

## *Localisation précise par moyens spatiaux*

### Traitement des données GNSS

*Félix Perosanz*

*François Fund*

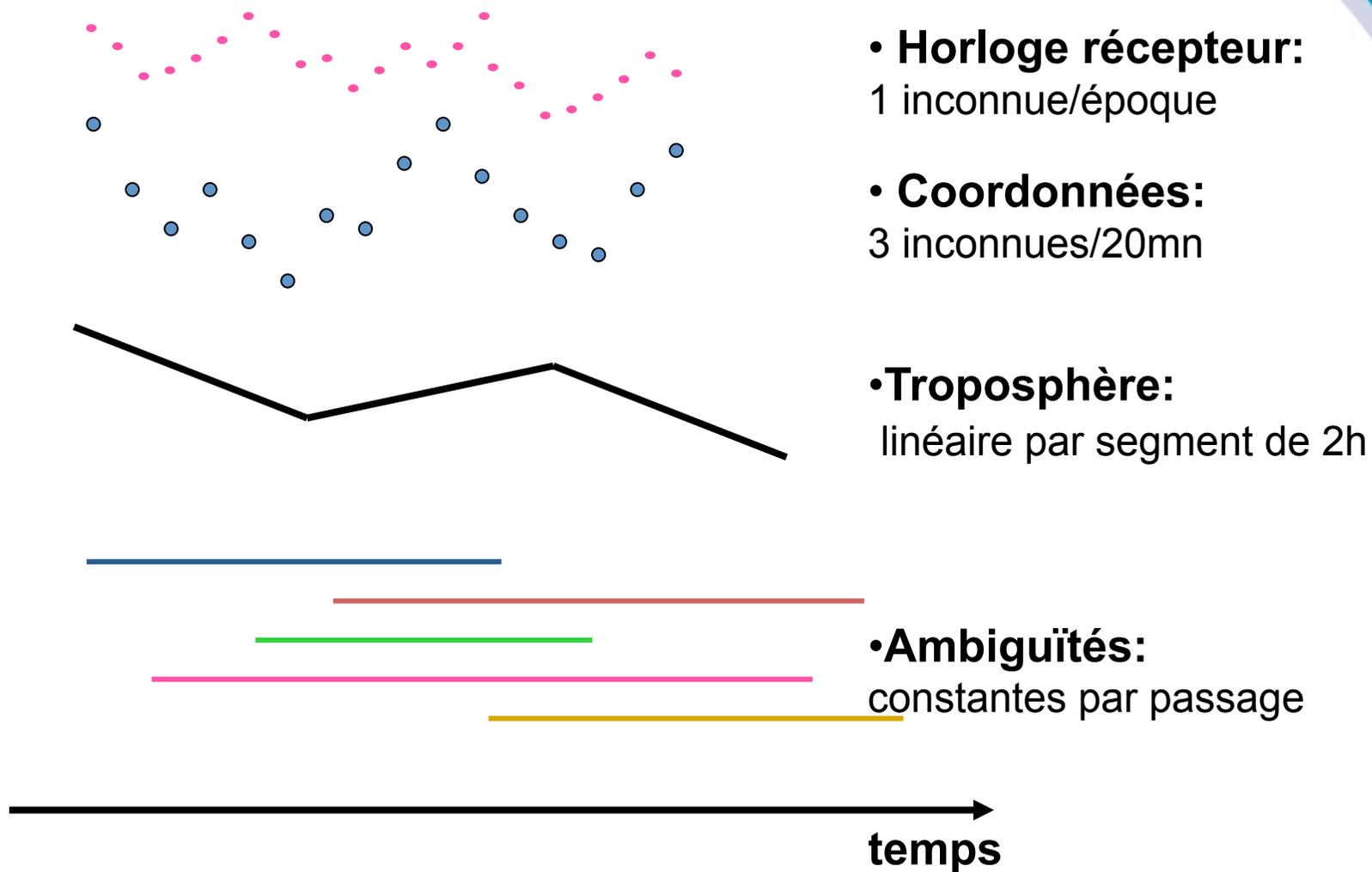
*Sylvain Loyer*

*Flavien Mercier*

# Introduction

- L'équation d'observation GNSS contient une grande variété de paramètres
- Le traitement précis de données GNSS répond à des besoins très variés
- Différents « modes » :
  - Temps réel / Temps différé
  - Dynamique / Statique
  - Différentiel (relatif) / Ponctuel (absolu)
- Mais certaines questions sont communes :
  - Comment détecter des sauts de cycles
  - Choix de la stratégie ? exemple : DD ou PPP
  - Quels modèles, quelles paramétrisation ?
  - Comment résoudre les ambiguïtés entières ?

# Exemples de paramètres



# Plan

- Les besoins pour le prétraitement des données :
  - Détection de données aberrantes
  - Détection de sauts de cycles
- Les combinaisons d'observables
- Les multi-trajets, angle de coupure, SNR,...
- La résolution des ambiguïtés
- PPP, IPPP, DD
- corrélations

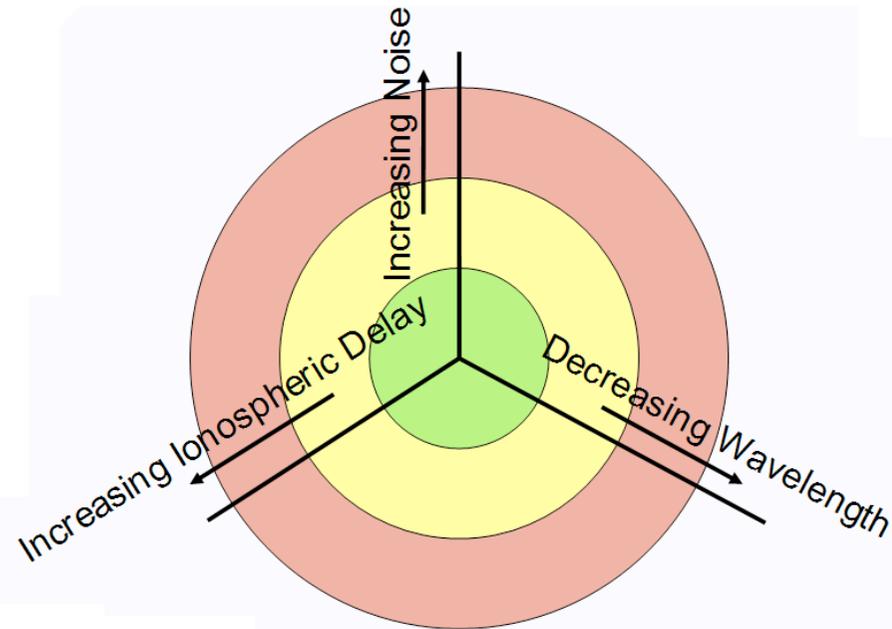
# Limitations des données GNSS

- Les données de phase L :
  - Biaisées : ambiguïtés + hardware
  - mais précises ( $\sim$ mm)
  - Affectées par des sauts de cycles
- Les données de pseudo-distance P :
  - « Absolues »
  - Bruités ( $>$  longueur d'onde des mesures de phase)
- Le bruit des mesures de pseudo-distance ne permet pas directement :
  - D'identifier les sauts de cycles
  - De figer les ambiguïtés entières

# Intérêt des Combinaisons

L'idée est de **construire de nouvelles observables** pour lesquelles:

- seront éliminés ou réduits :
  - Les termes mal connus (biais d'horloges, erreur d'orbite, délais ionosphériques,...)
  - La dynamique du signal (la mesure varie de plusieurs milliers de km)
- La longueur d'onde sera supérieure au bruit de pseudo-distance
- Le bruit de phase restera sub-centimétrique



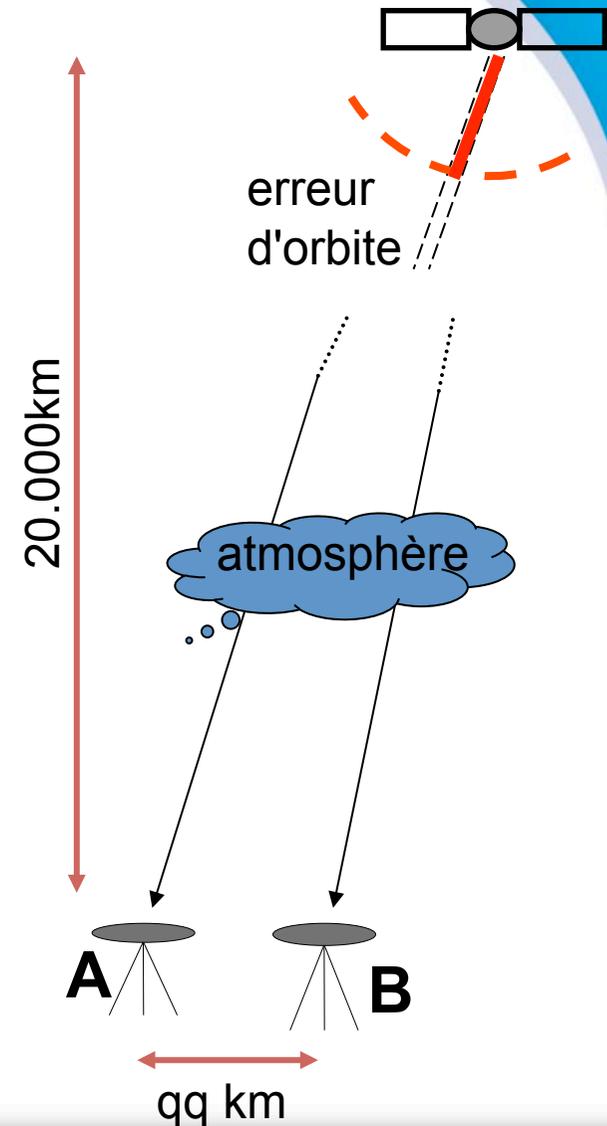
Tiré de Urquhart (2009)

# Grande variété de combinaisons

- Combinaison de fréquences
- Combinaisons de mesures P et L
- Combinaison de fréquences et de mesures
- Différentiation temporelle
- Différentiation entre paires de stations
- Différentiation entre paire de satellites
- Double différence
- Triple différence...

# L'idée du traitement différentiel

- Dès les années 1985 apparait l'idée de différentier les observations (entre récepteur et/ou entre satellite) pour **réduire les effets troposphériques et les erreurs d'orbite**
- deux récepteurs proches (en comparaison à la distance des satellites) observant les mêmes satellites sont affectés par les mêmes erreurs :
  - erreur (radiale) d'orbite
  - erreurs de propagation dans l'atmosphère
- si la position de A est connue (station de référence), l'erreur du système peut être calculée puis appliquée au récepteur B
- La solution du point B est améliorée



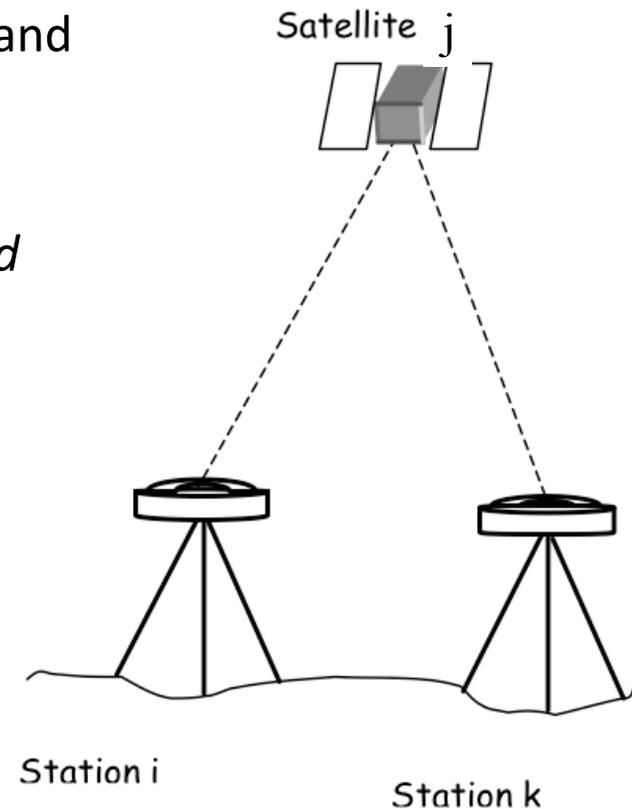
# Combinaison de récepteurs : simple différences

- When differencing the measurements of receivers i and k on satellite j at epoch m we get :

$$\Delta\phi_{i,k;m}^j = \Delta\rho_{i,k;m}^j - c\Delta dt_{i,k;m} - N_{i,k}^j \times \lambda + \cancel{\Delta\rho_{ion;m}^{j,i,k}} + \cancel{\Delta\rho_{tropo;m}^{j,i,k}} + \Delta\rho_{rel;m}^{j,i,k}$$

- Differencing removes the satellite orbit/clock error and minimise atmospheric biases
- However :
  - 2 receivers tracking at the same time are needed
  - The estimated values will be the difference of coordinates between station i and k
  - Reference stations are needed

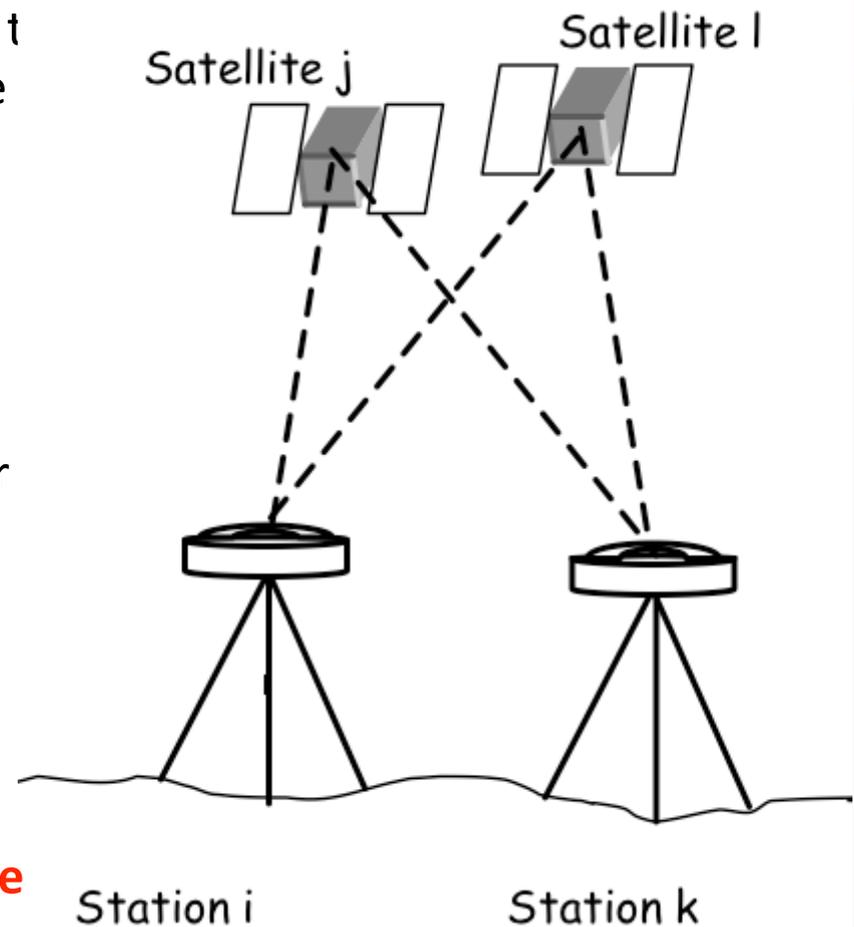
- **This principle is called RELATIVE POSITIONING**



# Combinaison de récepteurs : double différences

$$\nabla\Delta\phi_{i,k;m}^{j,l} = \nabla\Delta\rho_{i,k;m}^{j,l} - N_{i,k}^{j,l} \times \lambda + \cancel{\nabla\Delta\rho_{ion;m}^{j,l;i,k}} + \cancel{\nabla\Delta\rho_{tropo;m}^{j,l;i,k}} + \nabla\Delta\rho_{rel;m}^{j,i,k}$$

- In order to remove the receivers clock errors t 2 simple differences for station i and k on the satellites j and l are differenced
- This relation will be used for the coordinates difference estimation
- Any satellite and receiver hardware bias is eliminated
- $N_{i,k}^{j,l}$  can be estimated as an integer number



**La combinaison DD Iono-free est l'observable la plus couramment utilisée**

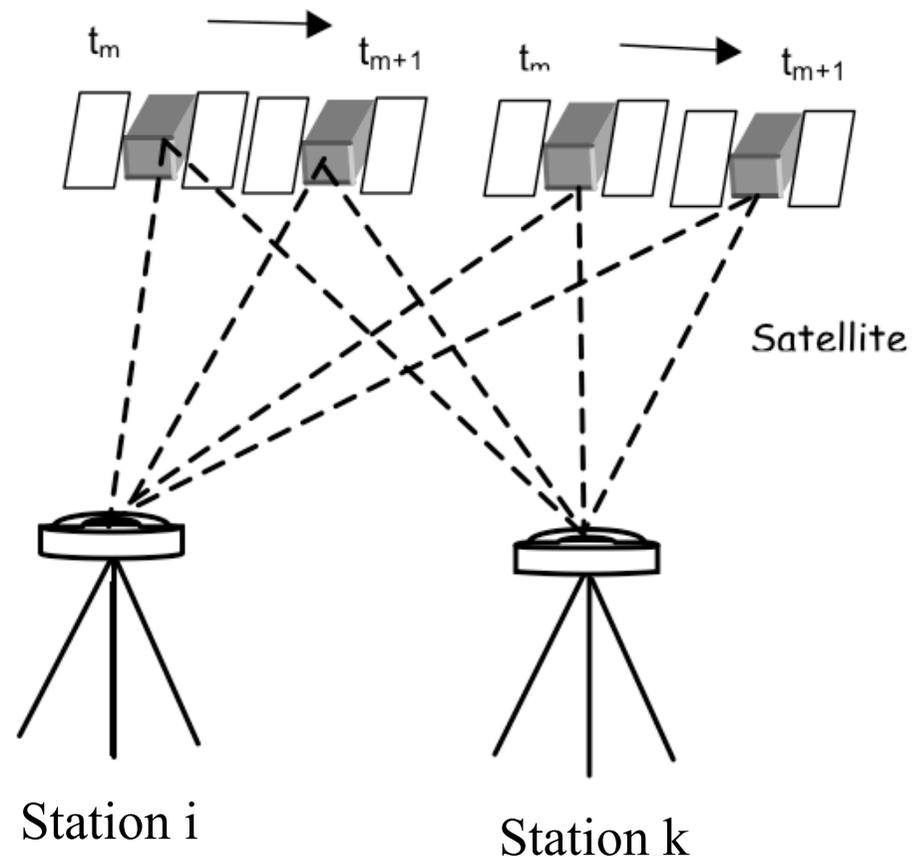
# Combinaison de récepteurs : triple differences

- Triple differences are the difference of 2 double differences at 2 consecutive epochs

- While  $N_{i,k}^{j,l}$  doesn't change, the TD combination eliminates the ambiguities

- An outlier in a TD series will reflect a discontinuity of  $N_{i,k}^{j,l}$

- TD are often used to detect **CYCLE SLIPS**



## Combinaison de 2 fréquences $f_i$ et $f_j$

<b>Pseudo-Range</b>	$P_i, P_j$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non ambiguë</li> <li>• bruité</li> </ul>
<b>Phase</b>	$L_i, L_j$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ambiguë</li> <li>• non bruité</li> </ul>
<b>Ionospheric-Free</b>	$\text{IF}(L_i, L_j) = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \cdot L_i - \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \cdot L_j$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• élimine le signal iono</li> </ul>
<b>Geometry-Free</b>	$L_4 = L_i - L_j$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• élimine la géométrie</li> <li>• permet d'identifier les sauts de cycles</li> </ul>
<b>Wide-Lane</b>	$L_5 = \frac{1}{f_i - f_j} (f_i L_i - f_j L_j)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• permet de fixer <math>N_i - N_j</math></li> </ul>

fréquence	longueur d'onde $\lambda = c/f$ ***	Bruit rel. $L_1$	commentaire
$f_0 = 10.23 \cdot 10^{+06} Hz$	$\lambda_0 = 29.31 m$	—	fréquence fondamentale
$f_1 = 154 \times f_0$ *	$\lambda_1 = 19.03 cm$ **	1	fréquence 1
$f_2 = 120 \times f_0$ *	$\lambda_2 = 24.42 cm$ **	1	fréquence 2
		3	“iono - free” (cf p.30)
$f_5 = f_1 - f_2$	$\lambda_5 = 86.19 cm$ **	5	“wide - lane” (cf p.62)
$f_3 = f_1 + f_2$	$\lambda_3 = 10.69 cm$ **	—	“narrow - lane” (cf p.63)

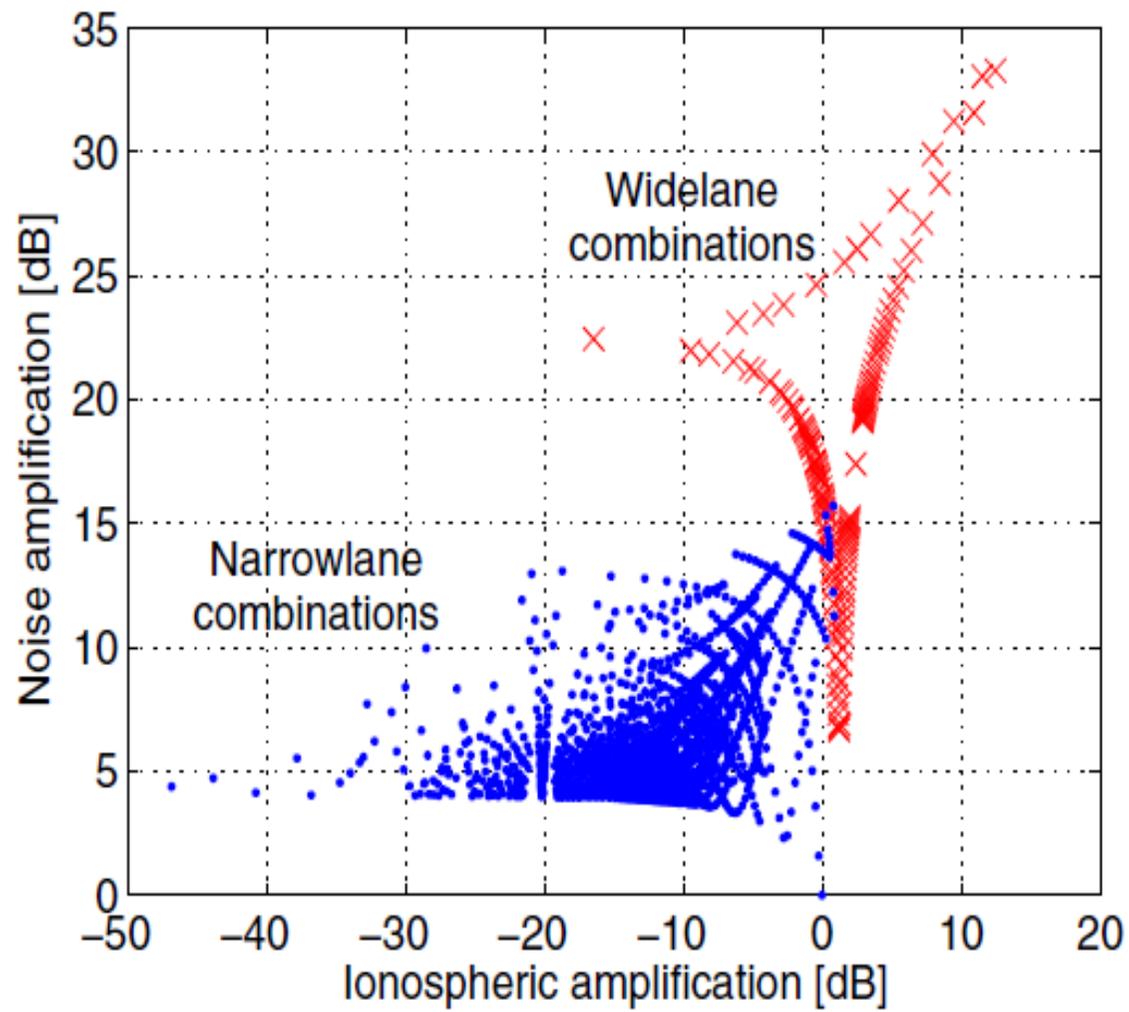
Loyer (2007)

# Autres combinaisons

$$L_{\alpha,\beta} = \alpha L_1 - \beta L_2$$

Combi [cyc]	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$ [mm]	$\sigma$ [mm]	Commentaires
$L_1$	1	0	190	3.0	Signal original
$L_2$	0	-1	244	4.0	Signal original
$L_{4,3}$	4	3	114	9.2	Quasi Iono-Free
$L_{5,4}$	5	4	101	10.4	Quasi Iono-Free
$L_{9,7}$	9	7	54	9.8	Quasi Iono-Free
$L_{77,60}$	77	60	6	9.8	Iono-Free; ambi entières
<b>LC</b>	<b>1</b>	<b><math>f_2/f_1</math></b>	<b>484</b>	<b>9.8</b>	<b>Iono-Free; ambi réelles</b>
$L_W$	1	1	862	19.6	Wide-Lane
$L_N$	1	-1	107	2.4	Narrow-Lane

**$L_{77,60}$  est intéressante car les ambiguïtés restent entières mais la très faible longueur d'onde la rend inutilisable. On préfère utiliser LC.**



## Exemple d'interet

$$\begin{aligned}
 \text{DIF}(L_1, L_2, L_5) &= \text{IF}(L_1, L_2) - \text{IF}(L_1, L_5) \\
 &= \left( \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_5^2} \right) \cdot L_1 \\
 &\quad - \left( \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot L_2 + \left( \frac{f_5^2}{f_1^2 - f_5^2} \right) \cdot L_5 \\
 \text{MW}(L_i, L_j, P_i, P_j) &= \frac{f_i}{f_i - f_j} \cdot L_i - \frac{f_j}{f_i - f_j} \cdot L_j - \frac{f_i}{f_i + f_j} \cdot P_i - \frac{f_j}{f_i + f_j} \cdot P_j
 \end{aligned}$$

**Table 1** Linear combinations of triple-frequency GPS observations for clock and line bias analysis

Combination	Value
$\text{IF}(L_1, L_2)$	$+2.546 L_1 - 1.546 L_2$
$\text{IF}(L_1, L_5)$	$+2.261 L_1 - 1.261 L_5$
$\text{DIF}(L_1, L_2, L_5)$	$+0.285 L_1 - 1.546 L_2 + 1.261 L_5$
$\text{MW}(L_1, L_2, P_1, P_2)$	$+4.529 L_1 - 3.529 L_2 - 0.562 P_1 - 0.438 P_2$
$\text{MW}(L_1, L_5, P_1, P_5)$	$+3.949 L_1 - 2.949 L_5 - 0.572 P_1 - 0.428 P_5$
$\text{MW}(L_2, L_5, P_2, P_5)$	$+24.00 L_2 - 23.00 L_5 - 0.511 P_2 - 0.489 P_5$

O. Montenbruck, U. Hugentobler, R. Dach, P. Steigenberger, A. Hauschild, Apparent clock variations of the Block IIF-1 (SVN62), GPS satellite, GPS Solut (2012) 16:303–313 DOI 10.1007/s10291-011-0232-x

## Combinaison Melbourne-Wubben

The Melbourne-Wübbena combination is a linear combination of both, carrier phase ( $L_1$  and  $L_2$ ) and code ( $P_1$  and  $P_2$ ) observables as described by [Wübbena, 1985] and [Melbourne, 1985]. This combination eliminates the effect of the ionosphere, the geometry, the clocks, and the troposphere. The combination is given by

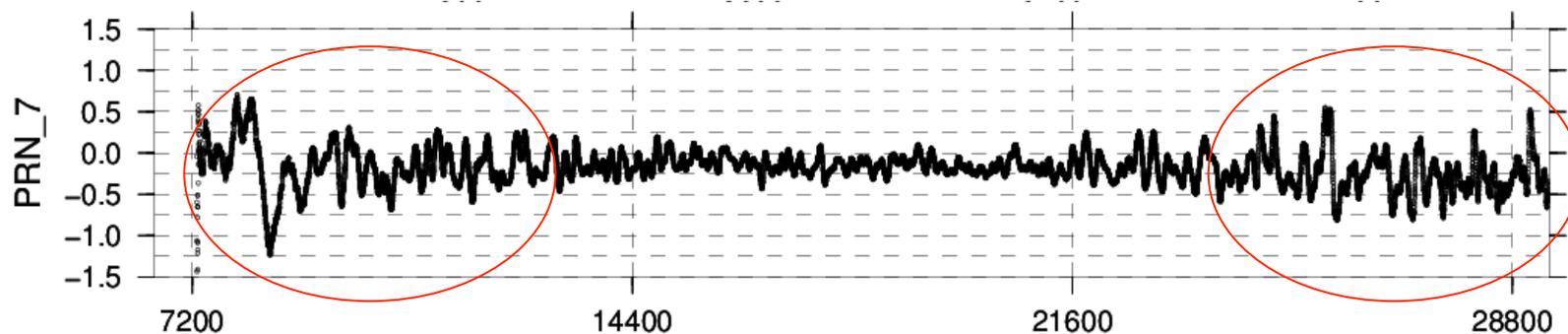
$$L_6 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 + f_2 P_2) . \quad (2.50)$$

$$\lambda_5 = 86 \text{ cm} \quad N_5 = N_1 - N_2$$

Bernese GPS Software Version 5.0, Edited by Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, Michael Meindl (2007)

# Combinaison Multi-path MP

$$MP_1 = R_{L1} - \frac{f_{L1}^2 + f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \phi_1 \lambda_1 + \frac{2f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \phi_2 \lambda_2 + \epsilon_{MP1}$$



Improving the Precision and Accuracy of Geodetic GPS: Applications to Multipath and Seismology. Andria L. Bilich (2006)

# Détection des sauts de cycles

Méthode : analyse de plusieurs combinaisons

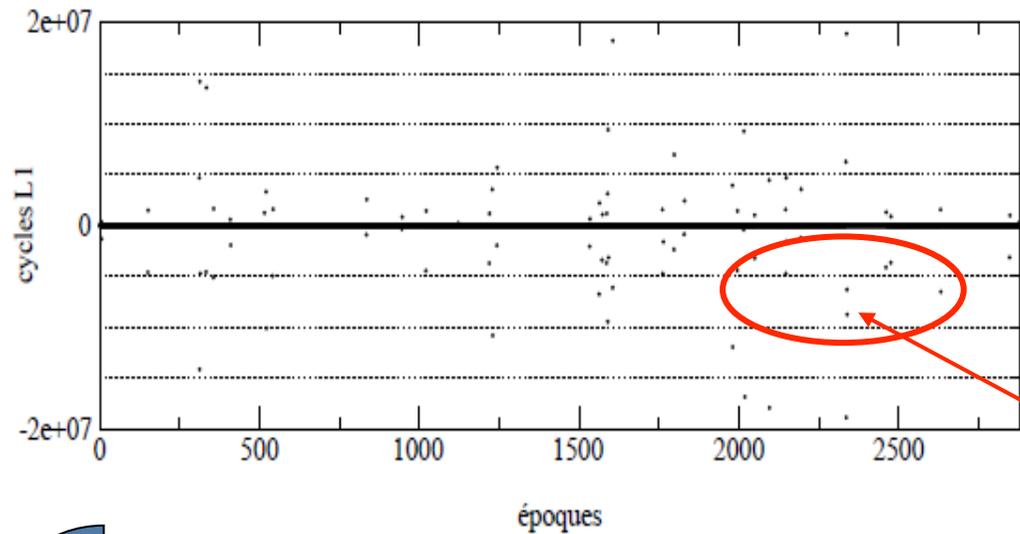
Par exemple :

- Dérivées finie d'ordre 4 de  $L_1$  et  $L_2$  permet d'isoler les « grands » sauts de cycles (on utilise les dérivées d'ordre 4 pour annuler les variations de la distance émetteur-récepteur causée par l'orbite du satellite et la rotation terrestre)
- Dérivées finies d'ordre 1 de la combinaison :
  - Melbourne Wubben – Wide Lane
  - L4 Geometry-Free (GF)

!\\ Un saut de cycle n'est pas visible sur toutes les combinaisons !!

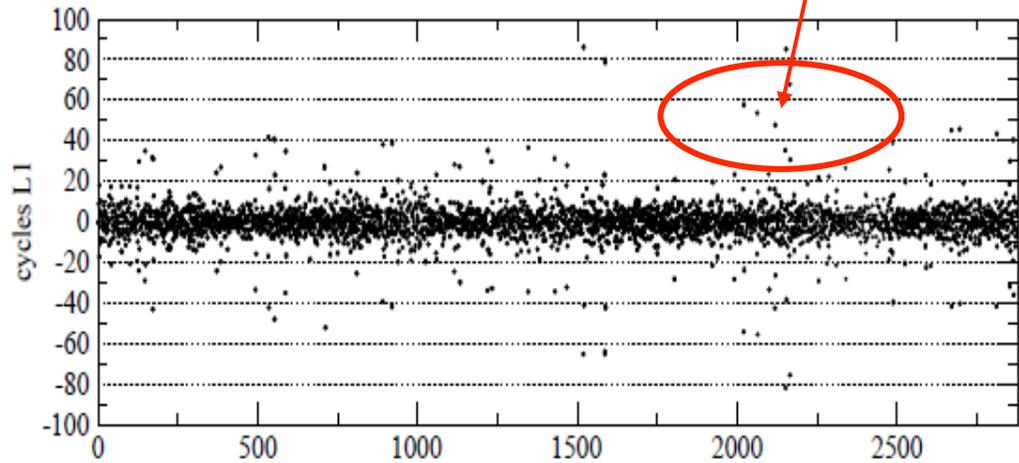
Ex : un saut identique de  $n$  cycle(s) sur  $L_1$  et  $L_2$  n'est pas visible sur la MW-WL

# Différence finie d'ordre 4 de L1



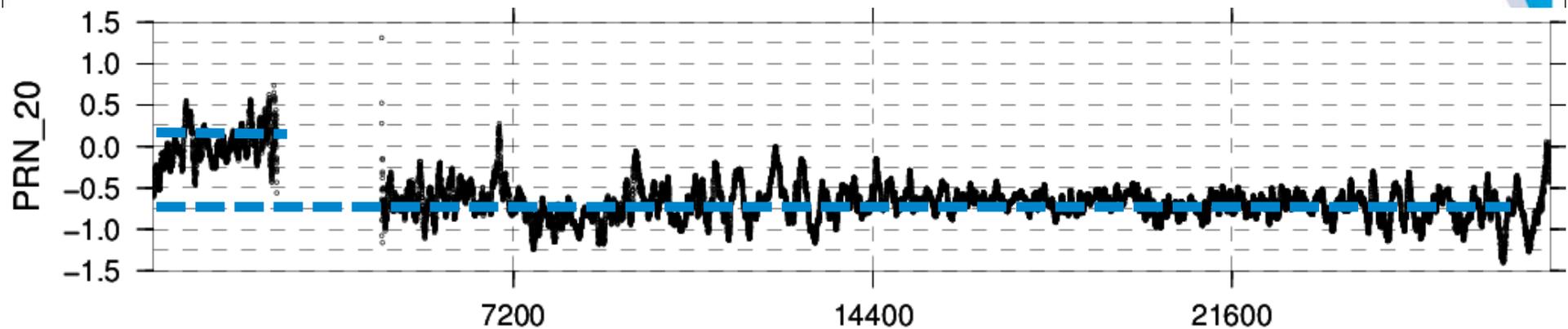
Sauts de cycles

Zoom



# Discontinuité des observations

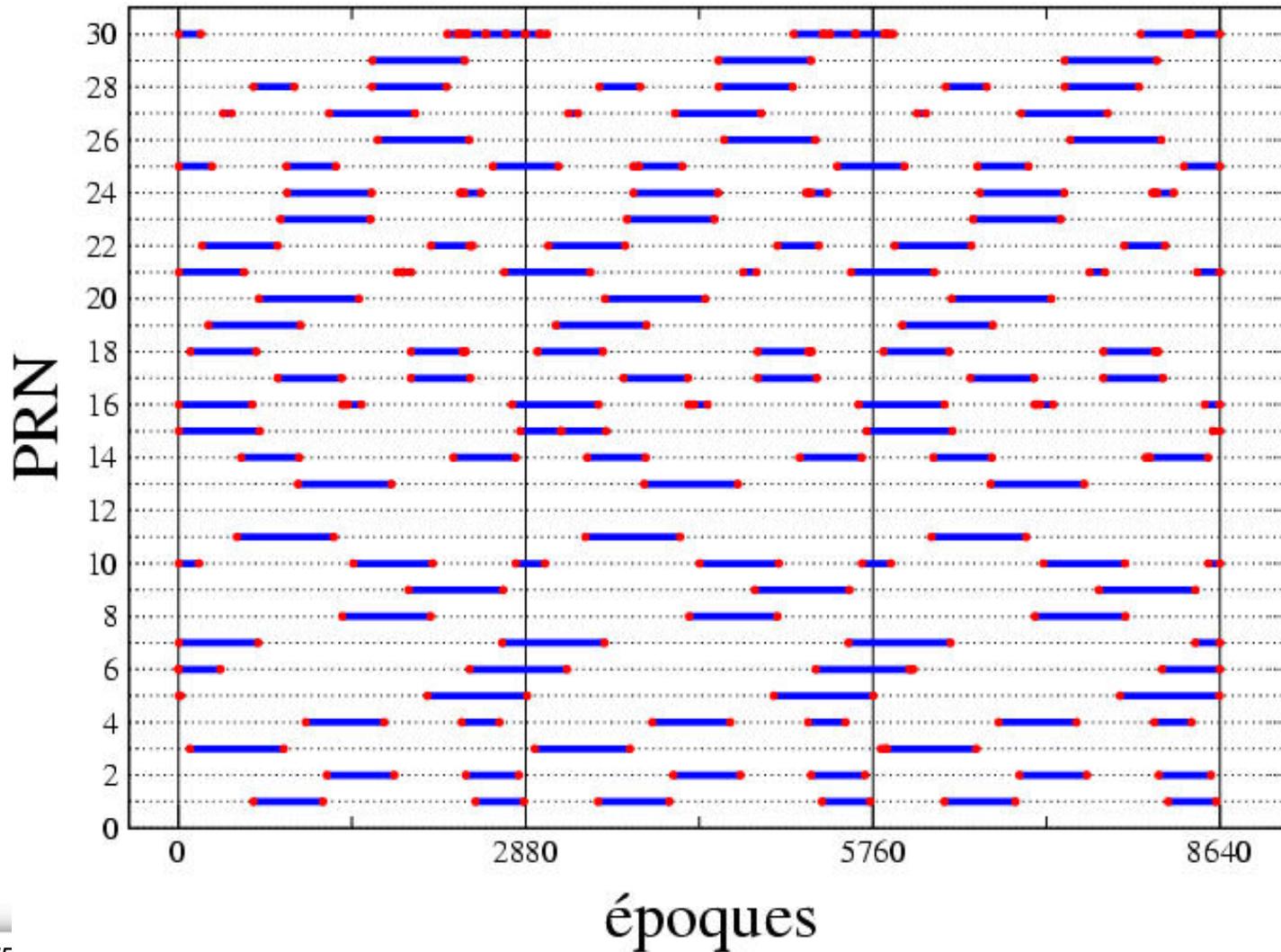
Coupure dans les observations = réinitialisation des ambiguïtés



Ici, la coupure entraîne un saut de 1 cycle dans l'ambiguïté Wide-Lane

Problème : quelle fréquence a subi le saut ?  $L_1$ ,  $L_2$ , les deux ?

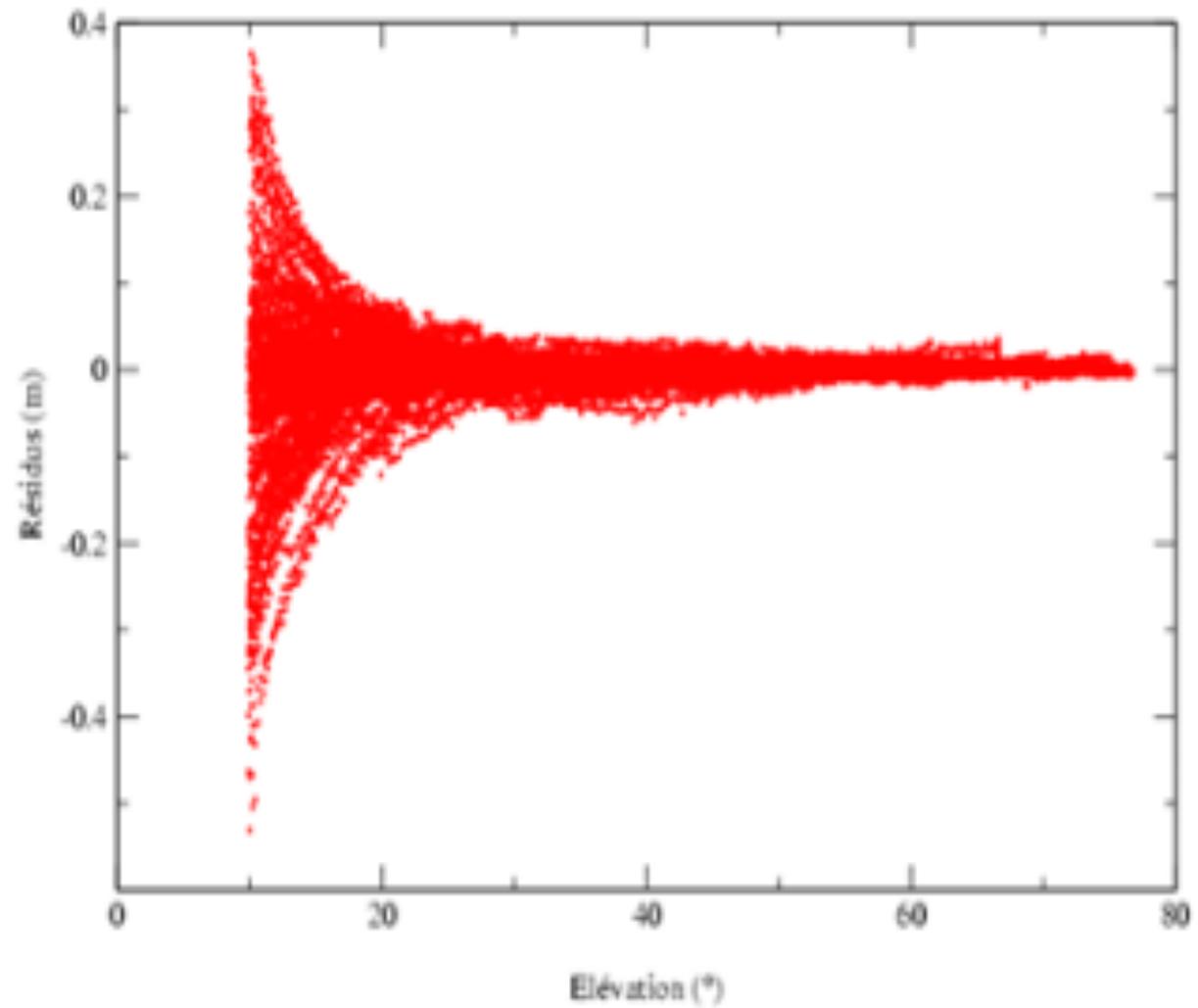
# Découpage en « passages »



# Angle de coupure

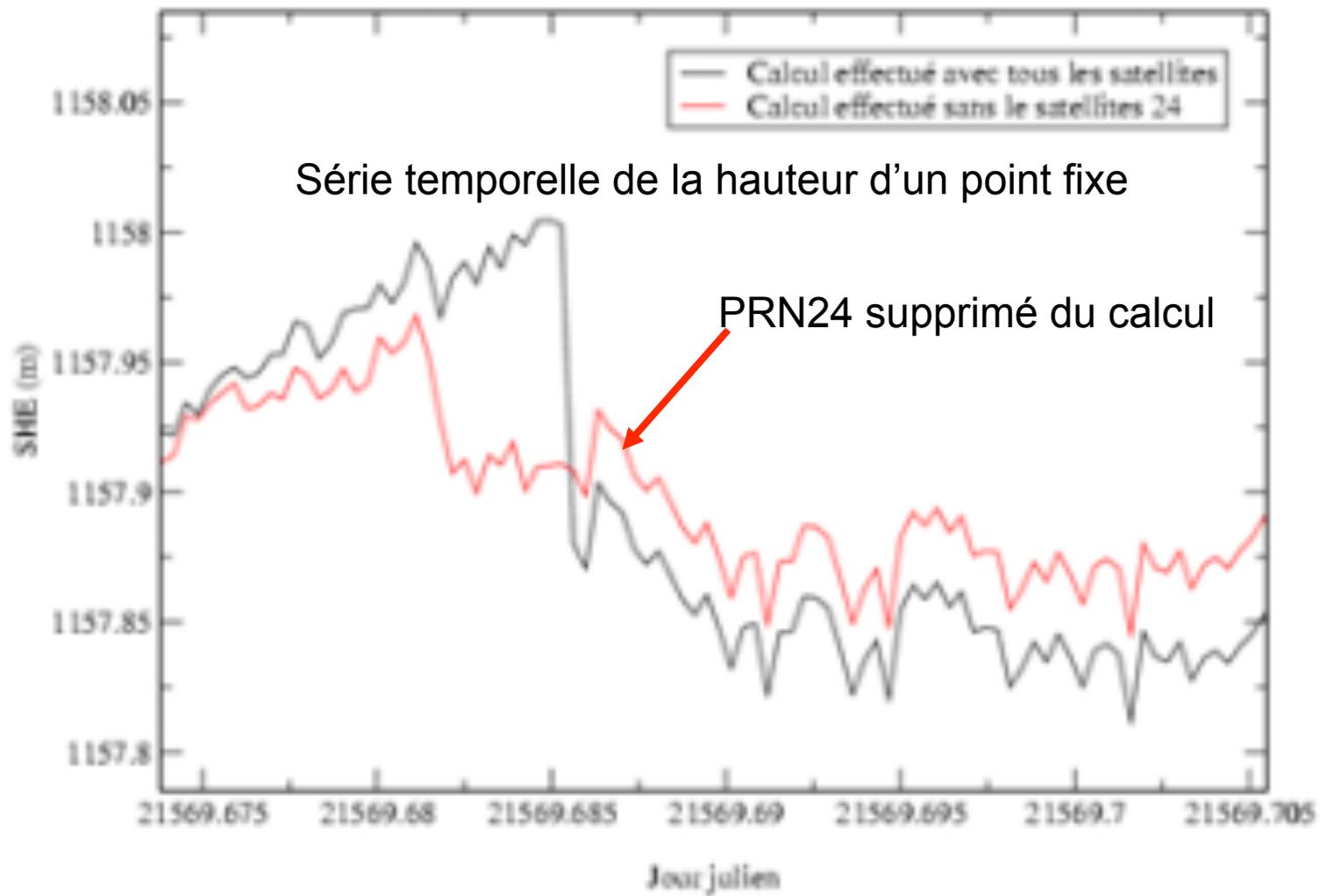
- Dans le repère local du récepteur considéré
- La couche d'atmosphère traversée est d'autant plus grande que l'élévation du signal est faible
- pour des stations a moyenne et haute latitude la densité des observations est d'autant plus importante que l'élévation est faible
- Risque d'éliminer beaucoup de données
- Le choix de l'angle de coupure dépend :
  - De la qualité des modèles
  - Du besoin

## Résidus des observations en fonction de l'élévation



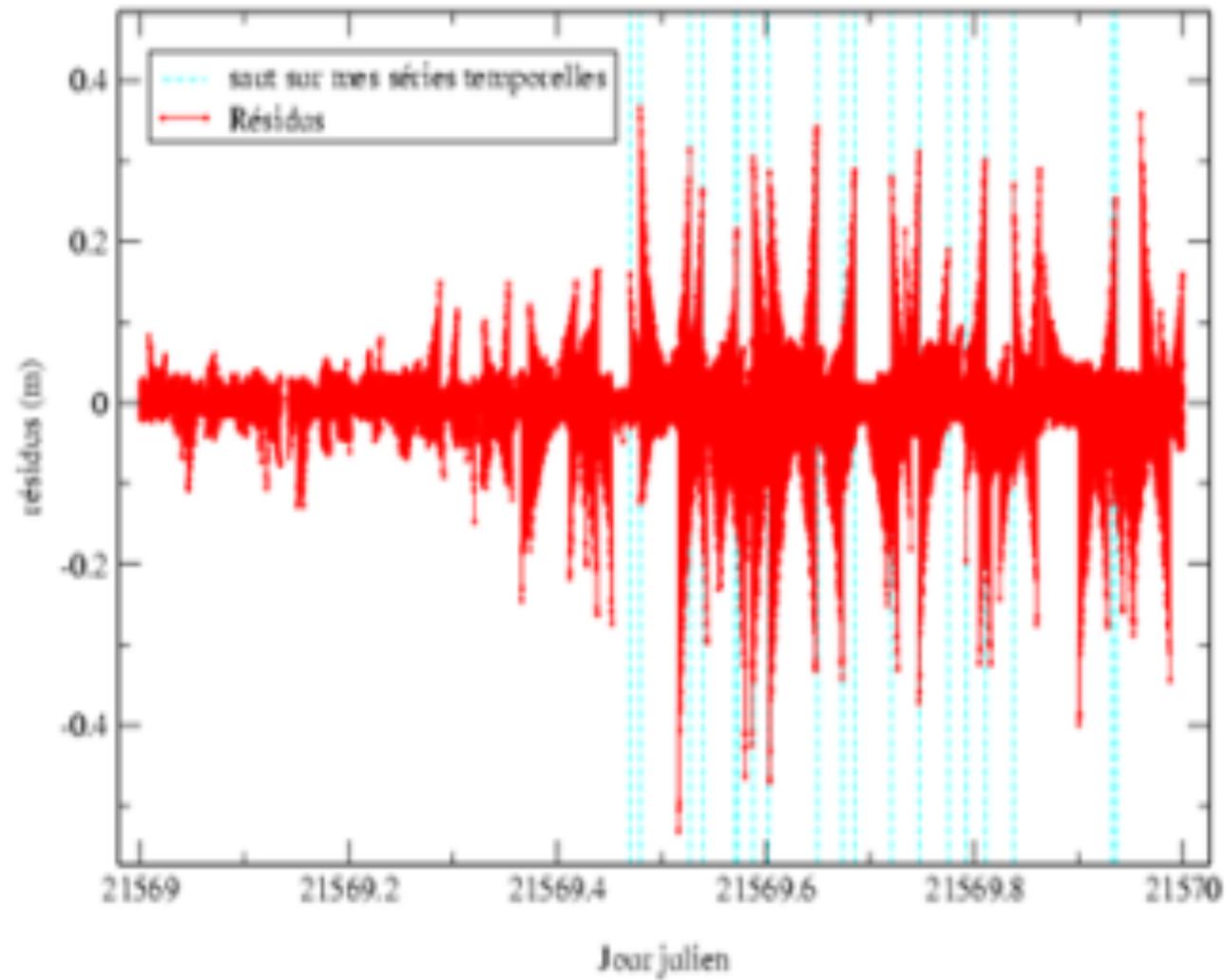
# Influence du début ou de la fin d'un passage d'un satellite sur les sauts

Avec le modèle Tropo ECMWF



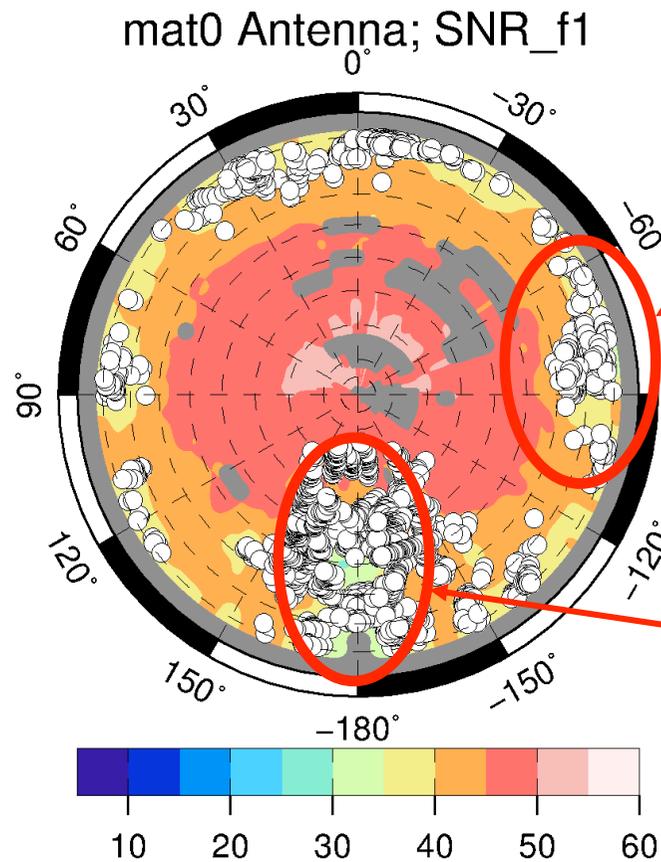
## Résidus de mes observations en fonction du temps

Avec le modèle Tropo ECMWF



# Multi-path, SNR, cycle-slip...

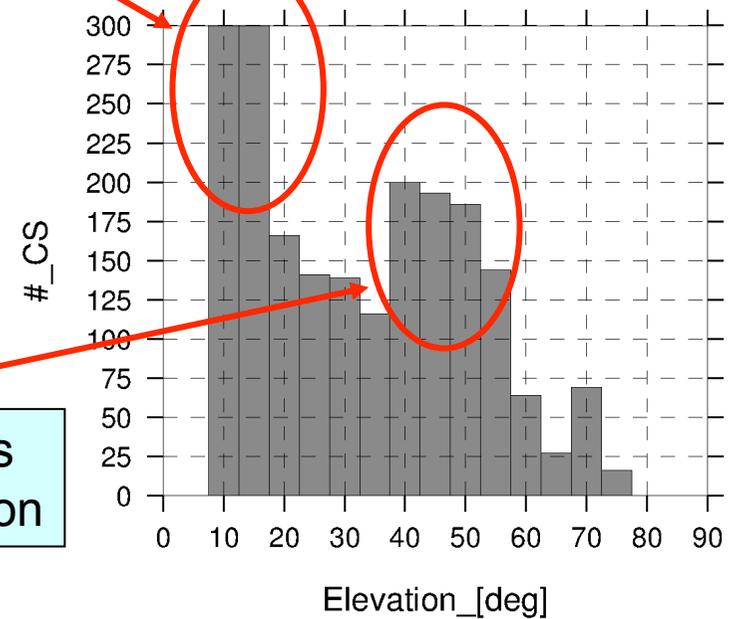
Ex : antenne GPS installée sur un navire



Sauts de cycles  
à basse élévation

Sauts de cycles  
à haute élévation

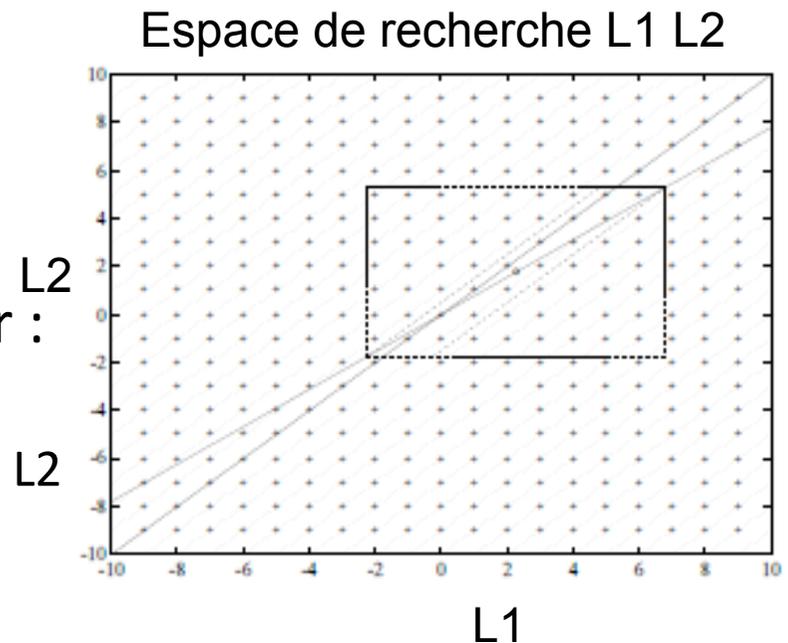
mat0 Antenna; CS\_L4\_vs\_elevation



# Résolution des ambiguïtés entières

# Résolution des ambiguïtés

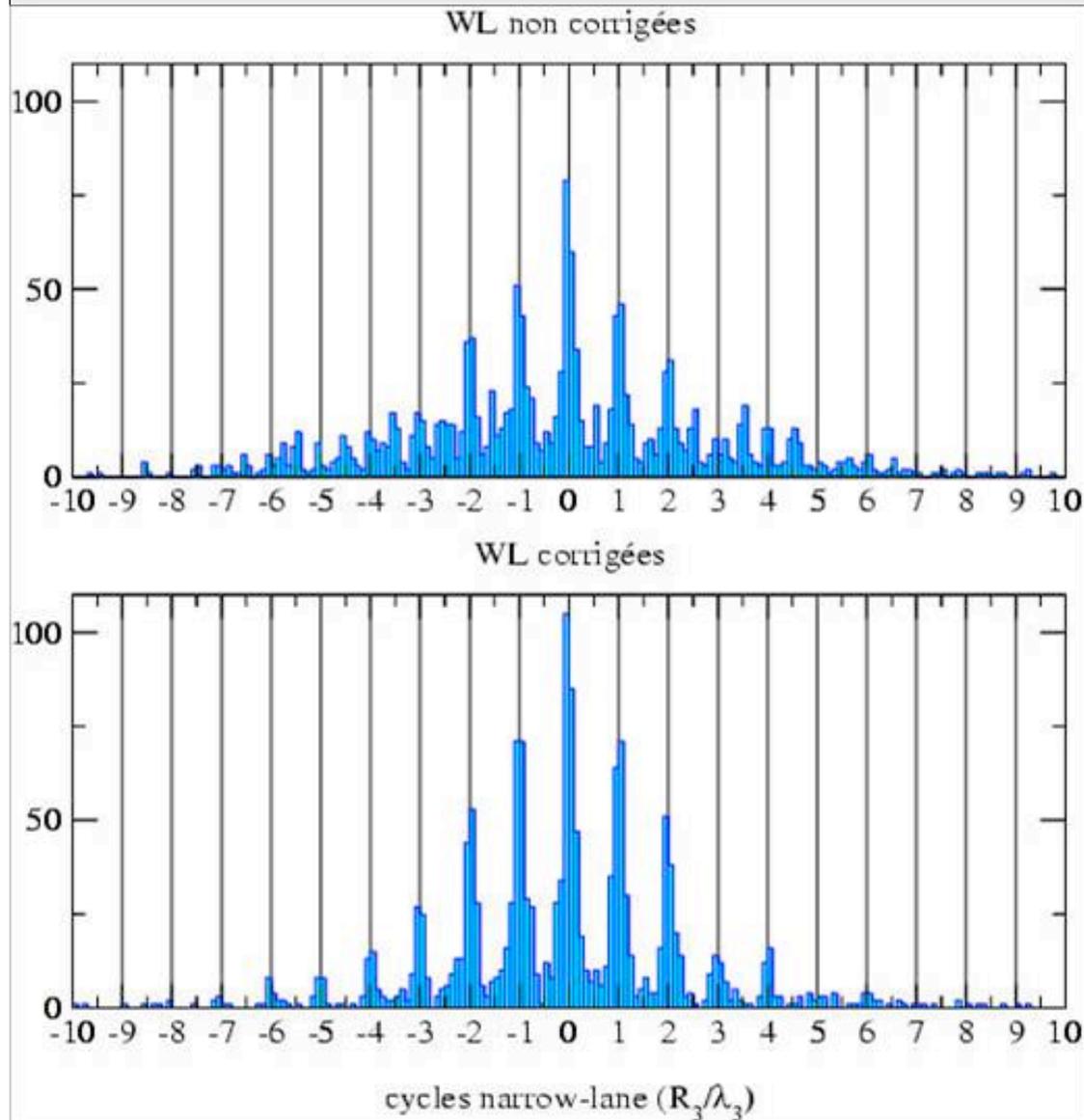
- La résolution des ambiguïtés entières est nécessaire pour un traitement précis
- Illustration au travers du cas « classique » GPS L1 & L2
- C'est un challenge :
  - Trouver la solution entière a des paramètres estimés comme des réels
  - plusieurs dizaines de publications par an depuis 1990 !
    - Key words : QIF, LAMBDA,...
  - Tous les algorithmes sont basés sur :
    - La matrice variance-covariance
    - combinaisons des mesures P1, P2, L1, L2



# Résolution des ambiguïtés au CA CNES-CLS de l'IGS

- Principe « classique » :
  - Détermination de N2-N1 en utilisant la combinaison Wide-Lane/Melbourne-Wubbena
  - report de N2-N1 dans la combinaison Ion-Free et résolution de N1 (et N2)
- Originalité :
  - Traitement des données « zero-différence » au lieu de « double-différences »
  - Nécessité de gérer les biais « hardware »

# Histogramme des ambiguïtés



La connaissance de  $WL=N_2-N_1$  facilite la détermination de  $N_1$

# Equations de mesure

Horloges récepteur-satellite  
(une valeur par époque)  
Inclus les biais hardware  
satellite et récepteur

Ambiguïtés  
(entier par passage)

Code  
Bruit ~ m

$$P_1 = D_1 + e + \Delta h_{p1}$$

$$P_2 = D_2 + \gamma e + \Delta h_{p2}$$

Phase  
Bruit ~ mm

$$\lambda_1 L_1 = D_1 + \lambda_1 d_{windup} - e + \Delta h_{L1} - \lambda_1 N_1$$

$$\lambda_2 L_2 = D_2 + \lambda_2 d_{windup} - \gamma e + \Delta h_{L2} - \lambda_2 N_2$$

Distance géométrique  
+ effets de propagation  
(sauf ionosphère)

Phase Wind-Up

Ionosphere  
(premier ordre)

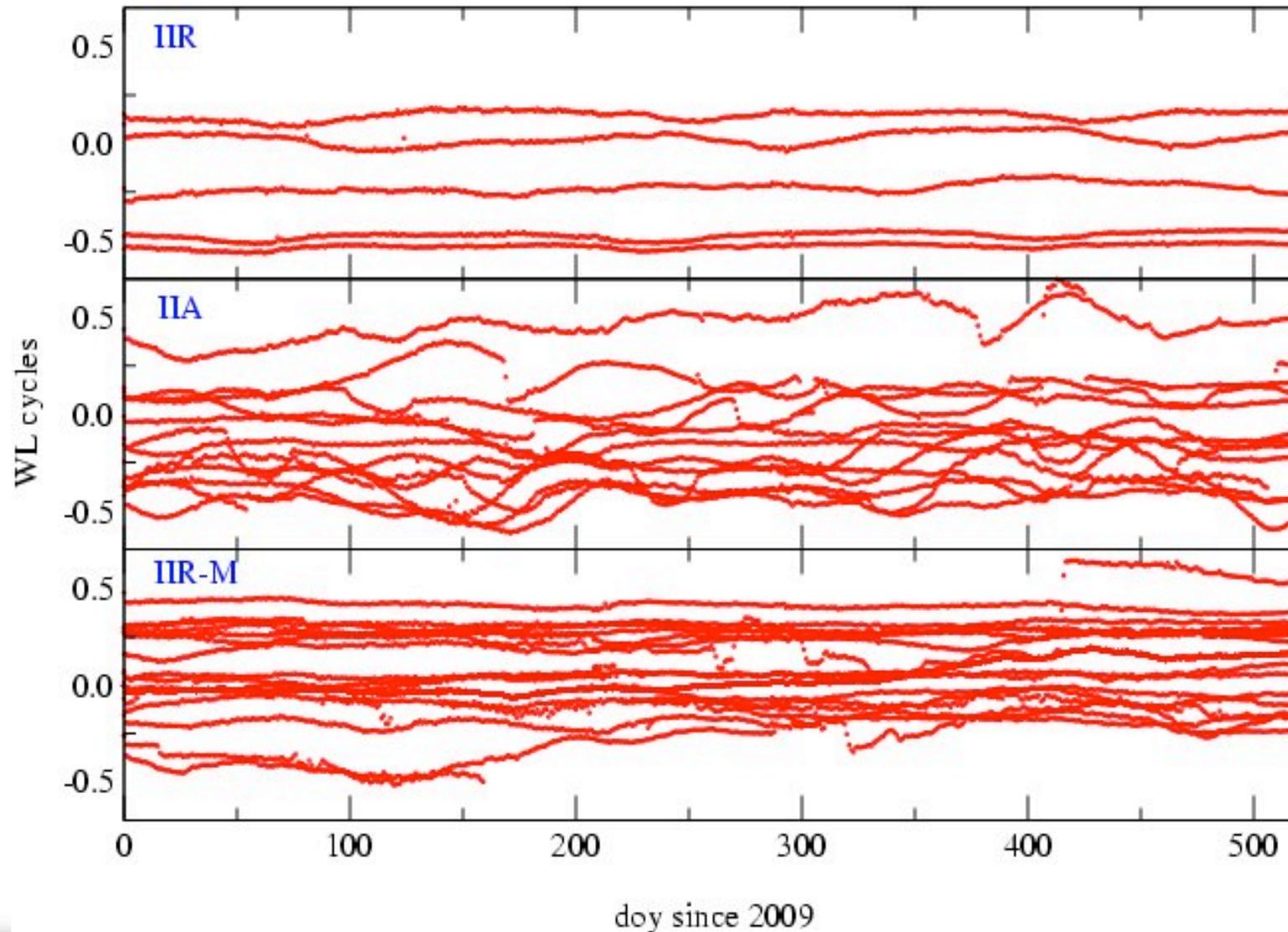
Avec :  $\Delta h = h_i - h^j$   
la différence d'horloges  
récepteur  $i$  – satellite  $j$

# Biais hardware des satellites

- L'idée que les biais « hardware » des satellites puisse être déterminés est à la base de l'idée de traiter les données en mode « zéro-différence »
- Le problème est de découpler les biais satellites et récepteurs qui sont 100% corrélés
- Idée de base : Utiliser un sous-réseau mondial de récepteurs de la même marque dont on suppose que les biais sont « petits » puis :
  - Les biais satellites sont estimés
  - Les biais du réseau complet sont estimés
  - Le processus est itéré (et converge)
- Les biais satellites sont très stables. Les biais du jour J servent de valeur initiale au jour J+1
- Dans la pratique, c'est la combinaison Wide-Lane des biais qui est déterminée (et non les biais L1 et L2 séparément)

# Solution des WSB (Wide-lane Satellite Biases)

WSBREF.res.dat (<http://igsac-cnes.cls.fr/>)



# Résolution des ambiguïtés Step 1

## 1. Wide-lane / Melbourne Wubben combination :

$$L_2 - L_1 - f(P_1, P_2) - (c\tau_{WSB} / \lambda_{WL}) = -N_W - (c\tau_{WRB} / \lambda_{WL})$$

$$N_w = N_2 - N_1$$

$$\lambda_{wl} = 86.19 \text{ cm}$$

$$c\tau_{WSB} / \lambda_{WL}$$

Wide-lane Satellite Bias is provided by CNES-CLS

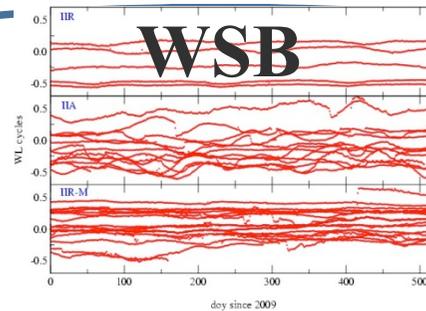
$$N_W + (c\tau_{WRB} / \lambda_{WL})$$

Wide-lane ambiguity  $N_W$  + Wide-Lane Receiver Bias is unknown

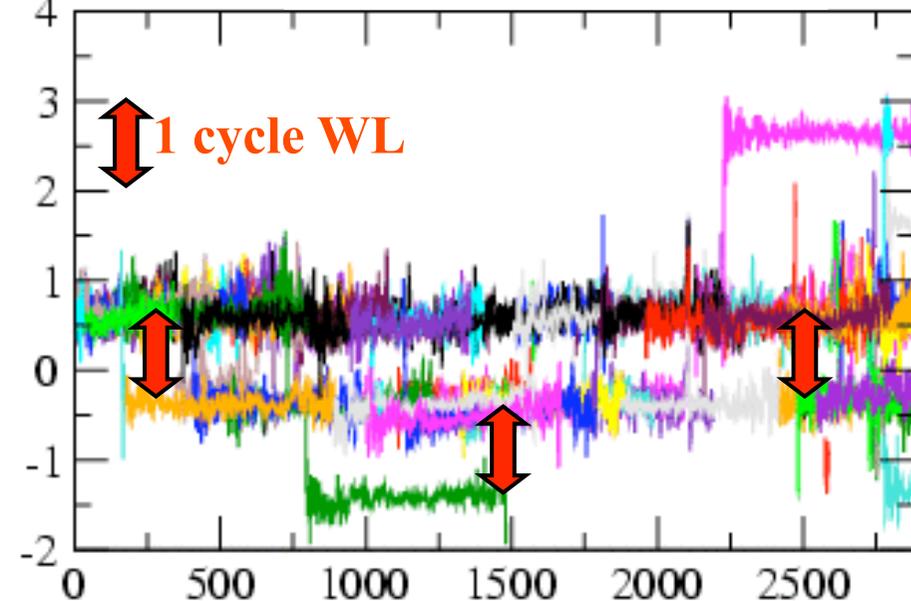
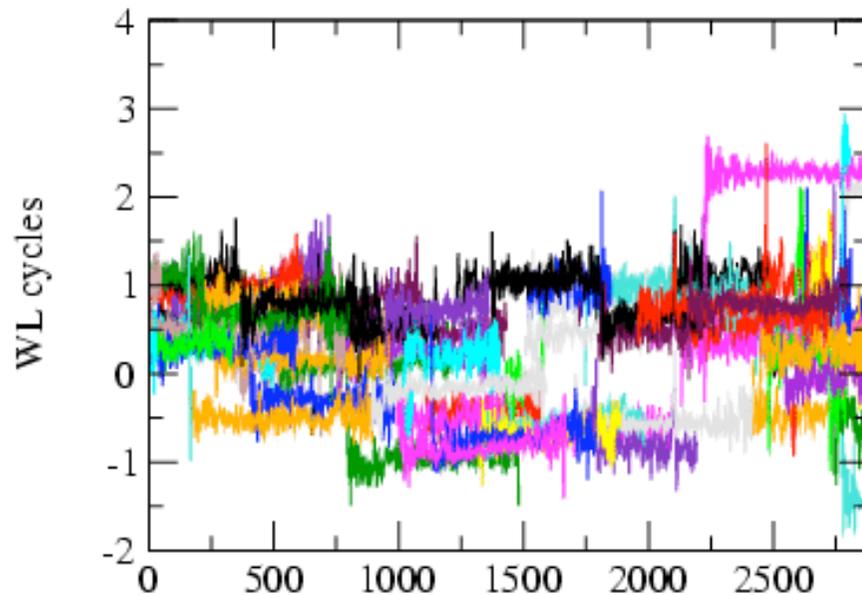
# Résolution des ambiguïtés Step 1

- Zero difference wide-lane residuals before and after correction with WSB values

$$L_2 - L_1 - f(P_1, P_2)$$



$$L_2 - L_1 - f(P_1, P_2) - c\tau_{WSB} / \lambda_{WL}$$



- The WL ambiguity  $N_w = N_2 - N_1$  can be fixed to an integer value
- The Wide-lane Receiver Bias is the remaining fractional part (modulo 1 WL cycle)

# Résolution des ambiguïtés Step 2

## 2. Ionosphere free phase equation & Narrow lane:

L'ambiguïté Wide-Lane  $N_w$  est «injecté» dans la combinaison ionospheric-free de L1 et L2 (plus de mesures de phase a partir de là)

$$\gamma = (\lambda_1 / \lambda_2)$$

$$\frac{\gamma\lambda_1 L_1 - \lambda_2 (L_2 + N_w)}{\gamma - 1} = D + \lambda_c d_{windup} + \Delta t - \lambda_c N_1$$

Integer ambiguity

Narrow-Lane  
wavelength 10.7 cm

Measurements

Propagation  
model

Iono-Free  
phase clock  
differences

## Résolution des ambiguïtés Step 2

- Il est nécessaire de converger vers une solution (orbite/horloge/tropo/...) avec ambiguïtés réelles de bonne qualité : erreurs  $< \frac{1}{2}$  cycle  $\lambda c$  (= 5 cm)
- Le système d'équation normale est constitué avec l'ensemble des observations iono-free
- Le système est réduit (résolution partielle) aux seuls paramètres d'ambiguïtés
- A partir des valeurs des variances, les ambiguïtés N1 sont résolues une à une (méthode de bootstrapping)

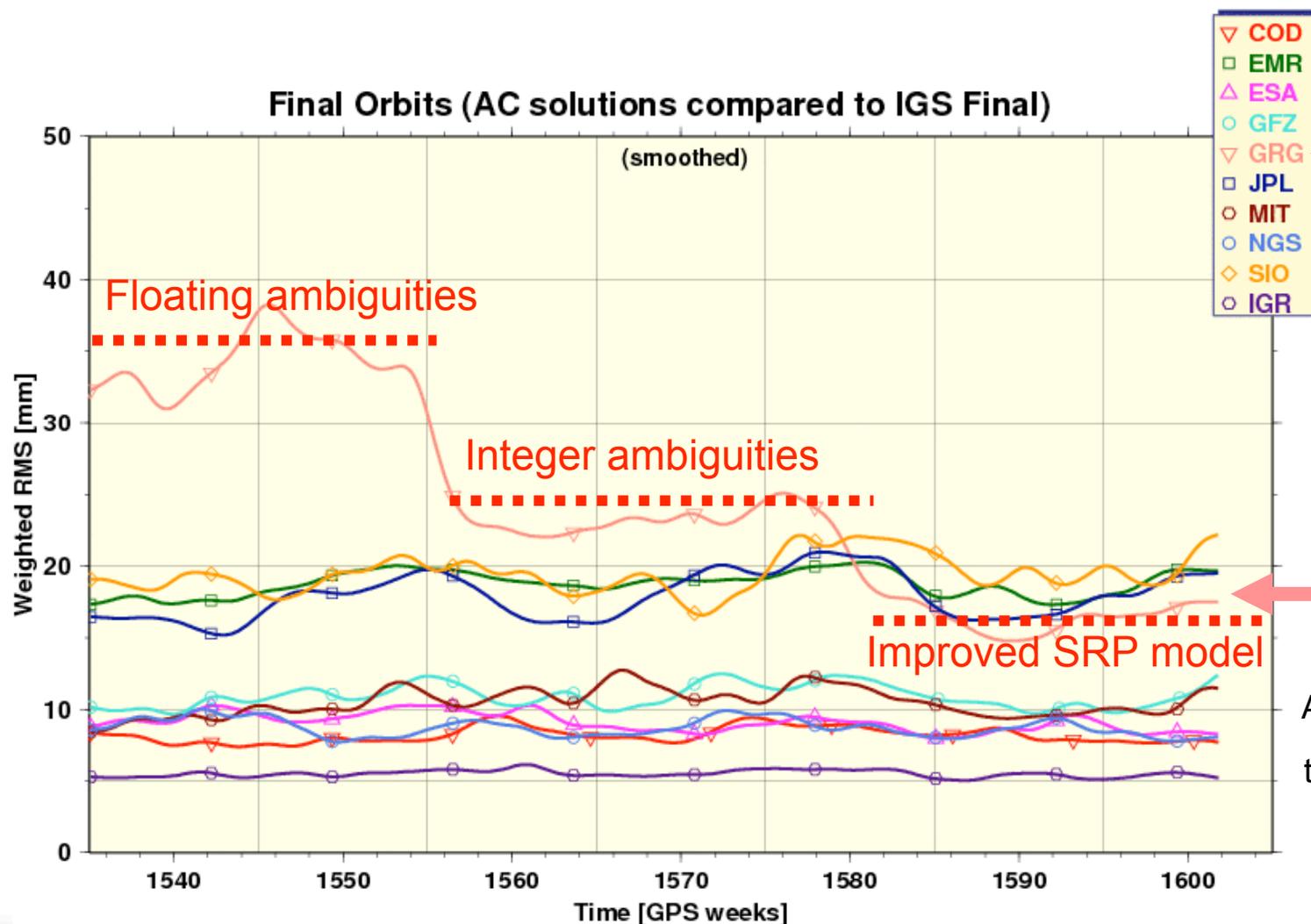
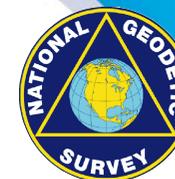
# Résolution des ambiguïtés par bootstrapping

..\..\..\AMBIGUITES\film 3.avi

## Résolution des ambiguïtés Step 3

- N1 et N2 étant connues le jeu des mesures de phase initial est corrigé
- Les mesures de phase deviennent des mesures de range avec des précisions millimétriques !
- Les mesures de pseudo-distances sont éliminées du fichier de mesure
- Une nouvelle solution (orbite/horloge/tropo/...) est calculée
- La solution d'orbite/horloge est soumise à l'IGS

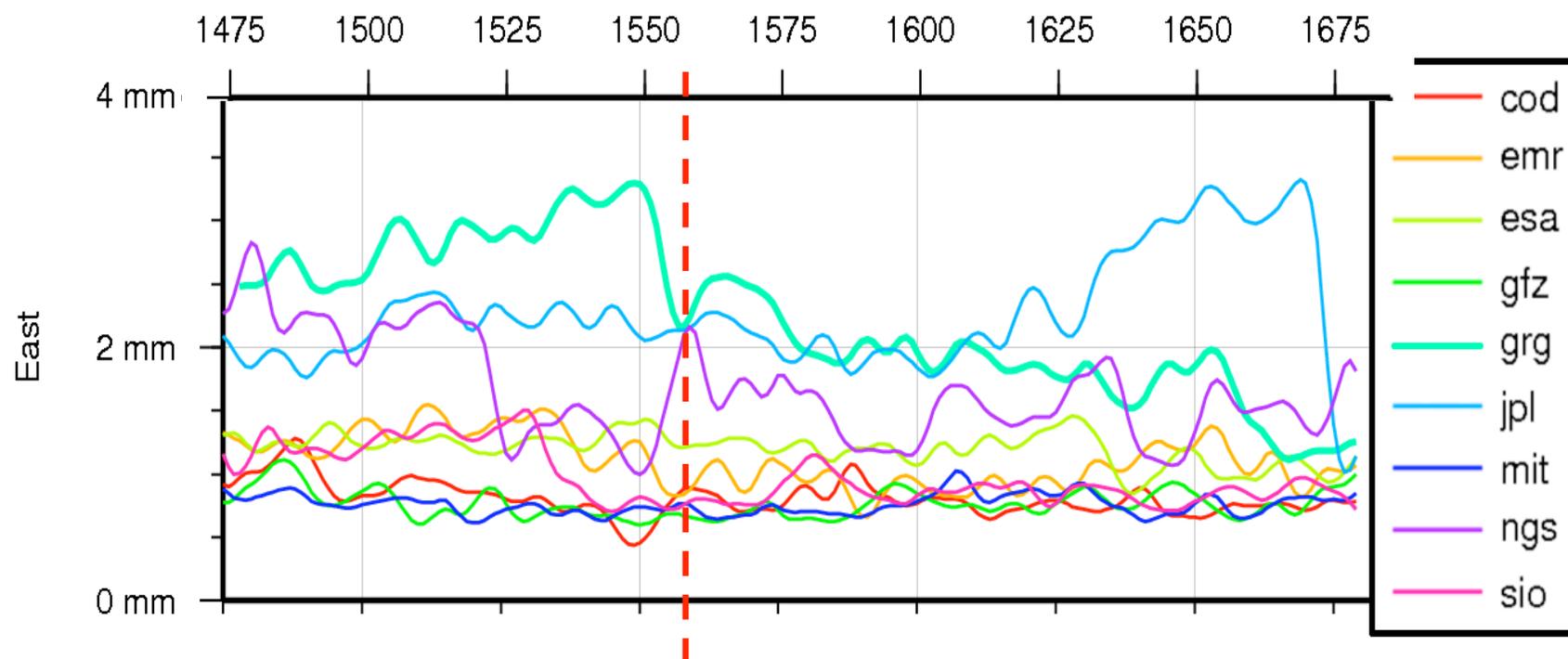
# Impacts of ambiguity fixing : orbits



Acknowledgements  
to Jim Ray (NOAA)

# Impacts of ambiguity fixing : station network

RMS of AC-igs residuals (mm)



Semaine 1555

Courtesy  
P. Rebischung (IGN)





J Geod

DOI 10.1007/s00190-012-0559-2

ORIGINAL ARTICLE

# **Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES–CLS IGS Analysis Center**

**Sylvain Loyer · Félix Perosanz · Flavien Mercier ·  
Hugues Capdeville · Jean-Charles Marty**

Received: 26 October 2011 / Accepted: 21 March 2012

# Synthèse

- Les combinaisons des mesures GNSS sont très utiles
  - Outliers, cycle-slips,...
  - Produits ionosphériques
  - résolution ambiguïtés (bi-fréquence, tri-fréquence)
- Suivant le problème que l'on veut résoudre il faut choisir des modèles et une paramétrisation adaptée :
  - Rapport observations/inconnues (défaut de rang)
  - Corrélations entre paramètres (ex: UP et tropo)
  - Intérêt ? nécessité ? Légitimité ? d'appliquer des contraintes
- Mais aussi choisir :
  - Quelle stratégie ? (ex: DD ou PPP)
  - Quelle méthode mathématique ? Quel logiciel ?