersif donc éliminable par combinaison linéaire.

- Retard troposphérique:

$$d_{tropo}(\mathbf{q}) = 10^{-6} \int_0^{\infty} N(s) ds \approx ZTD \times m(\mathbf{q})$$

Inconnue: ZTD, **modélisé et estimé** lors du traitement GPS

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 3



Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS

- modélisation

Corrélations
ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

17-19/11/2004

Modélisation dans les logiciels GPS

$$\Delta L(\mathbf{q}) \equiv ZTD \times m(\mathbf{q})$$

$$\equiv SHD + SWD \equiv ZHD \times m_h(\mathbf{q}) + ZWD \times m_w(\mathbf{q})$$

- Retard oblique
 - 3 types de fonctions de projection

Pour une couche homogène horizontale:

$$m(\mathbf{q}) \equiv \frac{STD}{ZTD} = \frac{1}{\cos(\mathbf{q})}$$

Dans la plupart des logiciels GPS, le retard troposphérique est traité en deux étapes:

- Correction a priori : ZHD ou ZTD (plusieurs possibles), $m0(\theta)$
- Estimation : ZTD ou ZWD (1 seul), $m(\theta)$
 $m(\theta)$: on utilise soit le même modèle que pour $m0(\theta)$, soit un modèle complémentaire. Ex: $m0(\theta) = NMF_h$ et $m(\theta) = NMF_w$.

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 4



Logiciels et stratégies recommandées

Logiciel	ZTD × m ⁰ (θ)	δZTD	m(θ)
Bernese Software (ancienne : 4.2)	Pas de correction a priori	Constant par morceaux Δt = 2H	NMF_h
Bernese Software (récente : 5.0)	Saastamoinen_hydro × NMF_h	Constant par morceaux Δt = 2H	NMF_w
GAMIT (ancienne : 9.6)	Saastamoinen_hydro × NMF_h	Linéaire / Gauss Markov Δt = 2H	NMF_w

Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS

- modélisation

Corrélations ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

17-19/11/ 2004

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 5



Corrélations : analyse mathématique du problème

- On peut modéliser la phase calculée par:

$$\Phi_c(\theta) = \Phi_c^0(\theta) + \delta H \cos\theta + \delta ZTD \times m(\theta) + \delta C$$

où θ est la distance zénithale, $m(\theta)$ la fonction de projection, et δH , δZTD et δC les paramètres (hauteur, ZTD et horloge) qui sont soit estimés, soit fixés.

- Pour une mesure proche du zénith, on a:

$$\cos\theta \approx 1 - \theta^2 / 2$$

$$m(\theta) \approx 1 / \cos\theta \approx 1 + \theta^2 / 2$$

i.e., on ne peut pas distinguer une variation de hauteur d'une variation de ZTD (mis à part le signe). L'estimation simultanée des trois paramètres donne la solution suivante:

$$\delta \hat{H} \approx \delta Z \hat{T} D$$

$$\delta \hat{C} \approx -2\delta Z \hat{T} D$$

- Résultats de Santerre, 1991
- La corrélation entre les paramètres peut être totalement éliminée si la hauteur ou le ZTD est fixé. Mais : un biais sur le paramètre fixé va se répercuter sur les autres paramètres estimés (ex : effets de système de référence, transformations globales de plusieurs cm).

Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS

- modélisation

Corrélations ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

17-19/11/ 2004

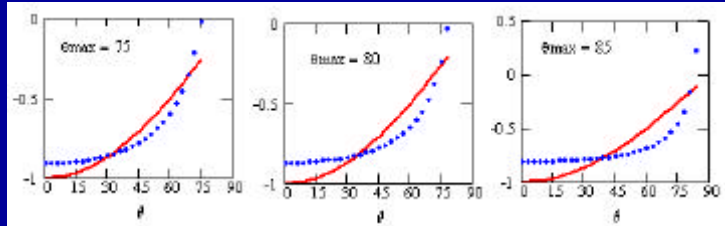
Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 6



Impact d'un biais en hauteur sur le ZTD estimé

- Supposons la hauteur fixée, avec un biais $\delta H=1\text{cm}$, et l'ajustement des paramètres ZTD et C à partir de mesures allant du zénith à un angle de coupure θ_{\max} . Ce biais se traduit par une erreur sur la phase en $\delta H \cos(\theta)$ qui peut être partiellement compensée par un décalage d'horloge δC et un biais en ZTD (δZTD):



- Le résultat dépend de l'angle de coupure θ_{\max}
P.ex., pour $\theta_{\max} = 80^\circ$, $\delta ZTD = 2.2 \text{ mm}$ et $\delta C = -1.09 \text{ cm}$.

$$\frac{\delta H \cos(\theta)}{\cos(\theta)} + \delta C$$

Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS
- modélisation

Corrélations ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

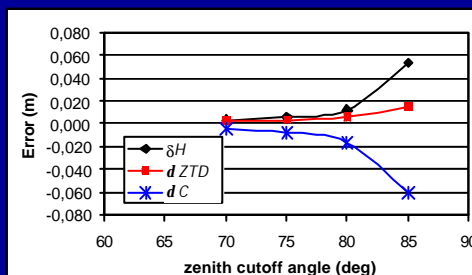
M.N. Bouin et O. Bock - 7

17-19/11/2004



Impact d'une erreur de fonction de projection

- Supposons que le modèle de fonction de projection soit différent de la réalité. Cela introduit une erreur dans la phase calculée qui dépend de l'angle zénithal. Cet effet ne peut pas être compensé exactement par le modèle de la « phase calculée » $\Phi_c(\theta)$. Cette erreur produit un biais sur la hauteur, le décalage d'horloge et le ZTD estimé.



Modèle (Davis, 1991):

$$m(q) = \frac{1}{\cos(q) + \frac{a}{\cos(q)}}$$

On suppose une erreur de 5% sur a, avec un ZTD = 230 cm

Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS
- modélisation

Corrélations ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock - 8

17-19/11/2004



Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS
- modélisation

Corrélations ZTD/H

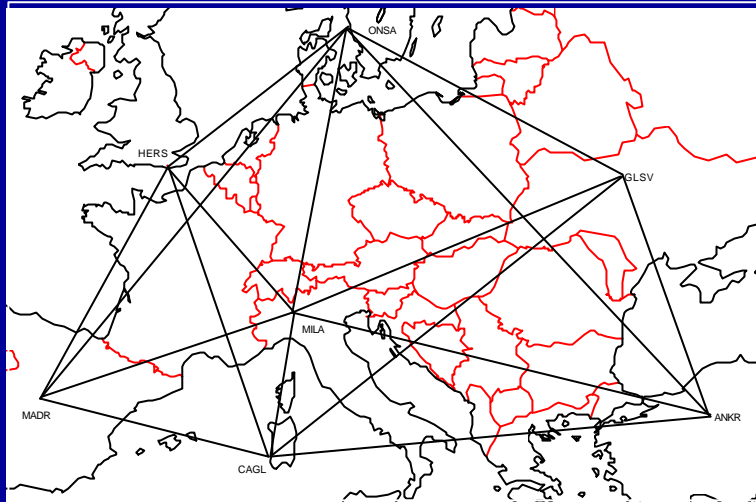
Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

17-19/11/ 2004

Réseau utilisé : Milan (RS) et stations permanentes européennes.



Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 9



Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS
- modélisation

Corrélations ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

17-19/11/ 2004

Réseau test : Milan (RS) et stations permanentes européennes.

• Paramètres :

- traitement Bernese 4.2, orbites IGS précises, EOP IERS B, stratégie QIF

- positions a priori : ITRF2000 ou résultats d'un calcul décontraint

- contraintes : de 1 m à 0.1 mm

- cut off : 5, 10, 15 et 20°

- Modèle tropo : SAAS-1/cosZ, SAAS-NMFh, No-NMFh

• Résultats :

- ZTD, H_brut, H_ITRF (ADDNEQ)

- Répétabilité ITRF (sol libre) : 2.3/1.2/3.6 mm en moyenne

- ZTD (GPS – RS) : -2 mm

Attention, il ne s'agit pas des "meilleurs" paramètres possibles (Berne 4.2, modèle tropo, réseau, pas de gradient) → tests de sensibilité.

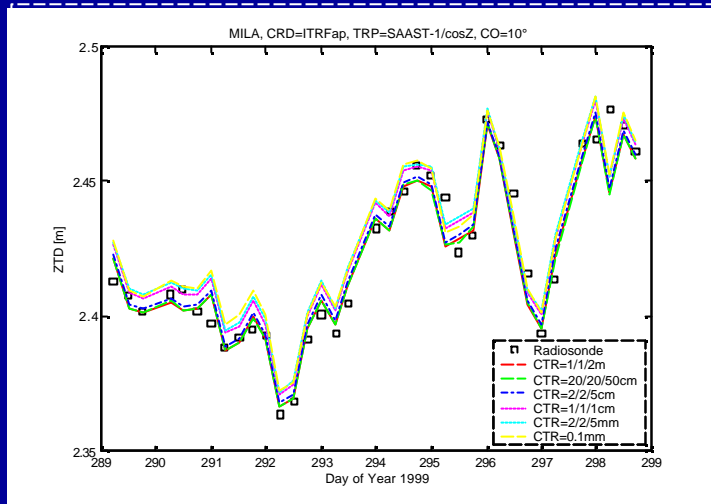
Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 10



Variation avec le SR et les contraintes

- coordonnées a priori = ITRF ou ajustées, contraintes variables entre 0.1mm et 1/1/2m en N/E/U.
- Résultats: ZTD GPS comparé à ZTD radiosondage, campagne MAP.



Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 11

Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS

- modélisation

Corrélations ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

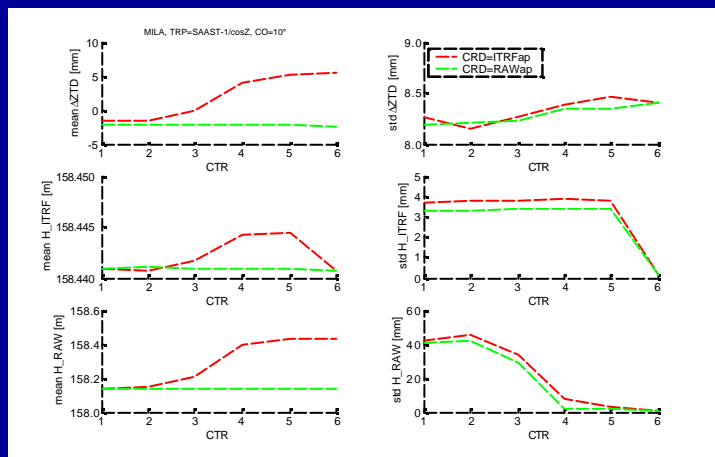
Conclusions

(O. Bock et M.N. Bouin, résultats présentés à l'EGS, 2003.)

17-19/11/ 2004



Variation avec le SR et les contraintes : station de Milan



- Effet de réseau : décalage important H_brut / H_ITRF

- Corrélation positive ZTD/H_brut/H_ITRF

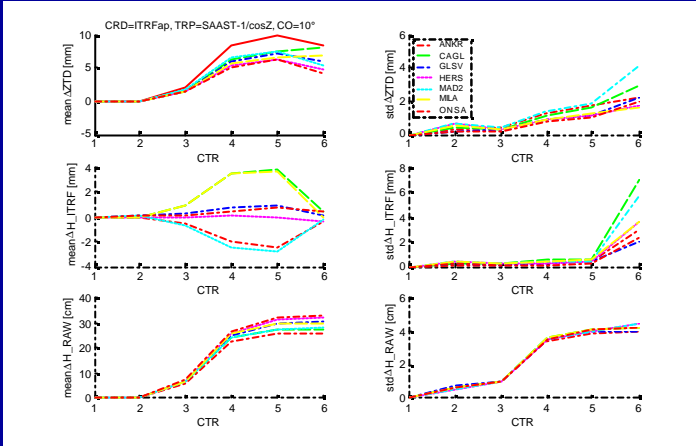
Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 12

17-19/11/ 2004



Variation avec le SR et les contraintes : toutes les stations.



- Effet de réseau : corrélation positive H_brut / ZTD
- Effets de sites : corrélation H_ITRF / ZTD (dépend des stations)

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 13

17-19/11/ 2004

Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS
- modélisation

Corrélations ZTD/H

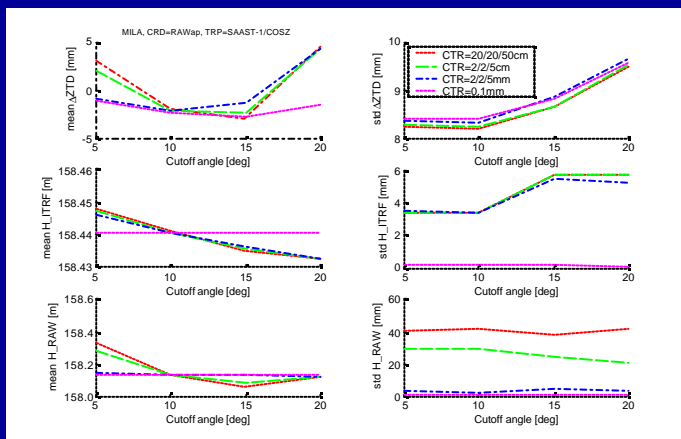
Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions



Tests de cut off : Milan, avec et sans contraintes



- Corrélations positives ZTD / H_brut
- Pas d'effet sensible sur H_ITRF
- Avec contraintes fortes : pas ou peu de variations

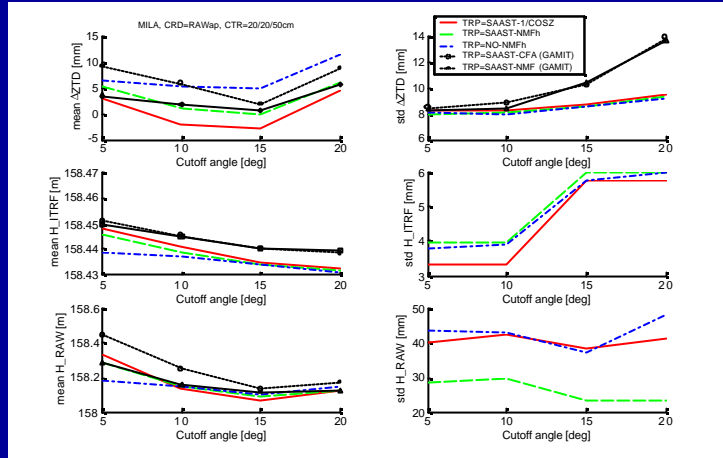
Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 14

17-19/11/ 2004



Tests de cut off et fonctions de projection



Rappels :

- effet de l'atmosphère sur le GPS

- modélisation

Corrélations ZTD/H

Résultats

- effets contraintes et position a priori
- cut off tests

Conclusions

• Résultats Bernese / GAMIT

- Variabilité plus importante avec modèle moins adapté
- Effets à 5° : erreurs de modélisation – à 20° : corrélations

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 15

17-19/11/ 2004



Conclusions

- Ne pas utiliser avec des contraintes fortes de positions a priori qui ne soient pas ajustées par un premier calcul (décontraint).
- Corrélation forte entre hauteur H_{brut} et ZTD (positive)
- Variations temporelles : corrélation négative entre hauteur H_{ITRF} et ZTD
- La règle habituelle « facteur 1/3 » entre le ZTD et la hauteur (Santerre, 1991) n'est valable que pour du PP et des conditions théoriques.

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock- 16

17-19/11/ 2004



Références bibliographiques

- Bock, O. and Doerflinger, E., "Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning," *Phys. Chem. Earth*, 26, 373-383, 2001.
- Bock, O., Tarniewicz, J., Thom, C., and Pelon, J., "Effect of small-scale atmospheric inhomogeneity on positioning accuracy with GPS," *Geophys. Res. Lett.*, 28, No. 11, p. 2289, 2001.
- Bock, O., Tarniewicz, J., Thom, C., Pelon, J., and Kasser, M., "Study of external path delay correction techniques for high accuracy height determination with GPS," *Phys. Chem. Earth*, 26, 165-171, 2001.
- Davis, J.L., T. Herring, I. Shapiro, A. Rogers and G. Elgered, "Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline lengths," *Radio Sci.* 20, 1593-1607, 1985.
- Davis, J.L., T. Herring, I. Shapiro, "Effects of atmospheric modeling errors on the determinations of baseline vectors from very long baseline interferometry" *J. Geophys. Res.*, 96, B1, 643-650, 1991.
- Davis, J.L., G. Elgered, A.E. Niell, C.E. Kuehn, "Ground-based measurements of gradients in the wet radio refractive index of air," *Radio Sci.*, Vol. 28, pp. 1003-1018, 1993.
- Doerflinger, E., "Utilisation de la méthode de positionnement satellitaire GPS pour la détermination précise des altitudes relatives et absolues," Thèse de l'Université de Montpellier II, 13 Juin 1997.
- MacMillan, D. S., "Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations," *Geophys. Res. Lett.* Vol. 22, No. 9, p. 1041-1044, 1995.
- Marini J.W. and C.W. Murray : Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevation above 10 degrees, GSFSC, Nasa Technical Memo, Nov. 1973.
- Niell, A., "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths," *J. Geophys. Res.*, 101, 3227-3246, 1996.
- Saastamoinen, J., "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellite, Geophysical monograph 15, The use of artificial satellites for geodesy, AGU, Washington D.C., 1972.
- Santerre, R., "Impact of GPS satellite sky distribution," *Manuscr. Geod.* Vol. 16, pp. 28-53, 1991.
- Tarniewicz, J., Bock, O., Pelon, J., and Thom, C., Raman Lidar for External GPS Path Delay Calibration Devoted to High Accuracy Height Determination, *Phys. Chem. Earth*, 27, 329-333, 2002.

17-19/11/ 2004

Colloque GDR-G2 – ESGT Le Mans

M.N. Bouin et O. Bock - 17