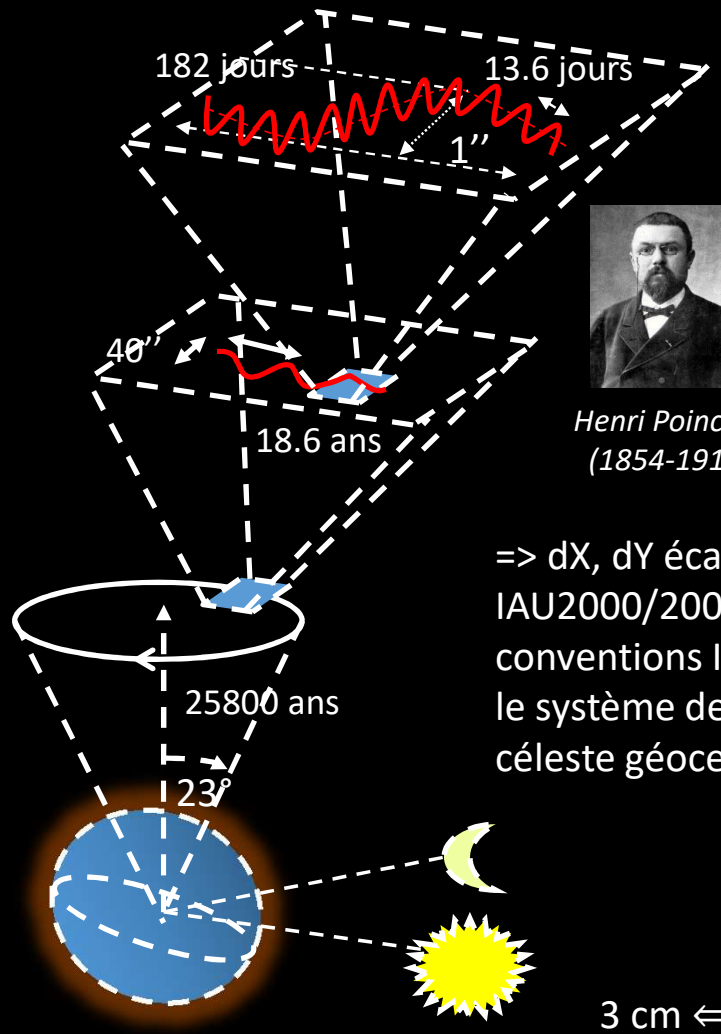
Nouvelle série opérationnelle de paramètres d'orientation de la Terre du centre de produit EOP de l'IERS, obtenue par Combinaison des Equations Normales GNSS & VLBI avec DYNAMO

Jean-Yves Richard,
Olivier Becker,
Sébastien Lambert,
Christian Bizouard,
Teddy Carlucci

SOMMAIRE

- Précession-Nutation et mouvement du Pole de rotation de la Terre
- Combinaison GNSS et VLBI réalisé avec le logiciel Dynamo:
  - ❑ Les données utilisées
  - ❑ Les paramètres estimés
  - ❑ Stratégie de traitements opérationnels intra et inter techniques GNSS & VLBI réalisés chaque semaine
- Solutions des paramètres de rotation de la Terre (EOP) par combinaisons GNSS & VLBI sur 19 années consécutives
- Analyse des corrélations entre EOP estimés
- Les systématismes du réseau de stations GPS et du réseau VLBI
- Solutions des stations
- Analyse du géocentre estimé par combinaison GNSS et VLBI
- Conclusion & Perspectives

Précession-Nutation

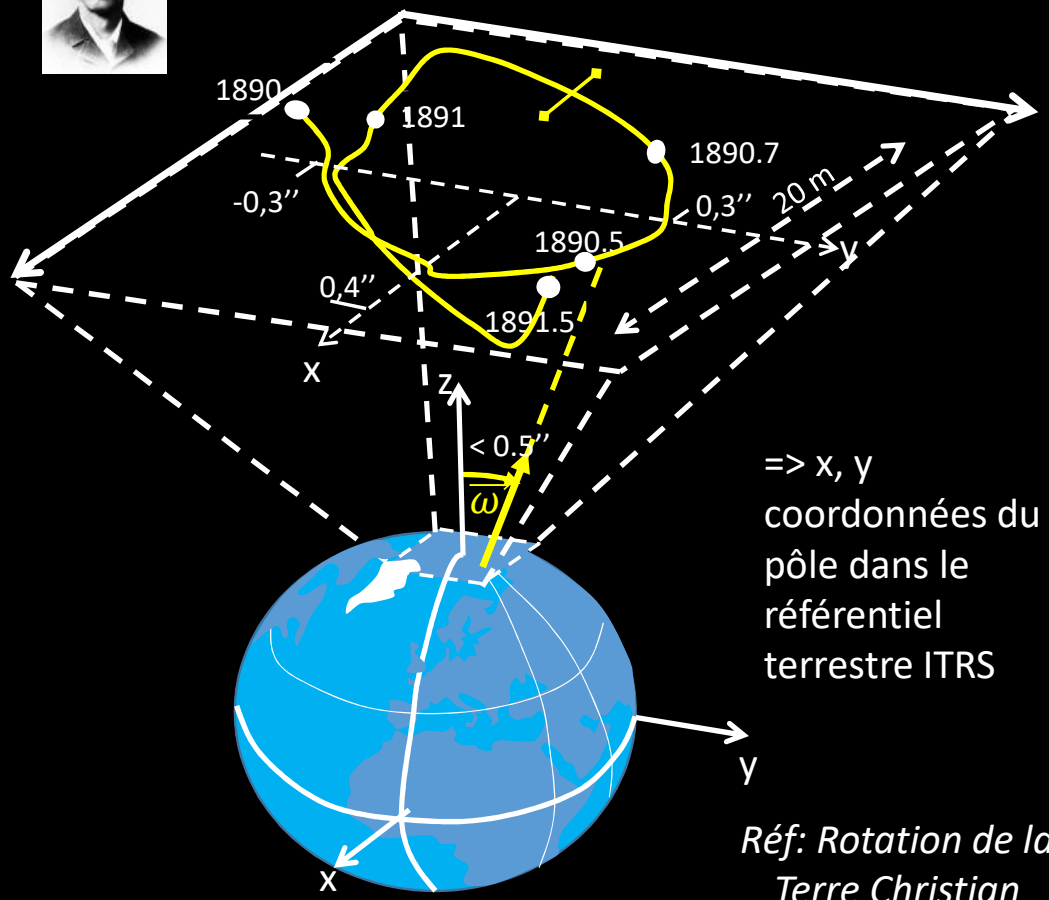


Henri Poincaré (1854-1912)

=> dX, dY écarts au modèle IAU2000/2006 des conventions IERS 2010, dans le système de référence céleste géocentrique GCRS

Mouvement du Pole terme de Chandler 430 jours et 1 an

Découvert en 1891, par C.S. Chandler (1846-1913)



=> x, y coordonnées du pôle dans le référentiel terrestre ITRS

Réf: Rotation de la Terre Christian Bizouard

3 cm ⟺ 0.001'' = 1 milli-arc-second = 1 **mas**

Données utilisées sur 2000-2019

	IGS combinées	***IVS combinées***
	GNSS	**VLBI**
origin	**IGS**	**IVS**
ftp	ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products	ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/vlbi/ivsproducts
SINEX format	daily GNSS solution with **variance-covariance Matrix**	**Normal Equation Matrix** & **Normal Equation Vector**
SINEX files	**5513 daily files** GPS week **repro2**: 1043 – 1831 (02/01/2000 – 14/02/2015) **1541 daily files** GPS week 1832 (15/02/2015) – 2052 (27/04/2019)	**2576** VLBI R1 / R4 sessions from January 2nd 2000 to April 25th 2019

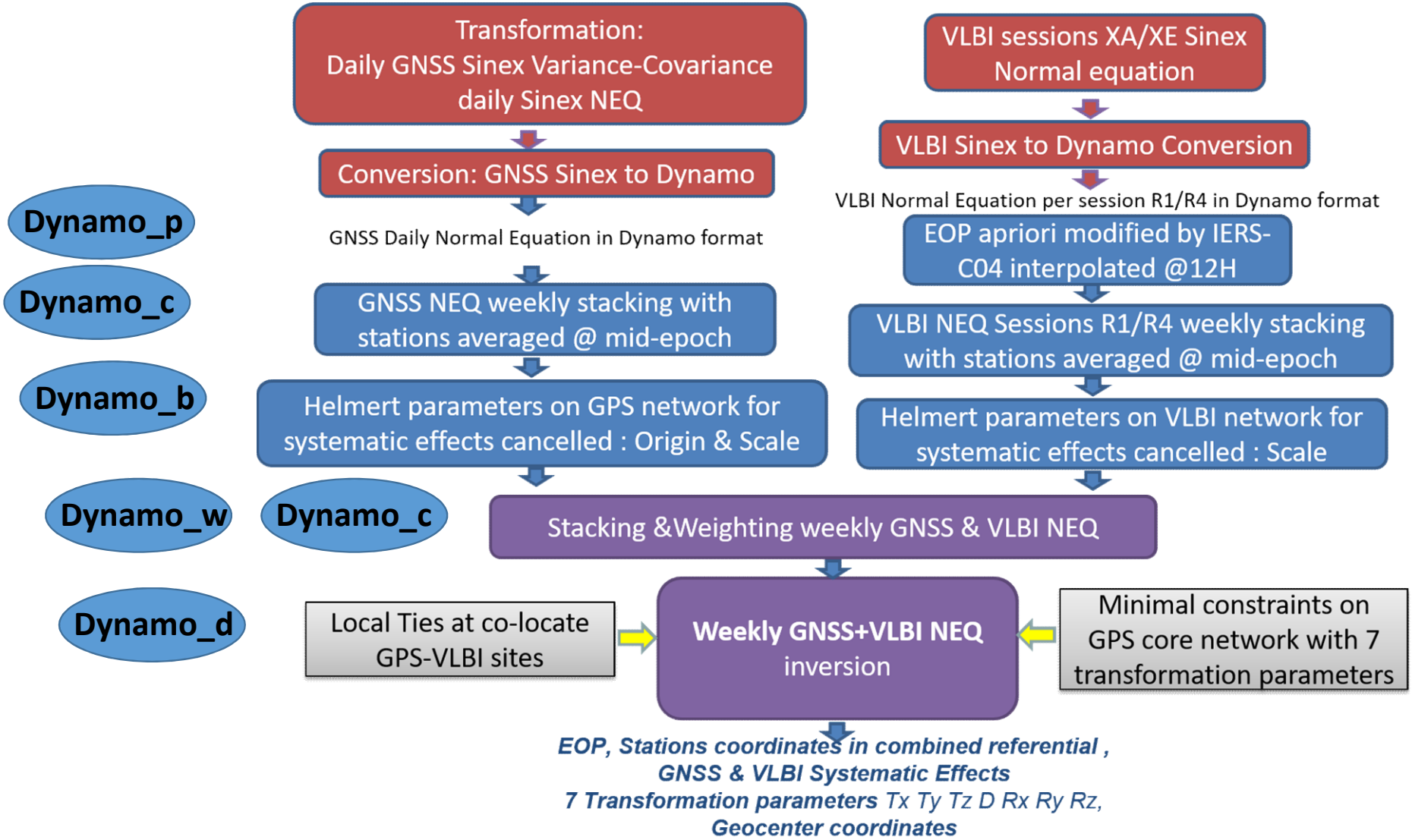
Paramètres astro-géodésiques estimés et leurs apriori initiaux

Parameters	GNSS daily		VLBI R1/R4 sessions	
	Sinex parameters	Initial values	Sinex parameters	Initial values
Polar coordinates	**XPO, YPO** @12h	IERS EOP 08-C04	**XPO, YPO** @~04-06h	IERS EOP 14-C04
Polar motion rate	**XPOR, YPOR** @12h	IERS EOP 08-C04	**XPOR, YPOR** @~04-06h	0.0
Delta time UT1-UTC	-		**UT** @~04-06h	IERS EOP 14-C04
Length of Day LOD	**LOD** @12h	IERS EOP 08-C04	**LOD** @~04-06h	IERS EOP 14-C04
Nutation offset dX, dY IAU2000/2006 model	-		**NUT_X, NUT_Y** @~05-07h	0.0
Station coordinates	**STAX, STAY, STAZ ~500 stations** @12h	IGb08 & IGS14 from February 2017	**STAX, STAY, STAZ ~5 stations /session** @~04-06h	ITRF14
Geo-centre	**XGC, YGC, ZGC** @12h	Set to 0.0	-	

Paramètres mis en commun dans la combinaison

NOUVELLES SERIES DES **EOP** et des STATIONS:
Combinaison des **OBSERVATIONS** (Equations Normales) au lieu de combiner les **SOLUTIONS** (C04)

Traitements intra et inter-techniques en opérationnel chaque semaine

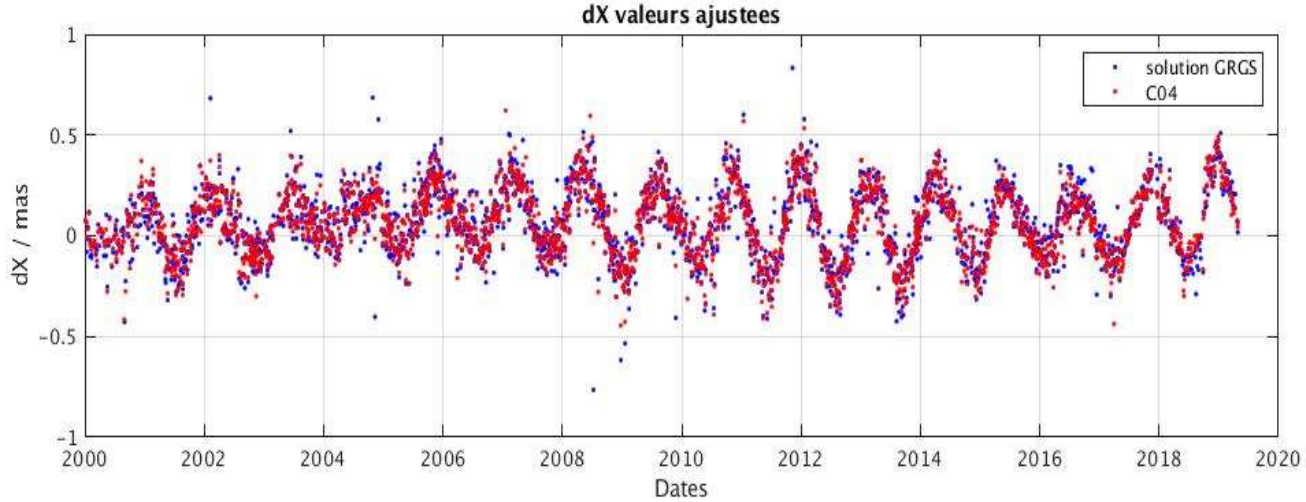


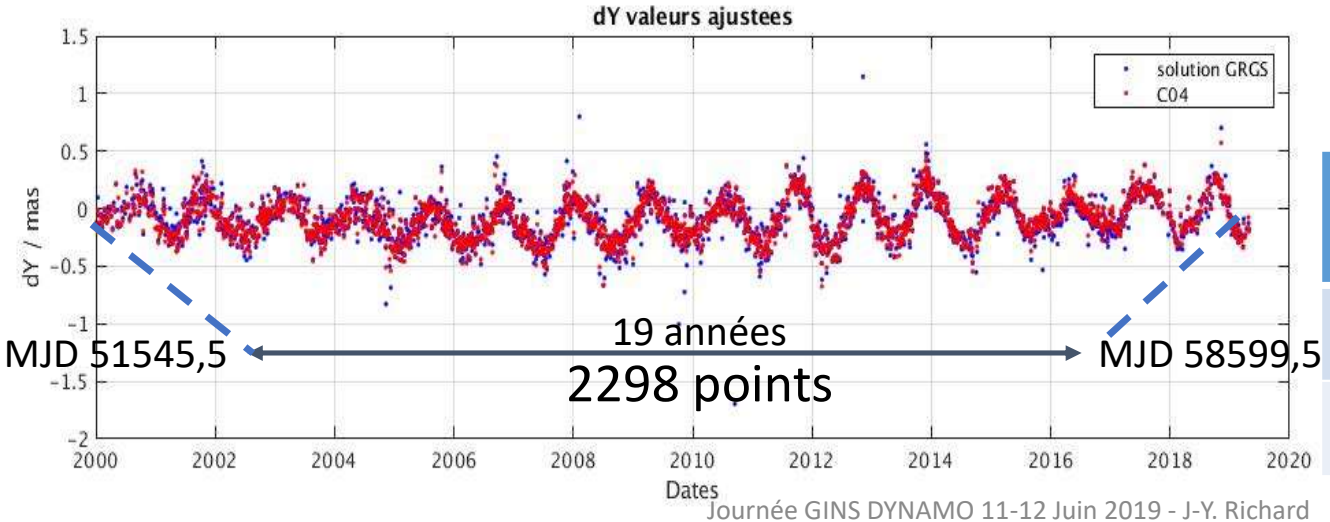
Traitements des stations dans les Combinaisons des techniques GNSS, VLBI

- pour la détermination des positions des stations on sélectionne un ensemble de stations GPS de référence (IGS core stations) que l'on force à être raccordées au référentiel ITRF à mieux que le mm (contraintes minimales à 0,1mm)
- Les stations de la technique VLBI sont raccordées au réseau de référence par contraintes de co-localisation avec les stations GPS lorsqu'elles sont présentes sur un même site. Pour les stations qui ont subies des déplacements sismiques : pas de contrainte appliquée
- QUESTION:
  - nécessité ou non de transformer les apriori des stations GPS de l'ITRF2008 à l'ITRF2014 avant d'effectuer la combinaison pour que les solutions stations soient cohérentes. Et si oui, quelles opérations sont à effectuer?
  - appliquer les paramètres de transformation ITRF2008 vers ITRF2014 à chaque apriori des stations GPS de chaque fichier journalier puis
  - appliquer la transformation à chaque apriori X_itrf14(t) = X_itrf14(t0) + X_rate_itrf14*(t-t0)

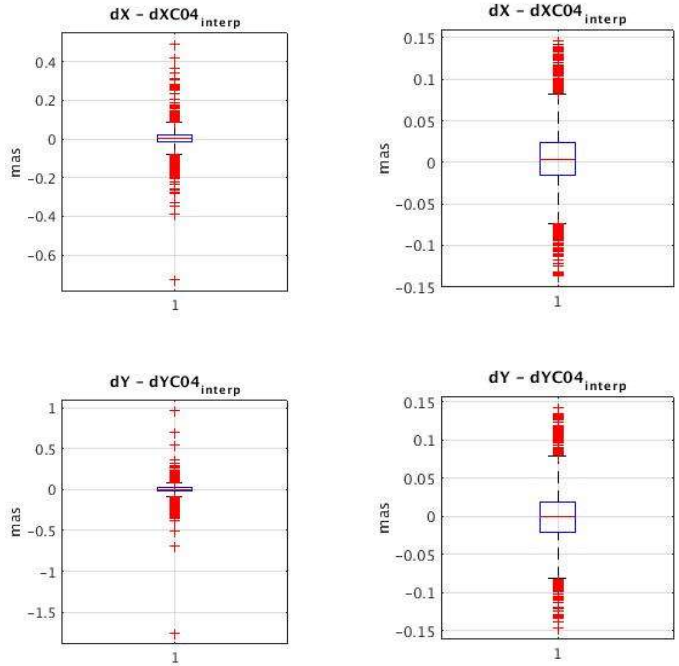
Série VLBI

Nutation offset: dX, dY



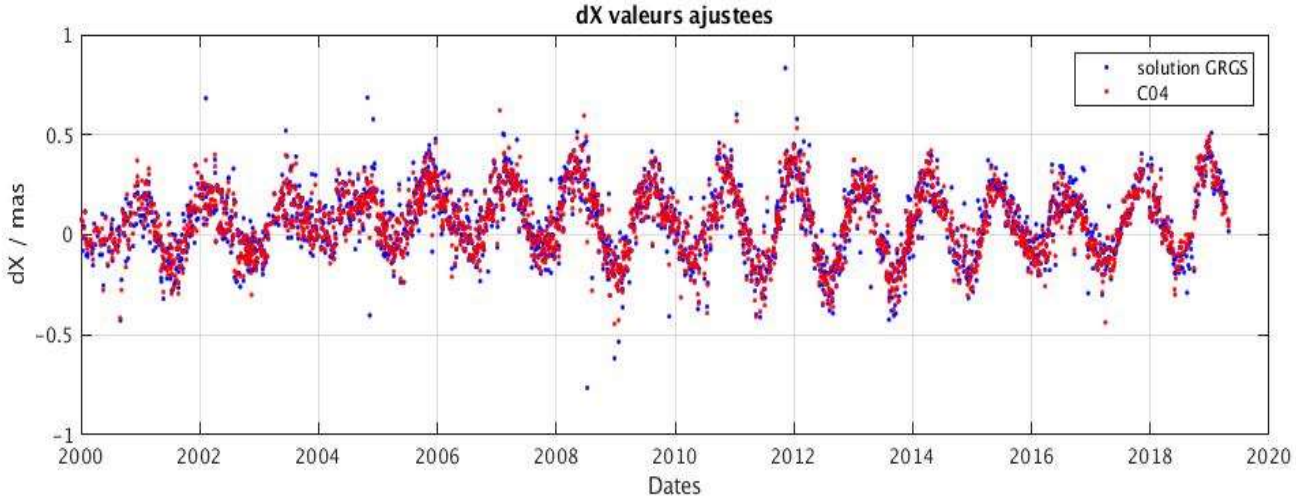


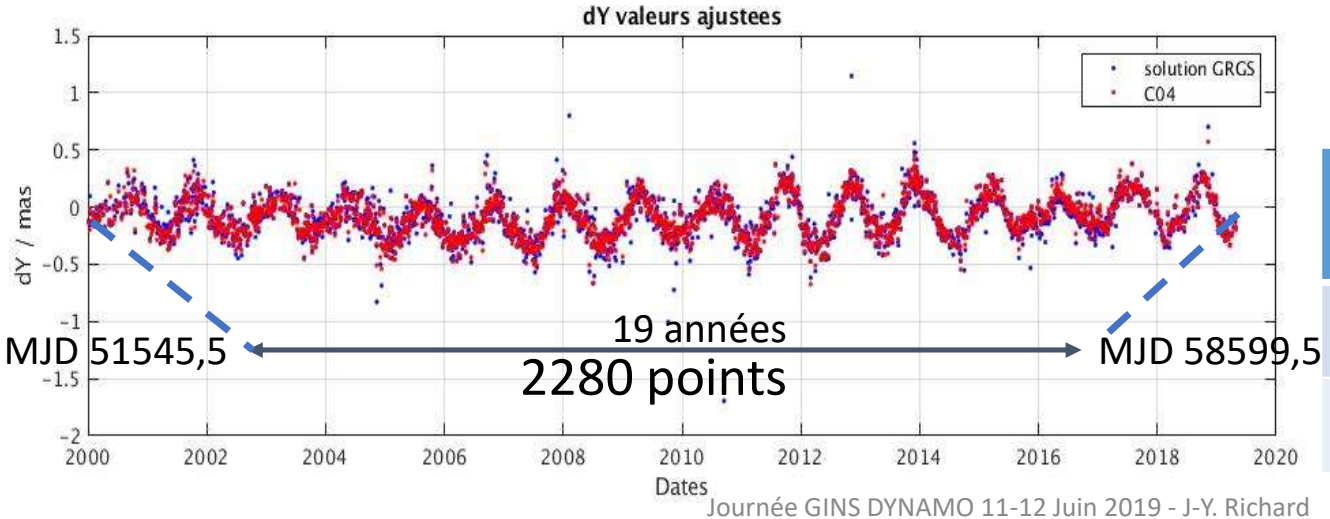
Boxplot brut et retrait écarts > 7*σ



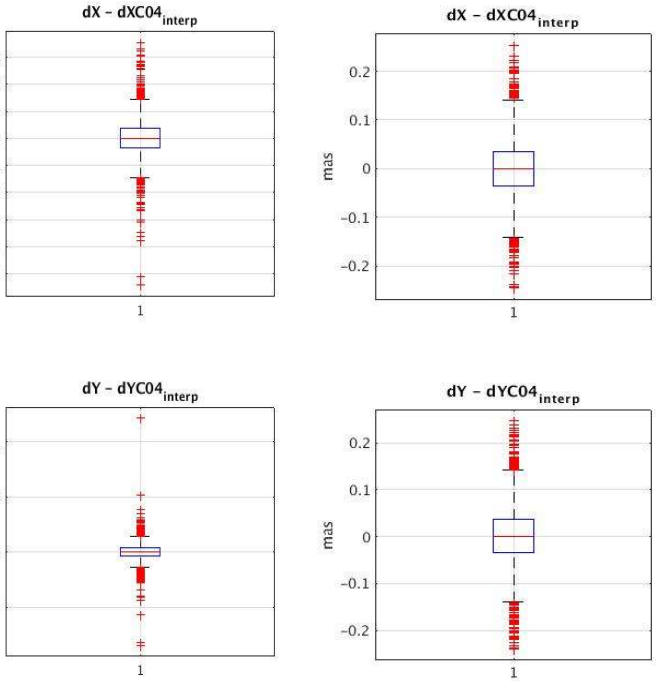
	Mean	Standard deviation	Weighted RMS	WRMS outliers rmv
dX (µas)	67	172	55	39 55 outliers
dY (µas)	-86	185	73	38 71 outliers

Série VLBI+GNSS Nutation offset: dX, dY





Boxplot brut et retrait écarts > 7*σ



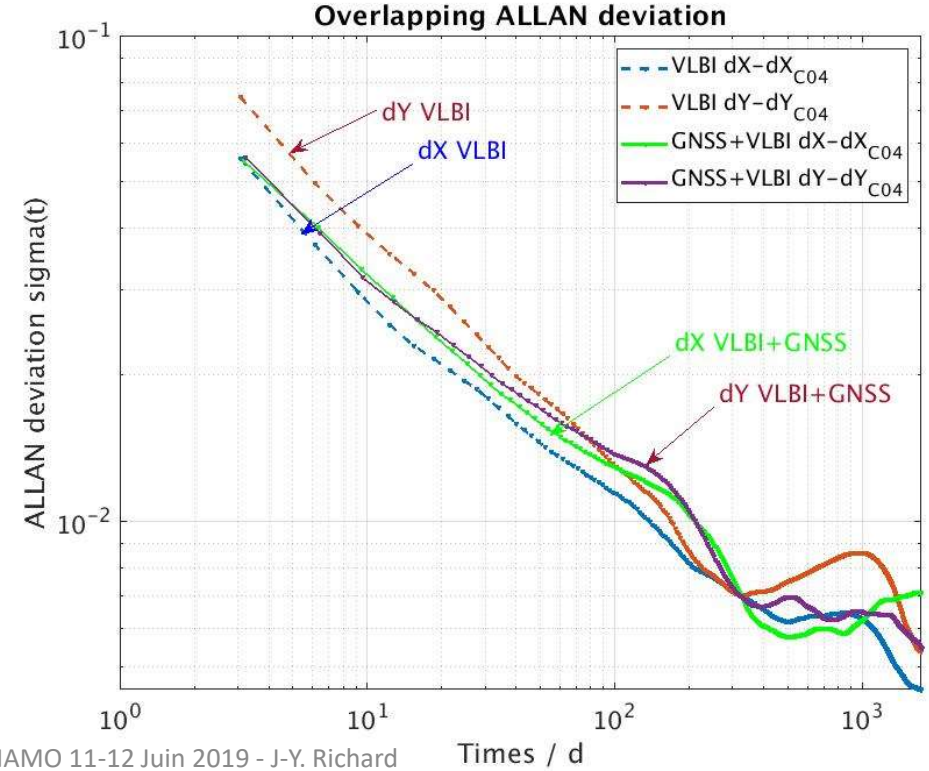
	Mean	Standard deviation	Weighted RMS	WRMS outliers rmv
dX (µas)	63,8	166	69,7	61,9 23 outliers
dY (µas)	-83,6	181	80,7	64,7 25 outliers

Apport des combinaisons GNSS et VLBI à l'estimation de la NUTATION

Effet de la stabilité des paramètres de nutation dX, dY sur le long terme

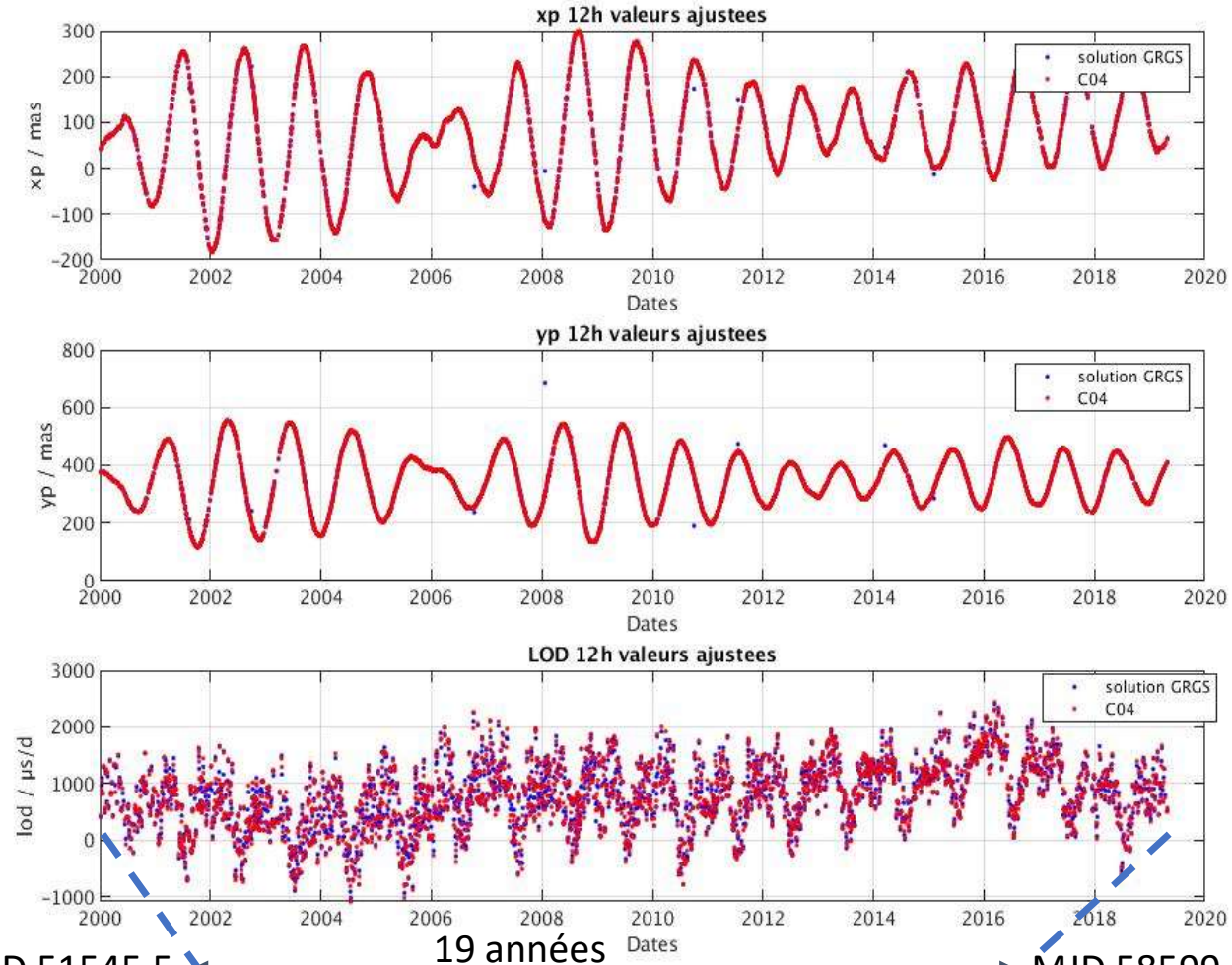
Résumé sur le WRMS

Nutation WRMS	VLB I	VLBI outliers removed	VLBI+GNSS	VLBI+GNSS Outliers removed
dX (µas)	55	39 55 outliers	69,7	61,9 23 ouliers
dY (µas)	73	38 71 outliers	80,7	64,7 25 outliers



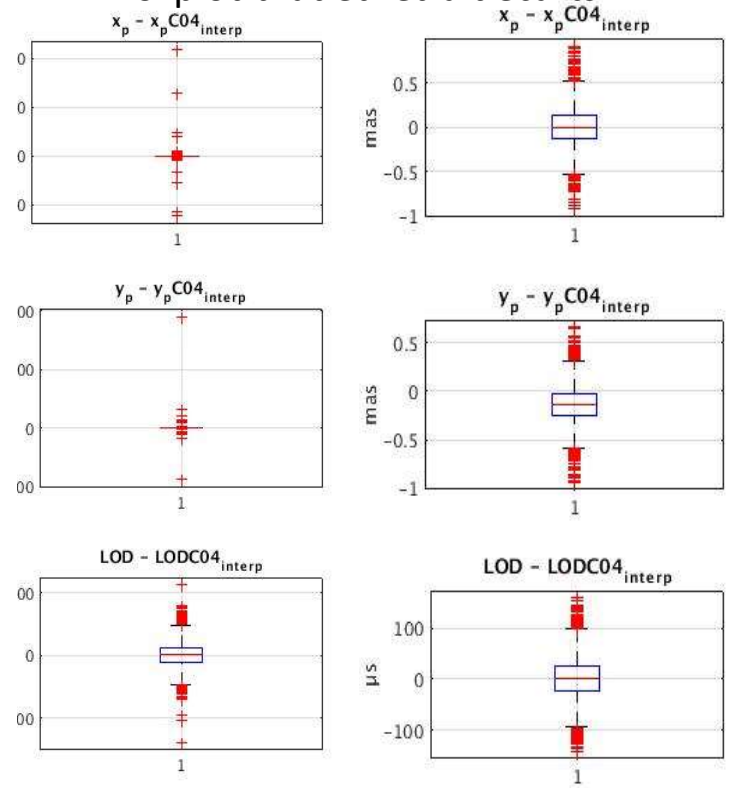
Série VLBI

Pole (xp,yp) & LOD



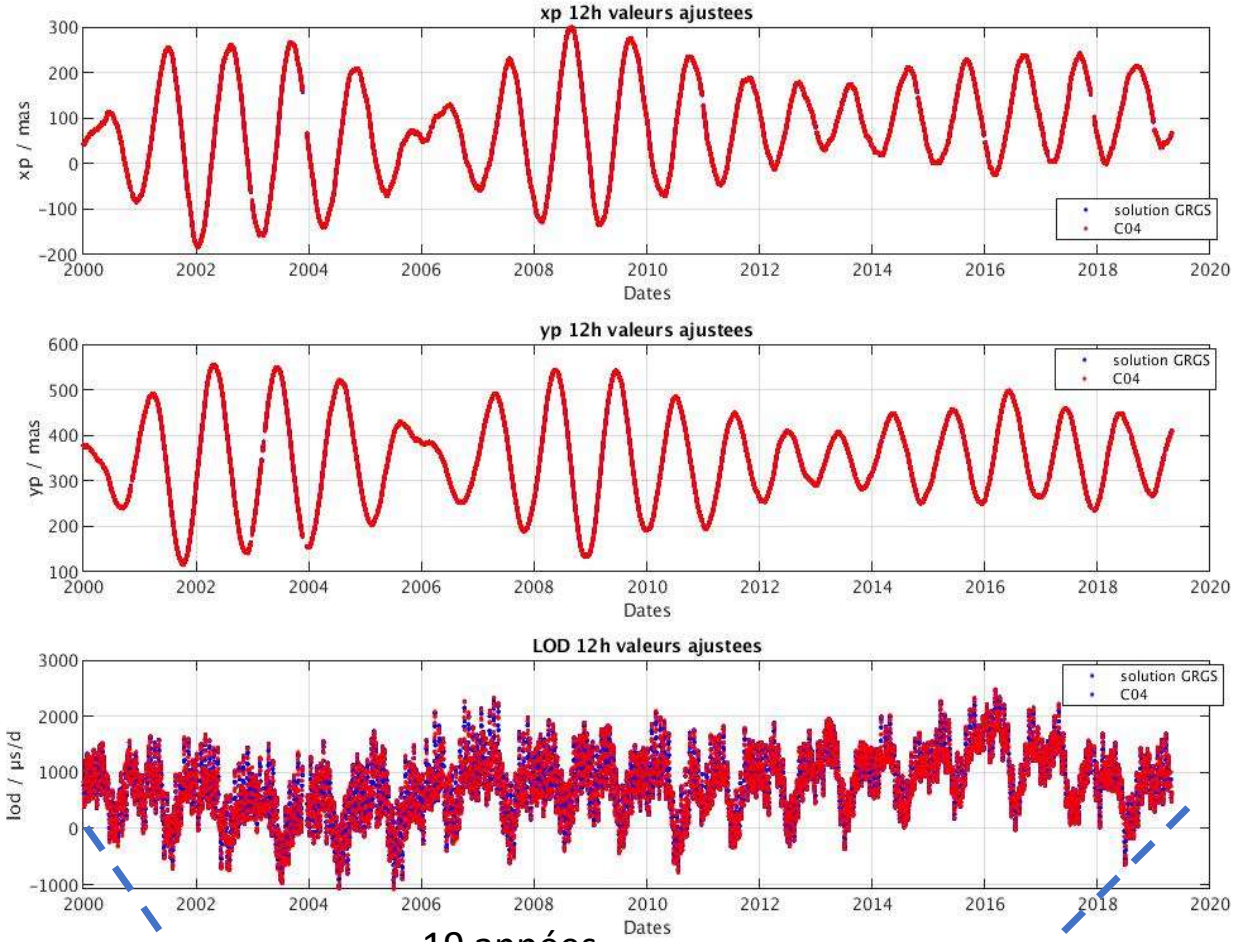
MJD 51545,5 ← 19 années / 2298 points → MJD 58599,5

Boxplot brut et retrait écarts > 7*σ



	Mean	Standard deviation	Weighted RMS	WRMS outliers rmv
xp (µas)	18,7	3331	182	177 32 outliers
yp (µas)	7,0	8995	195	136 45 outliers
LOD (µs)	1,7	43,4	36,9	36,8 4 outliers

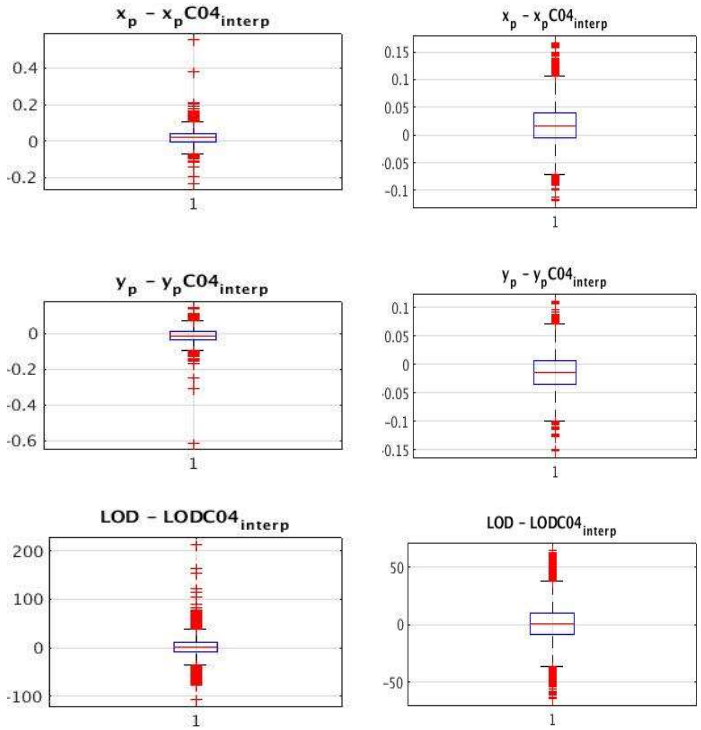
Série VLBI+GNSS Pole (xp,yp) & LOD



MJD 51545,5 ← 19 années → MJD 58600,5

6895 points

Boxplot brut et retrait écarts > 7*σ



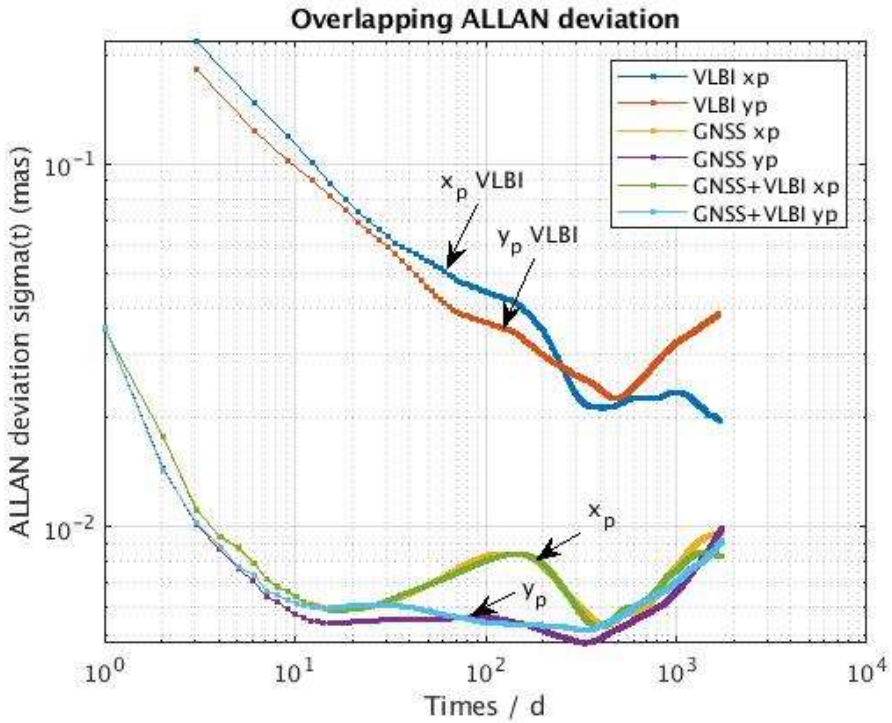
	Mean	Standard deviation	Weighted RMS	WRMS outliers rmv
xp (µas)	18,5	36,6	35,2	35,2 10 outliers
yp (µas)	-13,9	33,6	32,8	32,4 7 outliers
LOD (µs)	0,94	16,1	16,1	15,1 30 outliers

Apport des combinaisons GNSS et VLBI à l'estimation du Pole de rotation

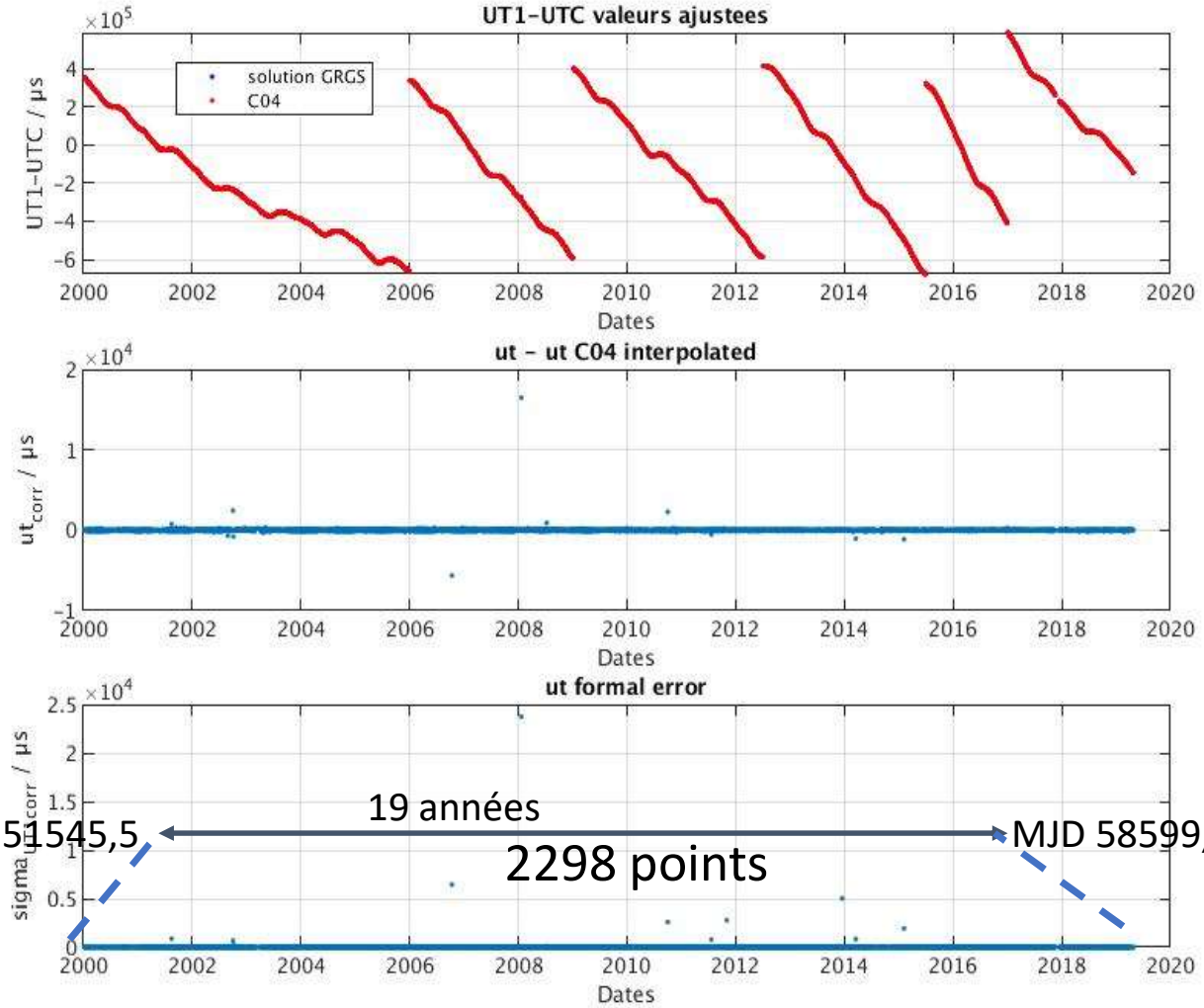
La stabilité des paramètres du pole xp, yp est comparable au pole GPS

Résumé WRMS Pole de rotation

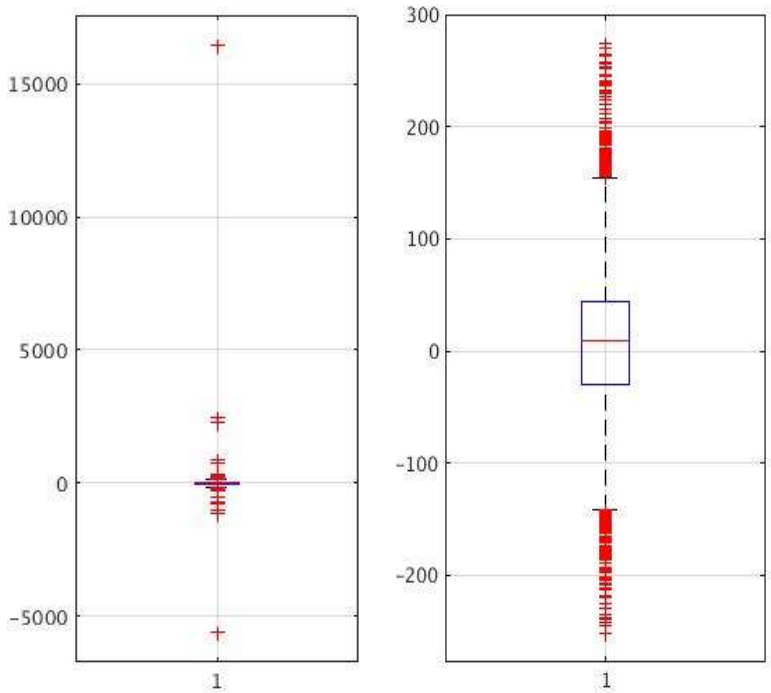
	VLBI		VLBI+GNSS		GNSS	
Pole WRMS		Outliers removed		Outliers removed		Outliers removed
xp (µas)	182	177 32 outliers	35,2	35,2 10 outliers	36,7	35,6 7 outliers
yp (µas)	195	136 45 outliers	32,8	32,4 7 outliers	32,3	32,2 3 outliers
LOD (µs)	36,9	36,8 4 outliers	16,1	15,1 30 outliers	16,5	



Série VLBI UT1

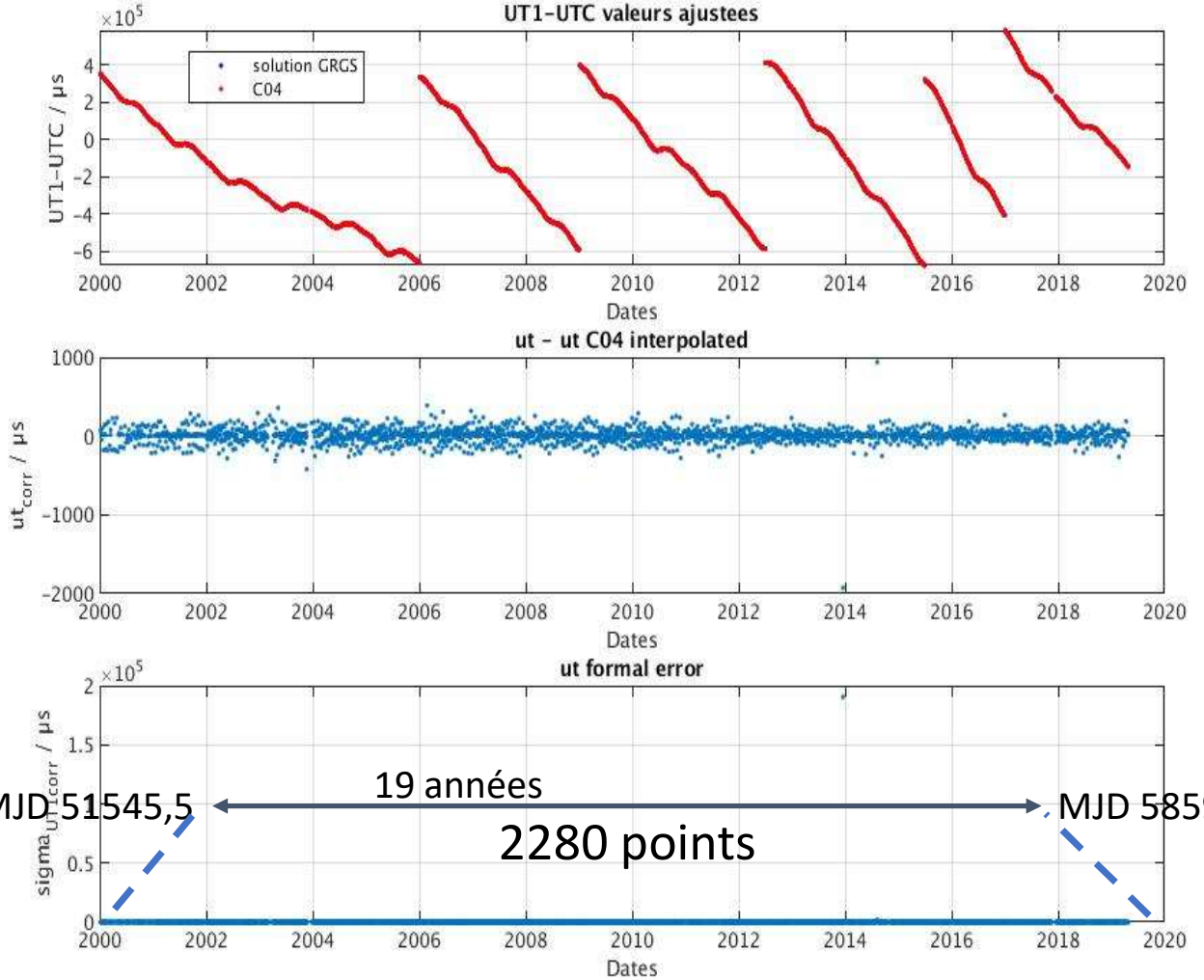


Boxplot brut et retrait écarts > 7*σ

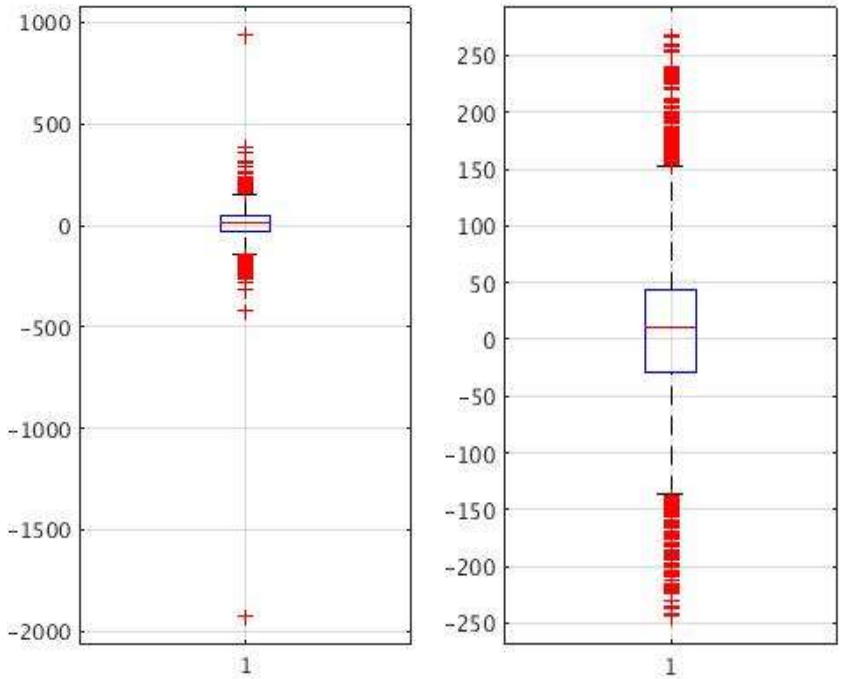


	Mean	Standard deviation	Weighted RMS	WRMS outliers rmv
UT1 (µs)	12,5	382	69,5	67,1 26 outliers

Série VLBI+GNSS UT1



Boxplot brut et retrait écarts > 7*σ

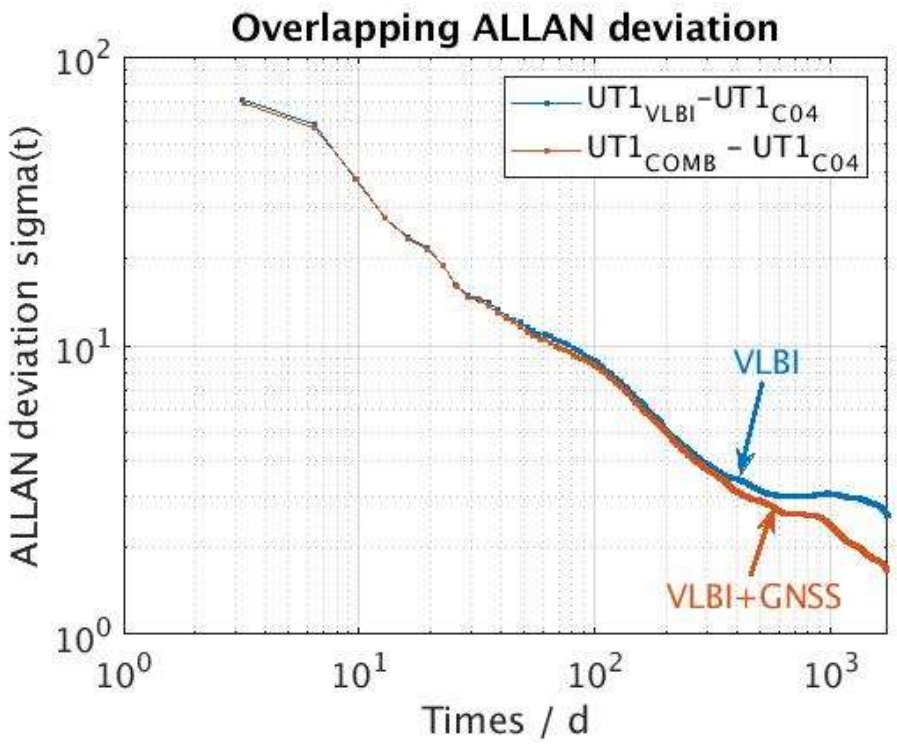


	Mean	Standard deviation	Weighted RMS	WRMS outliers rmv
UT1 (µs)	7,4	93,8	69,9	66,9 19 outliers

Apport des combinaisons GNSS et VLBI à l'estimation de UT1

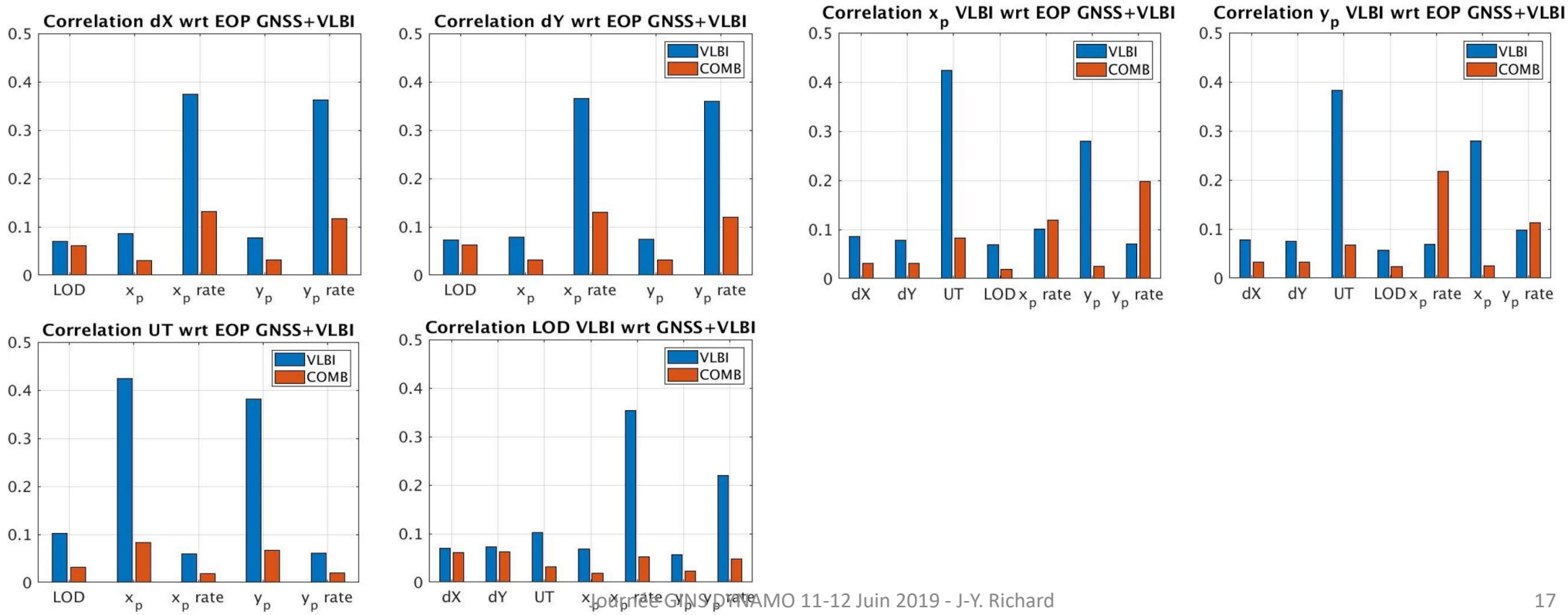
- Stabilité accrue de UT1 sur le long terme

	VLBI		VLBI+GNSS	
	WRMS	WRMS outliers rmv	WRMS	WRMS outliers rmv
UT1 (µs)	69,5	67,1 26 outliers	69,9	66,9 19 outliers



Apport des combinaisons GNSS et VLBI à l'estimation des EOP

- Les corrélations des paramètres EOP de la technique VLBI seule sont très sensiblement diminuées par la combinaison GNSS + VLBI



Extraction des corrélations entre paramètres

MATRICE de CORRELATION : à partir de la matrice normale inverse contenue dans le fichier solution si dans le fichier directeur DIRD on a:

…

INVERSION key (0 : no sigmas, -1 : sigmas, 1 : inverse matrix) / EPSILON COND.

KEY=1, EPSILON COND.=1.0000E-40

…

fichier “solution dynamo”

matrice des covariances

INVERSE MATRIX

31273 640.80760924582554E+00

0.33265988354828E+01

0.33813346750810E+000.16780334439439E+01

-.33647284165007E-040.42570246271018E-020.21036677106885E-01

0.66950615698500E-03-.69533526006500E-03-.13419938056330E-040.27033311707749E-02

pour un paramètre donné, en utilisant le programme:

./DYNAMO/bin/extraction_correlations_par_parametre

extraction_correlations_par_parametre

Element signaletique dont on veut extraire les correlations (24 caracteres) ?

NE 2003080512

Nom du fichier solution contenant la matrice inverse ?

solutions_cumul_vlbi_IVSC_84_s_syst3

Nombre de parametres 50 inconnues libres sur 50

Le fichier de sortie est : out.extraction_correlations_par_parametre.dat

Affichage des plus fortes correlations par la commande :

sort -r out.extraction_correlations_par_parametre.dat | head

```
# Corrélations du paramètre : [NE 2003080512 ]
# Corrélation Elément Signalétique Nlib Ntot
0.360189169645 "[PXR 2003080512 ]" 1 1
0.008101194166 "[PX 2003080512 ]" 2 2
0.000299126055 "[PXR 2003080812 ]" 3 3
0.014196855016 "[PX 2003080812 ]" 4 4
0.372475773096 "[PYR 2003080512 ]" 5 5
0.015719352290 "[PY 2003080512 ]" 6 6
0.000379489822 "[PYR 2003080812 ]" 7 7
0.001227889326 "[PY 2003080812 ]" 8 8
0.034109313041 "[PTR 2003080512 ]" 9 9
0.018562614918 "[PT 2003080512 ]" 10 10
0.001335037407 "[PTR 2003080812 ]" 11 11
0.011669537984 "[PT 2003080812 ]" 12 12
0.000000000000 "[NE 2003080512 ]" 13 13
0.000274567894 "[NE 2003080812 ]" 14 14
0.036832820624 "[NP 2003080512 ]" 15 15
0.000638541242 "[NP 2003080812 ]" 16 16
```

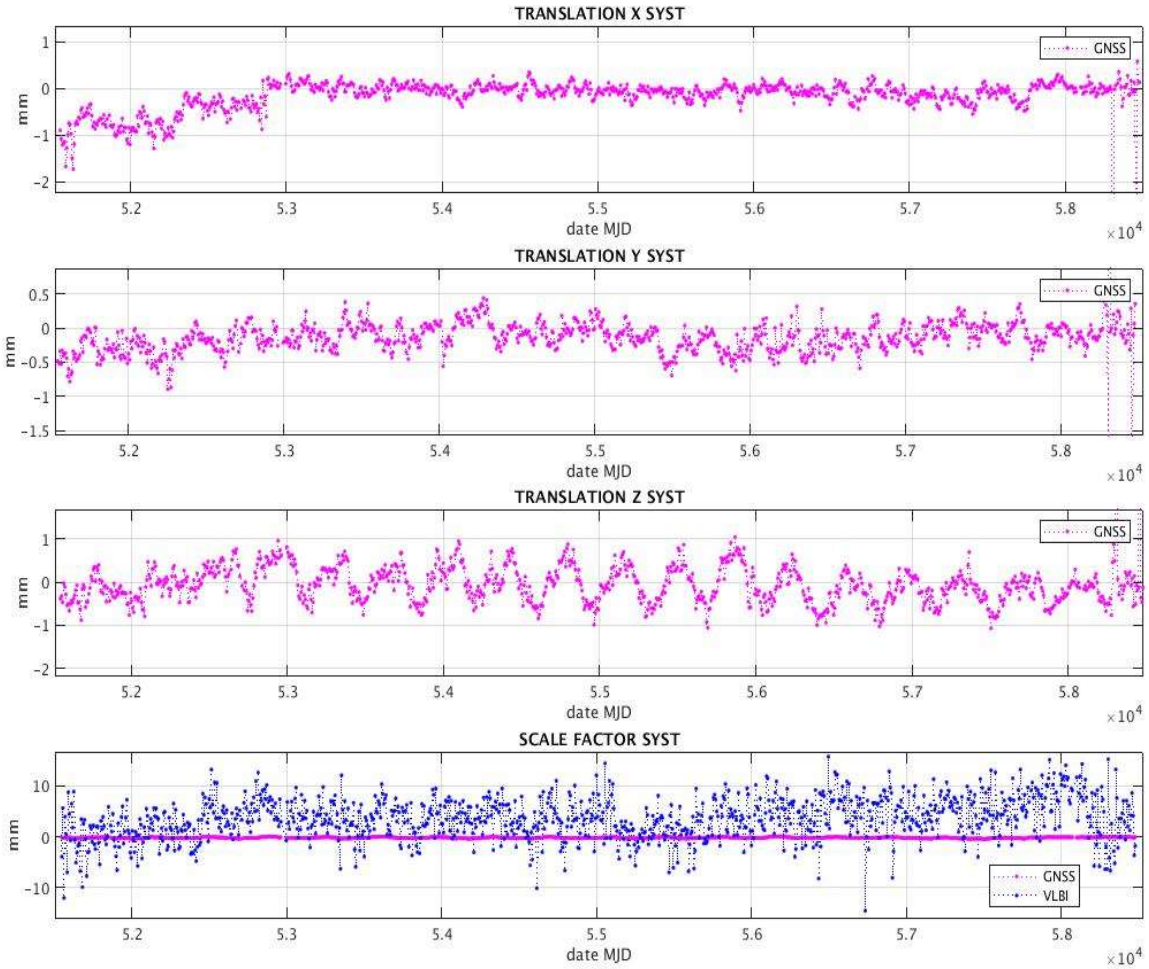
Bilan des incertitudes

Médian des erreurs:

	xp	yp	UT1 µs	LOD	dX	dY
C04	67.0	63.0	9.5	15.2	43.0	40.0
IVS					17.2	17.4
GNSS	3.8	3.9		0.8		
VLBI	27.9	27.5	1.2	2.4	15.6	15.9
COMB	3.6	3.6	1.1	0.8	14.2	14.3

Incertitudes formelles des moindres carrés

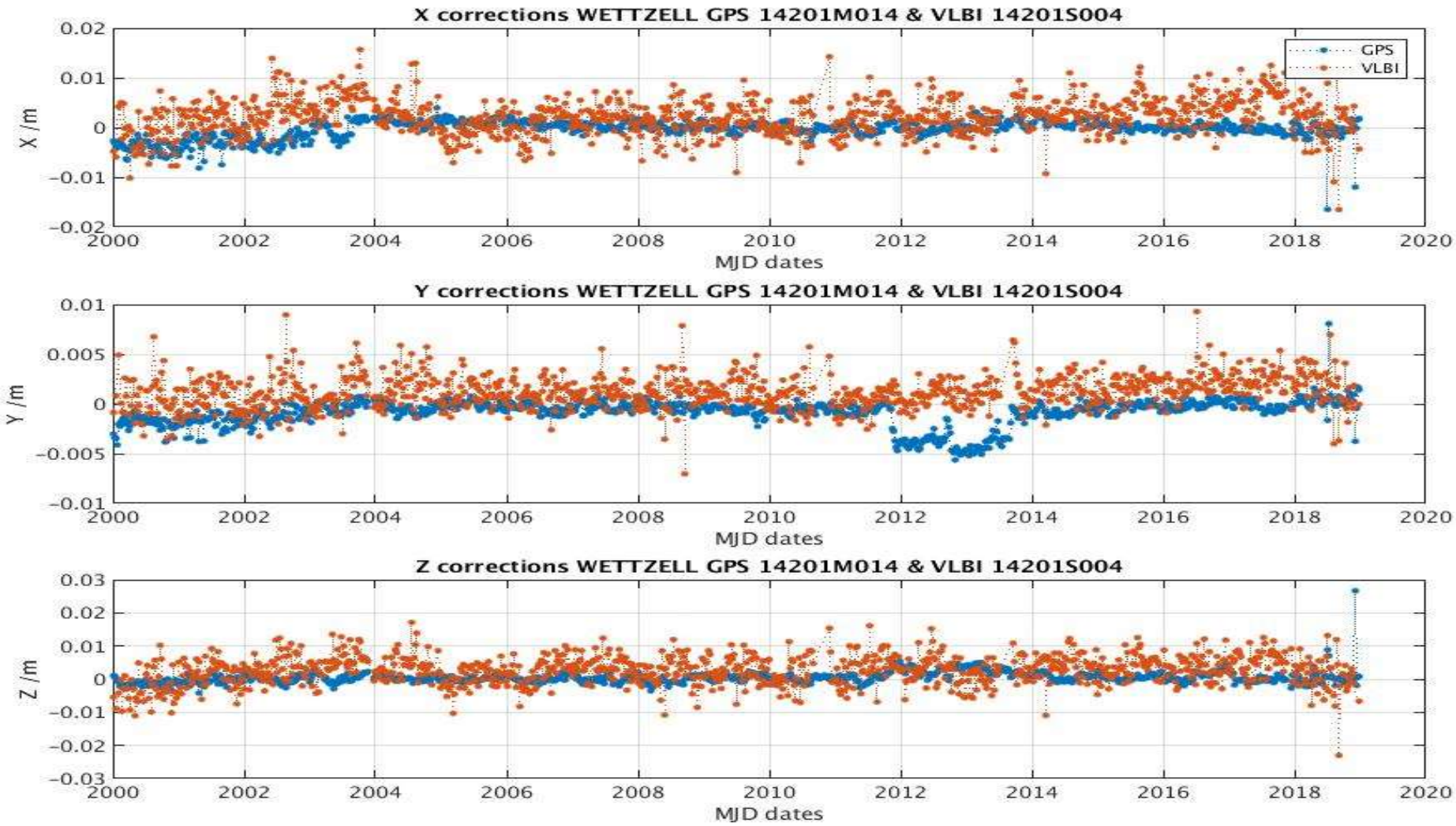
Effets systématiques réseaux GPS & VLBI



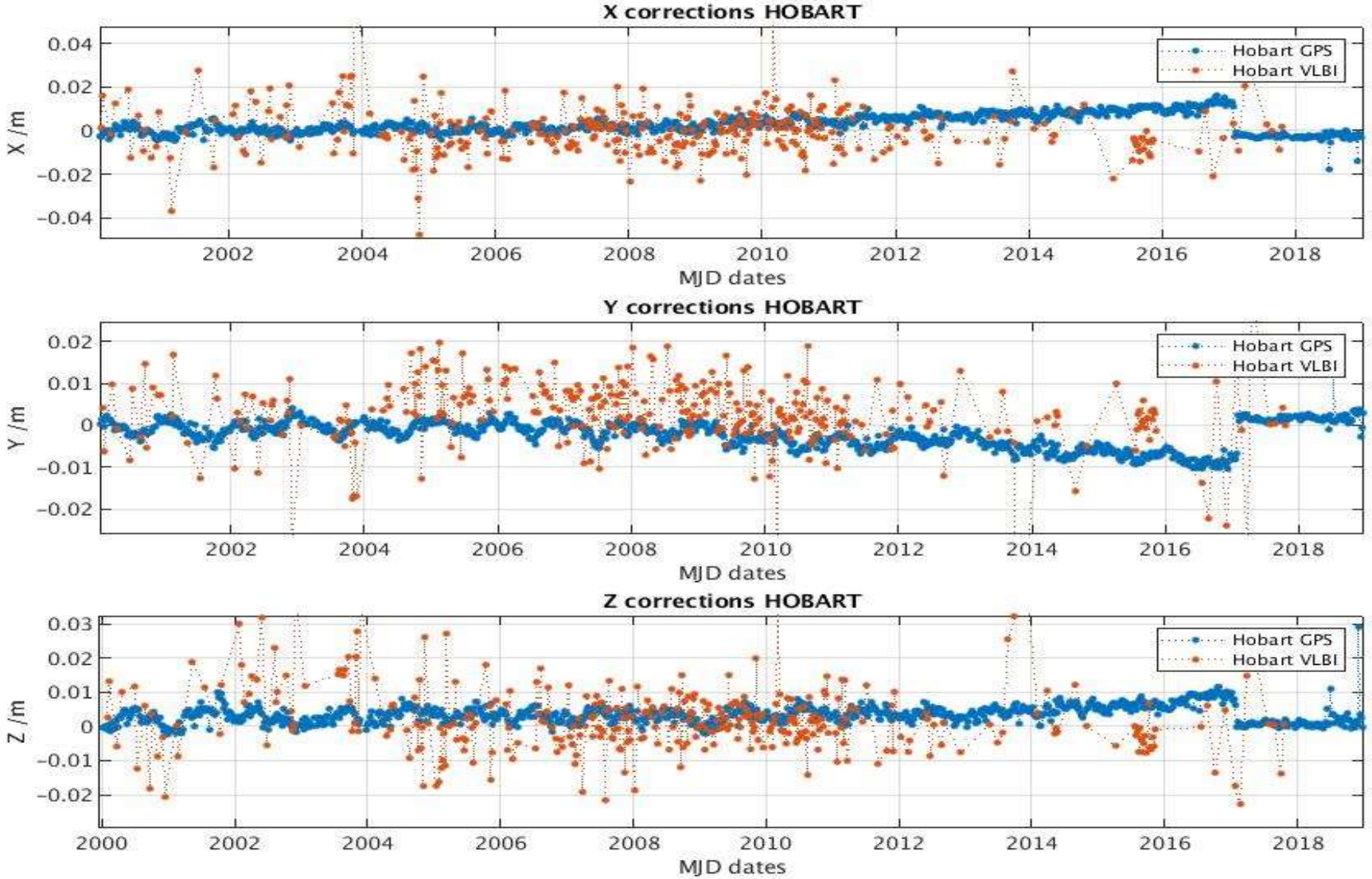
Θ_{SYST} mean & rate wrt. ITRF over 2000-2019, on Translation & Scale for GNSS & VLBI networks

	Tx mm $\dot{T}$x mm/y	Ty mm $\dot{T}$y mm/y	Tz mm $\dot{T}$z mm/y	D mm $\dot{D}$x mm/y
GNSS	-0.185 ±0.709 +0.031	-0.136 ±0.376 -0.0006	-0.028 ±1.021 -0.010	-0.979 ±0.689 -0.767
VLBI				+3.624 ±4.205 -1.558

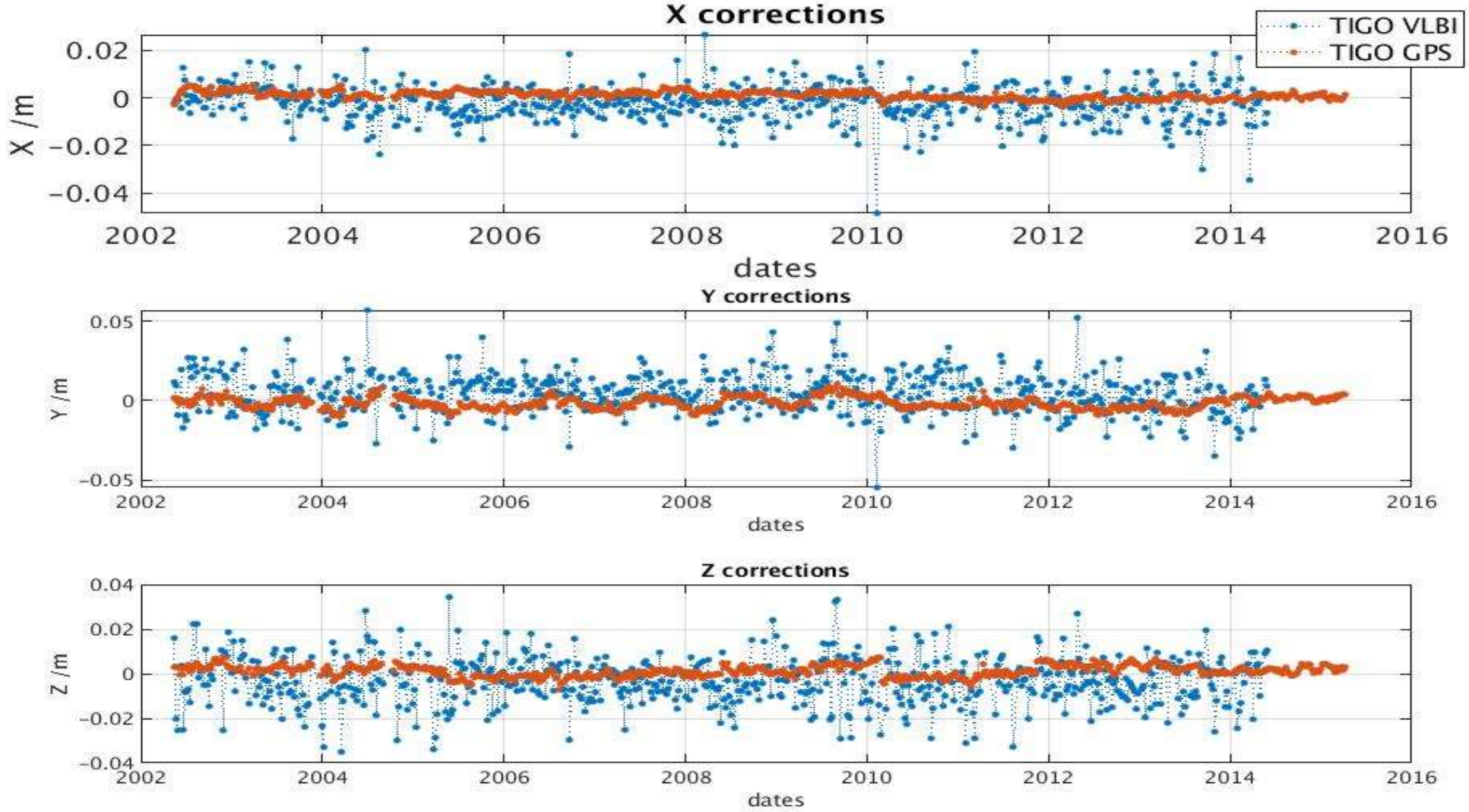
Stations WETTZELL VLBI & GPS



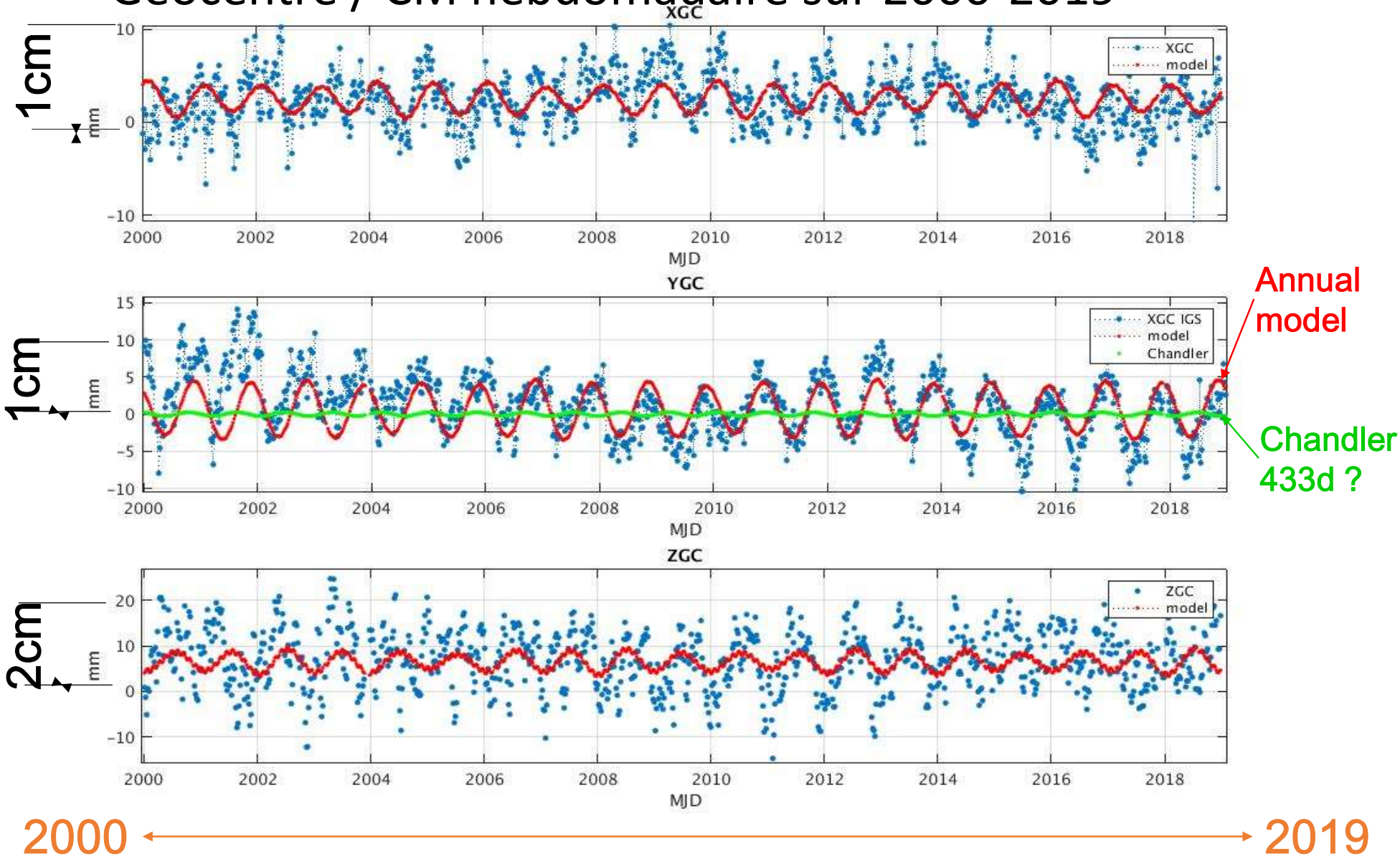
Stations HOBART VLBI & GPS



Stations: TIGO VLBI & GPS



Géocentre / CM hebdomadaire sur 2000-2019



Conclusion & perspectives

- La nouvelle série opérationnelle des EOP par combinaison GNSS+VLBI
  - Solutions cohérente avec l'ITRF => cela permet de contrôler la série C04 en quasi temps réel (plus de nécessité d'attendre le nouvel ITRF pour réajuster les EOP)
  - La nutation : stabilité accrue et dispersion sensiblement diminuée (moins d'outliers)
  - UT1 et le LOD: plus grande stabilité sur long terme (> 1 an)
  - Le pole: comparable au pole du GNSS
  - Les corrélations entre EOP estimés sont sensiblement plus faibles
- Inclure les équations normales VLBI des sessions intensives pour tester leurs influences sur l'estimation de UT1
- Introduire les estimations des quasars observés par VLBI pour disposer du référentiel céleste CRF en cohésion avec le TRF
- Ecrire un article sur cette combinaison GNSS+VLBI
- Adopter l'ITRF2014 comme apriori depuis le début des traitements (2000) si nécessaire
- Mettre à jour les contraintes de colocalisation entre stations
- Combiner les équations normales SLR (ILRS) puis DORIS (IDS) en opérationnel
- Mise à jour du logiciel Dynamo à l'Observatoire de Paris sur une nouvelle machine (2020)

Annexe

Equation de contrainte d'Affranchissement des Effets systématiques des techniques sur les positions de stations

Pour chaque technique on exprime les coordonnées de station dans le référentiel apriori R1 liées au référentiel R2 par une similitude à 7 paramètres (cas général)

$$\underbrace{\begin{pmatrix} SXi_{R1} \\ SYi_{R1} \\ SZi_{R1} \end{pmatrix}}_{\text{Référentiel 1}} = \underbrace{\begin{pmatrix} SXi_{R2} \\ SYi_{R2} \\ SZi_{R2} \end{pmatrix}}_{\text{Référentiel 2}} + \underbrace{\begin{pmatrix} Tx_{SYST} \\ Ty_{SYST} \\ Tz_{SYST} \end{pmatrix}}_{\text{3 Translations}} + \underbrace{\begin{pmatrix} x_i^0 / R_0 \\ y_i^0 / R_0 \\ z_i^0 / R_0 \end{pmatrix} D_{SYST}}_{\text{Facteur d'échelle}} + \begin{pmatrix} 0 & z_i^0 / R_0 & -y_i^0 / R_0 \\ -z_i^0 / R_0 & 0 & x_i^0 / R_0 \\ y_i^0 / R_0 & -x_i^0 / R_0 & 0 \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} Rx_{SYST} \\ Ry_{SYST} \\ Rz_{SYST} \end{pmatrix}}_{\text{3 Rotations}}$$

$$coordonnées\ apriori = \begin{pmatrix} x_i^0 \\ y_i^0 \\ z_i^0 \end{pmatrix}, R_0 = 6\,378\,136 \text{ m}, \Theta = \begin{pmatrix} Tx_{SYST} & Ty_{Syst} & Tz_{Syst} & D_{Syst} & Rx_{Syst} & Ry_{Syst} & Rz_{Syst} \end{pmatrix}^T$$

$$\text{en posant } B_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i^0 / R_0 & 0 & z_i^0 / R_0 & -y_i^0 / R_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_i^0 / R_0 & -z_i^0 / R_0 & 0 & x_i^0 / R_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i^0 / R_0 & y_i^0 / R_0 & -x_i^0 / R_0 & 0 \end{pmatrix}$$

on forme sur l'ensemble des stations "i" l'Equation Normale de contrainte

$$(B^{\mathrm{T}}.B)^{-1} B^T.(S_{R2} - S_{R1}) = \Theta_{Syst} \pm \sigma_{Syst}$$

Technique satellite DORIS, GPS, SLR

$$B = \begin{bmatrix} B_{1Tech} \\ . \\ . \\ B_{n_{Tech}} \end{bmatrix}, B_{i_{Tech}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i^0 \\ 0 & 1 & 0 & y_i^0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i^0 \end{bmatrix}, \Theta_{Tech} = \begin{bmatrix} T_{x_{Tech}} \\ T_{y_{Tech}} \\ T_{Z_{Tech}} \\ S_{c_{Tech}} \end{bmatrix}$$

Technique VLBI

$$B_i = \begin{bmatrix} x_i^0 \\ y_i^0 \\ z_i^0 \end{bmatrix}, \Theta_{Tech} = [S_c]_{Tech}$$

Estimation des coordonnées de station relatives au référentiel combiné en appliquant certaines contraintes

Contraintes de rattachement

Cette technique de rattachement consiste à introduire les contraintes entre stations co-localisées et former les contraintes à la date considérée entre les stations 1 and 2:

$$X_2(t) - X_1(t) = \Delta_{21}(t)$$

Contraintes Minimales

Les équations normales de chaque technique sont cumulées et pondérées par algorithme d'Helmert qui forme l'équation normale combinée. L'estimation des coordonnées de station de chaque technique relative au référentiel combinée est réalisée en ajoutant des contraintes minimales à l'équation normale combinée consistant à ajouter 7 paramètres de transformation une technique (sous réseau de stations GPS par exemple):

$$X_{Tech} = X_{apriori_ITRF} + B.\Theta$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ . \\ . \\ B_n \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i^0 & 0 & z_i^0 & -y_i^0 \\ 0 & 1 & 0 & y_i^0 & -z_i^0 & 0 & x_i^0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i^0 & y_i^0 & -x_i^0 & 0 \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_Z \\ S_c \\ R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix}$$

Ces contraintes minimales forment une équation de contrainte rajoutée à l'équation normale combinée :

$$(B^T B)^{-1} B^T (X_{Tech} - X_{Tech_ITRF}) - \Theta = 0 \pm \sigma \text{ with } \sigma = 0{,}1\text{mm}$$

Les 7 paramètres de transformation de **Θ (Tx,Ty,Tz,Sc,Rx,Ry,Rz)** sont estimés et représentent l'écart entre le référentiel combiné réalisé et le référentiel ITRF