







4-6 juin 2013, Toulouse

# PPP avec ambiguïtés entières

Flavien Mercier



# SOMMAIRE

#### PPP avec ambiguïtés entières

Rappel, positionnement avec mesures de code

Equations code et phase bi-fréquence

Propriétés des ambiguïtés de phase

Positionnement standard avec mesures de code et de phase (PPP)

Positionnement avec blocage des ambiguïtés



Mesures de code

Positionnement récepteur avec mesures de code bi-fréquence

PPP statique et PPP cinématique



#### Mesures de code

#### Rappel:

<u>Code</u>: mesure de temps de propagation  $P = c \left( t_1^{rec} - t_0^{eme} \right)$ 

 $t_1^{rec}$  temps de réception en échelle récepteur

 $t_0^{\it eme}$  temps d'émission en échelle émetteur

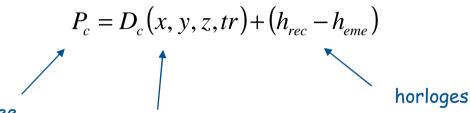
$$t_0^{\it eme} = t_0^{\it gps} + b_{\it h,eme}$$
 
$${\it \'emetteur}$$
 
$$r\'ecepteur$$
 
$$t_1^{\it rec} = t_1^{\it gps} + b_{\it h,rec}$$

$$P = c \Big( t_1^{gps} - t_0^{gps} \Big) + c \Big( b_{h,rec} - b_{h,eme} \Big)$$
 
$$= D + \big( h_{rec} - h_{eme} \big)$$
 distance de propagation biais horloges (exprimés en mètres)



#### Positionnement avec le code

Code iono-free: 
$$P_c = \frac{\gamma P_1 - P_2}{\gamma - 1}$$



Mesure iono-free

Distance de propagation (entre centres de phase iono-free)

Une équation de mesure par date, par satellite en visibilité

x, y, z, tr Coordonnées récepteur, allongement troposphérique, à identifier pour modéliser D, on a en plus les positions satellites à l'émission

 $h_{rec}$  Horloge récepteur, à identifier

 $h_{\it eme}$  Horloge émetteur, connue à chaque date d'échantillonnage (en général à 30 s)

Rappel : ce n'est pas un positionnement absolu, il est relatif au réseau qui a servi à calculer les orbites et horloges de la constellation GPS

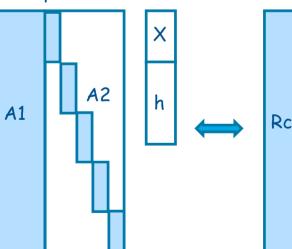


#### Structure des équations

Exemple: une session de deux heures environ, à 30 secondes position x,y,z et tr à identifier linéarisation du problème autour de positions initiales

$$P = (D(x_0, y_0, z_0, tr_0) - h_{eme}) + A_1 \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta tr \end{bmatrix} + A_2 \begin{bmatrix} h_1 \\ \dots \\ h_n \end{bmatrix}$$

dérivées partielles



résidus

#### Tailles

4 paramètres globaux 240 paramètres horloge ~ 2400 mesures

Résolution par moindres carrés itérations, méthode Newton par exemple



#### Différents types de paramétrages

En fait, le cas précédent est le plus simple qu'on puisse faire il y a plusieurs déclinaisons possibles selon ce qu'on cherche dans les positions x,y,z

<u>PPP statique</u>: sur l'ensemble de mesures traitées, un seul jeu x,y,z allongement troposphérique : segments 1 à 2 heures (cas de l'exemple)

<u>PPP cinématique</u>: on ajuste à chaque date x,y,z, en même temps que h allongement troposphérique le point GPS classique est dans cette catégorie (tropo figée)

<u>PPP cinématique</u>: solution intermédiaire, on ajuste des x,y,z constants par morceaux allongement troposphérique intérêt: permet de diminuer le bruit sur les positions si on ne cherche pas des phénomènes rapides

Autres approches : filtre de Kalman avec allongement tropo stochastique, c'est en fait du PPP cinématique



Mesures de code et phase bi-fréquence

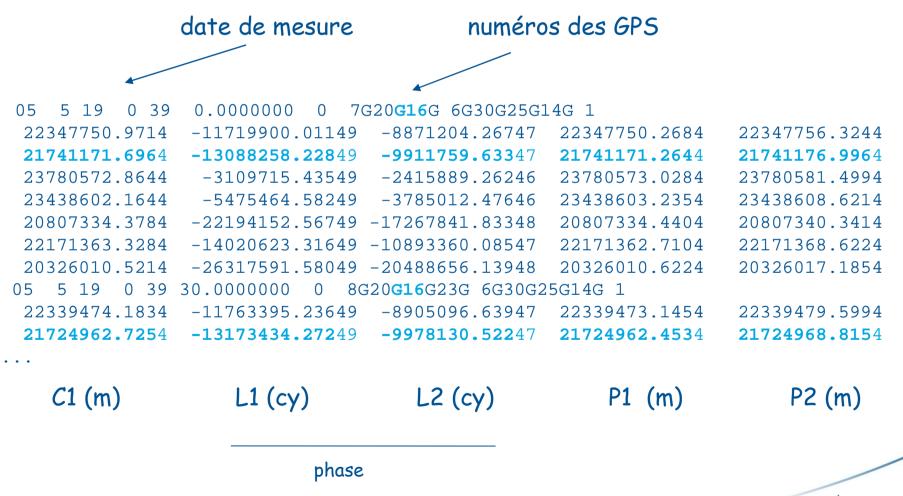
Positionnement récepteur avec mesures de phase

Blocage des ambiguïtés de phase



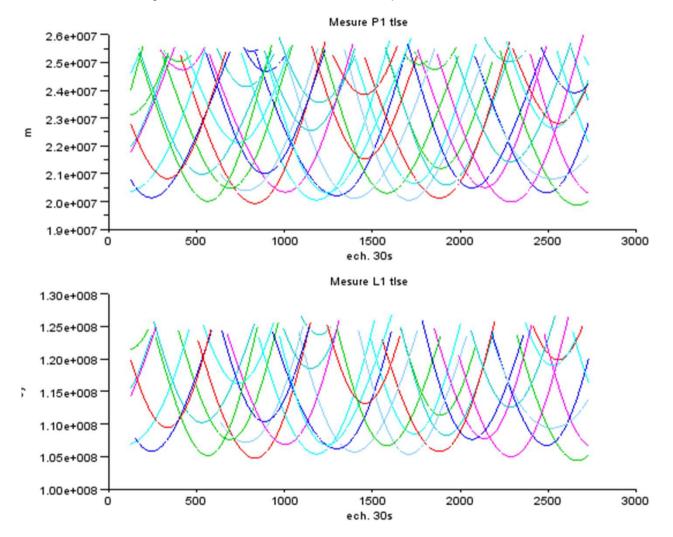
#### **Mesures**

#### Exemple de données au format Rinex



#### Exemple: mesures code et phase fréquence 1

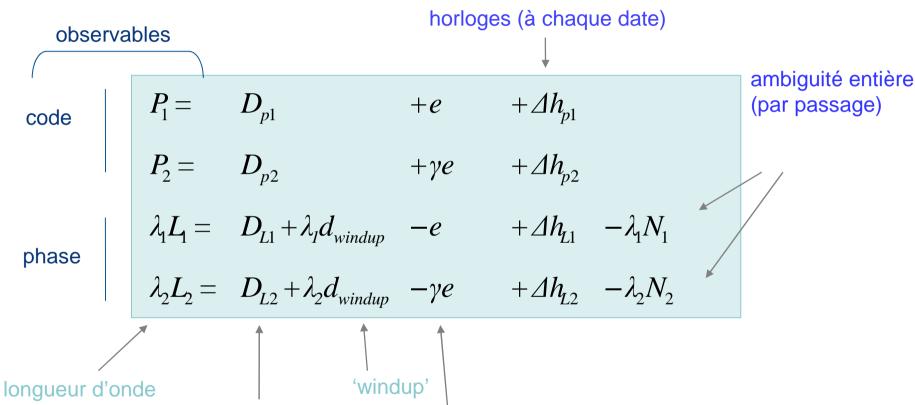
Station de Toulouse, une journée à 30 s, une couleur par satellite, mesures fonction du temps





### Modélisation bi-fréquence (1)

Récepteur bi-fréquence : code et phase sur chaqcune des deux fréquences 1575.42 MHz (f1) et 1227.60 MHz (f2)



distance de propagation ionosphere (avec effet troposphérique) (premier ordre)

$$\Delta h = h_i - h^j$$

différence des horloges récepteur i - satellite j

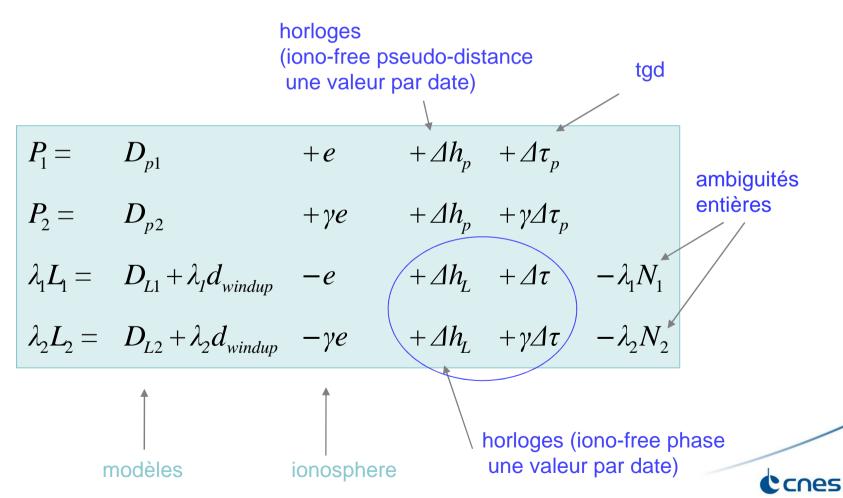


#### Modélisation bi-fréquence (2)

#### Transformation pour avoir les horloges iono-free en référence

 $\Delta h$  : horloge, résolution à chaque date

 $\Delta h$ - $\Delta h_p$ ,  $\Delta \tau$ ,  $\Delta \tau_p$ : variations lentes



#### Combinaisons équivalentes des équations ....



$$P_c = D_c + \Delta h_p$$

Pseudo distance 'ionosphere free'



$$L_2 - L_1 + f(P_1, P_2) \cong -(N_2 - N_1) + \mu_i - \mu^j$$

Widelane 'ionosphere free' 'geometry free'

$$\int_{w} N_{w} = N_{2} - N_{1}$$



$$Q_c - \frac{\lambda_2 N_w}{1 - \gamma} = D_c + \lambda_c d_{windup} + \Delta h_L - \lambda_c N_1 \qquad \lambda_c \sim 10.7cm \qquad \text{Phase 'ionosphere free'}$$



Equation iono



#### Equations au niveau du récepteur, principe de la solution

Linéarisation autour d'une position courante, comme dans le cas du code vu plus haut

$$L_2 - L_1 + f(P_1, P_2) + \mu_{eme} \cong -N_w + \mu_{rec}$$

Widelane

$$\int N_{_{\scriptscriptstyle{\mathsf{N}}}}$$

$$Q_{c} - \frac{\lambda_{2} N_{w}}{1 - \gamma} - \left(D_{c0} + \lambda_{c} d_{windup}\right) + h_{L,eme} = \frac{\partial D}{\partial x} \delta x - \lambda_{c} N_{1} + h_{L,rec}$$

Phase 'ionosphere free'

$$P_{c} - D_{c0} + h_{p,eme} = \frac{\partial D}{\partial x} \delta x + h_{p,rec}$$

Pseudo distance 'ionosphere free'

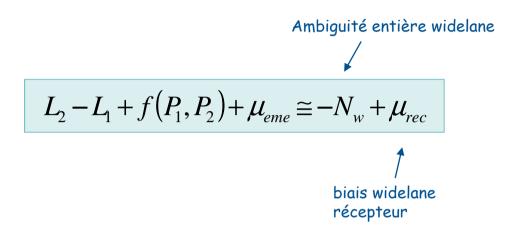
Remarques : l'équation widelane ne dépend (presque) pas des variables x,y,z on peut la résoudre indépendamment de la géométrie

 $h_{L,eme}$  et  $\mu_{eme}$  ne sont pas interchangeables entre solutions orbites/horloges

il y a deux types d'horloge (code ou phase), la solution GRG ne donne pour le moment que les horloges de phase, donc on utilisera l'horloge de phase aussi dans l'équation de code mais en sous pondérant fortement



#### Résolution des ambiguités widelane



Une équation par date et par satellite en visibilité

- à partir des mesures Rinex
- et des biais satellites  $\mu_{eme}$  fournis avec la solution GRG

Un entier Nw à identifier par passage

Un réel  $\mu_{rec}$  à identifier, par date, ou par segments, ou constant (dépend de la qualité du récepteur)

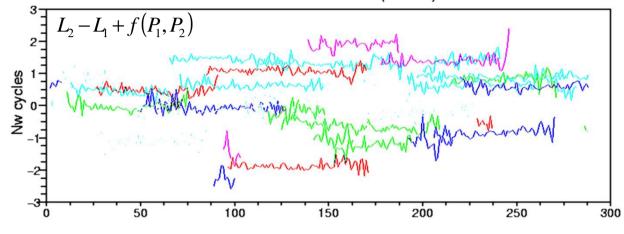


#### Exemple de widelane (usn3)

$$L_2 - L_1 + f(P_1, P_2) + \mu_{eme} \cong -N_w + \mu_{rec}$$

Raw MW-widelane (USN3)

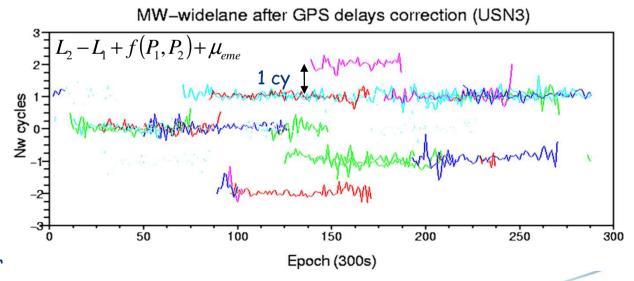
Valeurs brutes



Valeurs corrigées des biais satellites

On voit les entiers par passage

 $\mu_{rec}$  stable pour ce récepteur





# **Exemple : ambiguités iono-free, simples différences phase opmt et brus**

opmt: Paris différence brus-opmt cy brus: Bruxelles 11598 11596 11594 1 cy Contribution 11592du terme d'horloge Biais entier par passage 11590-11588 11586 11584 ech. 300s 350 400 450 500 550 600 650 700 300

Simples différences, même structure du problème interprétation : opmt sert à avoir les horloges satellite et on fait du PPP sur brus

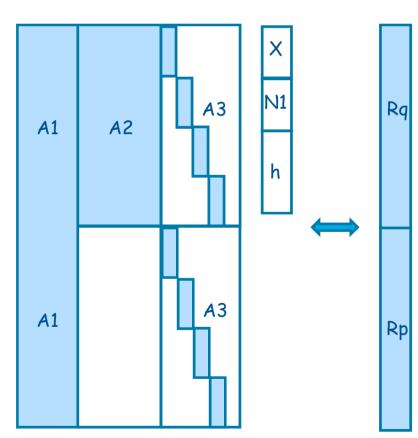


# Résolution des équations de positionnement avec phase (1)

$$R_{Qc} = \frac{\partial D}{\partial x} \, \delta \! x - \lambda_c N_1 + h_{L,rec} \qquad \text{bruit de mesure quelques millimètres}$$

$$R_{Pc} = \frac{\partial D}{\partial x} \delta x + h_{L,rec}$$

bruit de mesure quelques dizaines de centimètre fortement augmenté (> 10 m) à cause des biais possibles dans l'horloge de phase de la solution GRG



Retour sur le cas 2 heures, 30 s

#### Tailles

- 4 paramètres globaux
- ~ 10 passages
  - 240 paramètres horloge
- ~ 2400 mesures phase
- ~ 2400 mesures code



# Résolution des équations de positionnement avec phase (2)

Résolution par moindres carrés

On obtient une solution 'flottante', c'est-à-dire dans le domaine des réels (donc les ambiguïtés N1 sont identifiées comme des réels)

solution PPP classique 'flottante'

Equations normales sur position, tropo, ambiguïtés (horloges éliminées)

Equations normales sur ambiguïtés N1 seules

Solution entière sur N1 méthode de bootstrap

Nouvelle solution mesures de phase avec ambiguïtés bloquées traitées comme du code

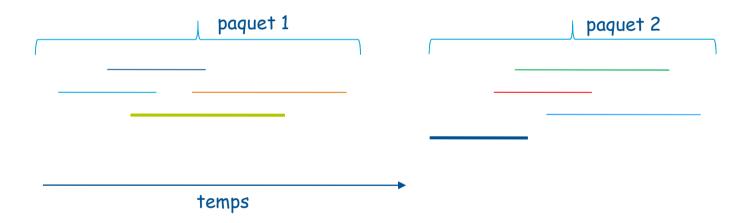




#### Méthode bootstrap, passages de référence

Remarque: indétermination entre horloge récepteur et ambiguïtés on a en fait un ensemble de solution équivalentes il suffit d'en trouver une, et on a toutes les autres

le code sert à stabiliser la solution, le problème phase seul est singulier (avoir une solution avec des mesures de phase non ambiguës proches du code)



Choix d'un passage de référence par paquet de passages connexes

différentes stratégies possibles

- passage initial
- meilleures mesures actuellement, on prend le plus long, et le plus proche d'une date de référence utilisateur



#### Méthode bootstrap, solution séquentielle

$$J(x) = (x - x_0)^t Q(x - x_0)$$

recherche du minimum  $x \in N$ 

En fait Q a une chute de rang de 1 (au moins) : ambiguïté de référence arbitraire

$$x(i_0) = round(x_0(i_0)) \qquad \text{nouvelles valeurs flottantes} \quad x, \sigma$$

$$J\left(\begin{bmatrix} n \\ x \end{bmatrix}\right) = \left(\begin{bmatrix} n \\ x \end{bmatrix} - x_0\right)^t Q\left(\begin{bmatrix} n \\ x \end{bmatrix} - x_0\right)$$
libres (réels)

Recherche indice k pour la partie x tel que :

$$\sigma\!(k)$$
 minimum ,  $\sigma\!(k)\!\leq\!\sigma_{\!_{0}}$  et  $frac\!\left(x\!\left(k\right)\right)\!\leq\!\varepsilon_{\!_{0}}$ 

$$x(k) \rightarrow n(k)$$
 arrondi au plus proche entier transféré dans le sous-ensemble bloqué

itérations arrêt si aucune ambiguïté restante ne vérifie les conditions



#### Remarques

#### Point délicat : le passage de référence

- si le passage choisi est biaisé mauvais comportement du récepteur mauvais calage widelane en amont

aucun autre passage ne se bloque relativement à celui là et donc impossible de démarrer le bootstrap (c'est déjà arrivé ...)

- remède : changer de passage de référence

#### Réglage du bootstrap

- ne pas oublier de sous-pondérer le code (avec la version GRG actuelle)
- blocage, valeurs typiques

```
tolérance blocage (en cy) 0.20 sigma maximal blocage (en cy) 0.05
```



Exemple de bootstrap dans GINS

Exemple de PPP cinématique



#### Un exemple

Cas de positionnement, pour transfert de temps un jour à 30 secondes (J. Delporte)

ajustement x,y,z,tr par segments

Normalement, sur ce type de résolution la qualité de la solution flottante permet d'observer directement les ambiguïtés entières

Mais c'est un cas à problème, taux de blocage trop faible (~75 %)

Analyse de quelques sorties listing



#### **Solution flottante**

Solution flottante initiale, Sortie listing, passages classés chronologiquement

num.	N1	sig. N1	
1 2 3 4 5	5.789579 3.728433 2.761025 0.741781 2.734429 4.747829	0.027313 0.026164 0.026287 0.026030 0.026017 0.025831	OK entre elles
7 8 9 10 11 12 13	5.036458 -0.221010 2.822326 3.233124 0.859577 6.977033 0.047270 3.023605	0.028195 0.025792 0.026116 0.025699 0.025633 0.025941 0.025645 0.025607	?
15 16 17 18 19 20 21 22	5.036722 4.049821 1.046937 1.085022 3.064985 2.035767 2.078751 3.078032	0.025678 0.025651 0.025621 0.025592 0.025599 0.025609 0.025598 ** 0.026046	OK entre elles

Les écarts deux à deux sont proches d'entiers, pour des passages proches en temps Sigmas N1 un peu petits

observabilité donnée par le code (donc peut être un peu trop contraint)



<sup>\*\*</sup> passage de référence choisi pour la suite

# **Bootstrap**

#### (valeurs et sigmas avant blocage)

•					
		blocages initiaux			
Blocage	21	2.079	0.025598	ambiguité passage 21 contrainte à 2.000	
		blocages entiers			
Blocage	23	2.974	0.001870		
Blocage	25	1.985	0.001870		
Blocage	19	2.996	0.001918		
Blocage	18	1.016	0.001934		
Blocage	20	1.953	0.001017		
Blocage	17	0.984	0.001913		
Blocage	27	0.963	0.001913		
Blocage	29	3.992	0.001930	On remarque la forte diminution de covariance dès	
Blocage	32	1.974	0.001911	le blocage de la référence :	
Blocage	30	2.995	0.001911		
Blocage	28	3.959	0.001943	covariances passent de 0.025 à 0.002	
Blocage	16	3.988	0.001884		
Blocage	13	-0.009	0.001915	La plupart des ambiguïtés restantes après le blocage	
Blocage	15	4.985	0.001740	de référence sont très proches d'entiers	
Blocage	14	2.977	0.001610		
Blocage	10	3.185	0.001817		
Blocage	24	-0.993	0.001047		
Blocage	34	4.037	0.002073		
Blocage	35	0.049	0.002054		
Blocage	36	0.018	0.002255	Le boostrap se déroule bien, mais s'arrête	
Blocage	37	0.954	0.002200	trop tôt sur tolérance 0.2 cy	
Blocage	12	6.904	0.003112	11 op 101 our 10101 and 0.2 of	
Blocage	26	6.019	0.003161	The state of the s	
Blocage	22	3.022	0.003203	Le paquet d'ambiguïtés initiales de 1 à 6 n'est pas	
Blocage	33	4.058	0.001333	bloqué.	
Blocage	38	-4.952	0.006952		
Blocage	39	5.193	0.006253		
Blocage	3 <del>9</del>	4.887	0.010597		
Diocage	,	1.007	0.010377		

0.012285

Blocage

31

4.106

#### Passages non bloqués

Valeurs	non	bloquees		
1	MNA	0000062260700030USN3	5.684370	0.008723
2	MNA	0000092260700030USN3	3.580126	0.003269
3	MNA	0000152260700030USN3	2.618452	0.003466
4	MNA	0000182260700030USN3	0.600307	0.003017
5	MNA	0000212260700030USN3	2.592520	0.003370
6	MNA	0000222260700030USN3	4.614226	0.002458
8	MNA	0000142260700780USN3	-0.350525	0.002134
9	MNA	0000122260704740USN3	2.679173	0.003066
11	MNA	0000202260716590USN3	0.764691	0.001934

#### Plusieurs remarques

- les sigmas formels on bien diminué par rapport au cas flottant, donc les passages se recouvrent bien avec des passages déjà bloqués (bonne observabilité)
- ces passages ont l'air cohérents entre eux pour les ambiguïtés
- ils sont tous dans la même zone, en début de journée
- si on avait choisi la référence dans ceux-ci, les passages suivants n'auraient pas été bloqués
- situation peut être due à un passage 'vrillé' qui fait le raccord entre le paquet bloqué et le paquet non bloqué (saut de phase raté, mauvaise widelane, problème dans l'horloge satellite ...)

Il y a une incohérence dans les données vis-à-vis des ambiguïtés entières cas à analyser plus en détails ..



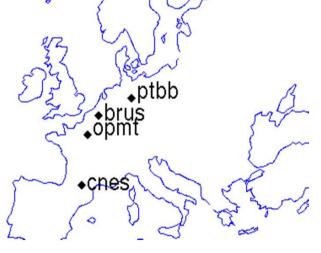
## Exemple de positionnement stochastique

Horloges de phase satellites obtenues avec cnes, brus, ptbb, alrt

Positionnement stochastique (x,y,z,t à chaque date) opmt

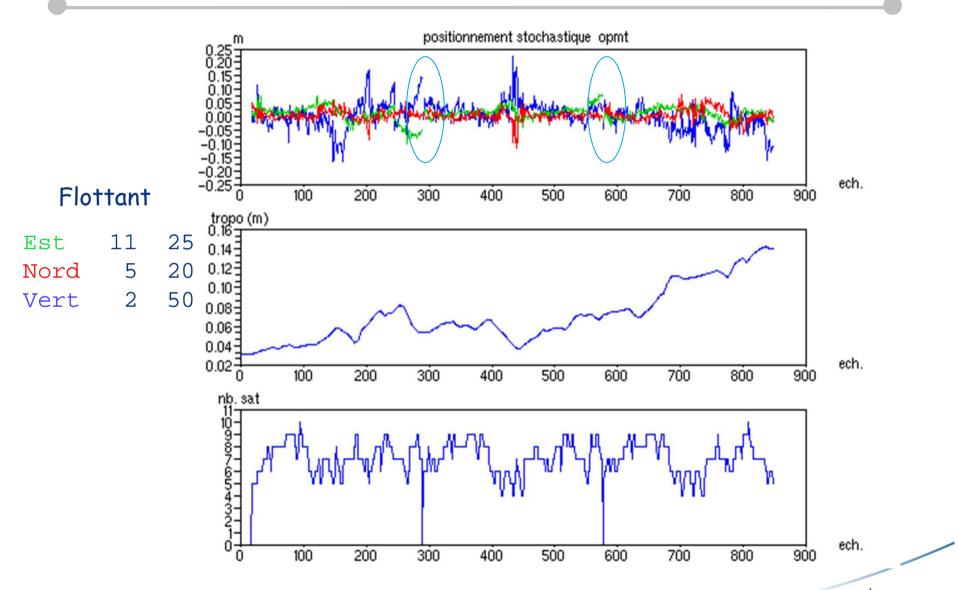
- ambiguités flottantes
- ambiguités entières

Trois jours, à 300 secondes éphémérides IGS

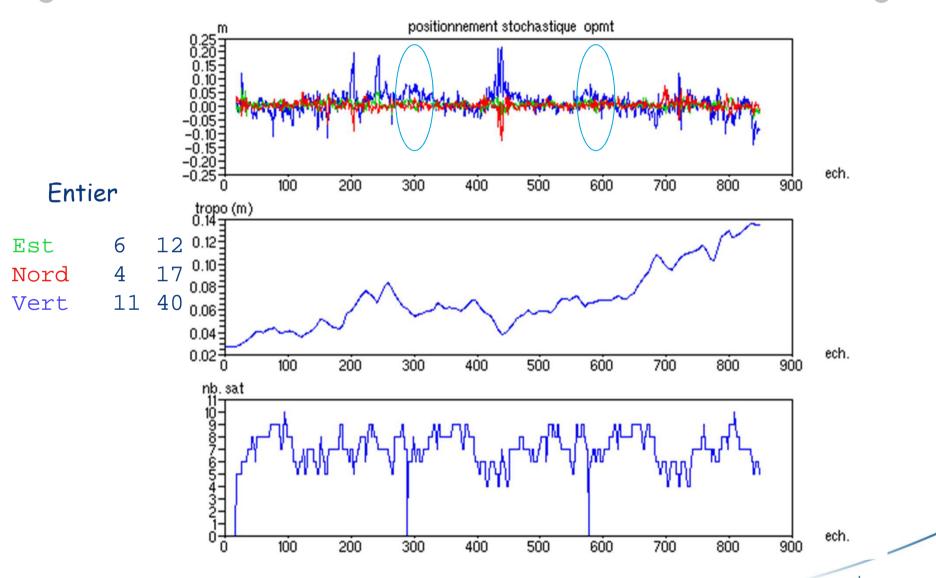




#### **Positions flottantes**



#### Positions entières



# Particularités

Conclusion



#### Problème des solutions sur plusieurs jours

Les solution IGS (dont GRG) sont calculées par jour :

- présence de discontinuités orbites et horloges à 0h
   en particulier, la nécessité d'interpoler à cheval sur 0h, entre deux éphémérides non cohérentes, amène des erreurs, surtout dans le dernier échantillon d'orbite (en général entre 23h45 et 24h, échantillonnage à 300 s)
- il peut arriver que les horloges de phase GRG sautent de un cycle (c'est-à-dire que les deux solutions peuvent être équivalentes, mais non raccordables telles quelles)
- les biais widelane satellites sont continus, mais il faut vérifier que le biais widelane station l'est aussi (si on l'a identifié par jour par exemple, avec les recouvrements)

une erreur de 1 cycle Nw  $\rightarrow$  une erreur de 0.5 cycle N1 (cas de GPS)

faire si possible des calculs journaliers

si il faut absolument une solution sur plusieurs jours, bien vérifier les continuités (orbites/horloges et widelane) attention aux signaux suspects à période 24 heures...



#### **Configurations**

Utiliser des durées et des réglages adaptés aux signaux recherchés

Durée minimale recommandée : deux heures (avec suffisamment de satellites en visibilité continue...)

Adapter le paramétrage des coordonnées aux signaux recherchés (constant, par segments, stochastique...)

Le traitement entier n'est pas toujours nécessaire (par exemple pour avoir x,y,z par jour, le flottant doit suffire)

Avoir suffisamment de satellites en visibilité simultanée, avec passages longs

Les blocages se passent d'autant mieux que les passages durent longtemps avec de bons recouvrements

En pratique, un taux > 90 % de blocages est un bon indicateur que la solution est de bonne qualité



#### **Conclusion**

#### Il s'agit d'une nouvelle méthode

- seule la solution GRG permet de l'appliquer actuellement (ou alors il faut refaire soi même au moins les horloges de phase)
- le blocage est fait par bootstrap faiblesse : problème du choix des passages de référence si on tombe sur un mauvais passage, non convergence mais permet de faire de l'élimination de passages

Permet d'atteindre des performances similaires à du traitement doubles différences sans avoir à traiter simultanément tout un réseau de référence

Mais le positionnement absolu n'existe pas : on est toujours positionné relativement au réseau qui a servi à faire les horloges



# FIN



#### Physique de la mesure GNSS

Objectif: précision millimétrique sur les différents phénomènes (ou élimination, cas de la ionosphère)

position émetteur

- dynamique du satellite
- géométrie, attitude

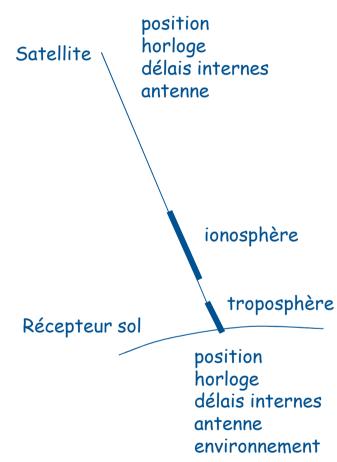
position récepteur

- géométrie locale
- mouvement terrestre
   marées terrestres
   charge océanique
   charge atmosphérique

•••

ionosphère: non modélisable bi-fréquence

troposphère: modèles et ajustement de paramètres (allongement à la verticale, gradients)





# Propagation ionosphérique



# Propagation ionosphérique

#### Extrait: Standards IERS (2010), http://www.iers.org

Table 9.2: Delays (in millimeters) corresponding to the first to fourth higher order ionospheric delay terms (in columns) for a representative subset of typical frequencies used in radio astronomy and geodesy: the values are based on typical values of  $|B_0 \cos \theta_0| \sim 10^4 \text{ nT}$ ,  $\theta_0 = \pi/4$ ,  $N_0 = 10^{12} \text{m}^{-3}$  and  $S = 3 \times 10^{18} \text{m}^{-2}$  (the values that can be typically neglected –those lower than 1 mm– can be clearly identified by a negative exponent).

f / MHz	Technique	$\delta\rho_{I,p,1}$ / mm	$\delta\rho_{I,p,2}$ / mm	$\delta\rho_{I,p,3}$ / mm	$\delta\rho_{I,p,4}$ / mm
150 400 1228 1575 2000 2300	NIMS NIMS / DORIS GPS (L2) GPS (L1) DORIS Low VLBI f.	$ \begin{array}{r} -5.3 \cdot 10^{6} \\ -7.5 \cdot 10^{5} \\ -8.0 \cdot 10^{4} \\ -4.8 \cdot 10^{4} \\ -3.0 \cdot 10^{4} \\ -2.3 \cdot 10^{4} \\ -1.7 \cdot 10^{3} \end{array} $	$-9.9 \cdot 10^{3}$ $-5.2 \cdot 10^{2}$ $-1.8 \cdot 10^{1}$ $-8.5 \cdot 10^{0}$ $-4.2 \cdot 10^{0}$ $-2.8 \cdot 10^{0}$ $-5.7 \cdot 10^{-2}$	$ \begin{array}{r} -4.8 \cdot 10^{3} \\ -9.4 \cdot 10^{1} \\ -1.1 \cdot 10^{0} \\ -3.9 \cdot 10^{-1} \\ -1.5 \cdot 10^{-1} \\ -8.8 \cdot 10^{-2} \\ -4.9 \cdot 10^{-4} \end{array} $	$-1.8 \cdot 10^{1}$ $-1.3 \cdot 10^{-1}$ $-5.0 \cdot 10^{-4}$ $-1.4 \cdot 10^{-4}$ $-4.2 \cdot 10^{-5}$ $-2.2 \cdot 10^{-5}$ $-3.3 \cdot 10^{-8}$
$8400 \\ 12000 \\ 14000$	High VLBI f. Time trans. low Ku f. Time trans. high Ku f.	$-1.7 \cdot 10^{\circ}$ $-8.3 \cdot 10^{2}$ $-6.1 \cdot 10^{2}$	$-5.7 \cdot 10^{-2}$ $-1.9 \cdot 10^{-2}$ $-1.2 \cdot 10^{-2}$	$-4.9 \cdot 10^{-4}$ $-1.1 \cdot 10^{-4}$ $-6.2 \cdot 10^{-5}$	$-3.3 \cdot 10^{-9}$ $-5.2 \cdot 10^{-9}$ $-2.5 \cdot 10^{-9}$

Effet ionosphérique:

$$\delta d_{iono-phase} = -\frac{s_1}{f^2} - \frac{s_2}{f^3} - \frac{s_3}{f^4}$$

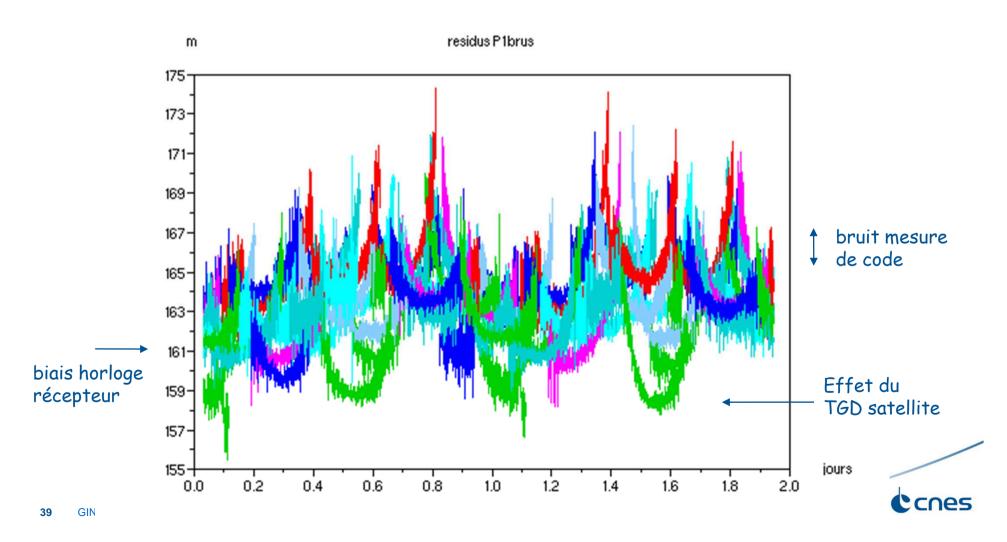
Mesures bi-fréquence
Modèles pour terme 1/f3

$$\delta d_{iono-code} = \frac{s_1}{f^2} + \frac{2s_2}{f^3} + \frac{3s_3}{f^4}$$



# Propagation ionosphérique, observation sur le code

Residus code P1, sans horloge récepteur, (pas de correction iono), correction tropo pas de correction TGD satellites (retard différentiel entre les deux fréquences) éphémérides/horloges précises IGS, position précise station



# Mesures de phase



# Mesures de phase

$$\boldsymbol{\varphi}_0 - \boldsymbol{\psi}_1 + \boldsymbol{k}$$

**Phase:**  $\varphi_0 - \psi_1 + k$  (en cycles, k est entier)

phase référence récepteur à l'événement de réception

phase signal émission à l'événement d'émission

Par définition :

$$t_0^{eme} = \frac{1}{f_0} \varphi_0 + a_e$$
  $t_1^{rec} = \frac{1}{f_0} \psi_1 + a_r$ 

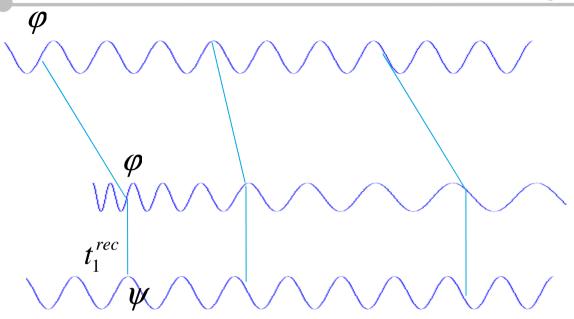
$$t_1^{rec} = \frac{1}{f_0} \psi_1 + a_n$$

 $f_0$  fréquence théorique du signal

Va permettre d'exprimer la phase de façon similaire au code (mais avec en plus un modulo --> ambiguité)



## Formulation de la mesure de phase (1)



horloge bord (phase à l'émission)

horloge bord (phase reque)

horloge sol (phase de référence)

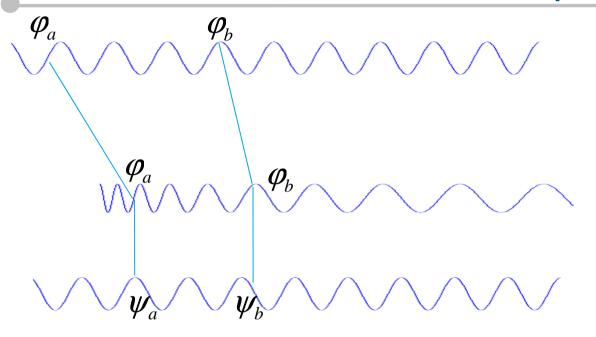
$$\mathbf{mesure}: \boldsymbol{\varphi} - \boldsymbol{\psi} = \left( \left( t_0^{\mathit{eme}} - a_e \right) - \left( t_1^{\mathit{rec}} - a_r \right) \right) f_0 \quad \mathsf{modulo} \, 1$$

On note 
$$t_0^{eme} = t_0^{eme} - a_e \quad \text{horloge de phase \'emetteur}$$
 
$$t_1^{rec} = t_1^{rec} - a_r \quad \text{horloge de phase \'ecepteur}$$

$$t_1^{rec'} = t_1^{rec} - a_r$$



## Formulation de la mesure de phase (2)



horloge bord (phase à l'émission)

horloge bord (phase reçue)

horloge sol (phase de référence)

mesure:

$$\varphi - \psi = \left(t_0^{eme'} - t_1^{ref'}\right) f_0 \quad \text{modulo 1}$$

$$\exists N_a / \varphi_a - \psi_a = \left(t_{a0}^{eme'} - t_{a1}^{rec'}\right) f_0 + N_a$$

$$\exists N_b / \varphi_b - \psi_b = \left(t_{b0}^{eme'} - t_{b1}^{rec'}\right) f_0 + N_b$$

 $N_a = N_b$  (par continuité des temps et de la mesure de phase)



## Formulation de la mesure de phase (3)

Mesure de phase : temps de propagation, mesuré modulo  $1/f_{
m 0}$  , horloges de phase

$$\lambda_0 \phi = c \left( t_0^{eme'} - t_1^{rec'} \right) + \lambda_0 N$$

N est un entier constant sur un passage (visibilité station - satellite ininterrompue)

Exemple: données d'un fichier Rinex

Récepteur géodésique (semi-codeless), cinq observables

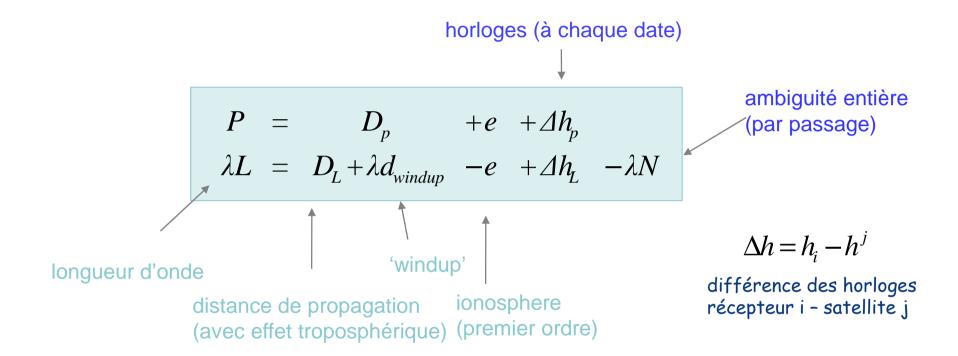
fréquence 1 : code C1 (C/A) et P1 phase L1

fréquence 2 : code P2 phase L2

**Remarque** : la phase stockée dans le rinex est en fait l'opposé de  $\phi$ , pour avoir des variations similaires au code



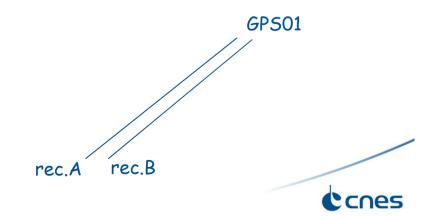
# Modélisation mono-fréquence



Problème: l'effet ionosphérique

Application : ligne de base courte (quelques kilomètres)

élimination perturbations communes



# Modélisation mono-fréquence et simples différences

Simples différences entre deux stations A et B : équations pour un satellite GPS donné Effet différentiels ionosphérique, troposphérique, windup négligeables

horloges récepteur

$$P_{,b}-P_{,a}=D_{p,b}-D_{p,a}\\ \lambda L_{,b}-\lambda L_{,a}=D_{L,b}-D_{L,a}\\ +h_{L,b}-h_{L,a}\\ -\lambda (N_b-N_a)$$
 ambiguité entière (par passage commun)

ambiguité entière

En faisant les différences entre deux GPS, plus d'horloge à résoudre (mais bruit de mesure double)

Exemple: positionnement d'une station b, relativement à une station a les positions interviennent via la modélisation :  $D_{L,b}(x,y,z) - D_{L,a}$ problème similaire au calcul du point standard, avec en plus les entiers à résoudre (peut être aussi appliqué sur le code seul, dans ce cas, pas d'ambiguité)

Inconvénient : lignes de base courtes uniquement (~quelques km)



# Traitement bi-fréquence doubles différences, simples différences, non différentié



# **Equations finales bi-fréquence**

$$P_{c} = D_{c} + \Delta h_{p}$$

$$\left(Q_{c} - \frac{\lambda_{2} N_{w}}{1 - \gamma}\right) = \left(D_{c} + \lambda_{c} d_{windup}\right) + \Delta h_{L} - \lambda_{c} N_{1}$$

## Equations similaires à un cas mono-fréquence

Par rapport à un cas mono-fréquence

- longueur d'onde ~10.7 cm (au lieu de ~19.0 cm)
- bruits de mesure multipliés par 3 (effet de la combinaison iono-free)
- pas d'effet ionosphérique



# Méthodes de résolution (1)

Exemple: solution réseau 10 stations, 30 s, un jour, éphémérides connues

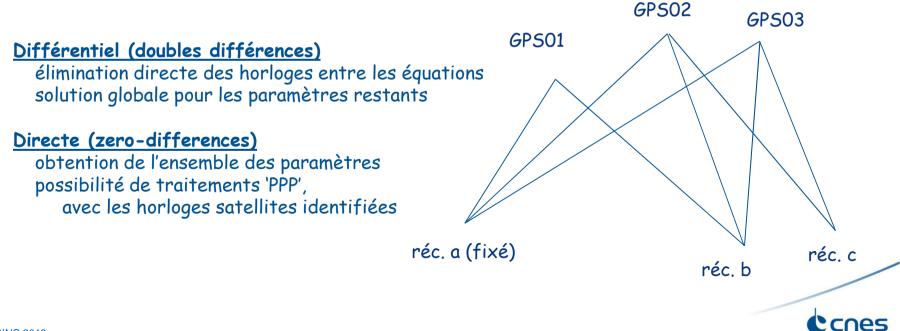
- 200000 mesures (à quatre observables)
- 2880 dates → ~ 72000 horloges
- 600 ambiguités
- autres paramètres

troposphère verticale 120

coordonnées : 27 (une seule position dans la journée)

77760 (une position par date)

#### Méthodes:



# Méthodes de résolution (2)

#### Différentiel (doubles différences)

élimination directe des horloges entre les équations

- élimine aussi les biais
- diminution notable de la taille du problème
- fixation des ambiguités au niveau doubles-différences

#### difficultés

- corrélation des erreurs (combinaison des mesures)
- augmentation du bruit
- raccourcissement des passages

- gestion des équations doubles différences à traiter (choix)

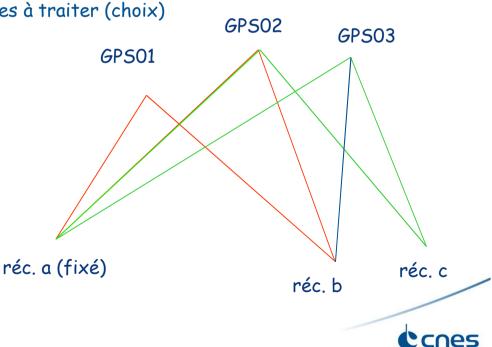
Les trajets vert et rouge ont la branche a 2 en commun : erreurs corrélées

$$N_{a1} - N_{a2} + N_{b2} - N_{b1}$$
 entier, etc...

En fait, on différentie directement sur les mesures

#### Variante : simples différences

- élimination des horloges satellites
- solution avec horloges stations
- utilisé en transfert de temps



# Méthodes de résolution (3)

#### Zero différence

- solution du système entier (code et phase)
- problème des indéterminations ambiguité-horloge
- passages longs
- bruit bien pris en compte
- permet un traitement de station isolée (une fois les horloges satellites connues)

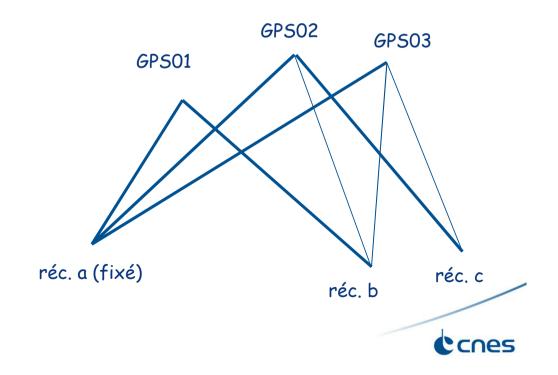
#### difficultés

- gestion des ambiguités de référence
- taille du système à traiter
- robustesse du blocage des ambiguités

Les trajets en gras sont les références, forcées à un entier — référence horloge

$$N_{a1}, N_{a2}, N_{b1}$$
 entiers, etc...

Résolution entière de  $N_{h2}, N_{h3}, N_{c3}$ 



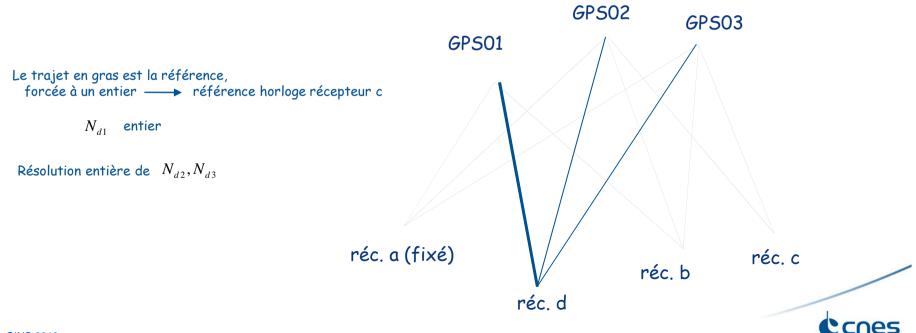
# Méthodes de résolution (4)

#### PPP, mode statique ou cinématique

- entrée : orbites et horloges de phase de la constellation
- traitement récepteur isolé
- ajustement : coordonnées constantes (mode statique), ou à chaque date (mode cinématique)
   allongement troposphérique vertical
   ambiguités (flottantes ou entières)
   horloge récepteur

Actuellement à l'IGS : seule la solution CNES/CLS ('grg') permet le PPP avec ambiguités entières

Remarque: peut être résolu en méthode différentielle aussi (simples différences satellite-satellite pour élimine l'horloge récepteur)



# **Applications de positionnement**



# **Applications de positionnement**

### Différents modes :

Temps réel / Temps différé
Dynamique / Statique
Différentiel / Ponctuel

# Soit potentiellement 8 «combinaisons »

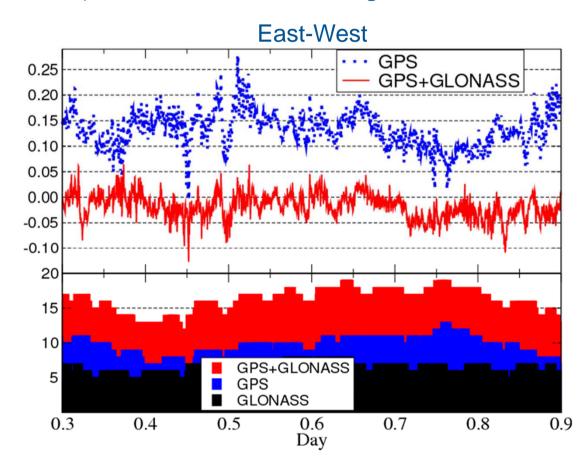
## D'où une variété:

- ◆Des applications
- → Des solutions techniques (équipements, stratégie de traitement des données,...)
- → des contraintes (opérations, coûts,...)



# PPP Cinématique (30s) mobile en Antarctique

- ·Vérification de la performance, mobile arrêté
- •IGS-ESA GLONASS orbites/horloges
- ·Positionnement à chaque date (mode PPP), ambiguités flottantes





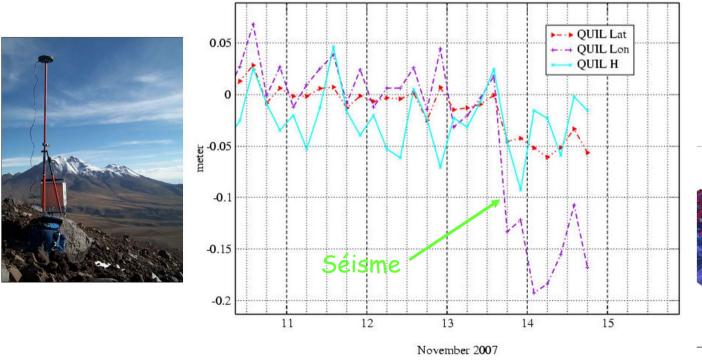
## Surveillance des déformations des volcans

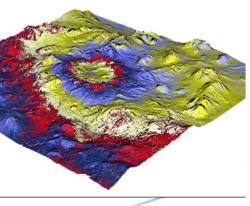
Les GNSS permettent d'observer des déformations coet post-sismiques

Exemple d'une campagne au Chili (novembre 2007)

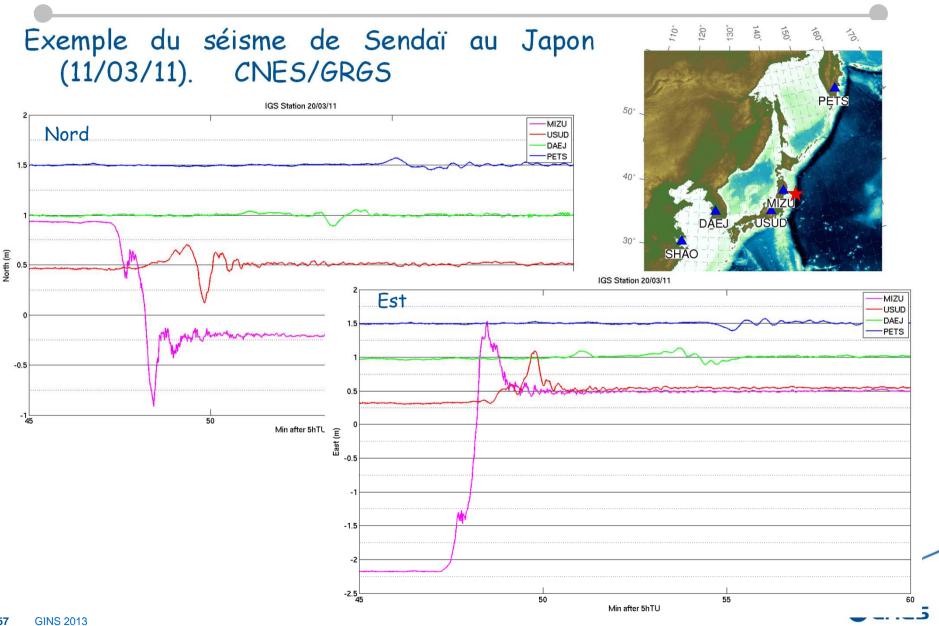
S. Bonvalot LMTG/IRD, Toulouse







# Mesure des déformations co et post-sismiques



#### MODES PROPRES DE VIBRATION DU GLACIER MERTZ

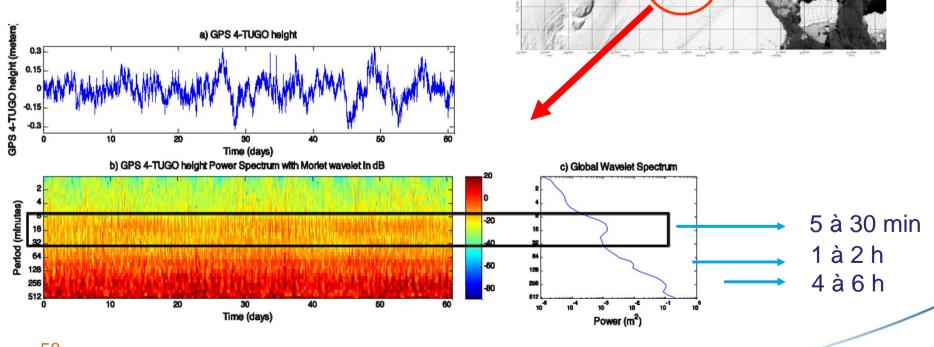
Projet CRAC-ICE (LEGOS)

cnes

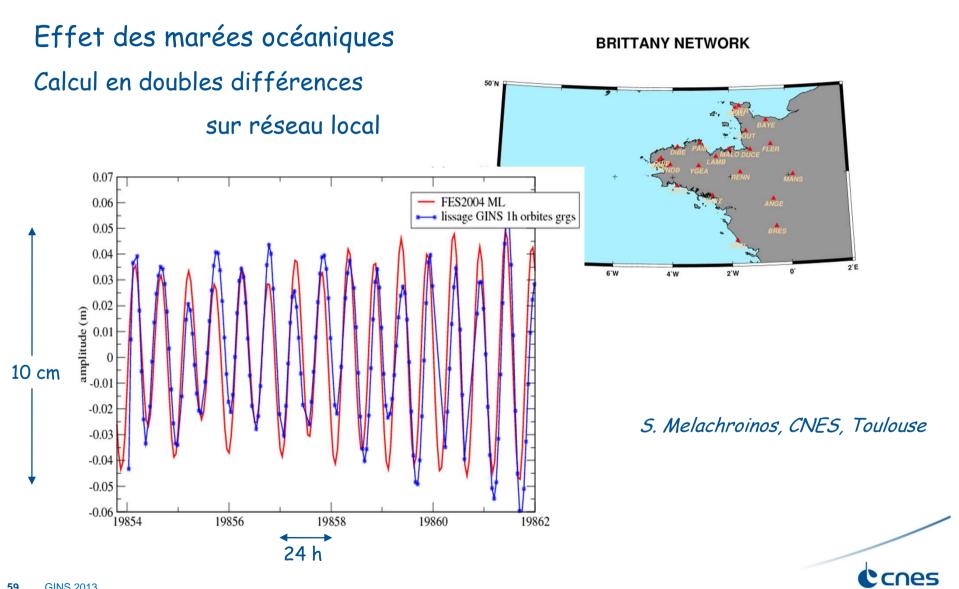
- Positionnement cinématique de 2 récepteurs GPS (« isolés ») en mode IPPP

- Mise en évidence de modes propres de vibrations du glacier

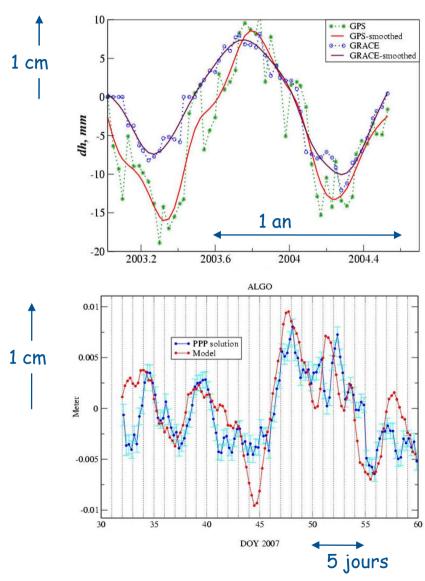
Thèse Lydie Lescarmontier (2012)



# Déformation crustale de charge



# Déformation crustale de charge



Effet hydrologique Périodes annuelles

D. Fazhilova, LEGOS, Toulouse

Effet de charge atmosphérique

F. Perosanz CNES, Toulouse

