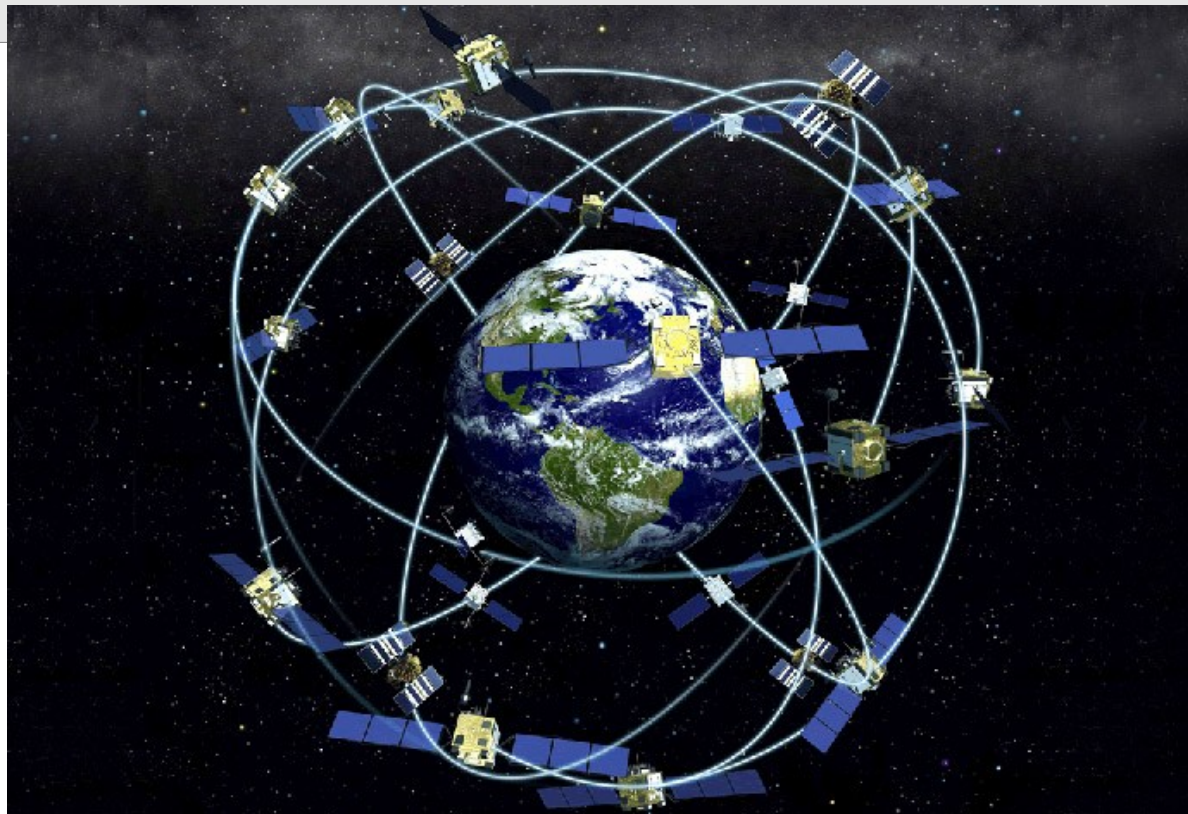


# Introduction aux Systèmes de Positionnement par Satellite (GNSS)



Stage de terrain Géopotential - M1  
1 - 8 octobre 2014

Emilie Klein

# Principe Général

A quoi ça sert ?

Déterminer la position et la vitesse d'un récepteur à tout moment, en tout point de la planète, quelque soit la météo.

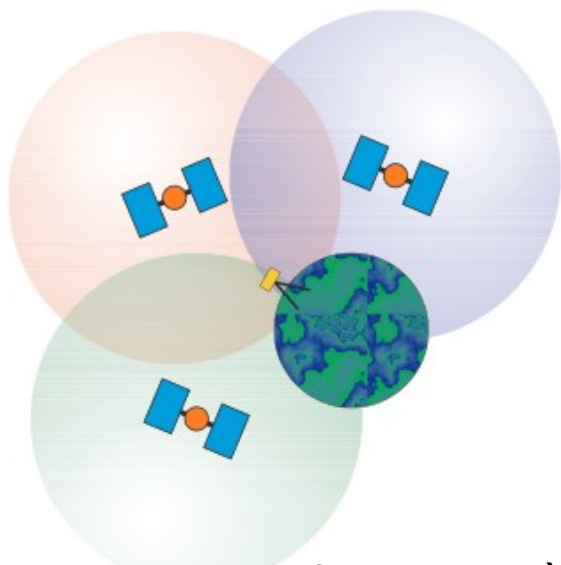
Comment ?

→ Mesure du **temps de propagation** du signal émis par un satellite, jusqu'à sa réception par un récepteur sur Terre.

→ Positionnement par **trilatération** (intersection des signaux provenant de plusieurs satellites), nécessitant des **horloges parfaitement synchronisées**.

*En théorie*, il faut donc au minimum **3 satellites**.

→ Estimation de 3 inconnues de position (X, Y, Z) dans un repère géocentrique



*En pratique*, il y a une 4ème inconnue  $\delta t$ , liée à la désynchronisation du temps récepteur avec le temps GNSS

→ 4 inconnues : 4 satellites sont nécessaires

Un GNSS est **opérationnel** dès lors qu'en tout point de la Terre, 4 satellites sont observables en simultané

→ il faut 24 satellites fonctionnels en orbite autour de la Terre, en permanence.

# Systeme de référence

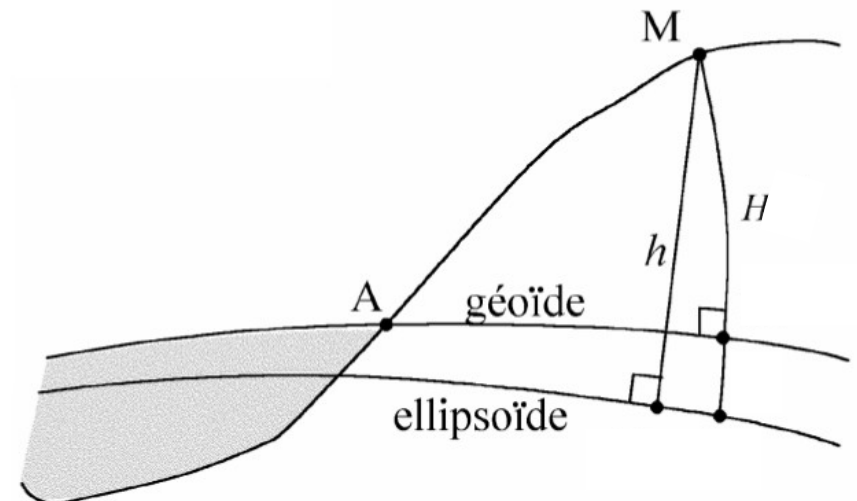
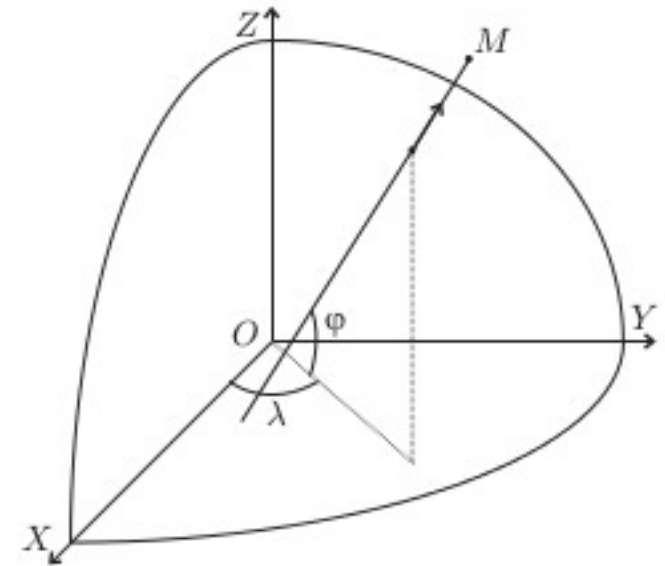
On se positionne, mais par rapport à *quoi* ?

Un système de référence est un **ensemble de conventions** permettant la description précise d'un point situé dans l'espace.

On l'assimile à un **objet mathématique** formant une *origine et un système d'axe*  $R=(O; \vec{i}; \vec{j}; \vec{k})$  vérifiant les propriétés suivantes :

- $O$  est voisin du centre des masses de la Terre
- $\|\vec{i}\| = \|\vec{j}\| = \|\vec{k}\| \approx 1$
- $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  base orthonormale directe telle que
  - ▶  $(O, \vec{k})$  parallèle à l'axe des pôles
  - ▶  $(O, \vec{i}, \vec{k})$  confondu avec le plan méridien de Greenwich
- repère en co-rotation avec la Terre dans l'espace

On y associe un **ellipsoïde de référence (WGS84)** permettant de décrire un point dans l'espace selon ses **coordonnées géographiques**.



# Différents GNSS

- **GPS**, *Global Positioning System*, système américain
- **Glonass**, système russe, constellation fonctionnelle depuis 1996
- **Galileo**, système européen, en phase de lancement des satellites opérationnels
- Et aussi **Beidou**, système chinois, **QZSS** système japonais,...

# Global Positioning System

## Quelques dates

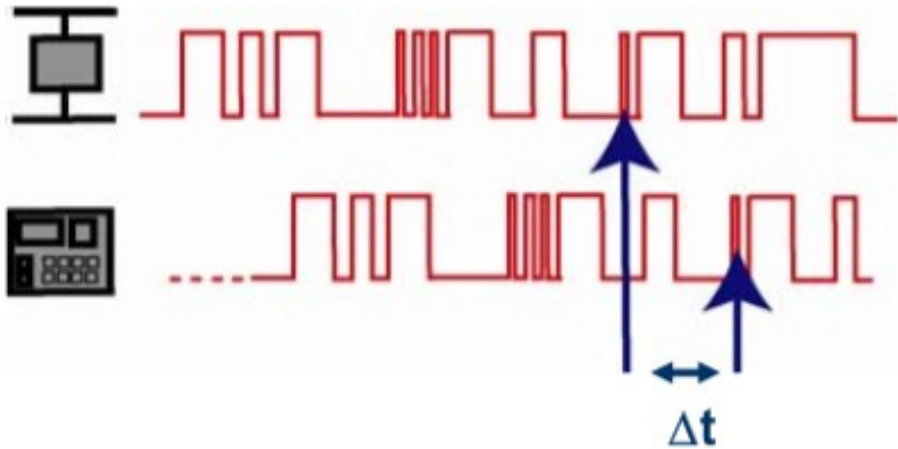
- Système militaire américain, conçu, mis en service et maintenu par la NGA (*National Geospatial Intelligence Agency*)
- 1978 : Lancement du premier satellite
- 1995 : Système totalement opérationnel, (avec dégradation volontaire des signaux pour le secteur civil)
- 1998 : ajout de 2 nouveaux signaux destinés au secteur civil (amélioration de l'efficacité et la précision du système)
- 2000 : désactivation du système de dégradation volontaire des signaux

## Organisation en 3 segments :

- **Segment Spatial :**
  - Constellation composée de plus de 30 satellites en orbite, répartis sur 6 plan orbitaux assurant la visibilité de 4 à 8 satellites avec une élévation supérieure à  $15^\circ$  en tout point de la Terre
- **Segment Sol :**
  - Pilote et surveille le système grâce à 5 stations de contrôle au sol et 10 stations de poursuite GPS servant de référence à la constellation
- **Segment Utilisateur :**
  - Ensemble des utilisateurs civils et militaires du système

# Signaux GPS

## Le code pseudo-aléatoire



**Signaux créneaux non ambigus** (ne se répètent jamais à l'identique), émis **simultanément** par le satellite et le récepteur, permettant la mesure précise du **temps de propagation** entre satellite et récepteur.

Signaux ne répondant pas aux lois de propagations électromagnétiques, ils sont donc modulés par des porteuses.

Il en existe plusieurs types :

→ **C/A code** : code civil non classifié, composé d'une suite de 1023 bits (durée 1ms), se répète toutes les 1 ms. Modulé par la porteuse L1.

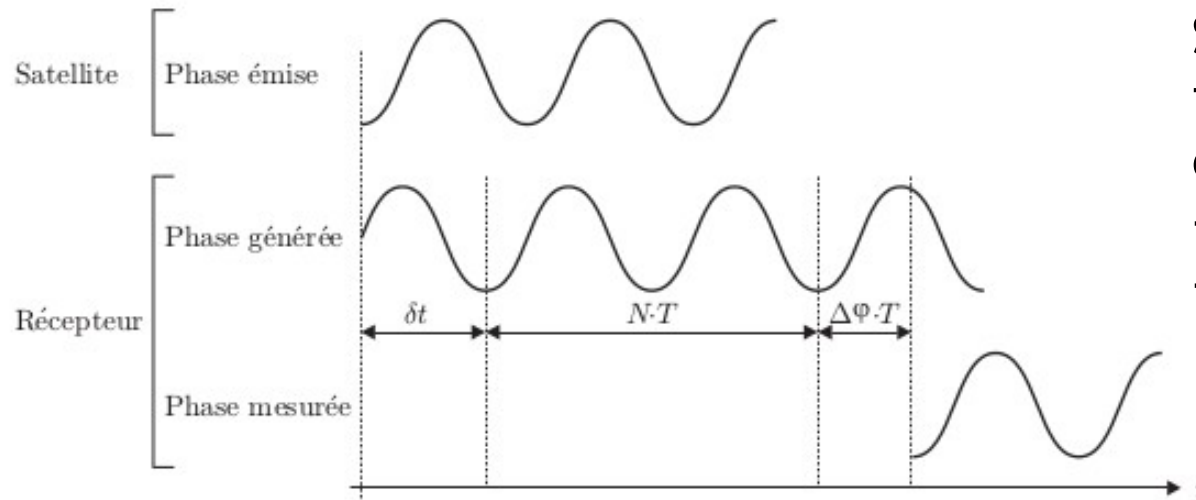
→ **P code** : code militaire, non classifié mais crypté (*anti-spoofing*). Modulé par L1 et L2.

→ et d'autres, commerciaux (L2C-code) ou militaires (M-codes)...

La mesure de ces codes permettent une **précision** de positionnement allant de **15 m à 50 cm**, selon le type de traitement.

# Signaux GPS

## Les ondes porteuses



Signaux sinusoïdaux ambigus, dont il y a plusieurs fréquences différentes :

→ L1 : 1,575 GHz,  $\lambda = 19$  cm

→ L2 : 1,277 GHz,  $\lambda = 24,4$

(→ L5 : 1,176 GHz)

$\Delta \delta$   
Avec  $N$  = nombre entier de cycles,  $T$  = période du cycle,  
la partie fractionnaire du cycle mesuré.

Seule la **partie fractionnaire** de la durée de propagation du signal entre le satellite et le récepteur, comptée en nombre de cycles, peut être mesurée par les récepteurs : le **nombre entier de cycles** écoulés depuis le début de la mesure est inconnu : on parle d'**ambiguïté de la mesure de phase**. On définit alors l'ambiguïté entière comme étant le nombre entier de cycles écoulés au début de la mesure. Il est indispensable de fixer cette ambiguïté.

La mesure de la phase permet une **précision** de positionnement allant de **50 cm à 5 mm**, selon le type de traitement.



# Signaux GPS

## Le message de navigation

Contient les informations relatives à la constellation GPS :

- Les éphémérides : positions et informations concernant les satellites
- La correction d'horloge satellite à appliquer pour s'affranchir de sa dérive par rapport au temps GNSS
- Les éléments permettant l'obtention de la date d'émission du signal dans l'échelle du temps du satellite
- Des informations générales comme le modèle paramétrique global de l'ionosphère (pour sa correction), l'almanach de tous les satellites (santés...)



# Equation d'observation

Prenons un récepteur  $i$  et un satellite  $j$  :

$$\lambda \Delta \varphi_i^j(t_r) = r_i^j(t_e, t_r) + c(\delta t_i - \delta t^j) + \tau_i^j(t_e, t_r) - \lambda N_i^j(t_r) + \varepsilon_i^j(t_r)$$

Avec :

- $t_e$  le temps d'émission du signal par le satellite  $j$  (échelle de temps GNSS)
- $t_r$  le temps d'émission du signal par le récepteur  $i$  (échelle de temps GNSS)

-  $\lambda$  la longueur d'onde du signal

-  $\lambda \Delta \varphi_i^j(t_r)$  la partie décimale du déphasage, qui est **mesurée**

- la distance géométrique (satellite-récepteur) :

$$r_i^j(t_e, t_r) = \sqrt{[x_i(t_r) - x^j(t_e)]^2 + [y_i(t_r) - y^j(t_e)]^2 + [z_i(t_r) - z^j(t_e)]^2}$$

-  $\delta t_i$  l'erreur d'horloge du récepteur

-  $\delta t^j$  l'erreur d'horloge du satellite

-  $\tau_i^j$  les retards de propagations liées à l'atmosphère (tropo et iono)

-  $N_i^j(t_r)$  le nombre entier de cycles

-  $\varepsilon_i^j$  le bruit de la mesure de pseudo-distance

# Equation d'observation

$$\lambda \Delta \varphi_i^j(t_r) = r_i^j(t_e, t_r) + c(\delta t_i - \delta t^j) + \tau_i^j(t_e, t_r) - \lambda N_i^j(t_r) + \varepsilon_i^j(t_r)$$

→ Sont connus ou modélisés :

$\tau_i^j$ , retard de propagation,  $\delta t^j$  l'erreur d'horloge du satellite ainsi que la position du satellite à l'instant  $t_e$  ( $x^j(t_e), y^j(t_e), z^j(t_e)$ )

→ Sont inconnus et à déterminer :

$\delta t_i$ , la position du récepteur à l'instant  $t_r$  ( $x_i(t_r), y_i(t_r), z_i(t_r)$ ) et le nombre entier de cycle  $N_i^j$

## Résolution des ambiguïtés

Etape cruciale du traitement pour un positionnement précis.

Méthode de résolution en post-traitement en un processus de recherche discrète.

En pratique, plus les sessions d'observations sont longues, moins l'effet des ambiguïtés non fixées est important

# Les erreurs sur les mesures GPS

## Erreur sur l'orbite et l'horloge des satellites

La précision du positionnement dépend directement de la précision de l'orbite des satellites

- **Positionnement en temps réel** : utilisation d'orbites radiodiffusées, ie *broadcast*, précision 1m
- **Positionnement a posteriori** : utilisation des orbites IGS (*International GNSS Services*), précision variable :
  - *Orbites Ultra-rapides (igu)* : prédites, disponibles en quelques heures, précision de 5cm
  - *Orbites rapides (igr)* : estimées, disponibles en 36h, précision 2,5 cm
  - *Orbites Finales (igs)* : estimées, disponibles en 12 à 18 jours, précision 2,5 cm, (horloges finale)

## Effets relativistes

La fréquence des horloges des satellites est affectées par le mouvement des satellites et par les écarts sur l'influence du champ de gravitation terrestre.

Effet de l'ordre de  $0,1 \mu\text{s}$  sur la mesure du temps de propagation.

→ correction de cet effet indispensable

# Les erreurs sur les mesures GPS

## Erreurs liées à la propagation

La vitesse de propagation des signaux change avec le déplacement du signal à travers l'ionosphère et la troposphère.

### Délai ionosphérique :

Milieu dispersif (la propagation dépend de la fréquence de l'onde)  
Allongement du temps de parcours entre le satellite et le récepteur, allant de 1 à 100 m en fonction de l'agitation ionosphérique liée à :

- la latitude du point
- l'activité solaire
- la période de l'année
- du jour ou de la nuit

Elimination de ce délai troposphérique par combinaison **ionosphere-free**, CL des 2 fréquences porteuses :

$$L_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2$$

# Les erreurs sur les mesures GPS

## Retard troposphérique :

Effet dégradant surtout la détermination de la composante verticale.

Il varie en fonction de l'élévation du satellite au dessus de l'horizon.

On le corrige par estimation de paramètres troposphériques, en divisant en 2 composantes :

- le *retard hydrostatique* : de l'ordre de 2.3 m au zénith ; varie très lentement et est calculable à partir des mesures de pression sol (formule de Saastamoinen)
- le *retard humide* : entre 5 et 50 cm au zénith, très variable et complexe à modéliser...

# Les erreurs sur les mesures GPS

## Erreurs liées à la station

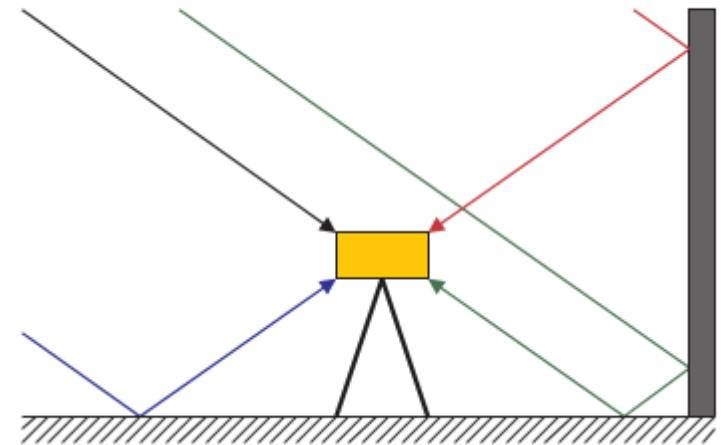
### Les multi-trajets :

Réflexions parasites sur des surfaces proches du récepteurs (immeubles, par ex). Il dépend donc de l'environnement autour de l'antenne, du type d'antenne et de l'élévation des satellites (plus le satellite est bas, plus il y est sensible).

→ erreurs de plusieurs cm

*Pour s'en affranchir :*

- éloigner l'antenne des surfaces réfléchissantes,
- filtrer les signaux reçus,
- sélectionner les satellites les plus hauts,  
(*Elevation mask*)
- faire des sessions longues...



### Les masques :

Obstacles physiques qui empêchent la réception du signal, entraînant une atténuation de ce signal voire sa perte momentanée.

*Seule solution :* Choisir judicieusement la localisation de la station... !

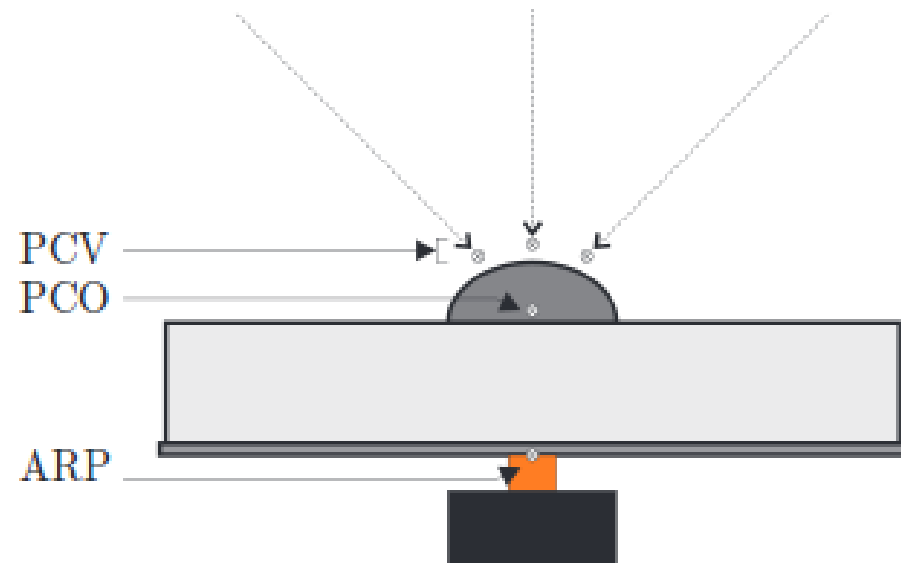
# Les erreurs sur les mesures GPS

## Le centre de phase de l'antenne :

Point par rapport auquel se fait la mesure.

Il faut

- connaître précisément sa position, elle varie en fonction de l'incidence du signal
- Ramener la mesure au point matérialisée au sol



PCO = Phase center Offset ;  
ARP = Antenna Reference Point ;  
PCV = Phase Center Variation

Les PCO et PCV sont fournis par l'IGS et introduits directement dans les logiciels de traitement.

## *A faire :*

- Mesure précise du vecteur (marqueur sol-ARP) pour ramener la mesure au marqueur
- Orienter les antennes dans la même direction (au Nord en général) pour que toutes les corrections soient identiques et s'éliminent en calcul différentiel.



# Traitement des données GPS

Il existe deux stratégies de traitement :

- *Positionnement absolu ou ponctuel* : la position de l'antenne est déterminée de manière directe à partir des observations et de la position des satellites, dans le même référentiel.

Ex de logiciels utilisés : Gipsy-Oasis, GINS

Il existe aussi des serveurs de traitement :

- NASA/Jet Propulsion Laboratory (USA)
- Ressources Naturelles Canada
- University of New Brunswick (Canada)

- *Positionnement relatif ou différentiel* : le vecteur séparant l'antenne de position inconnue et une ou plusieurs stations de référence est estimé. L'antenne est ainsi positionnée dans le même référentiel que les stations de référence.

Ex de logiciels utilisés : GAMIT/GLOBK ; le Bernese

- Scripps Orbit and Permanent Array Center

# Positionnement différentiel

Considérons 2 récepteurs  $i$  et  $k$ , observant le même satellite  $j$ , à la même époque. On calcule la différence des mesures réalisées par  $i$  et  $k$  :

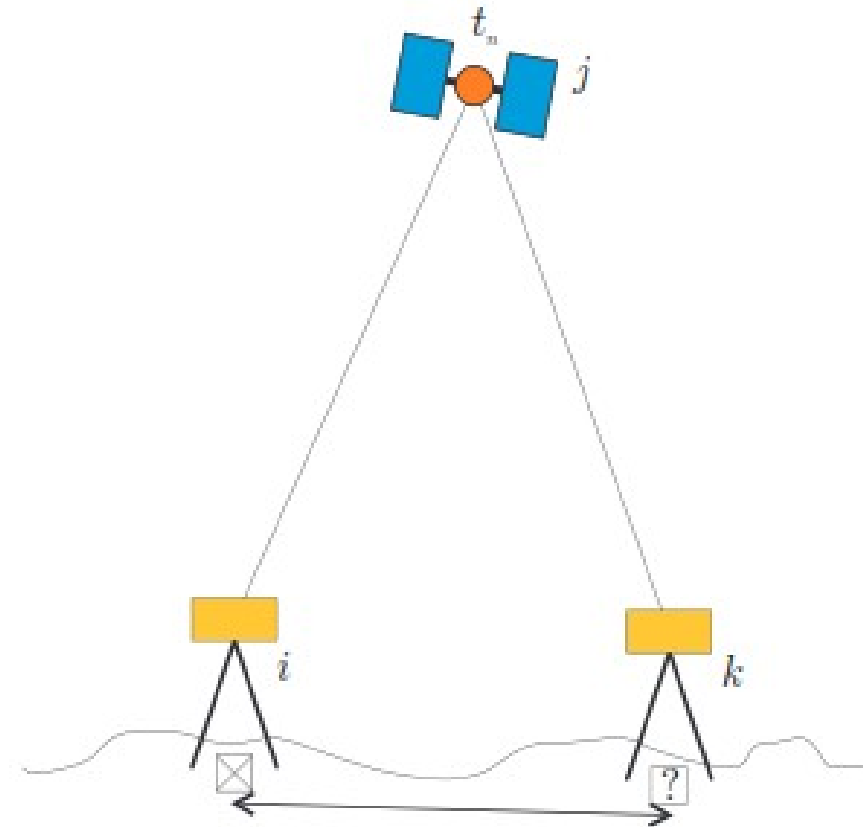
$$\lambda \Delta [L_{i,k}^j] = \Delta [r_{i,k}^j] + c \Delta [\delta t_{i,k}] + \Delta [\Delta L_{i,k}^j] - \lambda \Delta [N_{i,k}^j]$$

⇒ **Simple différence**, permet

- d'éliminer le terme d'erreur d'horloge du satellite  $\delta t^j$

- de réduire les effets d'erreurs d'orbite et de propagation de l'onde dans l'atmosphère (surtout pour des stations proches : atmosphères "identiques")

- les ambiguïtés conservent leur valeur entière



# Positionnement différentiel

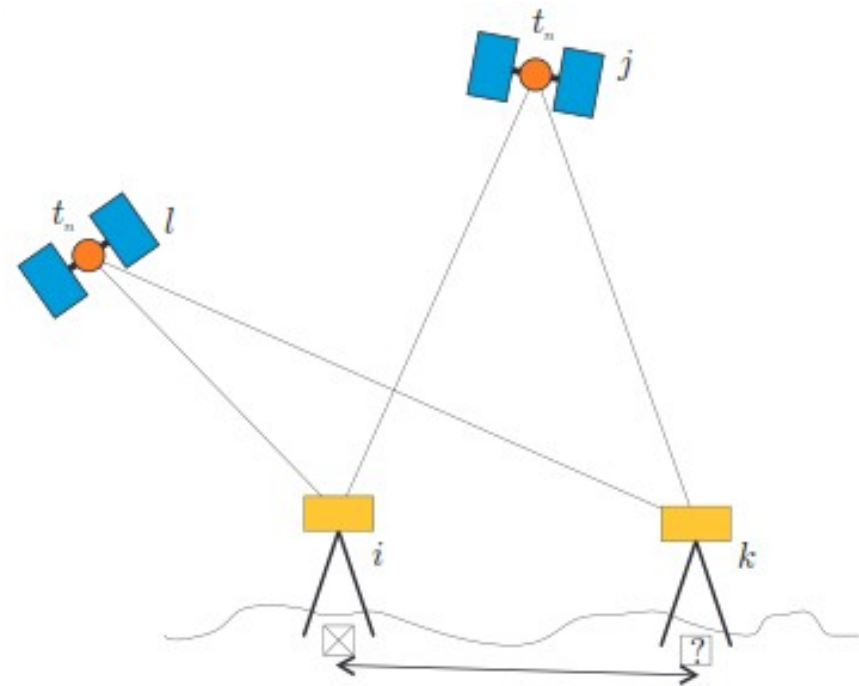
Considérons maintenant un autre satellite  $l$ , observé par les 2 récepteurs  $i$  et  $k$ , en même temps que le satellite  $j$ .

On calcule la différence des simples différences réalisées sur  $j$  et  $l$  :

$$\lambda \Delta \{ \Delta [ L_{i,k}^j ] \} = \Delta \{ \Delta [ r_{i,k}^j ] \} + c \Delta \{ \Delta [ \delta t_{i,k} ] \} + \Delta \{ \Delta [ \Delta L_{i,k}^j ] \} - \lambda \Delta \{ \Delta [ N_{i,k}^j ] \}$$

⇒ **Double différence**, permet

- d'éliminer les erreurs d'horloge des récepteurs
- les ambiguïtés gardent leur valeur entière
- Si les coordonnées de  $i$  sont connues, détermination de la position de  $k$  (à partir d'une position approchée de celui-ci) par rapport à  $i$  par inversion des équations d'observations (par Moindres Carrés par exemple)



Donne accès au **positionnement relatif** entre 2 récepteurs, et non à leur position absolue :

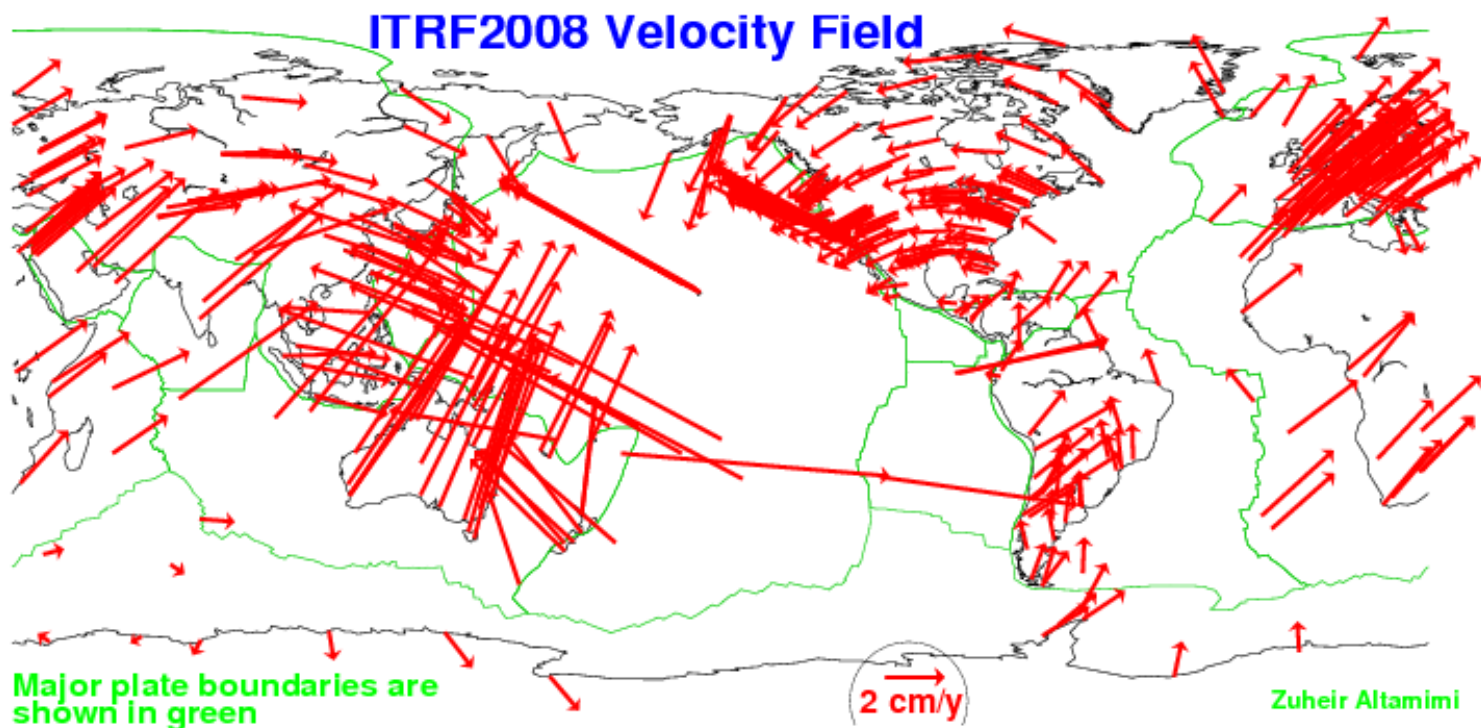
→ On calcule une **ligne de base**, ie distance entre les 2 récepteurs.

# Positionnement différentiel

Estimation de la position des stations les unes par rapport aux autres.  
→ intégration au calcul de stations dites de références.

Ces stations de références sont situées partout dans le monde, et maintenues par l'IGS (*International GNSS Service*). Leurs données sont mises à disposition libre sur le ftp de l'IGS. Leurs coordonnées sont exprimées dans l'ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), liste régulièrement mise à jour, de coordonnées et de vitesses pour les stations de l'IGS

Les coordonnées de nos stations, estimées par traitement différentiel, seront donc exprimées dans l'ITRF.



# Positionnement absolu

\* *Positionnement absolu sur le code* :

→ mode de positionnement autonome ou naturel voire par défaut de chaque GNSS. Il est utilisé pour la navigation automobile, aérienne, pédestre, ...

Réalisé à partir de mesures du code issue d'au moins 4 satellites sur un seul récepteur, en temps réel, il permet une exactitude de positionnement de l'ordre de 5 à 20 m.

\* *Positionnement Ponctuel Précis (PPP)* :

Positionnement absolu réalisé sur les mesures de phase et de code en post-traitement.

Il consiste à calculer une solution GNSS pour un **récepteur unique** ('zéro-différence') en estimant uniquement les **paramètres propres** à cette station (position, troposphère, erreur d'horloge).

On utilise pour cela des orbites, corrections d'horloge satellite précisées ainsi que des paramètres de rotation des pôles qui sont estimés, en amont, par des centres d'analyse GNSS à partir du réseau global analysé en différentiel.

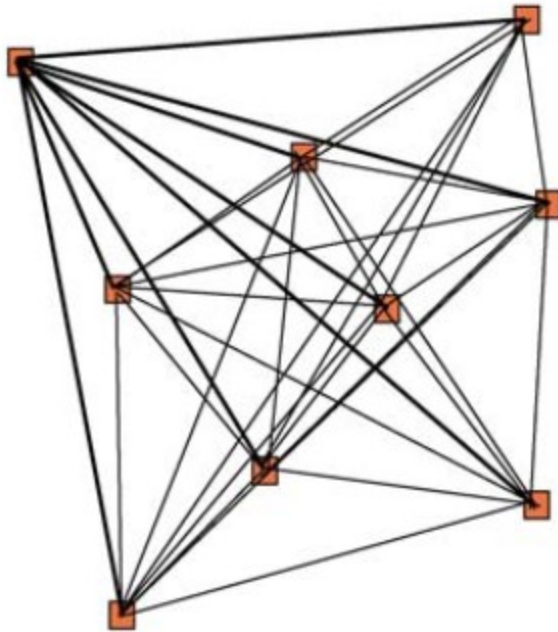
Cette méthode, permettant de diminuer les temps de traitement de manière significative est cependant encore moins efficace car elle conserve les différentes sources d'erreur éliminées lors d'un traitement différentiel. La **précision** sur le positionnement est généralement **inférieure** à celle issue d'un traitement différentiel.

La position des stations est estimée dans le système de référence dans lequel les orbites sont exprimées.

# Quantifier la précision de ses mesures

## Les répétabilités

Chaque ligne de base est mesurée plusieurs fois :



Ex pour un réseau de 9 stations :

-  $(N-1) = 8$  lignes de base entre la station 1 et les autres

-  $(N-2) = 7$  lignes de base entre la station 2 et les autres

- ...

→ Nombre total de ligne de base =  
 $(N-1)+(N-2) + \dots + 1 = N(N-1)/2 = 36$

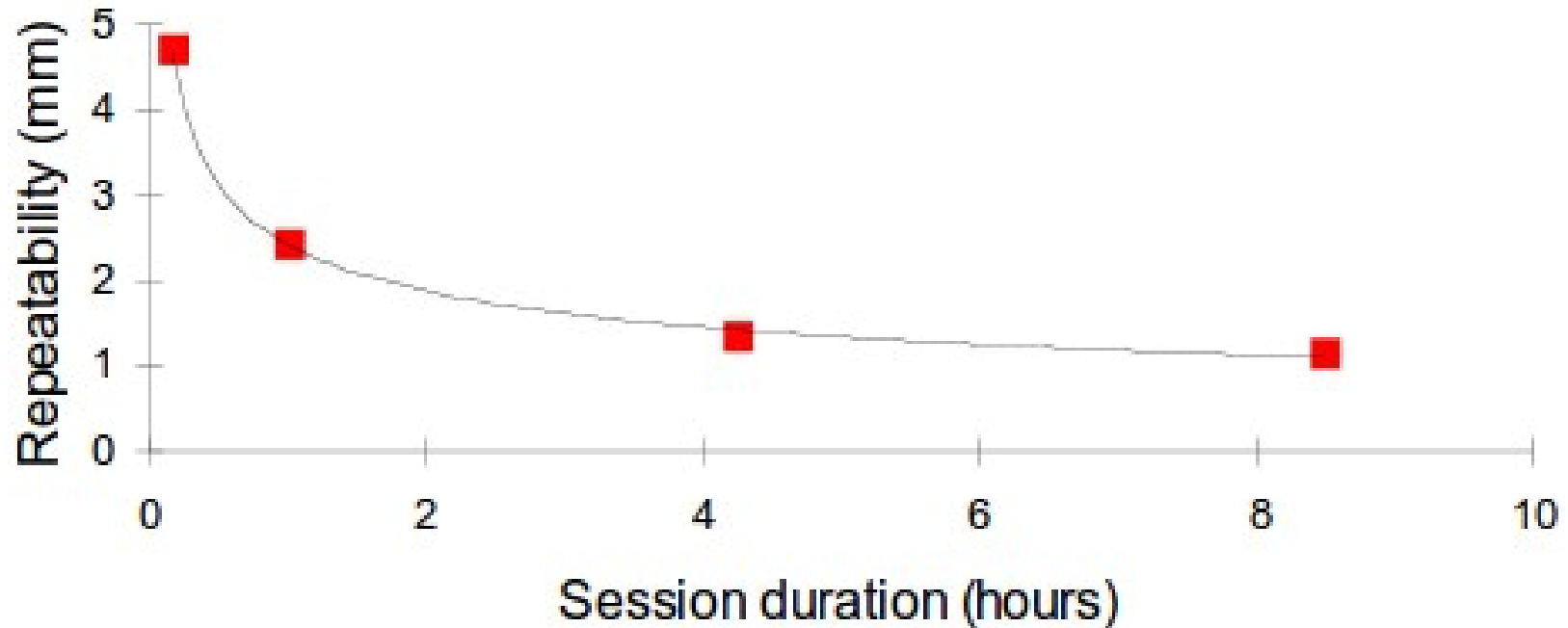
→ calcul de la valeur moyenne des mesures ainsi que la dispersion statistique des mesures autour de cette valeur moyenne.

$$wrms = \sqrt{\frac{\frac{N}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{(y_i - (a + bt_i))^2}{\sigma_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}}$$

avec  $y_i$  et  $\sigma_i$ , la position et son erreur formelle associée et  $N$  le nombre de points.

# Quantifier la précision de ses mesures

Plus les sessions de mesure sont longues, meilleures sont les répétabilités :

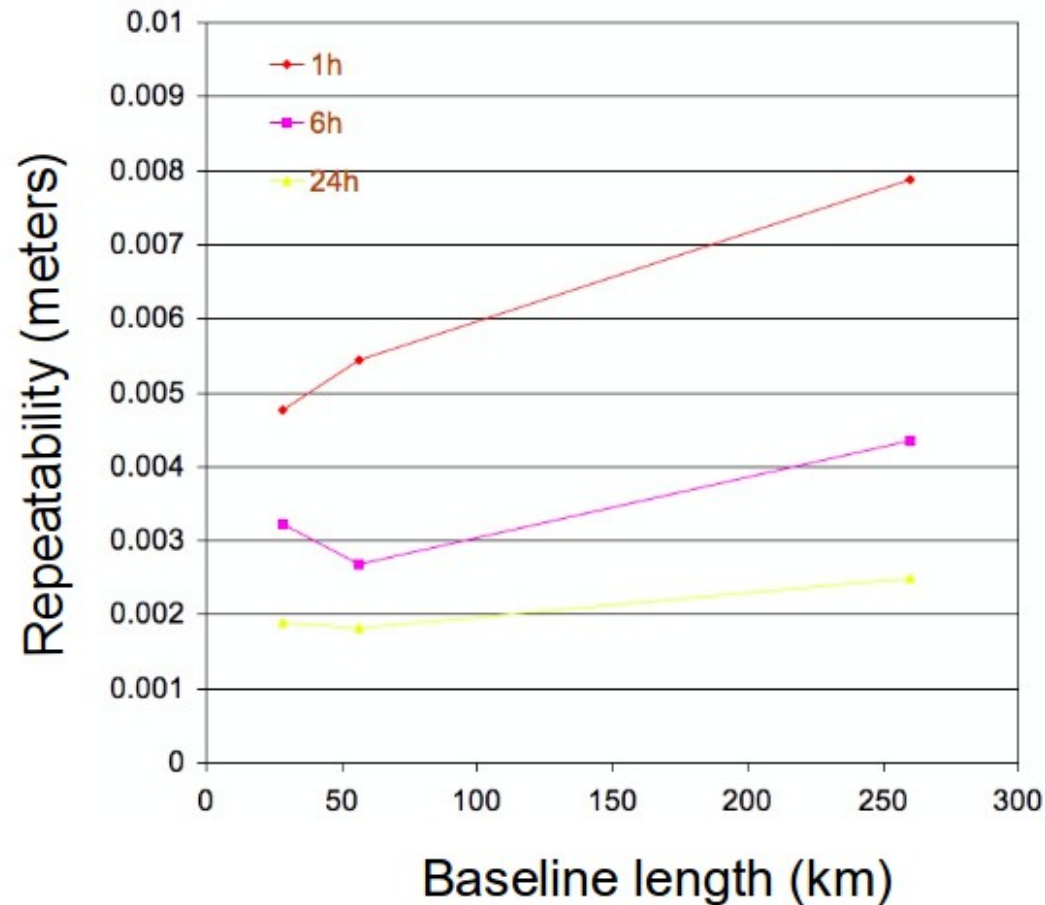


→ Sessions de 24h sur 3 ou 4 jours pour les missions scientifiques



# Quantifier la précision de ses mesures

Plus les lignes de bases sont courtes, meilleures sont les répétabilités :



→ Construction de réseaux denses et serrés.

# Le format RINEX

Chaque récepteur donne en sortie un format de fichier brute qui lui est propre.

Les récepteurs Ashtech ZXTREM créent des *fichiers U* : USITESAA.doy



Il est nécessaire de les convertir dans un format indépendant pour simplifier la procédure de traitement

⇒ Fichier RINEX ( *Receiver INdependent Exchange* )

Nom des fichiers :

*sitedoyf.yyt*

→ ssss : acronyme de la station

→ ddd : jour de l'année

→ f : séquence des données :

- 0 : fichier journalier

- a : fichier horaire 00 :00 - 01 :00

- ...

- x : fichier horaire 23 :00 - 24 :00

→ yy : année des données

→ t : type de fichier :

- o : fichier d'observation

- d : fichier d'obs. compressé

- n : fichier de navigation GPS

- ...

# Le format RINEX

## Création des RINEX avec TEQC

### Conversion RAW → RINEX :

```
teqc -ash u -O.obs l1+l2+ca+p1+p2 -O.at ASH701975.01a -O.sl  
1.4991 0 0 -O.ag ENS +nav toto2540.14n UTOTOB14.254 >  
toto2540.14o
```

### Evaluation de la qualité des données - *Quality check* :

```
Teqc +qc toto2540.14o
```

- Fait un bilan sur la qualité des observations :

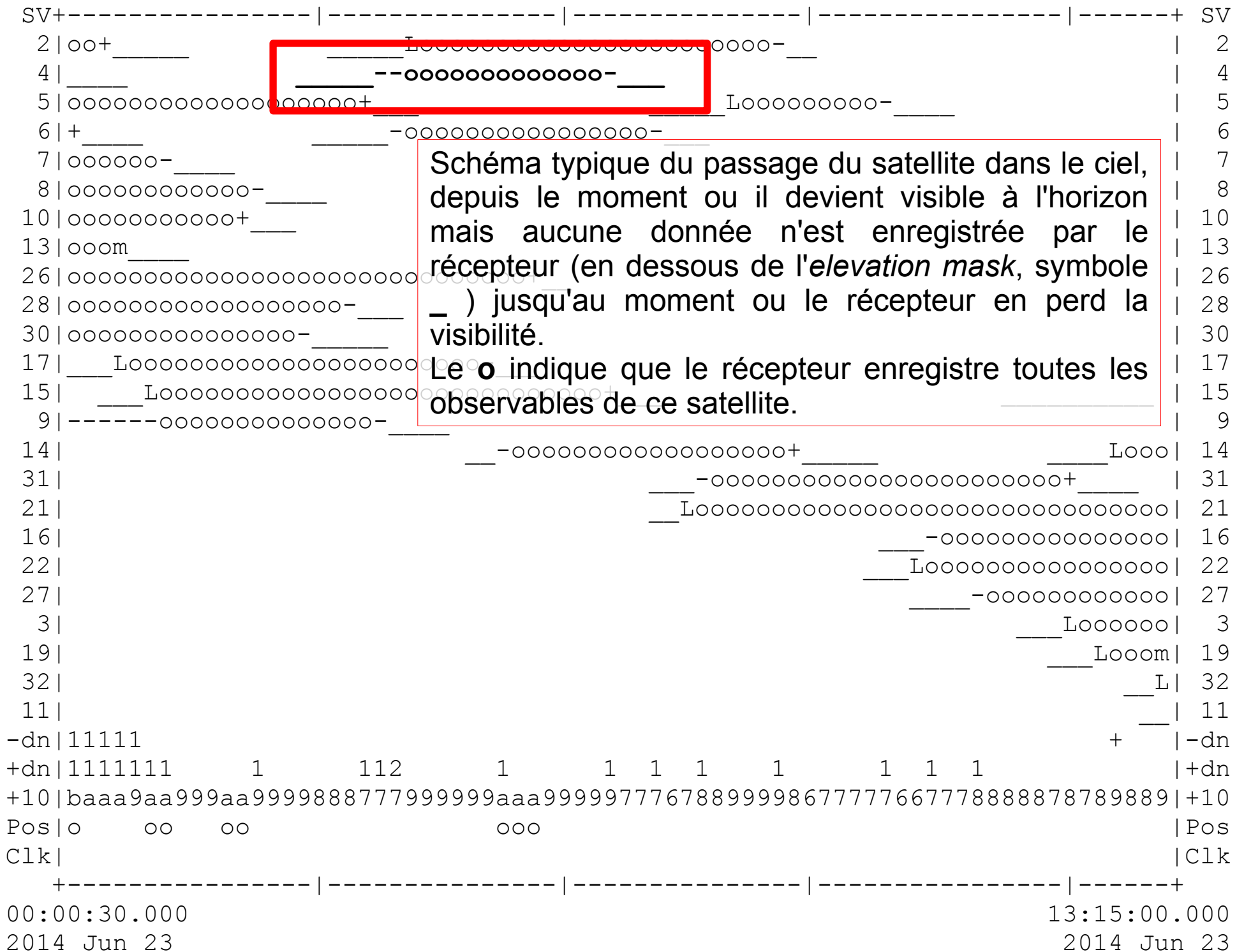
	first epoch	last epoch	hrs	dt	#expt	#have	%	mp1	mp2	o/slps
SUM 13	9 11 08:02 13	9 11 10:12	2.183	30	1891	1859	98	0.75	0.71	372

- Donne un graphe représentant la qualité du signal en fonction du temps pour chaque satellite dans le fichier rinex :

```

SV+-----|-----|-----|-----|-----+ SV
 2|oo+_____Loooooooooooooooooooooooooooo-__| 2
 4|_____---ooooooooooooo-_____| 4
 5|oooooooooooooooooooooooo+_____Loooooooooooo-_____| 5
 6|+_____---oooooooooooooooooooo-_____| 6
 7|oooooo-_____| 7
 8|ooooooooooooo-_____| 8
10|ooooooooooooo+_____| 10
13|oom_____| 13
26|oooooooooooooooooooooooooooooooooooooooo+_____| 26
28|ooooooooooooooooooooo-_____| 28
30|ooooooooooooooooooooo-_____| 30
17|___Looooooooooooooooooooooooooooooooo-_____| 17
15|___Loooooooooooooooooooooooooooooooooooo+_____| 15
 9|-----ooooooooooooooooo-_____| 9
14|_____---oooooooooooooooooooo+_____Looo| 14
31|_____---oooooooooooooooooooooooooooo+_____| 31
21|___Loooooooooooooooooooooooooooooooooooo| 21
16|_____---oooooooooooooooooooo| 16
22|_____Loooooooooooooooooooo| 22
27|_____---oooooooooooo| 27
 3|_____Loooooo| 3
19|_____Loom| 19
32|_____L| 32
11|_____| 11
-dn|11111|+| -dn
+dn|1111111 1 112 1 1 1 1 1 1 1 1 1|+dn
+10|baaa9aa999aa9999888777999999aaa9999977767889999867777667778888878789889|+10
Pos|o oo oo ooo|Pos
Clk| |Clk
+-----|-----|-----|-----|-----+
00:00:30.000 13:15:00.000
2014 Jun 23 2014 Jun 23

```



# Le format RINEX

## Entête

```
2.11 OBSERVATION DATA G (GPS) RINEX VERSION / TYPE
teqc 2013Mar15 20140701 13:03:09UTC PGM / RUN
ESMA MARKER NAME
---- MARKER NUMBER
C.Vigny&E.Klein ENS OBSERVER / AGENCY
ZE1200452010 ASHTECH UZ-XII3 ZB00 REC # / TYPE / VERS
8919 ASH701975.01A ANT # / TYPE
1898192.5785 -5419430.3049 -2767046.3393 APPROX POSITION XYZ
0.0440 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
5 L1 L2 C1 P1 P2 # / TYPES OF OBSERV
30.000 INTERVAL
15 LEAP SECONDS
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
2014 6 16 0 0 30.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
```

# Le format RINEX

## Entête

N° de série récepteur et antenne

Site

Coordonnées cartésiennes a priori

2.11	OBSERVATION DATA	G (GPS)	RINEX VERSION / TYPE
2013Mar15		20140701 13:03:09UTC	PGM / RUN
ESMA			MARKER NAME
-----			MARKER NUMBER
C.Vigny & A.Klein	ENS		OBSERVER / AGENCY
ZE1200452010	ASHTECH UZ-XII3	ZB00	REC # / TYPE / VERS
8919	ASH701975.01A		ANT # / TYPE
1898192.5785	-5419430.3049	-2767046.3393	APPROX POSITION XYZ
0.0440	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N
1	1		WAVELENGTH FACT L1/2
5	L1	L2	C1
			P1
			P2
30.000			# / TYPES OF OBSERV
			INTERVAL
			LEAP SECONDS
			COMMENT
2014	6	16	0
			0
			30.0000000
			GPS
			TIME OF FIRST OBS
			END OF HEADER

Echantillonnage à 30sec

Nombre et types d'observables

Hauteur d'antenne



# Le format RINEX

## Corps

Nombre de satellites observés à cette époque suivi de:  
**G** (pour GPS) + N° du satellite (R pour Glonass)

Date et époque de mesure (échantillonnage 30s ici)

14	6	16	0	0	30.0000000	0	11	G13G05G06G02G07G30G04G08G10G28G26
-11078259.58548	-8617298.03447	23388985.465	23388987.6094	23388986.6324				
-6163467.26448	-4785238.99247	22408265.856	22408267.5094	22408267.2554				
-11099320.07248	-8587538.18647	23788619.390	23788621.5844	23788627.6984				
741325.08848	581695.09047	23626431.041	23626432.2604	23626433.4724				
-18759698.68448	-14601645.45947	21727741.087	21727742.4744	21727740.4094				
-25399973.74449	-19781808.98948	20589763.507	20589764.6534	20589766.6104				
-11953146.50148	-9260173.55047	23670147.911	23670149.4744	23670151.5974				
-2033049.63149	-1569942.02748	20547970.802	20547970.0774	20547970.2874				
-20806587.28449	-16195928.96848	20189559.104	20189559.7314	20189560.9124				
-19491338.00848	-15140278.94347	21441008.649	21441009.3074	21441009.4594				
-6047564.90448	-4709902.35846	24552333.771	24552333.4384	24552336.1884				
14	6	16	0	1	0.0000000	0	11	G13G05G06G02G07G30G04G08G10G28G26
-11033313.98648	-8582275.50347	23397539.281	23397540.4434	23397540.2424				
-6245022.48948	-4848788.48747	22392745.938	22392748.0134	22392746.8024				
-11023030.92348	-8528092.09847	23803136.327	23803139.0764	23803145.2424				
795054.26548	623561.94647	23636654.766	23636655.8934	23636657.6504				
-18684433.83448	-14542997.51547	21742063.348	21742064.1064	21742063.6384				
-25368600.27749	-19757362.11248	20595733.918	20595734.9074	20595736.4414				
-11878588.08148	-9202076.03247	23684335.758	23684336.2134	23684342.5224				
-1978911.57849	-1527756.52548	20558272.582	20558272.8704	20558272.6934				
-20805723.93049	-16195256.23048	20189724.117	20189724.2034	20189724.8344				
-19581401.09048	-15210457.90247	21423869.358	21423871.0324	21423871.2154				
-6100675.36248	-4751287.00447	24542226.409	24542229.4324	24542227.6794				

L1

L2

C/A

P1

P2

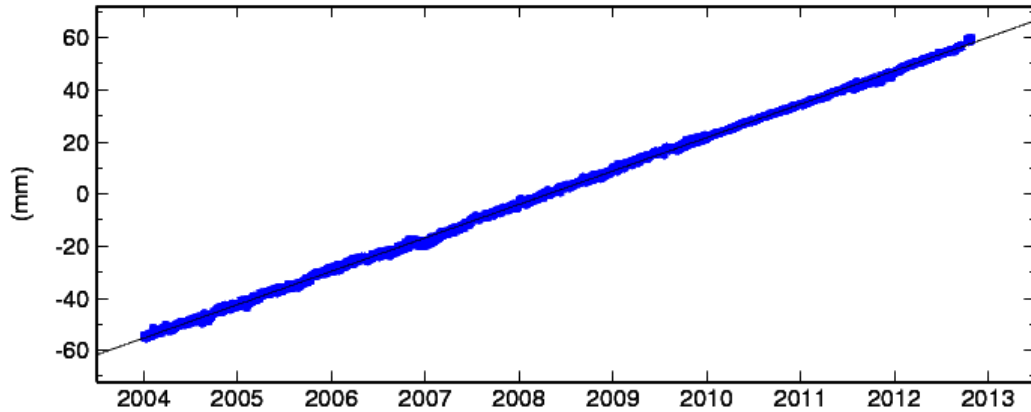
Nombre de cycles entiers sur les 2 porteuses

Mesure de pseudo-distance sur les 3 codes

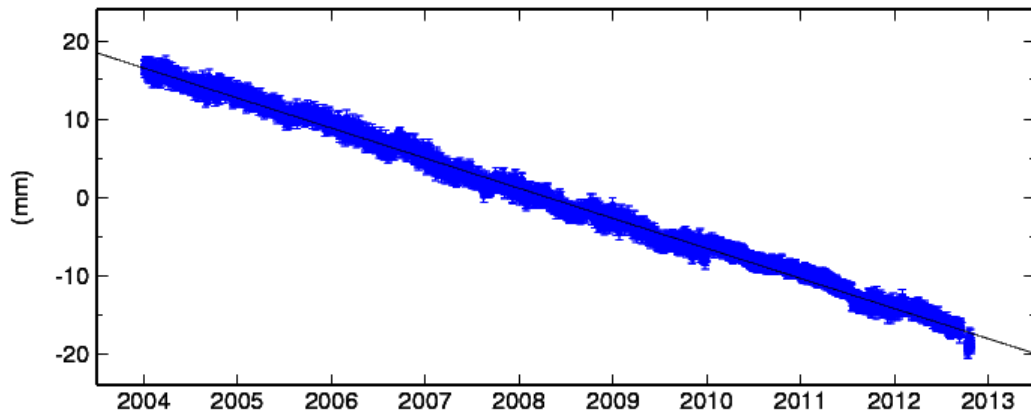
# Série temporelle de position GPS

## Station GPS permanente

BRAZ North Offset -1775264.783 m  
rate(mm/yr)=  $12.81 \pm 0.01$  nrms= 0.98 wrms= 0.8 mm # 2952



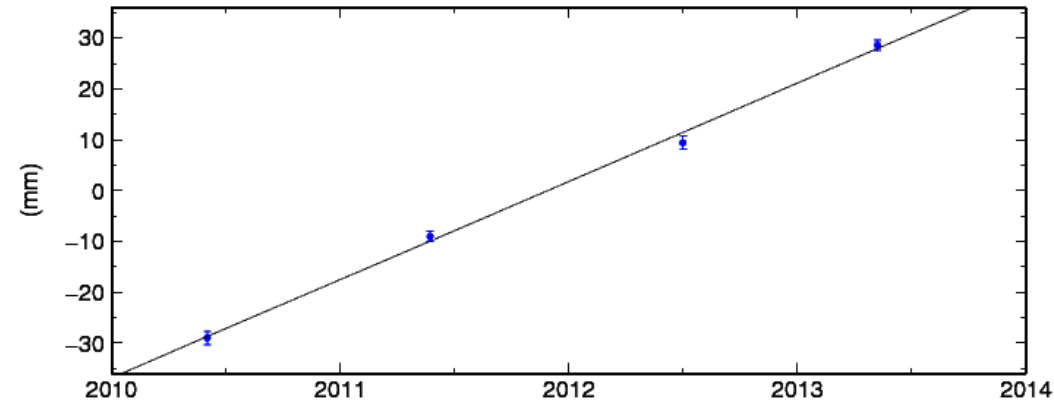
BRAZ East Offset 33407899.967 m  
rate(mm/yr)=  $-3.84 \pm 0.01$  nrms= 0.82 wrms= 0.7 mm # 2952



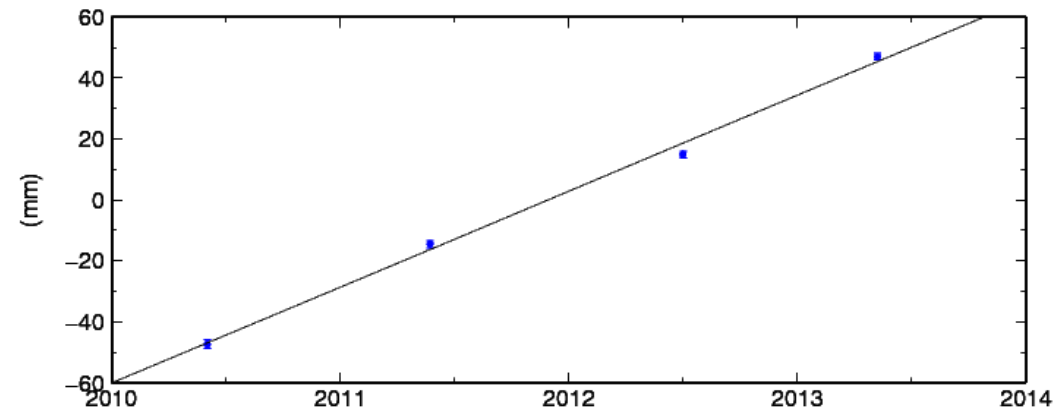
1 position par jour

## Station GPS de campagne

CHAR North Offset -2935362.138 m  
rate(mm/yr)=  $19.35 \pm 0.52$  nrms= 1.42 wrms= 1.6 mm # 4



CHAR East Offset 28858124.697 m  
rate(mm/yr)=  $31.47 \pm 0.56$  nrms= 2.69 wrms= 3.2 mm # 4



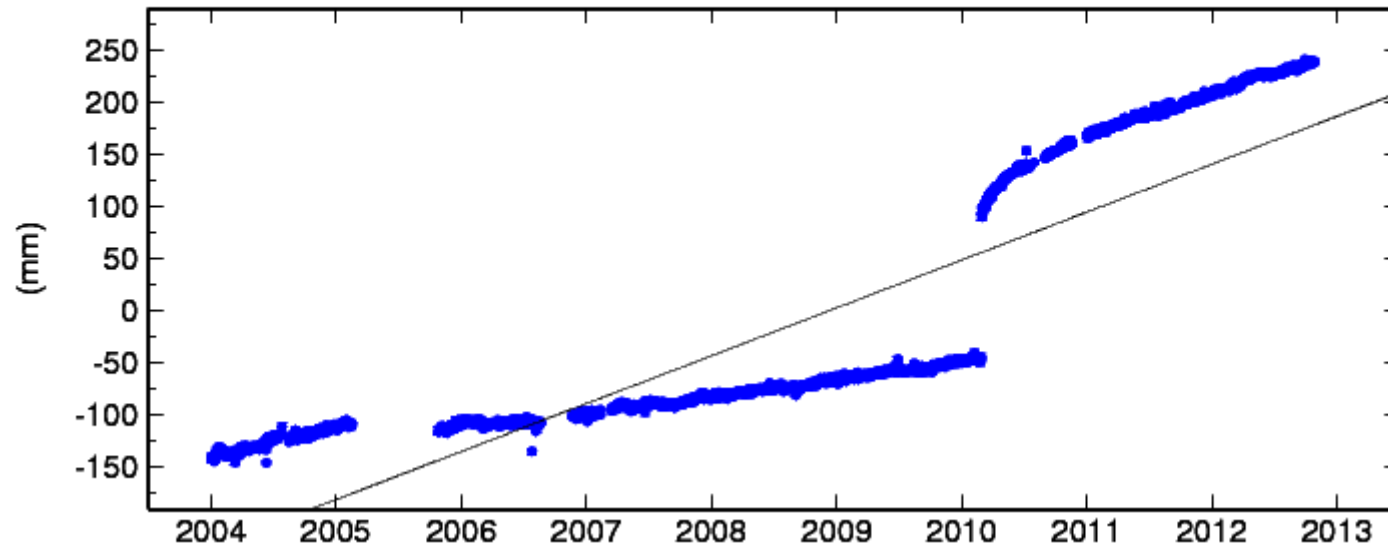
1 position par campagne (annuel par ex)

# Applications scientifiques

## Etude du cycle sismique

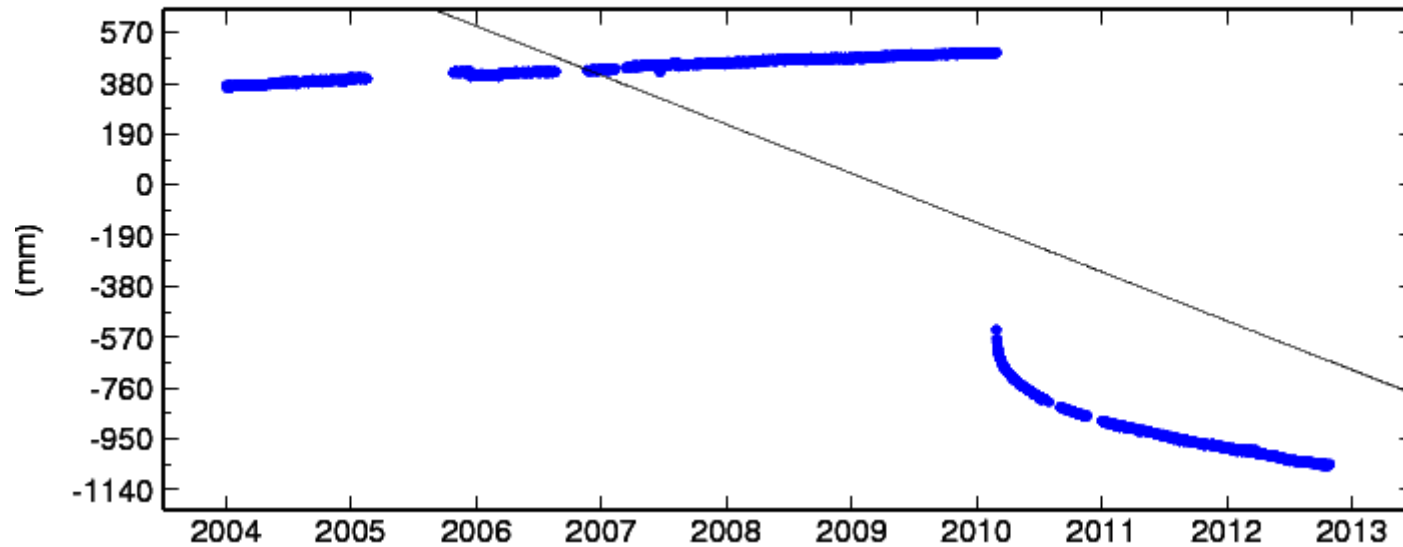
MAUL North Offset -3986306.178 m

rate(mm/yr)=  $45.95 \pm 0.01$  nrms= 43.97 wrms= 62.0 mm # 2735

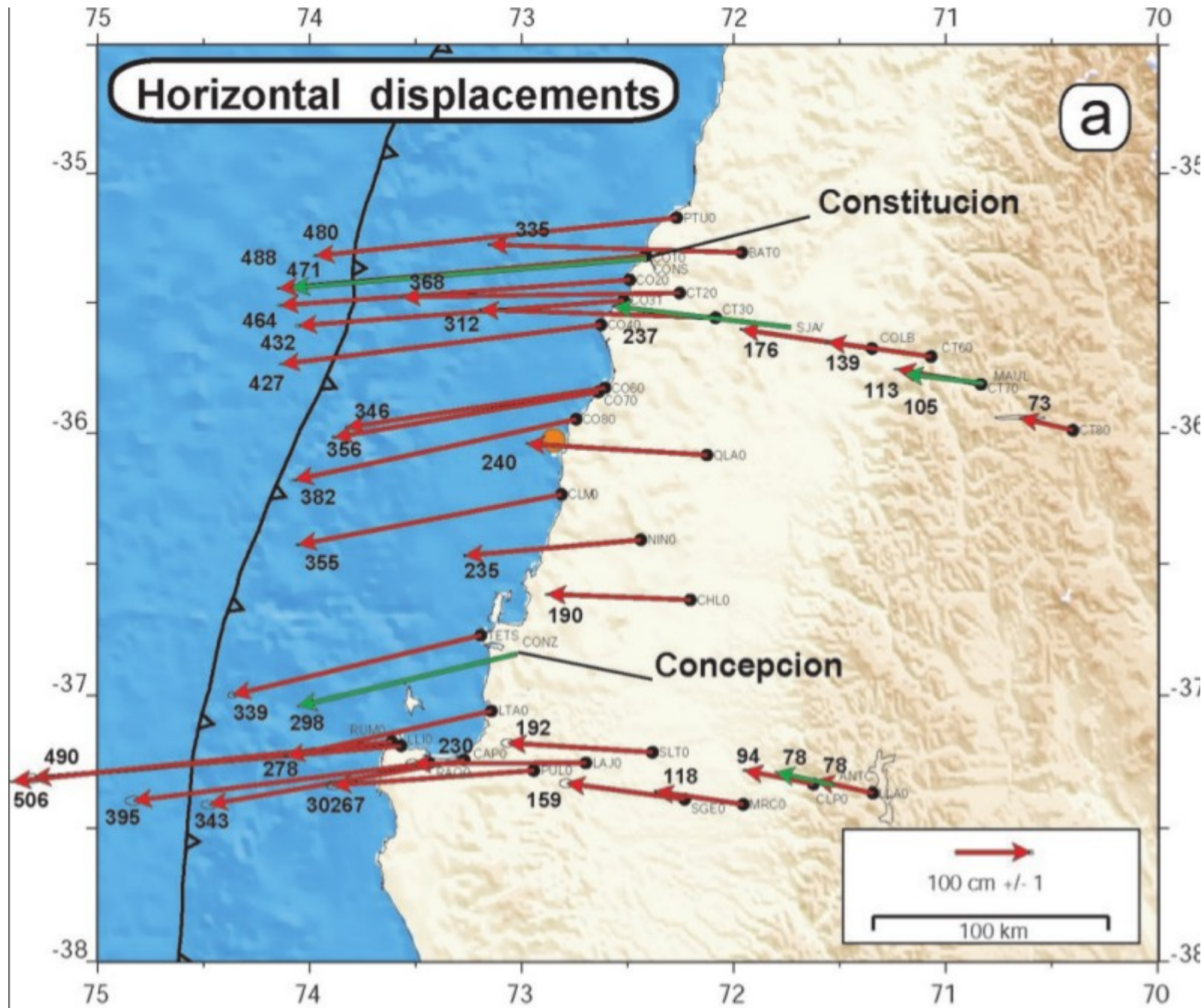


MAUL East Offset 26105814.117 m

rate(mm/yr)=  $-183.84 \pm 0.01$  nrms= 267.25 wrms= 405.6 mm # 2735

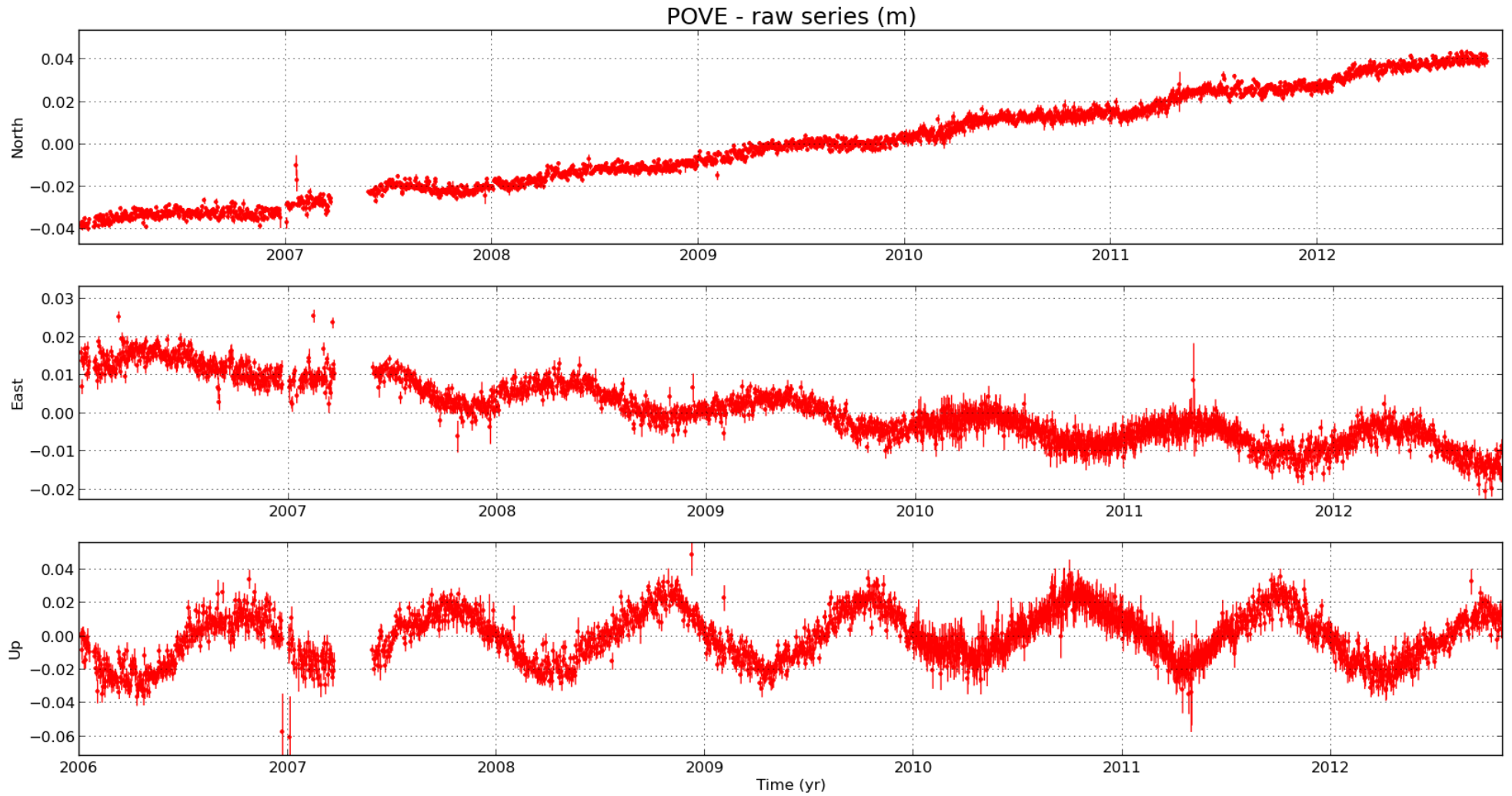


# Estimation du déplacement engendré par un séisme



Déplacement cosismique du séisme du Maule (Mw8.8, 2010), [Vigny et al., 2011]

# Etude des charges hydrologiques



## Mais aussi...

- Etude de la déformations sur les volcans,
- Etude de l'évolution de l'ionosphère,
- Etude de la troposphère
- Etude du rebond post-glaciaire
- Métrologie : surveillance de glissement de terrain ou d'ouvrage d'art
- ...

Ou, dans notre cas, étude de l'anomalie de géoïde...

# Sources et références

Sources et images :

- Cours de GNSS de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (P.Bosser)
- Pages personnelles E. Calais et C. Vigny

Pour plus d'information sur le format RINEX :

<http://rgp.ign.fr/DONNEES/format/rinex.php>

Pour plus d'informations sur l'ITRF et sa réalisation :

<http://itrf.ensg.ign.fr/>

Pour le téléchargement des produits nécessaires au calcul GPS :

- orbites : <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/>
- RINEX stations IGS : <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/data/>