



Traitements de géodésie spatiale Multi Techniques par DYNAMO

Jean-Yves Richard(1) , Daniel Gambis(1), Sébastien Lambert(1), Christian Bizouard(1), Teddy Carlucci(1)

Sylvain Loyer(2), Laurent Soudarin(2), Géraldine Bourda(3), Antoine Bellanger(3), Florent Deleflie(4), David Coulot(4,5), Arnaud Pollet(5), Jean-Michel Lemoine(7), Richard Biancale(7), Jean-Charles Marty(7), Felix Perozanz(7)

(1) Observatoire de Paris - SYRTE – GRGS

(2) CNES / CLS, Toulouse

(3) Observatoire de Bordeaux, LAB

(4) IMCCE – GRGS Paris

(5) IGN – LAREG – GRGS

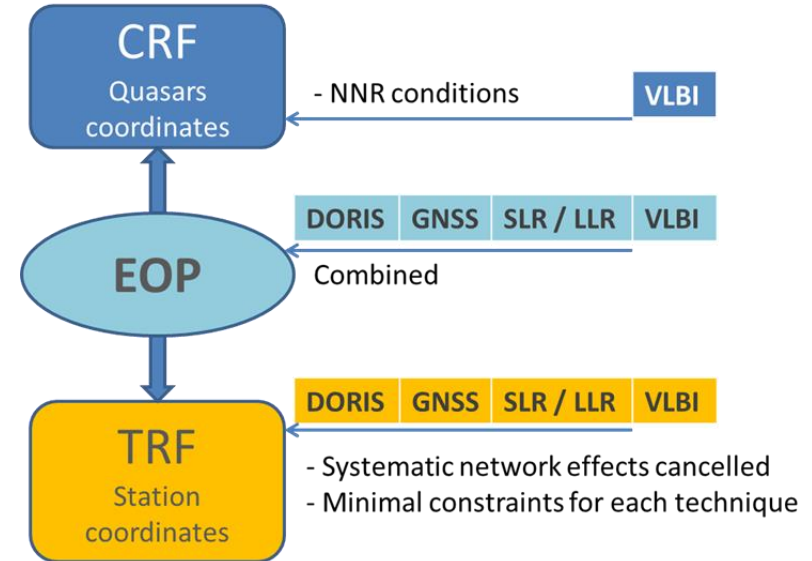
(7) CNES – OMP – DTP – GRGS Toulouse

SOMMAIRE

- Motivation du Projet de combinaison multi technique au niveau des équations normales
- Equations normales du GRGS pour l'année test 2009
- Traitements des équations normales
 - des techniques individuelles
 - de la combinaison multi techniques
- Solutions CRF, EOP, TRF par Combinaison multi techniques
- Conclusion & Perspectives

Projet de Combinaison Multi Techniques au niveau des observations

- Actuellement les référentiels d'espace céleste CRF, terrestre TRF et les paramètres d'orientation de la Terre EOP sont réalisés par combinaison de solutions sans aucune garantie sur l'homogénéité ni la cohérence entre les techniques de géodésie spatiale
- Le GRGS participe à un groupe de travail sur les combinaisons « COL » de l'IERS, créé en octobre 2009, pour développer une approche inter technique au niveau des observations



- ❑ Permet d'assurer la cohérence et l'homogénéité entre les techniques qui peuvent être étudiées et précisées plus directement si elles sont traitées ensemble dans une même série avec des logiciels compatibles et des modèles a priori identiques
- ❑ Permet de s'affranchir de systématismes propres à chaque technique
- ❑ Permet une détermination périodique et simultanée de paramètres:
 - Positions de quasars de référence → **CRF** Celestial Reference Frame
 - Coordonnées de station terrestres de références → **TRF** Terrestrial Reference Frame
 - du mouvement du Pole de rotation, UT1, LOD, Nutation → **EOP** Earth Orientation Parameters
 - Biais troposphériques & gradients → **ZTD** Zenithal Time Delay
 - Coordonnées du géo centre et des bas degré du champ de gravité → **CM, C21, S21** Center of Mass, Stockes Coefficients Order 2

Equations normales du GRGS pour l'année test 2009



GPS: CNES-CLS Toulouse	DORIS: CNES-CLS Toulouse	SLR: IMCCE GRGS Paris	VLBI: OB LAB Bordeaux	LLR: IGN- LAREG
<p>4372 daily NEQ, Period January 1st 2002 to December 30th 2013 GPS week 1147 to 1773</p>	<p>NEQ per 3,5d arc length & per satellite: 106 Jason2, 99 Jason1, 104 Envisat, 58 Spot2, 104 Spot4, 107 Spot5 over the whole year 2009</p>	<p>2009: Weekly v60 NEQ for LAGEOS-1, 74 NEQ LAGEOS-2, 74 NEQ ETALON-1, 74 NEQ ETALON-2, 74 NEQ</p>	<p>Session R1 & R4 from week 47 of 2008 to the week 5 of 2010, 62 NEQ R1 session & 62 NEQ R4 session</p>	<p>7-January-1990 to 8-December-2013 820 weekly NEQ</p>
<p>GPS – Glonass Constellations, between 23 and 55 GNSS satellites</p>	<p>Doris Doppler: Envisat, Jason-1, Jason-2, Spot-2, Spot-4, Spot-5 Doris Laser: Envisat, Jason-1, Jason-2</p>	<p>Lageos1&2 Etalon-1&2</p>		
<p>Pole: PX, PY 1pt/d @12h Pole Rates: PXR, PYR 1pt/d @12h UT1-TAI, LOD 1pt/d @12h, Nutation corrections w.r.t. IAU2000 NX, NY 1pt/d @12h Stations coordinates SX, SY, SZ 1pt/d Tropospheric parameters for collocated sites : - MZB (Zenith Tropospheric Delay) & - MGN, MGE (North / East gradients) 12pt/d @ 2h (01,03,05,07,09,11,13,15,17,19 ,21,23)</p>	<p>Pole: PX, PY, UT1-TAI 4pt/d @ 0h,6h,12h,18h Nutation NX, NY 2pt/d @ 00 12h Stations SX, SY, SZ 1p/week Tropospheric MZB (Zenith Tropospheric Delay) 12pt/d @2h MGE, MGN East & North Gradients 1pt/d CDX,CDY,CDZ Center of mass correction on satellites 1p/sat/week ----- *Global station bias SXC, SXS, SXD, SXT, SXB 1pt/arc *Doppler frequency offset MFO @ 2h. *Orbital elements EX, EY, EZ, EXP, EYP, EYP 1pt /arc *Atmospheric drag and lift FD *Radiation Solar pressure FS 1pt/arc. *Orbit Biases BT, BN *Radiation forces, 1 to 8: -specular reflectivity of panel RRS -diffuse reflectivity of panel RRD *Emissivity of panel 1 à 8 per arc RE, RF *Gravity field coefficients normalized: GCN cosinus, GSN sinus degree 0 a 40</p>	<p>Pole : PX, PY 4pt/d @ 00,06,12,18h UT1-TAI : PT 4pt/d @ 00,06,12,18h Stations: SX, SY, SZ 1pt/week @12:00 Station range Bias MRB ----- *Orbital elements EX, EY, EZ, EXP, EYP, EZP 1pt /arc *Radiation Solar pressure 1pt/week/sat *Orbit Biases 1pt/week/sat *Gravity field coefficients normalized: GCN cosinus, GSN sinus degree 0 to 40 *Oceanic tides coefficients normalized OCN, OSN</p>	<p>Pole : PX, PY 4pt/d @ 00,06,12,18h UT1-TAI : PT 4pt/d @ 00,06,12,18h Nutation : NX, NY 4pt/d @ 00,06,12,18h Stations : SX,SY,SZ 1pt/week @12h Quasars : QRA, QDE 1pt/week Tropospheric zenithal delays MZB12pt/d @ 02h (01,03,05,07,09,11,13,15,1, 7,19,21,23) ----- *Clock error for VLBI stations @1H</p>	<p>Pole : PX, PY 4pt/d @ 00,06,12,18h UT1-TAI : PT 4pt/d @ 00,06,12,18h (Nutation : NX, NY @00H - 12H not available) Stations SX,SY,SZ 1pt/week @12h ----- *Lunar Reflectors: SX, SY, SZ 1pt/week @12h</p>

Traitements des équations normales 1/3

❑ Sur les techniques individuelles

- Cumul des EQNs des arcs d'orbite sur une base hebdomadaire synchrone aux semaines GPS avec pondération par méthode de Helmert par type de satellite sur les paramètres communs EOP
- Réduction de paramètres autres que EOP, Stations, Quasars, Troposphère, CoM
- Affranchissement des Effets systématiques par technique
- Blocage Rétrograde Diurne sur le mouvement du Pole pour les techniques satellitaires
- Blanchiment du label technique associés aux paramètres de troposphère afin de mettre en commun les mesures de troposphère par différentes techniques regroupés sur un même sites

Traitements des équations normales 2/3

□ Sur l'ensemble des techniques utilisées

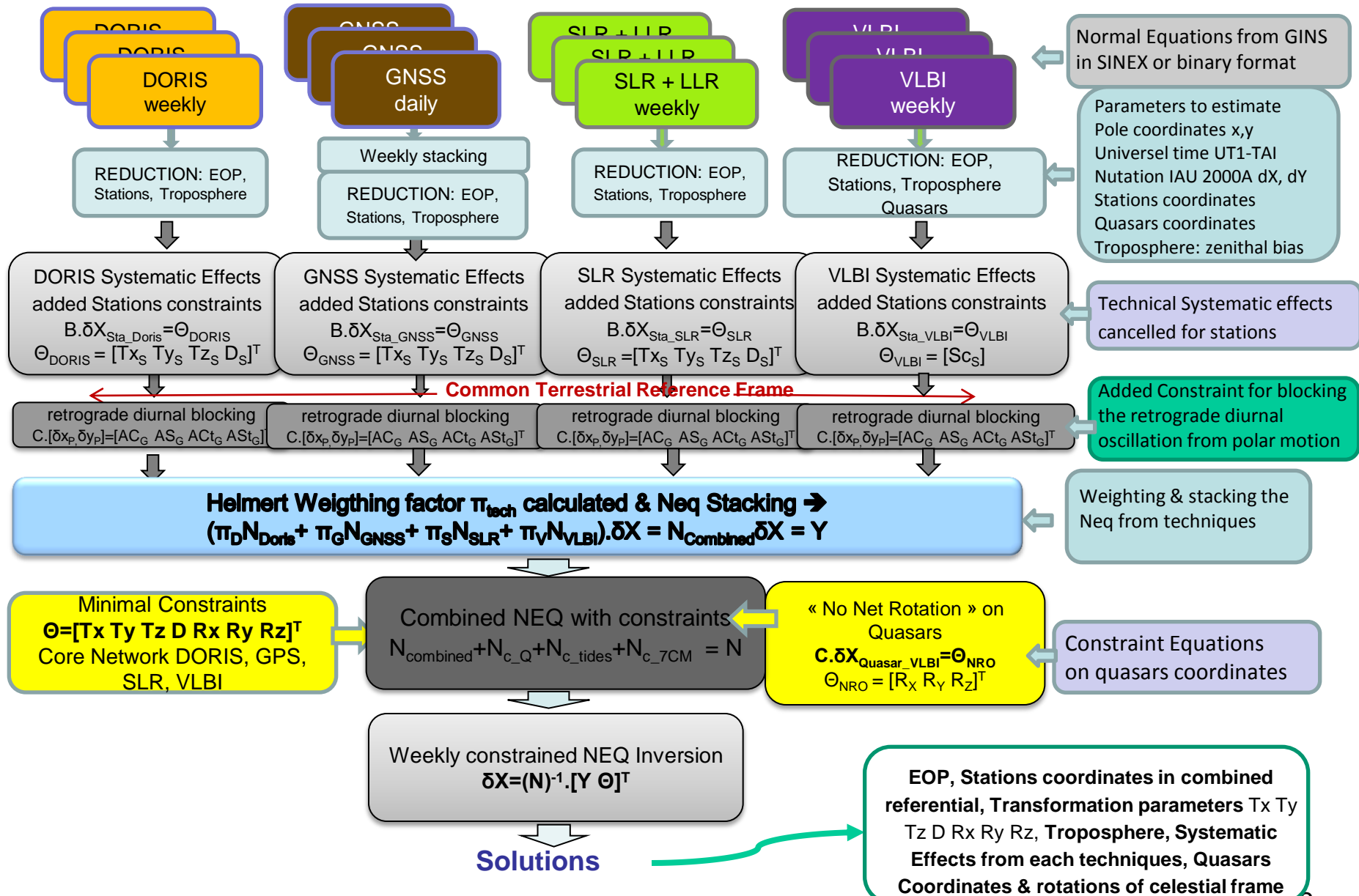
- Cumul avec pondération de Helmert des EQN DORIS Doppler, DORIS Laser, SLR et VLBI EOP(6h)
- Réduction des paramètres E,B,F : Eléments orbitaux, Biais d'orbites, Forces non gravitationnelles
- Elimination des EOP bords: forçage aux valeurs initiales des EOP externes à la semaine traitée
- Contrainte de linéarisation journalières des corrections des EOP 6h → Réduction des EQN avec EOP 1pt/d @ 12h
- Cumul de l'EQN GPS dont les EOP sont à 1pt/d @ 12h avec pondération de Helmert
- Blanchiment des paramètres de blocage de l'oscillation rétrograde diurne sur les coordonnées du pôle pour mutualiser ces paramètres issus de différentes techniques
- Non Rotation d'ensemble des quasars (NNR)
- Application des Contraintes Minimales (7 paramètres de transformation de Helmert) sur les réseaux de référence des 4 techniques DORIS, GPS, SLR, VLBI

Traitements des équations normales 3/3

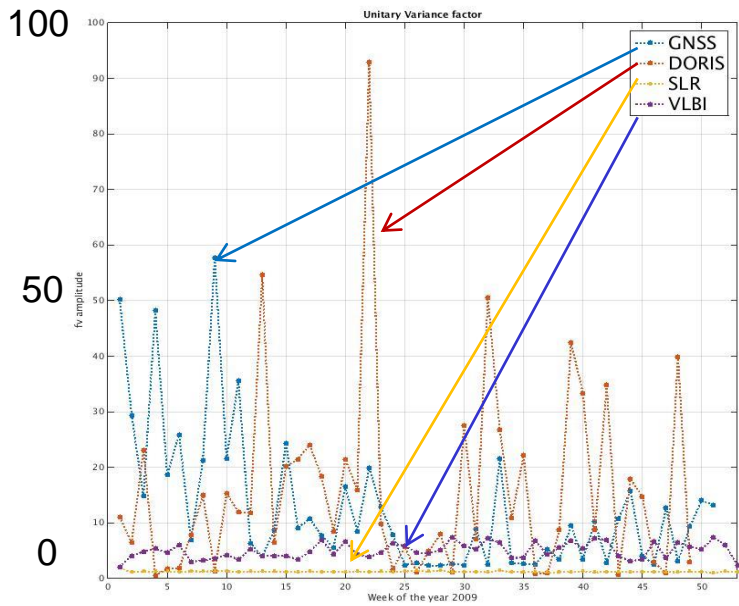
□ Inversion de l'EQN globale sur une base hebdomadaire pour obtenir les solutions simultanées des paramètres coordonnées de quasars, EOP, coordonnées de stations et des biais troposphériques zénithaux, en appliquant un fichier de contrainte sur les paramètres:

- Pôle libre avec contrainte de stabilité ± 10 mas sur les appoints (30cm à la surface de la Terre)
- UT libre avec contrainte de stabilité $\pm 6,47$ ms sur les appoints (3m à la surface de la Terre)
- Nutation libre avec contrainte de stabilité sur les appoints de ± 47 nrđ (± 10 mas)
- paramètres de blocage diurne AC, AS, Act, Ast libérés avec contrainte sur les appoints de ± 1 frđ
- Stations libres avec contraintes sur les appoints lâches ± 50 m et ± 20 m pour les stations SLR
- Systématismes DORIS, VLBI, SLR et GNSS libres sans contrainte
- Contraintes minimales sur un réseau de stations DORIS VLBI SLR et GNSS avec contrainte sur la valeur ajustée $X + dX = 0 \pm 10$ cm
- Biais Troposphériques LIBRES avec contrainte sur les appoints de ± 10 m
- Biais d'horloge LIBRES avec contrainte sur les appoints de ± 100 μ s
- Quasars LIBRES avec contrainte sur les appoints de ± 100 nrđ
- Paramètres de non rotation d'ensemble des quasars NNR de ± 100 nrđ
- Corrections du Centre de masse des satellites Jason1, Jason2, Envisat, techniques Doris doppler et Doris Laser LIBRES

Combinaison hebdomadaire multi techniques d'EQN



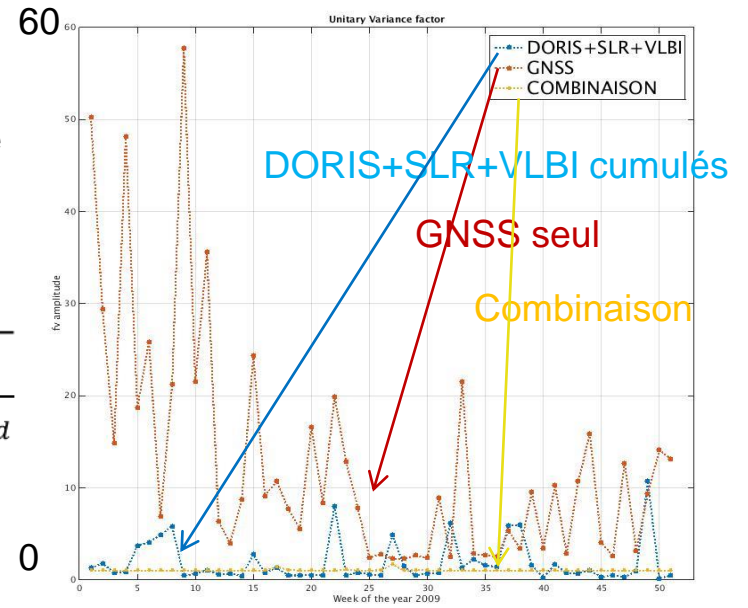
**Solutions EOP, TRF, CRF
par Combinaison multi techniques
DORIS, GPS, SLR, VLBI
au niveau des Equations Normales
Sur l'année test 2009**



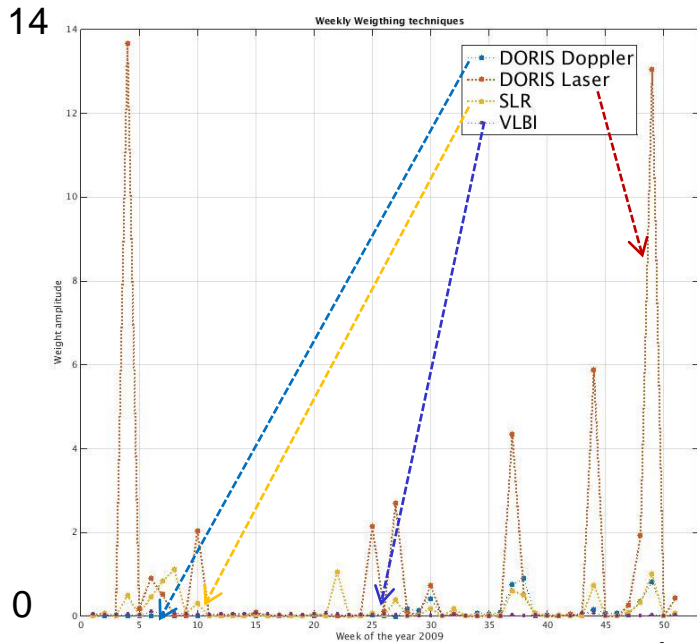
Avant combinaison

Facteur unitaire
de variance
a priori
hebdomadaire

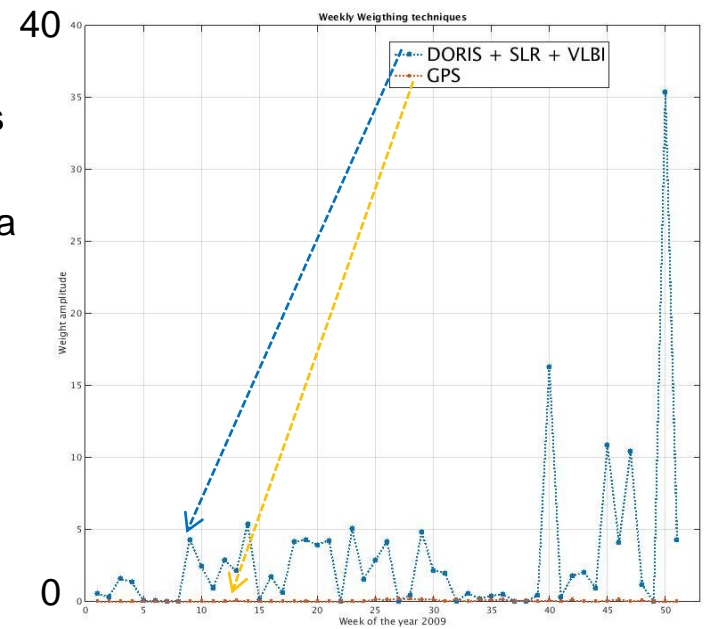
$$f = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n_{obs} - n_{red}}}$$



Lors de la combinaison

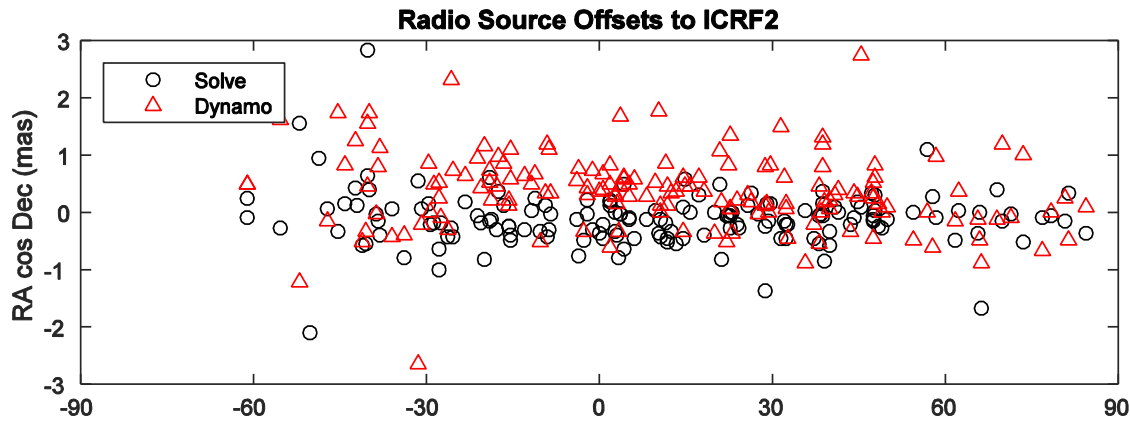


Poids appliqués
aux EQNs
déterminés par la
méthode de
Helmert



Corrections des positions de 161 radiosources par rapport au catalogue ICRF2

Nombre de sources = 161



Rotations Translation des 161 sources / ICRF2, solutions VLBI par Solve

$$R1 = 0.221 \pm 0.018 \text{ mas}$$

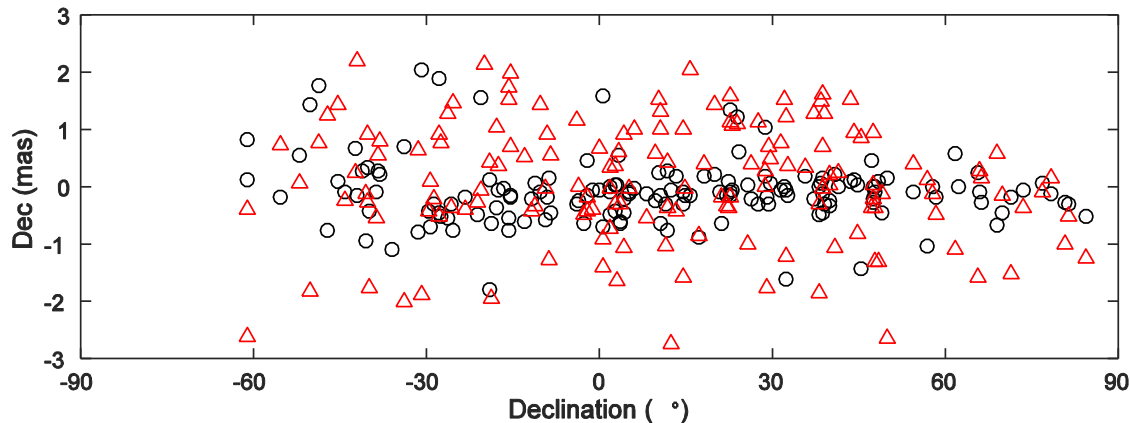
$$R2 = 0.109 \pm 0.015 \text{ mas}$$

$$R3 = -0.215 \pm 0.017 \text{ mas}$$

$$dz = 0.118 \pm 0.013 \text{ mas}$$

Postfit rms = 0.077 mas

Reduced χ^2 = 6.204



Rotations Translation des 161 sources / ICRF2, solutions VLBI par combinaison Dynamo

$$R1 = -0.339 \pm 0.087 \text{ mas}$$

$$R2 = 0.079 \pm 0.078 \text{ mas}$$

$$R3 = 0.496 \pm 0.034 \text{ mas}$$

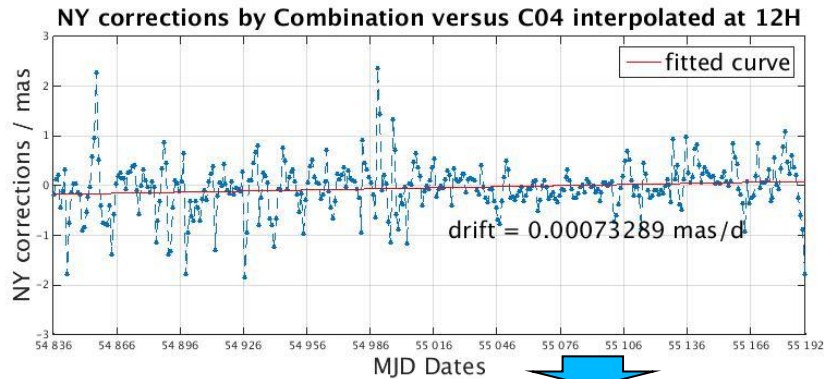
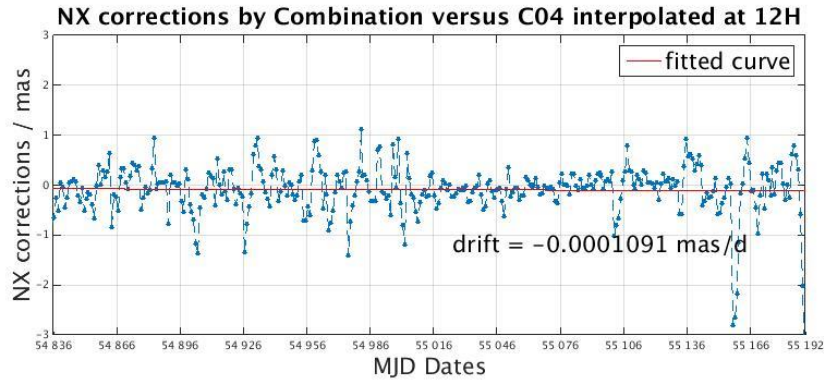
$$dz = 0.696 \pm 0.081 \text{ mas}$$

Postfit rms = 0.175 mas

Reduced χ^2 = 26.581

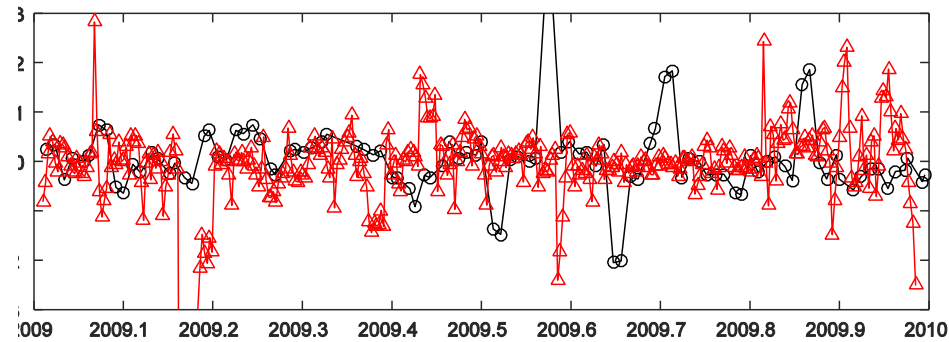
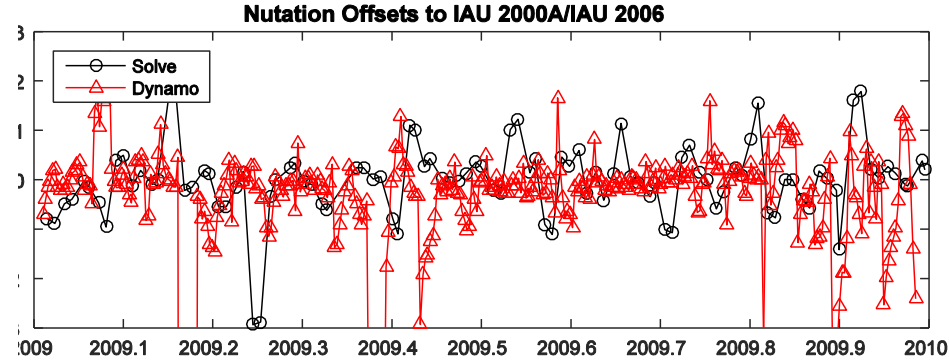
Corrections de la nutation X, Y par rapport au modèle IAU2000A

Comparaison solutions combinées / C04



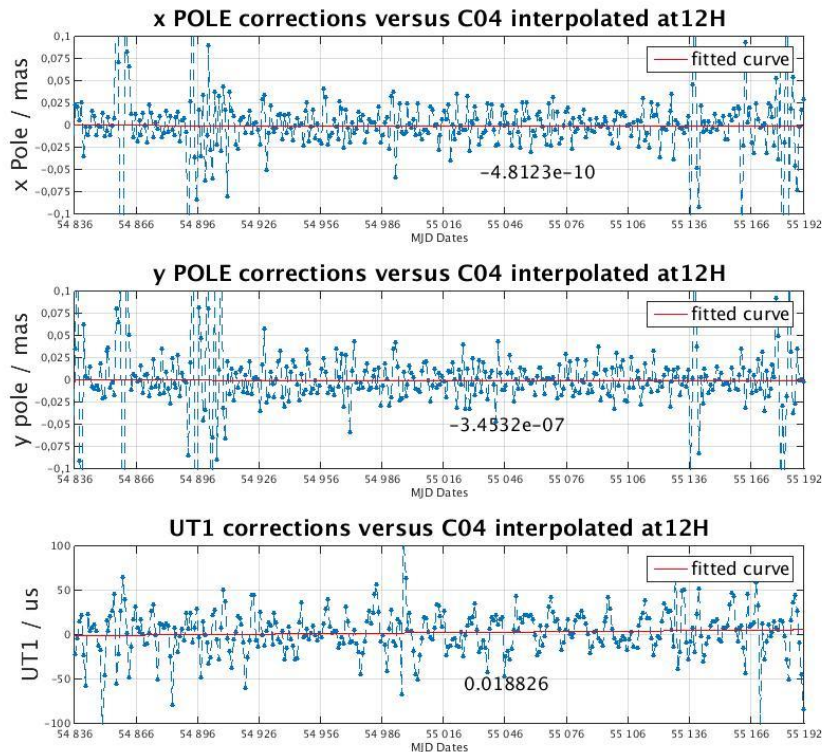
Nombre de points conservées :	357
Nombre de dates redondantes retirées :	49
Mean NX C04 - GRGS : /mas	-0.0920
Mean NY C04 - GRGS : /mas	-0.0434
RMS difference NX C04 - GRGS : /mas	0.5000
RMS difference NY C04 - GRGS : /mas	0.5021

Comparaison solutions combinées Dynamo / solutions VLBI OPA Solve



Corrections du pôle x, y par rapport à la série de référence a priori C04

Comparaison solutions combinées / C04

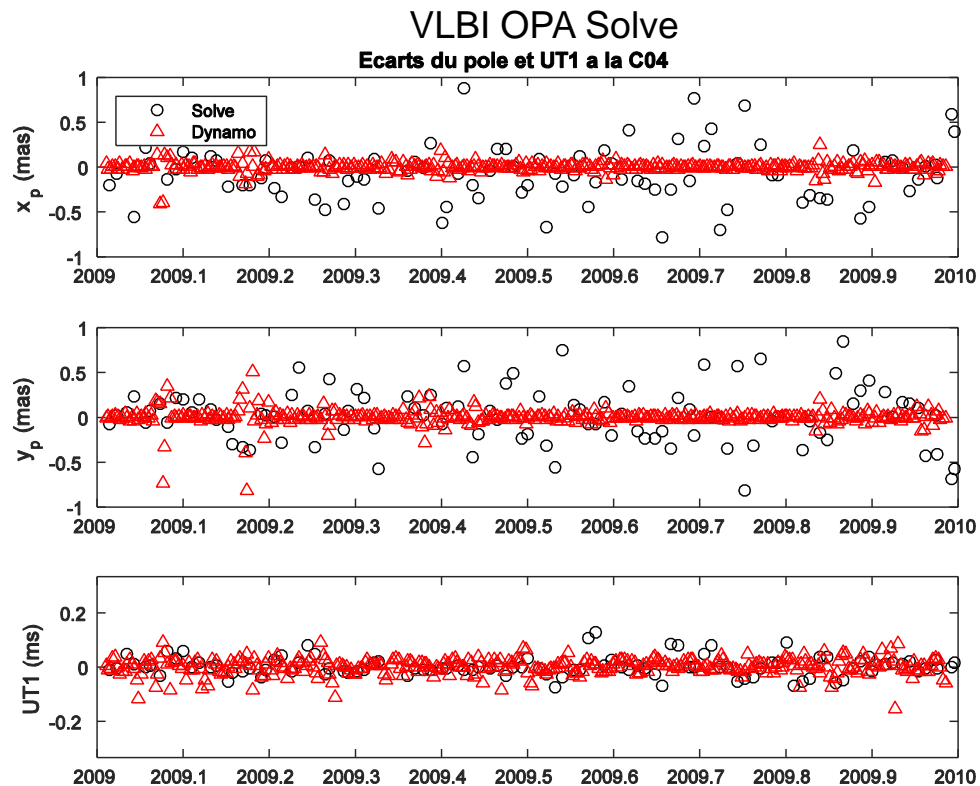


Statistiques:



Nombre de points conservés : 356
 Mean xp C04 - GRGS : /mas $-5.9373e-08$
 RMS difference xp C04 - GRGS : /mas 0.0476
 Mean UT1 C04 - GRGS : / μ s 2.6872
 RMS difference UT1 C04 - GRGS : / μ s 26.0558

Comparaison solutions combinées Dynamo / solutions



Nombre de dates redondantes retirées : 1
 Mean yp C04 - GRGS : /mas $-3.8108e-05$
 RMS difference yp C04 - GRGS : /mas 0.0511

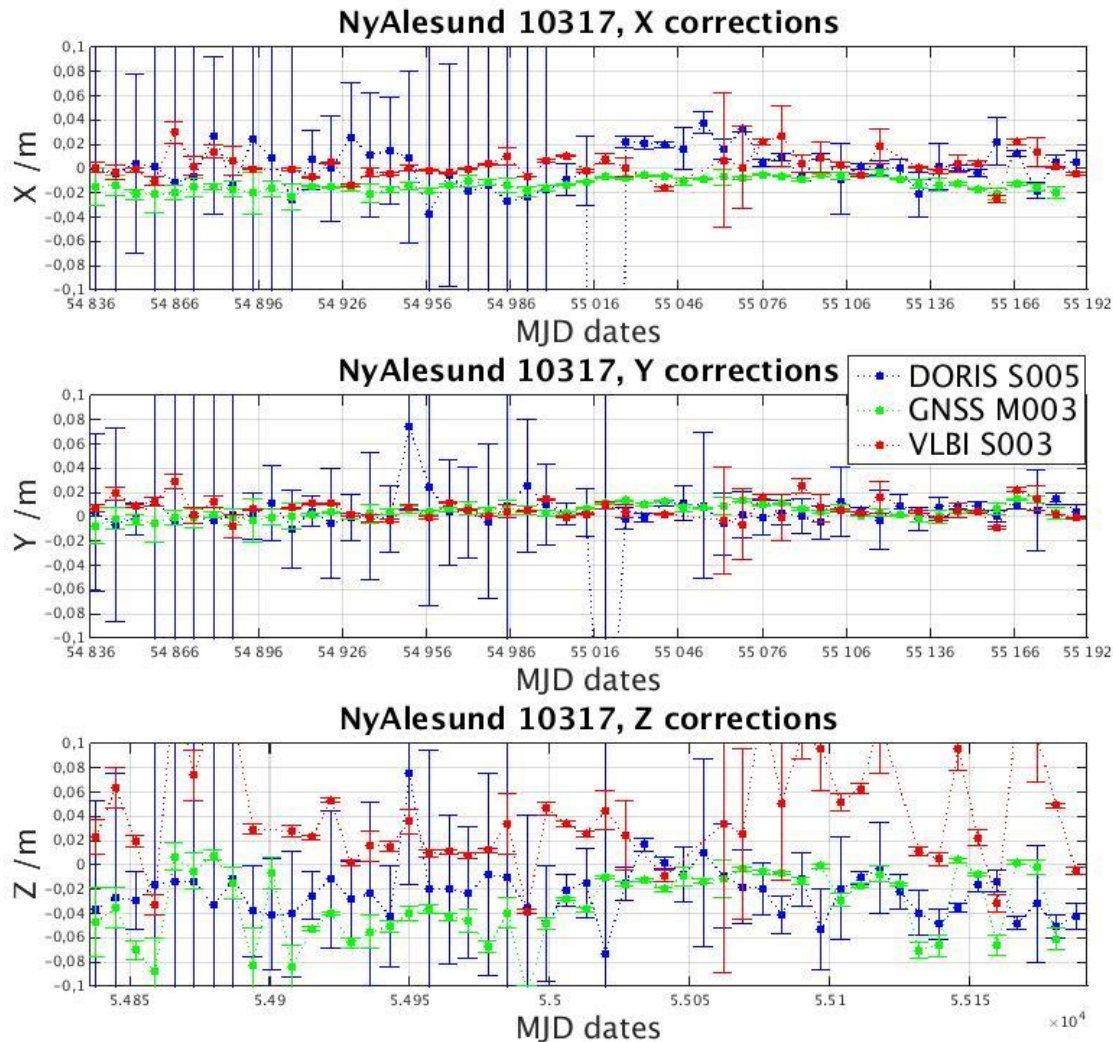
32 Stations de Différentes Techniques Localisées sur un même Site

Et mutualisation des paramètres de troposphère MZB, MGE, MGN

Stations	DORIS Doppler	GNSS	SLR	VLBI	Sélection des paramètres de biais troposphériques zénithaux (dans Dynamo)
GRASSE, France	10002S018		10002S002		EXT [MZB 10002 ? ? ? ? ?]
Toulouse, France	10003S005	10003M009			EXT [MZB 10003 ? ? ? ? ?]
Reykjavik, Iceland	10202S003	10202M001			EXT [MZB 10202 ? ? ? ? ?]
Ny-Alesund, Norway	10317S005	10317M003		10317S003	EXT [MZB 10317 ? ? ? ? ?]
Metsahovi, Finland	10503S015	10503M005			EXT [MZB 10503 ? ? ? ? ?]
Kitab, Uzbekistan	12334S006	12334M001			EXT [MZB 12334 ? ? ? ? ?]
Bad Koetzting, Germany		14201M010	14201S018	14201S004	EXT [MZB 14201 ? ? ? ? ?]
Wuhan, P.R. China	21602S005	21602M001			EXT [MZB 21602 ? ? ? ? ?]
Libreville, Gabon	32809S004	32809M002			EXT [MZB 32809 ? ? ? ? ?]
Algonquin Park, Canada		40104M002		40104S001	EXT [MZB 40104 ? ? ? ? ?]
Fairbanks, United Stat	40408S005	40408M001		40408S002	EXT [MZB 40408 ? ? ? ? ?]
Kooke Park, Waimea, USA	40424S009	40424M004		40424S007	EXT [MZB 40424 ? ? ? ? ?]
Westford, USA		40440S020		40440S003	EXT [MZB 40440 ? ? ? ? ?]
Greenbelt, United Stat	40451S176	40451M123	40451M105		EXT [MZB 40451 ? ? ? ? ?]
Laguna Mountains, USA	40497S009	40497M004	40497M001		EXT [MZB 40497 ? ? ? ? ?]
Ensenada, Mexico	41609S002	40508M002			EXT [MZB 41609 ? ? ? ? ?]
San Juan, Argentina			41508S003	41508S003	EXT [MZB 41508 ? ? ? ? ?]
Forteleza, Brazil		41602M002		41602S001	EXT [MZB 41602 ? ? ? ? ?]
Easter Island, Chile	41703S009	41703M007			EXT [MZB 41703 ? ? ? ? ?]
Santiago, Chile	41705S009	41705M003			EXT [MZB 41705 ? ? ? ? ?]
Concepcion, Chile		41719M002	41719M001	41719M001	EXT [MZB 41719 ? ? ? ? ?]
Puerto Ayora, Ecuador	42005S001	42005M002			EXT [MZB 42005 ? ? ? ? ?]
Lima II, Peru	42202S007		42202M003		EXT [MZB 42202 ? ? ? ? ?]
Thule Airbase, Greenland	43001S005	43001M002			EXT [MZB 43001 ? ? ? ? ?]
YARRAGADEE, Australia	50107S011		50107M001		EXT [MZB 50107 ? ? ? ? ?]
Canberra, Australia	50119S004	50119M001 50119M002	50119S003		EXT [MZB 50119 ? ? ? ? ?]
Waitangi, New Zealand	50207S001	50207M001			EXT [MZB 50207 ? ? ? ? ?]
Port aux Francais, Ker TAHITI	91201S005	91201M002	92201M007		EXT [MZB 91201 ? ? ? ? ?]
Antarctic base of Dum	91501S003	91501M001			EXT [MZB 91501 ? ? ? ? ?]
NOUMEA, FRANCE	92701S003	92701M005			EXT [MZB 92701 ? ? ? ? ?]
Kourou, French Guyana	97301S004	97301M210			EXT [MZB 97301 ? ? ? ? ?]
Le Tampon, France	97401S002	97401M003			EXT [MZB 97401 ? ? ? ? ?]

Sélection de 3 stations avec MZB en commun

Corrections de la station Ny-Alesund par rapport à son a priori ITRF2008



Station NyAlesund 10317

DORIS : 10317S005

GPS: 10317M003

VLBI: 10317S003

Ecart DORIS / GNSS X = 360.6817 m

Y = 1.5310e+03 m

Z = -163.0824 m

Troposphère MZB estimée / **fixée**

RMS 3D DORIS (m) = 5.8332 / **6,3319**

RMS 3D GNSS (m) = 0.1876 / **0,1002**

RMS 3D VLBI (m) = 0.2591 / **0,2423**

pente X de la station DORIS m/y = -0.0570

pente Y de la station DORIS m/y = 0.0074

pente Z de la station DORIS m/y = 0.0013

pente X de la station GNSS m/y = -0.0056

pente Y de la station GNSS m/y = 0.0178

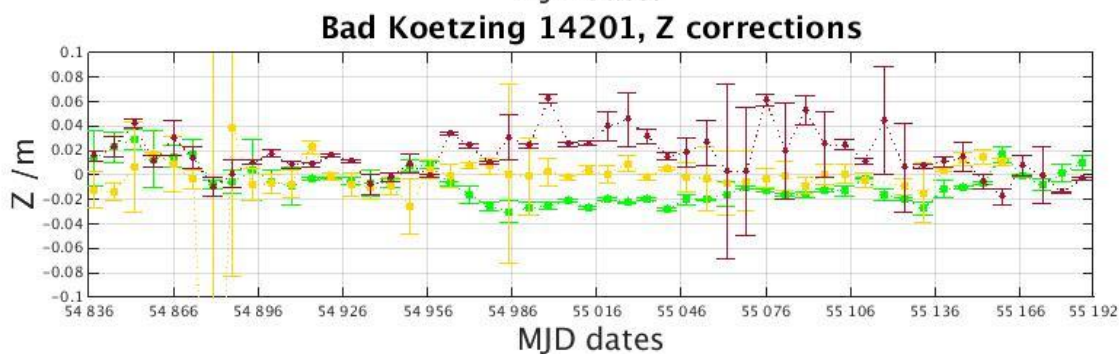
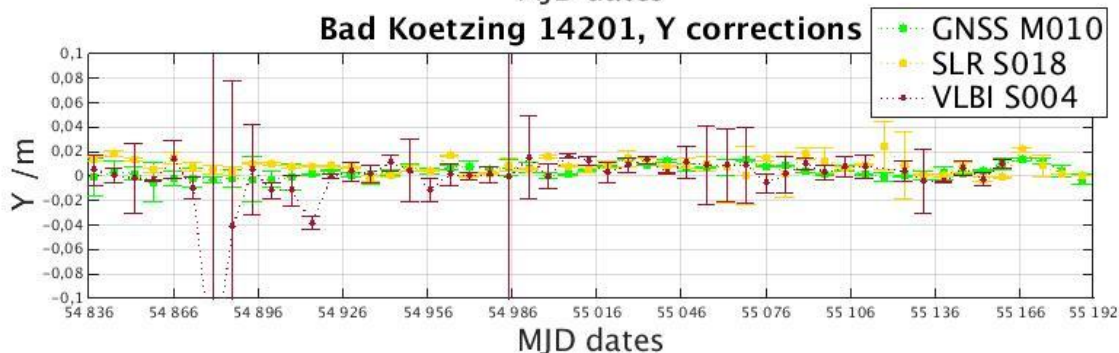
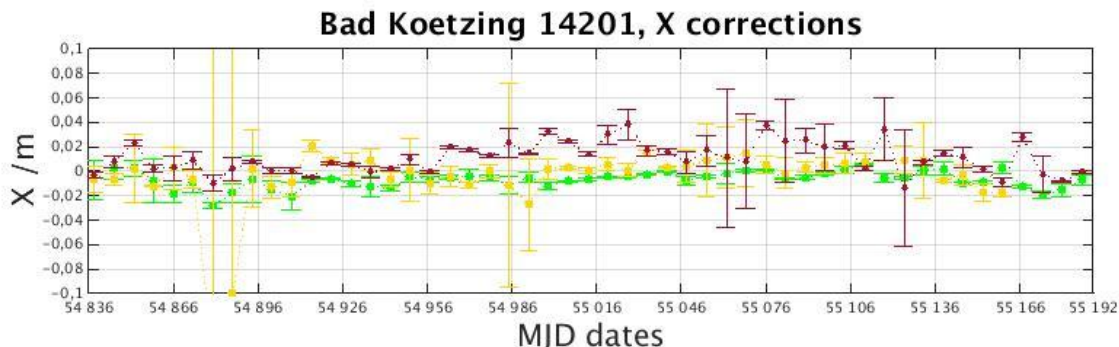
pente Z de la station GNSS m/y = 0.0407

pente X de la station VLBI m/y = -0.0106

pente Y de la station VLBI m/y = 0.0037

pente Z de la station VLBI m/y = 0.0221

Corrections de la station Bad-Koetzing par rapport son apriori ITRF2008



Station Bad Koetzing 14201

GPS: 14201M010

SLR: 14201S018

VLBI: 14201S004

Ecart X GNSS / SLR (m) = 3.8071

Ecart Y GNSS / SLR (m) = 68.2044

Ecart Z GNSS / SLR (m) = -15.5321

Ecart X SLR / VLBI (m) = 36.9730

Ecart Y SLR / VLBI (m) = 50.1923

Ecart Z SLR / VLBI (m) = -45.8041

Troposphère MZB estimée / fixée

RMS 3D GNSS (m) = 0.0818 / 0,0887

RMS 3D SLR (m) = 0.2579 / 1,1456

RMS 3D VLBI (m) = 0.1293 / 0,0948

pente X de la station GNSS m/y = -0.0096

pente Y de la station GNSS m/y = 0.0243

pente Z de la station GNSS m/y = -0.0088

pente X de la station SLR m/y = 0.0144

pente Y de la station SLR m/y = 0.0480

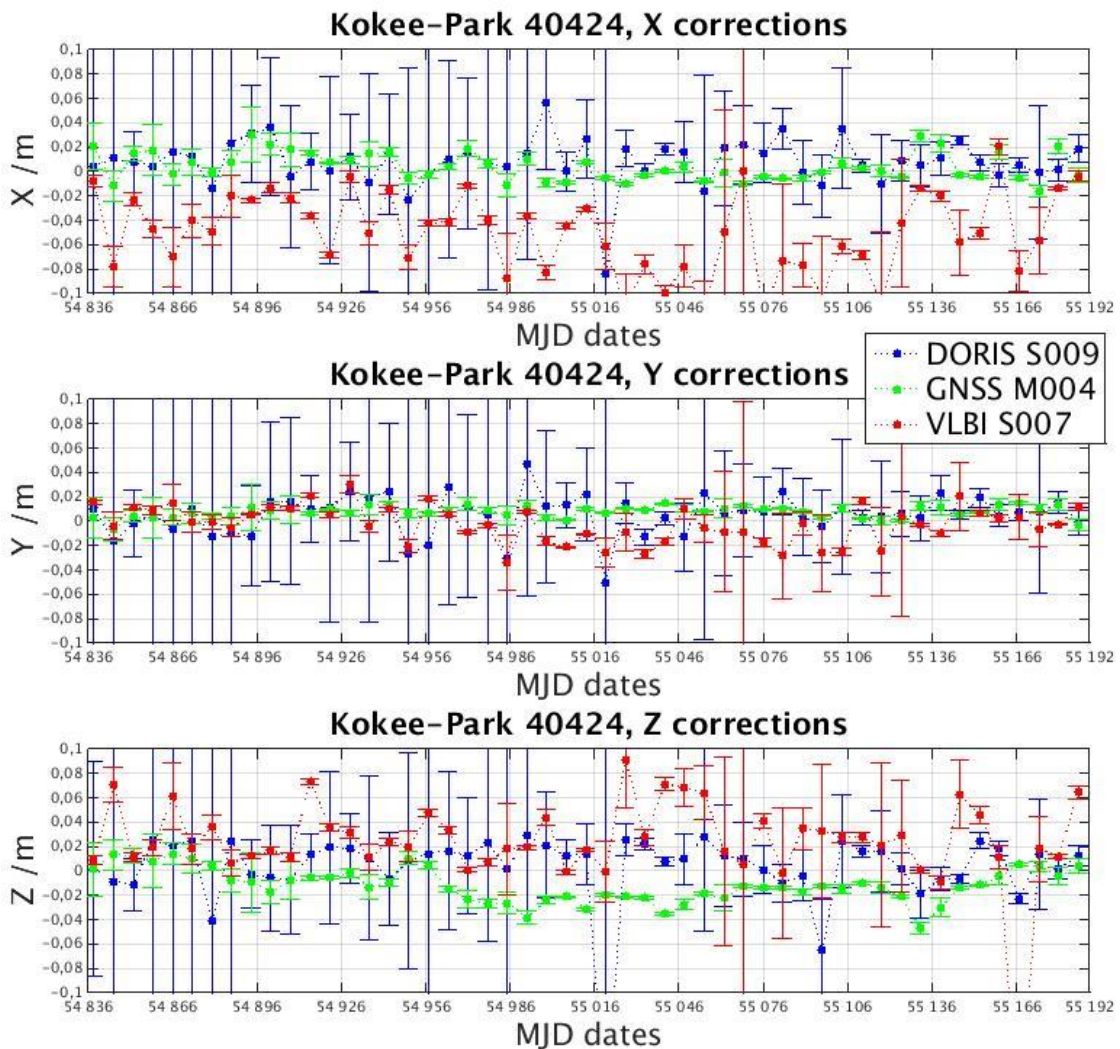
pente Z de la station SLR m/y = 0.0480

pente X de la station VLBI m/y = -0.0096

pente Y de la station VLBI m/y = 0.0143

pente Z de la station VLBI m/y = 0.0036

Corrections de la station Kokee-Park par rapport à son a priori ITRF2008



Station Kokee Park 40424
 Ecart X DORIS / GNSS (m) = -143.1587
 Ecart Y DORIS / GNSS (m) = 2.6043
 Ecart Z DORIS / GNSS (m) = -328.9660

Troposphère MZB estimée / **fixée**
 RMS 3D DORIS (m) = 0.1786 / **3,1262**
 RMS 3D GNSS (m) = 0.0978 / **0,0895**
 RMS 3D VLBI (m) = 0.3228 / **0,2751**

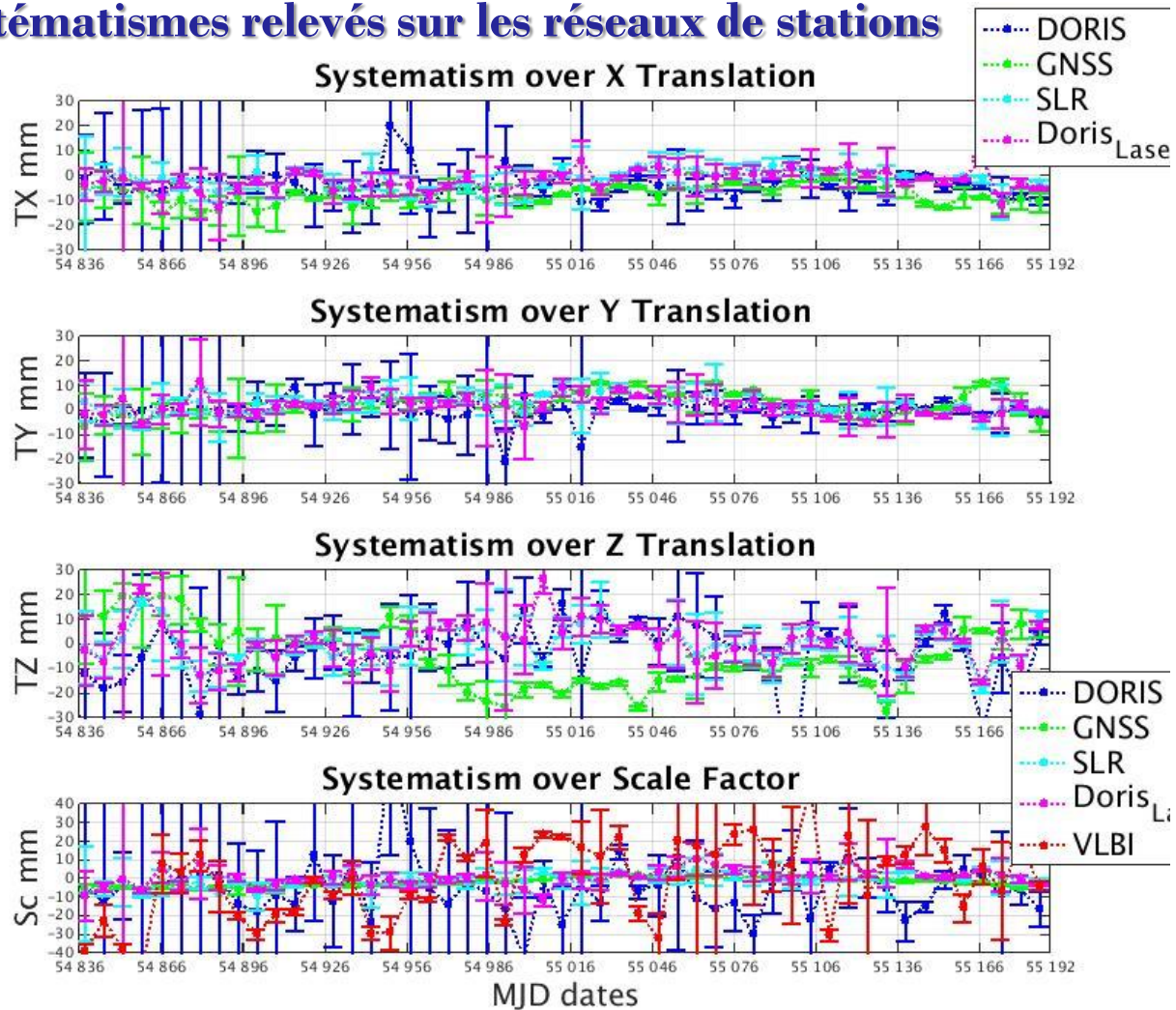
pente X de la station DORIS m/y = -0.0109
 pente Y de la station DORIS m/y = 0.0703
 pente Z de la station DORIS m/y = 0.0267

pente X de la station GNSS m/y = -0.0209
 pente Y de la station GNSS m/y = 0.0665
 pente Z de la station GNSS m/y = 0.0141

pente X de la station VLBI m/y = -0.0262
 pente Y de la station VLBI m/y = 0.0488
 pente Z de la station VLBI m/y = 0.0075

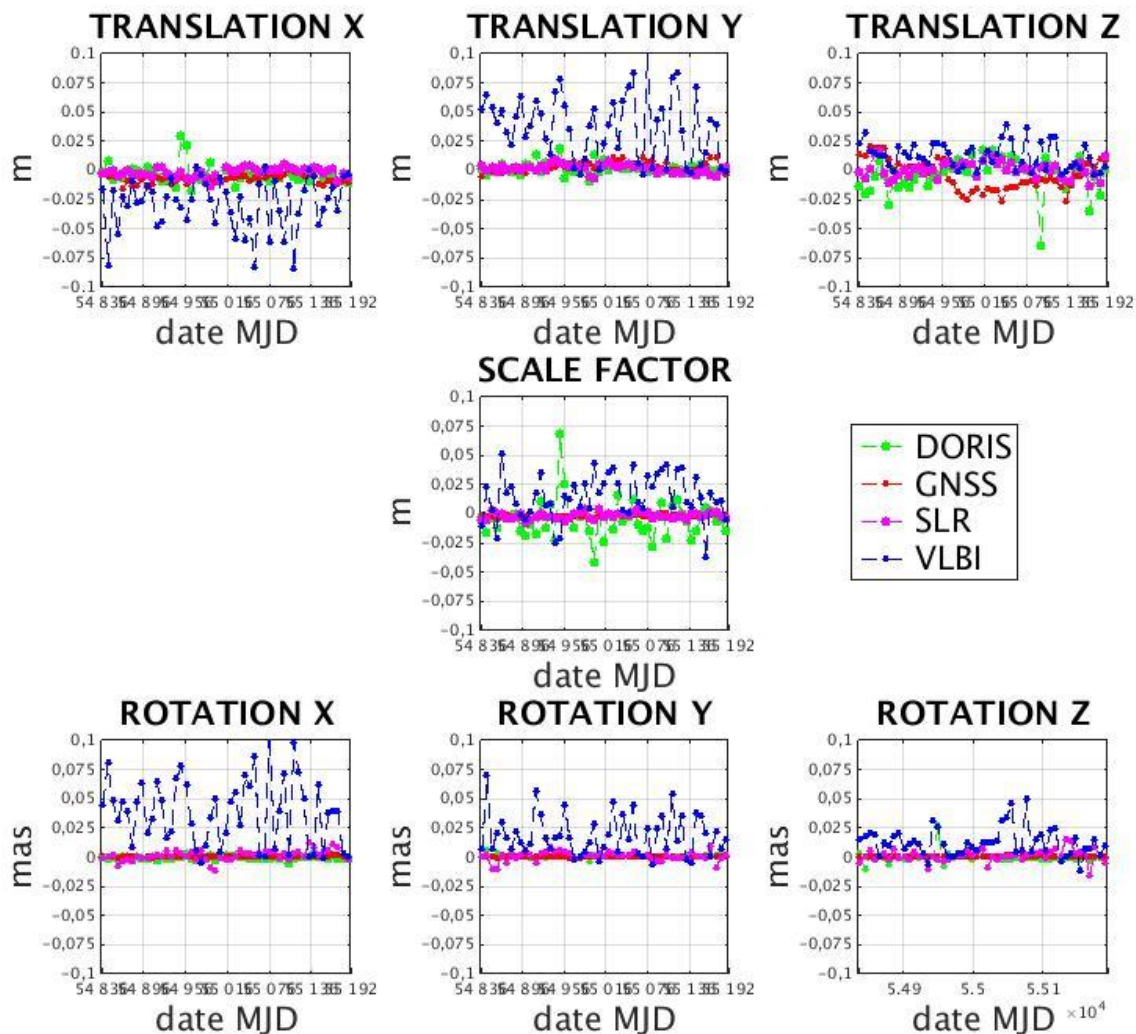
L'ajustement des biais troposphériques mutualisés MZB sur les sites Co localisés semble limiter la dispersion des appoints des techniques

Systématismes relevés sur les réseaux de stations



	DORIS Doppler		DORIS Laser		GNSS		SLR		VLBI	
	Mean	Rms	Mean	Rms	Mean	Rms	Mean	Rms	Mean	Rms
TX (mm)	-3,7	6,8	-1,8	4,4	-7,5	8,4	-1,2	3,8		
TY (mm)	0.2	4,8	1,8	4,2	2,7	5,4	2,4	4,2		
TZ (mm)	-4.5	14,5	-1.1	8,2	-4,5	13,2	0,01	7,3		
Scale (mm)	-4.8	16,9	0,8	4,5	-1,7	3,0	-0,7	3,6	0,05	21,3

7 paramètres de transformation des techniques DORIS GNSS SLR VLBI sur 2009



Remarques:

Ecarts des réseaux / ITRF2008

- Translation en Z du GNSS
- Transformations VLBI 10 fois plus dispersives que les techniques satellitaires
- Transformations SLR millimétrique

	TX mm	TY mm	TZ mm	Sc mm	RX μ as	RY μ as	RZ μ as
DORIS	$-3,7 \pm 8,6$	$1,8 \pm 5,1$	$-3,8 \pm 14,5$	$-4,7 \pm 16,6$	$-0,6 \pm 1,5$	$0,5 \pm 1,7$	$0,9 \pm 4,8$
GNSS	$-7,9 \pm 8,6$	$2,8 \pm 5,1$	$-4,5 \pm 13,6$	$-2,4 \pm 2,6$	$-0,04 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,4$	$0,2 \pm 0,4$
SLR	$-1,6 \pm 4,1$	$1,5 \pm 3,7$	$1,1 \pm 6,9$	$-1,7 \pm 3,2$	$1,1 \pm 4,7$	$0,3 \pm 3,9$	$0,7 \pm 5,2$
VLBI	-29 ± 36	37 ± 46	12 ± 16	$14,5 \pm 23,9$	$38 \pm 47,6$	$18,4 \pm 25,3$	$12 \pm 16,9$

Conclusion & Perspectives

Viabilité de la méthode

- Facteur de variance fluctuant d'une semaine à l'autre des EQN utilisées corrigé par la pondération
- Les tests sur 2009 ont montré une bonne cohérence des systèmes de référence d'espace
- L'ajustement des biais troposphériques mutualisés MZB sur les sites Co localisés semble limiter la dispersion des appoints des techniques (à finaliser)

Projet COL

- **Participation à l'ITRF2014**
- Générer les EQNs hebdomadaires combinées non contraintes sur la période 2002-2013 destinées à l'IGN Nos solutions stations seront comparées à l'ITRF2014 et le GRGS fournira également ses solutions

Traitements de combinaison des équations normales avec DYNAMO

- Finaliser les tests de la combinaison sur l'année 2009
- Détermination des EOP sur une cadence horaire
- Pondération: stagiaire ingénieur sur l'optimisation de la pondération des équations normales
- Analyse de l'estimation des paramètres de troposphère MZB (VLBI, GPS, DORIS) sur 12 années consécutives
- Analyse de la détermination des coefficients du champ de gravité de bas degré et du centre de masse

Communications

- **Conférence EGU2015, AGU2015, Réunion COL 1^{er} trimestre 2016**
- **Article** sur la méthode de combinaison multi techniques au niveau des équations normales