

Caractérisation des signaux et des bruits des séries temporelles du Géocentre et des paramètres de rotation de la Terre (EOP)

B. Gourine

Centre des Techniques Spatiales, Division de Géodésie Spatiale
BP 13, 31200, Arzew – Algérie. Tél. +213 41 472217, Fax. +213 41 473665
Email : bgourine@cts.asal.dz; bachirgourine@yahoo.com

ملخص : لفهم نظام الوسائط التي تحكم نظام الأرض، مثل وسائط دوران الأرض EOP و حركة مركز الأرض، من الضروري القيام بقياسها و تحليلها. إن تقنيات الجيوديزيا الفضائية (SLR, VLBI, DORIS, GPS) توفر بدقة سلاسل زمنية من الملاحظات لهذه الظواهر. الهدف من هذه الدراسة هو وصف الإشارات والضجيج في السلاسل الزمنية لحركات دوران الأرض وكذا مركزها، التي تم الحصول عليها من التقنيات المكانية المختلفة. تقوم هذه المنهجية بتقدير الإشارات الدورية عن طريق تحليل التردد وتقييم مستوى ونوع الضوضاء باستعمال تباين ألان. البيانات المستعملة تخص 13 سنة (1993-2006) من السلاسل اليومية لـ EOP (الحركة القطبية، وطول اليوم LOD) و الأسبوعية لبقية الإحداثيات لمركز الأرض المرتبطة بالسلاسل ITRF 2000.

أظهرت النتائج أن سعة الإشارات الدورية تقدر ببضعة ملمترات حسب التقنية المستعملة. إن حركة مركز الأرض، المتحصل عليها بتقنية SLR تعتبر أكثر دقة من غيرها من التقنيات وأنها قريبة من النماذج الجيوديناميكية. كما أن التغيرات في EOP المتحصل عليها بـ VLBI و GPS تقدر بمستوى ملليمترى. فقد أظهر تحليل ضجيج التغيرات وحركة مركز الأرض و EOP هيمنة الضوضاء البيضاء في حلول SLR و DORIS. ومع ذلك تتميز حلول VLBI و GPS بضوضاء وميض بمستوى ملليمترى.

الكلمات الأساسية : وسائط دوران الأرض EOP، مركز الأرض، الإشارة، الضوضاء، تحليل التردد، تباين ألان.

Résumé : Pour comprendre le comportement des paramètres qui contrôlent le système Terre, tels que les paramètres de rotation de la Terre (EOP) et le mouvement Géocentre, il est nécessaire de les mesurer et de les analyser. Les techniques de géodésie spatiale (SLR, VLBI, DORIS et GPS) fournissent avec précision les séries temporelles des observations de ces phénomènes. L'objectif de ce travail est de caractériser les signaux et les bruits des séries temporelles des EOP et du Géocentre obtenues à partir de différentes techniques spatiales. La méthodologie adoptée est basée sur l'estimation des signaux périodiques par l'analyse fréquentielle et l'évaluation du niveau et du type de bruits par la variance d'Allan. Les données utilisées concernent 13 ans (1993-2006) de séries journalières des EOP (mouvement du pôle et longueur du jour ; LOD)

et de séries hebdomadaires des coordonnées résiduelles du Géocentre, référées par rapport à l'ITRF2000.

Les résultats révèlent que les amplitudes estimées des signaux périodiques sont de l'ordre de quelques mm par technique. Le mouvement du Géocentre obtenu par la technique SLR est plus précis que les autres techniques et il est proche des modèles géodynamiques. Les variations des EOP sont bien estimées par les techniques VLBI et GPS au niveau millimétrique. L'analyse du bruit des variations du Géocentre et des EOP, montre la dominance d'un bruit blanc dans les solutions SLR et DORIS. Cependant, les solutions VLBI et GPS sont caractérisées par un bruit de scintillation avec un niveau millimétrique.

Mots clés : EOP, Géocentre, Signal, Bruit, Analyse fréquentielle, Variance d'Allan.

Abstract : To understand the behaviour of the parameters which control the Earth system, such as rotation parameters (EOP) and Geocentre motion, it is necessary to measure and analyse them. The space geodesy techniques (SLR, VLBI, DORIS and GPS) provide with accuracy the time series of observations of these phenomena. The objective of the present work is to characterize the signals and noises of EOP and Geocentre time series obtained from different space techniques. The adopted methodology is based on the estimation of periodic signals by frequency analysis and evaluation of level and type of noises by Allan variance. The used data concern 13 years (from 1993 to 2006) of daily series of EOP (pole motion and Length of Day - LOD) and weekly series of Geocentre residuals coordinates, according to ITRF2000.

The results reveal that the estimated periodic signals amplitudes are about few mm per technique. The Geocentre motion obtained by SLR technique is more precise than other techniques and it is close to the geodynamic models. The EOP variations are well estimated by VLBI and GPS techniques at mm level. The noise analysis of the Geocentre and the EOP variations shows a dominant white noise in the SLR and DORIS solutions. However, the VLBI and GPS solutions are characterized by a flicker noise at mm level.

Key words : EOP, Geocentre, Signal, Noise, Frequency Analysis, Allan Variance.

1. Introduction

La géodésie fournit, pour diverses applications en sciences de la Terre, un Repère de Référence Terrestre (RRT) dans lequel sont exprimés des paramètres qui gouvernent le système Terre : Rotation de la Terre et son champ de gravité, mouvement des plaques tectoniques, mouvement du Géocentre, etc. Ce repère est réalisé par les techniques de positionnement de géodésie spatiale (VLBI, SLR, GPS et DORIS). L'analyse fine des résultats obtenus des traitements des données de ces techniques permet d'évaluer la qualité des produits calculés et d'appréhender les phénomènes géophysiques qui y sont attachés. Ainsi, les mouvements des réseaux de stations sont, en principe, influencés par l'état des paramètres globaux et leur évolution temporelle qui contribuent dans la définition de l'origine, l'orientation et l'échelle du repère de référence sous-jacent. Ces paramètres concernent au premier lieu le repère de référence lui-même, en particulier le Géocentre, et les paramètres de rotation de la Terre (*Earth Orientation Parameters, EOP*).

Les mouvements du centre des masses de la Terre ou Géocentre sont attribués aux variations temporelles de la distribution des masses dans les couches liquides de la Terre : atmosphère, océans et les eaux continentales. Le Géocentre est influencé aussi par les couches internes de la terre à différentes échelles du temps [Bouillé, 2000]. L'observation et la modélisation de ces variations permettent d'accéder à la description géométrique du mouvement du Géocentre. En d'autres termes, le mouvement du Géocentre par rapport à un référentiel terrestre peut être décrit par les séries temporelles des coordonnées de l'origine du repère, ou les paramètres de translation, issues des solutions individuelles dérivées des techniques de géodésie spatiale SLR, DORIS et GPS.

La rotation de la terre est décrite en partie par les EOP. Ces derniers permettent l'accès au système de référence céleste (ICRF) qui est réalisé par la technique VLBI, ainsi ils contribuent à la transformation entre les systèmes internationaux de référence ITRF et ICRF. Ils consistent aux coordonnées du pôle (x_p , y_p), mouvement du pôle, *UT1* et la longueur du jour (*LOD*).

Le Géocentre et les EOP ont fait l'objet de plusieurs études et ils sont d'actualité aujourd'hui. A titre d'exemple, [Créaux et al., 2002] ont comparé les mouvements saisonniers et interannuels du Géocentre observés à partir des techniques SLR et DORIS avec ceux issues des données des charges de surface. [Feissel et al., 2007] ont fait une investigation sur la concordance, dans les parties saisonnières et non saisonnières du spectre des données géodésiques entre DORIS et SLR, et la comparaison de ces données avec celles fournies par l'analyse des mouvements globaux des fluides géophysiques. Concernant les paramètres de rotation de la Terre (EOP), [Gambis, 2004] a présenté

l'analyse de consistance à long terme du système EOP avec les deux repères de référence terrestre et céleste.

L'objectif de ce travail est consacré à l'analyse des séries temporelles du mouvement du Géocentre et des variations des EOP en se basant sur (i) l'analyse fréquentielle des séries temporelles de ces produits géodésiques par le logiciel *Famous* [Mignard, 2005], afin d'en extraire les signaux périodiques qui sont liés à des phénomènes géophysiques et (ii) l'étude du bruit affectant ces séries, par la méthode de la variance d'Allan afin d'évaluer leur stabilité (type et niveau du bruit), ce qui permettra de comprendre le comportement de ces mouvements et de faciliter leur interprétation.

La méthodologie d'analyse ainsi que les données utilisées sont décrites dans la section (2). Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les sections (3, 4 et 5), concernant, les variations du Géocentre, le mouvement du pôle et l'analyse de bruit, respectivement.

2. Méthodologie d'analyse

La figure (1) illustre la méthodologie adoptée qui se base sur l'extraction et l'analyse des signaux périodiques des séries temporelles ainsi que l'étude du bruit qui les affectent. Dans ce contexte, un programme dénommé *ANASCO* (Analyse Statistique et Spectrale des Séries temporelles des Sites en co-localisation) [Gourine, 2011], a été écrit sous le langage de programmation (IDL v.6) ; il permet de réaliser les tâches suivantes :

- Analyse statistique ;
- Analyse fréquentielle ;
- Analyse de bruit ;
- Représentations graphiques des résultats ;
- Interaction avec le logiciel *FAMOUS*.

Le logiciel *FAMOUS* (*Frequency Analysis Mapping On Unusual Sampling*) a été développé par M. F. Mignard (Laboratoire de CASSIOPEE /Observatoire de la Côte d'Azur) pour le projet GAIA [Mignard, 2005]. Ce programme effectue une analyse fréquentielle d'un signal temporel à échantillonnage non régulier. Pour plus de détails sur l'algorithme de ce logiciel, voir [Gourine, 2011 & 2012].

Pour l'étude de bruit des séries temporelles, nous avons utilisé la variance d'Allan. Cette dernière a été développée et largement utilisée comme estimateur de la stabilité des échelles de temps atomique [Allan, 1966 ; 1987], [Rutman, 1978], domaine dans lequel elle est aujourd'hui une statistique fondamentale. Elle a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs dans les différents domaines des sciences de la terre et de l'univers. Deux paramètres caractérisent le bruit : le type et le niveau de bruit [Gourine, 2012].

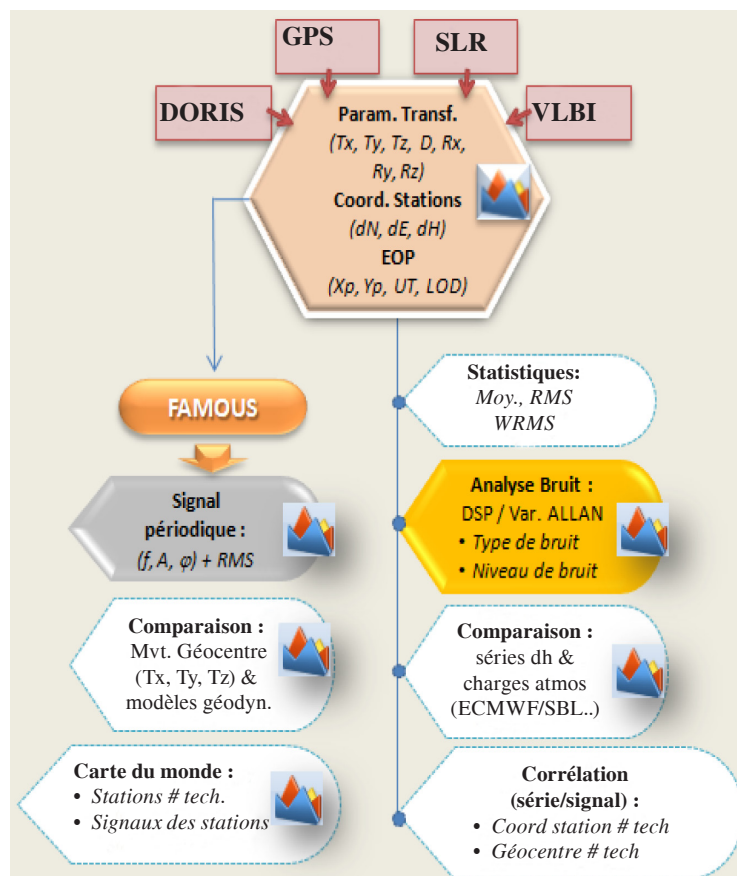


Fig. 1 Organigramme du programme ANASCO.

Les données traitées à travers cette étude concernent :

- Les séries journalières des EOP référencées par rapport à l'EOPC04, des techniques (VLBI, GPS, SLR et DORIS) ;
- Les séries hebdomadaires des paramètres de transformation d'Helmert entre les repères de référence de chaque technique (GPS, SLR et DORIS) et l'ITRF2000.
- La durée des données s'étale sur 13 ans (de 1993 jusqu'au 2006), sauf pour celle des données GPS qui débute en 1996.

3. Variations du Géocentre

La figure (2) représente les séries hebdomadaires des paramètres de translations pour les trois techniques satellitaires (GPS, SLR et DORIS). Ces solutions sont estimées par rapport à la solution de référence ITRF2000.

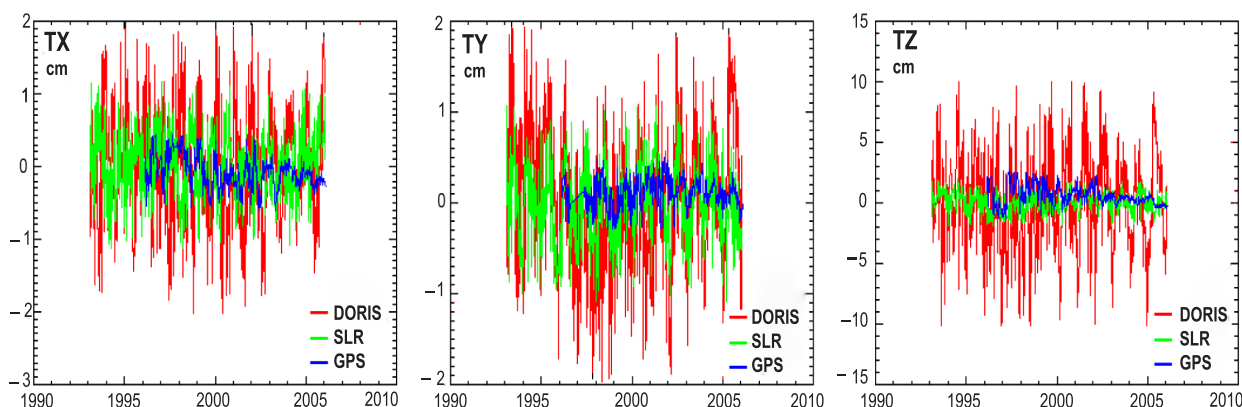


Fig. 2 Séries temporelles du mouvement du Géocentre (TX, TY, TZ) suivant les techniques GPS, SLR et DORIS.

Les résultats de l'analyse statistique effectuée par le programme ANASCO, sur ces séries, sont résumés dans le tableau (1). D'après ce tableau, les translations (mouvement du Géocentre) sont bien estimées par la technique laser (en moyenne de 0.5 mm, d'une précision de l'ordre de 4-8 mm) et par GPS (en moyenne de 6.4 mm, d'une précision de l'ordre de 2-8 mm). Concernant la technique DORIS, la détermination de ces paramètres (en moyenne de 0.2 mm) est moins précise (de l'ordre de 8-42 mm).

En effet, les valeurs des estimations sont élevées surtout pour la composante TZ. Bien que la technique SLR soit dédiée à la détermination « exacte » du Géocentre, la technique GPS permet une estimation plus précise de celui-ci, grâce au nombre et à la distribution géographique des stations du réseau IGS.

Tab 1. Moyenne et écart-type pondéré sur les paramètres de translations.

Technique	TX (cm)		TY (cm)		TZ (cm)	
SLR	0.01	± 0.46	-0.01	± 0.44	0.05	± 0.79
GPS	--0.09	± 0.21	-0.11	± 0.16	0.62	± 0.78
DORIS	0.00	± 0.82	0.02	± 0.80	0.01	± 4.15

• Caractérisation des signaux périodiques des variations du Géocentre

Les variations du Géocentre sont dues, principalement, à la redistribution des masses dans l'atmosphère, les océans et les réservoirs hydrologiques, en plus des séismes et de la tectonique des plaques. Elles présentent deux composantes périodiques principales : termes annuels et semi-annuels.

Le tableau (2) donne les valeurs des amplitudes et phases et leurs écarts types pour les termes annuels et semi-annuels pour

les solutions relatives aux techniques DORIS, SLR et GPS, et pour deux modèles géodynamiques : Le modèle [Dong et al., 1997] et le modèle [Chen et al., 1999]. L'amplitude A et la phase φ sont définies par la forme $A \cdot \cos(\omega(t-t_0) + \varphi)$, t_0 étant le 1^{er} janvier de l'année indiquée dans le tableau. Quelques signaux n'ont pas été détectés par *FAMOUS*, ils sont mentionnés par des tirets dans le tableau.

Tab 2. Comparaison des estimations basées sur les solutions des techniques satellitaires (DORIS, SLR et GPS) de mouvements du Géocentre avec celle de deux modèles géodynamiques. Les amplitudes sont exprimées en mm et les phases en degrés.

	DORIS		SLR		GPS		Dong et al. 1997		Chen et al. 1999	
Paramètre & période	A σA	φ $\sigma \varphi$	A σA	φ $\sigma \varphi$	A σA	φ $\sigma \varphi$	A	φ	A	φ
TX 1an	6.4 ±0.4	354 ±6.6	2.7 ±0.4	154 ±9.4	1.5 ±0.2	122 ±10.6	4.2	224	2.4	244
TX ½ an	2.5 ±0.4	80 ±16.4	-	-	1.1 ±0.2	340 ±15.4	0.8	210	0.7	1
TY 1an	5.3 ±0.5	247 ±7.9	3.4 ±0.4	217 ±6.3	0.8 ±0.3	21 ±34.7	3.2	339	2.0	270
TY ½ an	1.6 ±0.6	60 ±24.2	0.8 ±0.2	1 ±30	-	-	0.4	206	0.9	41
TZ 1an	28.7 ±2.1	168 ±7.3	4.6 ±0.7	132 ±8.9	3.7 ±0.7	195 ±18.5	3.5	235	4.1	228
TZ ½ an	-	-	1.7 ±0.6	203 ±26.2	-	-	1.1	133	0.5	58
Année de référence	1993		1993		1996		1990		1990	

Les résultats du tableau (2) montrent des accords de l'ordre de quelques mm, entre les différentes amplitudes calculées. On a pu détecter le terme annuel dans les composantes du Géocentre et suivant les trois techniques. Les amplitudes concernant la composante TZ semblent élevées, surtout dans le cas du DORIS (d'après une étude de [Gobinddass et al., 2009], ce biais est dû aux erreurs de modélisation de la pression de la radiation solaire sur les satellites TOPEX/Poseidon et SPOT), même si [Chen et al., 1999] donne une amplitude annuelle proche de celle de la technique SLR à 0.5 mm. On remarque aussi que les amplitudes concernant la technique SLR présentent des accords de l'ordre du mm (et voire mieux que le mm), avec ceux des modèles géodynamiques. Ceci est dû au fait que ces modèles sont basés sur des données laser des satellites LAGEOS. Cependant, le terme semi-annuel n'est pas détecté dans les composantes TX suivant SLR, TY suivant GPS et TZ suivant DORIS et GPS.

Concernant les phases, les accords sont moins probants. D'une part, les résultats des modèles géodynamiques, auxquels on compare nos solutions, ont été effectués sur 5 ans de données seulement par rapport à 13 ans, dans notre cas.

D'autre part, ces modèles géodynamiques n'ont pas de véritable caractère prédictif. En outre, dans le cadre de comparaison des signaux saisonniers de ces séries temporelles, on a utilisé la corrélation (en calculant le facteur de corrélation). Généralement, le facteur de corrélation entre deux variables exprime leur dépendance linéaire. Il est égal à 1 dans le cas où l'une des variables est fonction affine croissante de l'autre variable, à -1 dans le cas où la fonction affine est décroissante. Les valeurs intermédiaires renseignent sur le degré de dépendance linéaire entre les deux variables. Plus le coefficient est proche des valeurs extrêmes -1 et +1, plus la corrélation entre les variables est forte ; on emploie simplement l'expression « fortement corrélées » pour qualifier les deux variables. Une corrélation égale à 0 signifie que les variables sont linéairement indépendantes.

Le tableau (3) donne les résultats d'un tel calcul de corrélation entre les signaux des translations issues des techniques (GPS, DORIS et SLR) avec ceux des deux modèles géodynamiques [Dong et al., 1997] et [Chen et al., 1999]. On a pris en considération l'année de référence dans le calcul du coefficient de corrélation.

Tab 3. Facteurs de corrélation entre les signaux annuels du Géocentre suivant les techniques (DORIS, SLR et GPS) et ceux des deux modèles géodynamiques [Dong et al., 1997] et [Chen et al., 1999].

Paramètre	ρ DORIS		ρ SLR		ρ GPS	
	Dong et al. 1997	Chen et al. 1999	Dong et al. 1997	Chen et al. 1999	Dong et al. 1997	Chen et al. 1999
TX	-68 %	-39 %	39 %	5 %	-11 %	-44 %
TY	-2 %	94 %	-48 %	64 %	67 %	-45 %
TZ	44 %	54 %	-18 %	-6 %	83 %	89 %

On remarque qu'en termes de phase annuelle, la corrélation entre les modèles géodynamiques et GPS est nettement meilleure qu'avec celles des techniques (DORIS, SLR). Enfin, on peut constater que la comparaison menée entre les signaux saisonniers issus des techniques satellitaires et ceux des deux modèles géodynamiques a révélée une forte concordance en terme d'amplitude pour la technique SLR, et en terme de phase pour la technique GPS.

4. Mouvement du pôle

À titre d'exemple, la figure (3) montre le mouvement du pôle en 3D et du LOD, durant la période d'observations par la technique VLBI. Ce mouvement « spiral » évolue sur une surface ne dépassant pas 20 m x 20 m, sur Terre. Le mouvement du pôle exprime la non-régularité de la rotation de la Terre. En effet, la position de l'axe de rotation terrestre n'est pas constante.

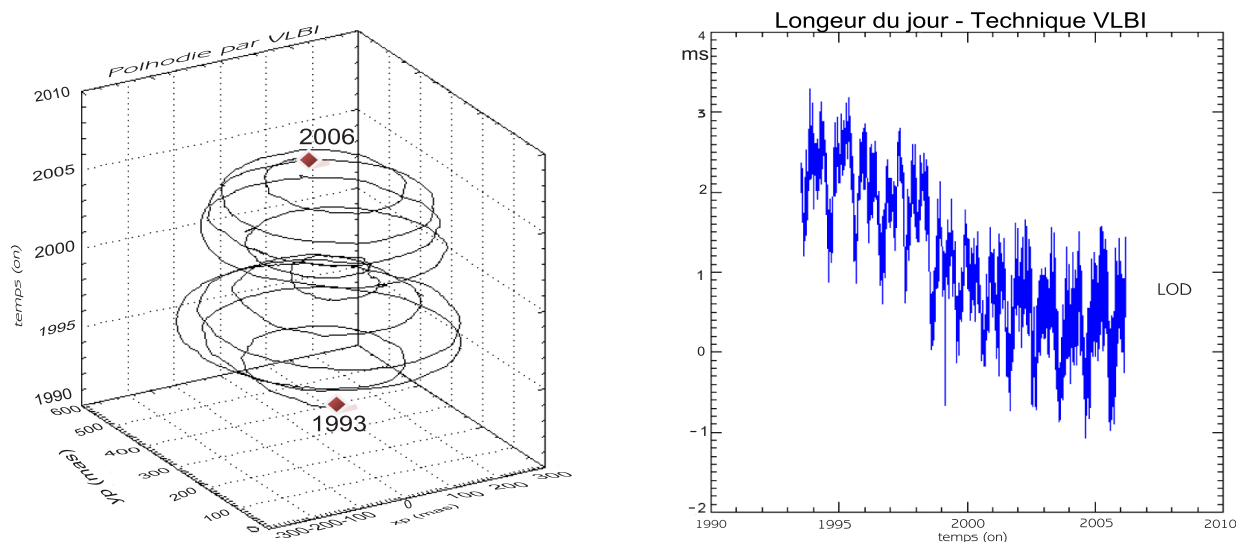


Fig. 3 Polhodie en 3D et LOD fournis par la technique VLBI.

• Caractérisation des signaux périodiques du Mouvement du pôle :

Le tableau (4) illustre les principaux signaux périodiques du mouvement du pôle.

Tab 4. Amplitudes des signaux périodiques du mouvement du pôle (X_p , Y_p et LOD). *: période correspondante à 1.37 ans proche de celle de Chandler (433 jours). Entre parenthèses les termes semi-annuels. Les unités as et ms correspondent à la seconde d'arc et au milliseconde, respectivement.

Paramètre	Période	VLBI	GPS	SLR	DORIS
Xp (as)	Chandler	–	0.152	–	0.047*
	Saisonnière	0.099	0.095	0.090	0.822
	Courtes périodes	–	–	–	–
Yp (as)	Chandler	0.052*	0.143	0.049*	0.048*
	Saisonnière	0.103	0.080	0.087	0.095
	Courtes périodes	–	0.001	–	–
LOD (ms)	Interannuel	0.095	0.11	0.13 – 0.34	
	Saisonnière	0.37 (0.32)	0.38 (0.29)	0.44 (0.29)	
	Courtes périodes	0.35	0.06 – 0.41	0.10 – 0.35	

Les caractéristiques de ces signaux périodiques sont :

- Une oscillation propre, appelée terme de Chandler dont la période est de 1.2 ans (ou 433 jours). Ce mouvement est causé par le fait que la Terre tourne et que l'axe de plus grande inertie ne coïncide pas exactement avec l'axe instantané de rotation propre. Si la Terre était parfaitement indéformable (i.e., rigide), on observerait une précession de l'axe de rotation par rapport à l'axe de figure avec une période de 305 jours, appelée « période d'Euler ». L'allongement de la période de Chandler par rapport à la période d'Euler est dû au fait que la Terre est en réalité déformable. Il s'agit d'un mouvement du pôle quasi-circulaire d'une amplitude comprise entre

0,1 as et 0,2 as. Seule la série temporelle de GPS fournie une amplitude de cet ordre en coordonnées polaires. Tandis que pour les autres techniques, on a pu détecter des signaux de période 1.37 ans (proche de celle de Chandler) mais avec une petite magnitude de l'ordre de 0.05 as.

- Des oscillations annuelle et semi-annuelle qui sont attribuées aux variations saisonnières de pression atmosphérique et océanique, possédant en général une amplitude comprise entre 0.050 as et 0.100 as. Dans ce cas, ces termes sont bien caractérisés dans les séries temporelles du mouvement du pôle pour les techniques VLBI, GPS et SLR (0.080 as – 0.103 as) ;

- Des termes à courtes périodes (allant de deux semaines à quelques mois) dont la principale source d'excitation est l'atmosphère [Frède, 1999]. Selon le traitement effectué, ces termes n'ont pas été détectés ;

- Une composante séculaire (ce terme n'est pas détecté dans nos séries parce qu'il faut disposer des variations à très long terme : plusieurs siècles) qui est due à l'effet du rebond postglaciaire.

La longueur du jour *LOD* correspond à la dérivée temporelle de l'angle de rotation de la Terre. Ce paramètre est accessible par les techniques de géodésie spatiale, sauf pour DORIS où il est mal déterminé.

Les variations du LOD dont la cause est la friction des vents et les courants océaniques à la surface de la Terre solide, sont décomposées en trois termes :

- Variations interannuelles : les amplitudes correspondantes au GPS et VLBI sont proches de l'ordre de 0.1 ms. Pour le SLR, on atteint une amplitude de 0.34 ms qui est en concordance avec la valeur standard (0.5 ms) [Frède, 1999] ;

- Variations saisonnières : sont de l'ordre de 0.37 ms, 0.38 ms et 0.44 ms, pour VLBI, GPS et SLR, respectivement, en terme annuel. Cependant, en termes semi-annuel, les trois techniques ont à peu près la même amplitude de 0.3 ms. On constate que ces résultats sont en cohérence avec les valeurs publiées dans le domaine.

- Variations à courtes périodes (<100 jours) : les amplitudes sont de l'ordre de 0.35 ms pour VLBI et SLR, et de 0.44 ms pour GPS.

La figure (4) montre les séries temporelles journalières de la partie résiduelle du mouvement du pôle et du LOD suivant les différentes techniques.

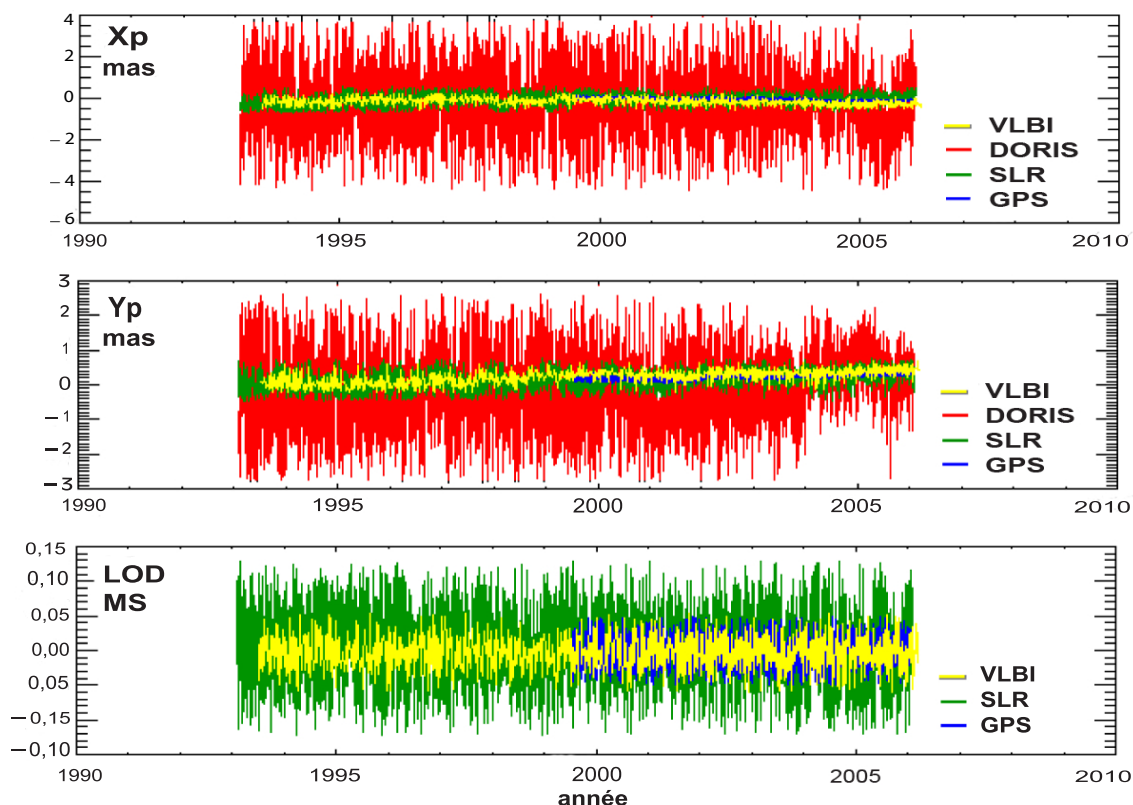


Fig. 4 Séries temporelles du mouvement résiduel du pôle suivant les techniques VLBI, GPS, SLR et DORIS.

Le tableau (5) donne les statistiques des séries temporelles d'appoints quotidiens sur les paramètres de rotation de la Terre (EOP) ramenés dans le repère de référence de la série EOPC04 pour les techniques VLBI, SLR, GPS et DORIS.

Ces EOP sont transformés des repères individuels dans le repère de référence, sur la base des paramètres de rotation déterminés par les positions de stations.

Tab 5. Moyenne et écart-type sur les paramètres du mouvement résiduel du pôle (*resXp*, *resYp*, *resLOD*). Une valeur de 1 mas représente 3 cm et 0.1 ms est équivalent à 5 cm, sur la surface de la Terre.

Technique	resXp (mas)	resYp (mas)	resLOD (MS)
VLBI	0,08 ±0,03	0,07 ±0,02	0,00 ±0,02
SLR	0,21 ±0,07	0,20 ±0,06	0,00 ±0,05
GPS	0,02 ±0,01	0,03 ±0,01	0,00 ±0,02
DORIS	1,40 ±0,24	0,96 ±0,20	

Les résultats du tableau 5 montrent, que les techniques VLBI et GPS sont les plus précises en estimation des appoints des coordonnées du pôle (à ± 1 mm) et du LOD (à ± 1 cm) comparés à ceux de la technique SLR (± 2 mm en position du pôle et ± 2.5 cm en LOD) et de la technique DORIS (± 7 mm en position du pôle). Les valeurs moyennes

et extrêmes du pôle correspondantes à la technique DORIS traduisent la difficulté de cette technique à fournir les EOP.

Le tableau (6) représente les principales composantes des signaux périodiques dans les séries d'appoints quotidiens des EOP suivant les différentes techniques. Les résultats sont obtenus par le logiciel FAMOUS.

Tab 6. Signaux périodiques du mouvement résiduel du pôle (*resXp*, *resYp* et *resLOD*). *: période correspondante à 1.37 ans proche de celle de Chandler (433 jours). Les valeurs entre parenthèses correspondent aux termes semi-annuels.

Paramètre	Période	VLBI	GPS	SLR	DORIS
resXp (μas)	Chandler	—	—	—	198.1
	Saisonnière	—	13.3 (13.6)	13.3 (13.6)	(192.8)
	Courtes périodes	19.4 – 42.6	—	—	—
resYp (μas)	Chandler	—	—	16.6	—
	Saisonnière	—	15.2	61.2	143.2
	Courtes périodes	20.7 – 30.9	—	22.7 – 28.2	105,8– 112.0
resLOD (μs)	Interannuel	—	—	—	—
	Saisonnière	—	—	6.4	—
	Courtes périodes	3.2 – 3.7	2.3 – 6.9	7.1 – 17.3	—

D'après le tableau (6), les résultats relatifs aux différentes techniques sont très petits car les amplitudes maximales des différents signaux des variations résiduelles du mouvement du pôle n'excèdent pas 48 μas (i.e., 1.4 mm). Cependant, pour la technique DORIS, l'amplitude maximale en coordonnées résiduelles du pôle est de l'ordre 6 mm. En ce qui concerne la longueur du jour (*LOD*), les variations résiduelles sont de l'ordre de 2 mm, 1–4 mm et 3–9 mm, pour VLBI, GPS et SLR, respectivement.

Ces valeurs restent très faibles vis-à-vis des amplitudes des différents termes (cf. §1.3.4 de la thèse de [Frède, 1999]) car elles décrivent les signaux résiduels des phénomènes en question.

5. Analyse de bruit

Dans cette partie d'analyse, on s'intéresse aux bruits qui affectent les séries temporelles des paramètres d'intérêt. Dans ce contexte, la méthode de la variance

d'Allan a été utilisée pour qualifier le type et quantifier le niveau de bruit dans ces séries temporelles. Il est à rappeler que les séries ont été corrigées de la tendance linéaire et des signaux saisonniers, principalement, des signaux annuels, semi-annuels et interannuels pour les paramètres du Géocentre, en plus des signaux de Chandler et à courtes périodes pour les paramètres des EOP.

Les figures (5 et 6) illustrent les évaluations des stabilités du Géocentre et du mouvement du pôle, suivant les techniques spatiales. Les résultats du GPS montrent l'existence d'un bruit de scintillation dans les deux déterminations (composantes du Géocentre et mouvement du pôle). Cependant, les résultats relatifs aux techniques SLR, DORIS exhibent un bruit blanc dominant. Au niveau de la stabilité, les résultats du GPS sont les plus précises en Géocentre (d'ordre de 0.1 mm à <2 mm), et avec ceux du VLBI en mouvement du pôle (d'ordre de 0.05 mas, soit 2 mm).

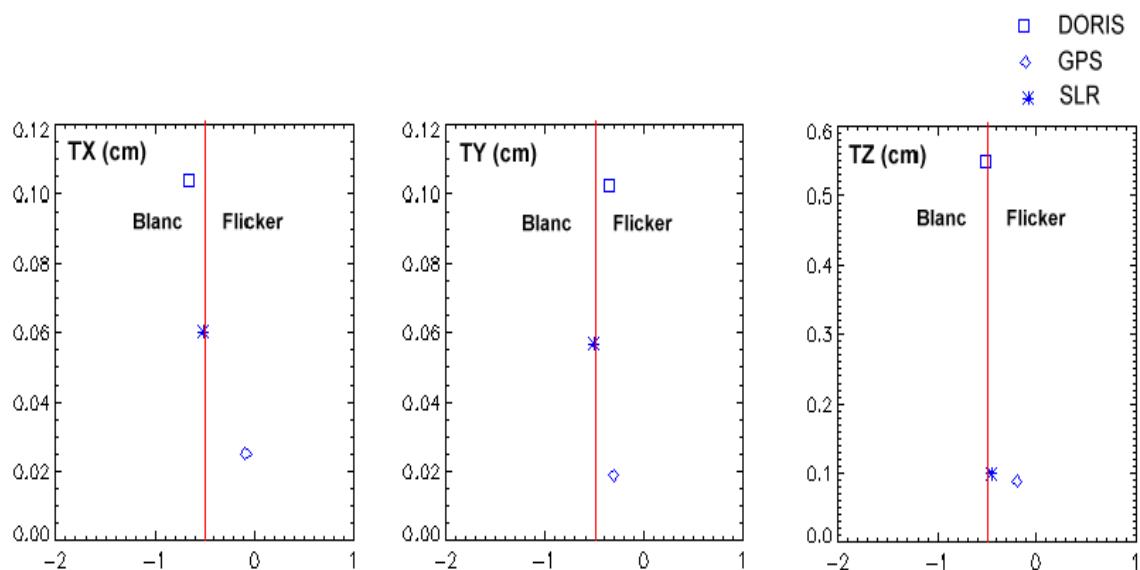


Fig. 5 Distribution du type de bruit (abscisse) et niveau de bruit (ordonnée) pour le Géocentre suivant les techniques GPS, SLR et DORIS.

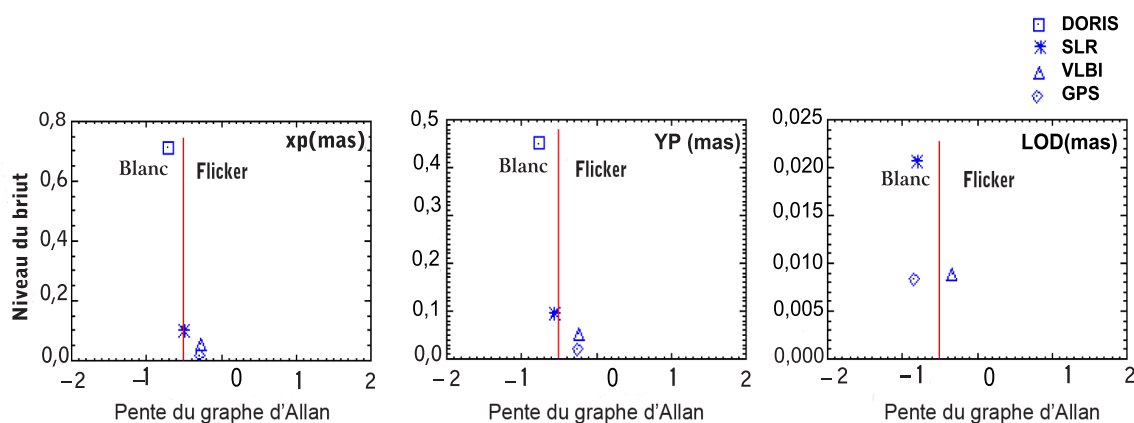


Fig. 6 Distribution du type de bruit (abscisse) et niveau de bruit (ordonnée) pour le mouvement du pôle suivant les techniques GPS, SLR, DORIS et VLBI.

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les résultats d'analyse des séries temporelles des paramètres d'intérêts (les EOP et le Géocentre) issues des techniques de géodésie spatiale, par la caractérisation des signaux et bruits de ces séries temporelles. La méthodologie adoptée est scindée en deux parties : analyse fréquentielle et étude de bruit.

Concernant, le mouvement du Géocentre, nos résultats montrent que les solutions des techniques GPS et SLR sont précises de l'ordre de 2-8 mm. Par contre, la technique SLR est moins performante dans l'estimation des rotations, car elle n'est pas sensible à l'orientation du repère de référence terrestre. En revanche, la technique GPS a permis une estimation millimétrique de ces paramètres. Les paramètres de rotation de la Terre

(EOP) sont bien estimés par les techniques VLBI et GPS, avec une précision de l'ordre de ± 1 mm et ± 10 mm, pour les appoints des coordonnées du pôle et du LOD, respectivement. Alors que pour la technique SLR, la précision est presque deux fois plus élevée. La précision des appoints de la position du pôle terrestre par la technique DORIS est la plus élevée de l'ordre de ± 7 mm.

L'utilisation de l'analyse fréquentielle par FAMOUS nous a permis d'estimer les termes annuels et semi-annuels des variations du Géocentre, suivant les techniques SLR, GPS et DORIS. Les résultats de la solution SLR sont les plus en accord avec ceux des modèles géodynamiques de [Chen et al., 1999] et de [Dong et al., 1997], ce qui montre l'efficacité de cette technique dans la détermination du Géocentre.

Les composantes principales des variations du mouvement du pôle évaluées sont le terme de Chandler et les oscillations saisonnières. En ce qui concerne la longueur du jour *LOD*, ce paramètre comporte des variations interannuelles et saisonnières. Les amplitudes estimées des paramètres des EOP, suivant les techniques spatiales, sont en cohérence avec les valeurs publiées dans le domaine [Gambis, 2004].

Concernant l'analyse du bruit, les résultats obtenus ont montré qu'un bruit de scintillation a été détecté dans le cas des techniques GPS et VLBI. Par contre, ceux des techniques SLR, DORIS exhibent un bruit blanc dominant. En termes de stabilité, les résultats du GPS sont les plus précis en mouvement du Géocentre avec ceux du VLBI en mouvement du pôle, d'ordre millimétrique.

Enfin, ce diagnostic reste tributaire de la qualité des solutions fournies par les différentes techniques qui ne cesse d'être améliorée au fil des dernières années. L'utilisation de données récentes sera d'un grand intérêt pour mieux appréhender les mouvements du Géocentre et les variations des EOP.

Remerciements

L'auteur remercie vivement Pr. Exertier et son équipe de recherche (GMC/GEMINI/OCA, France) pour leur aide concernant la mise à disposition de données de séries temporelles et du programme FAMOUS.

Références bibliographiques

- Allan, D.W., 1966 : *Statistics of Atomic Frequency Standard* Proceedings of the IEEE, 54, N°2, 221-231, 1966.
- Allan, D.W., 1987 : *Time and frequency characterisation, Estimation, and prediction of precision clocks and oscillators*. IEEE Trans UFFC, vol. 34, n.6, 1987.
- Bouillé, F., 2000 : *Etude des systèmes actuels et futurs de Positionnement spatial DORIS: Détermination des mouvements du centre de masse de la Terre et interprétations géophysiques*. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000, France.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Eanes, R. J. & Nerem, R. S, 1999: *Geophysical interpretation of observed Geocenter variations*. Journal of Geophysical Research, 104(B2): 2683-2690, 1999.
- Collilieux, X., 2008 : *Analyse des séries temporelles de positions Des stations de géodésie spatiale: Application au Repère International de Référence Terrestre (ITRF)*. Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, 2008, France.
- Coulot D., 2005 : *Télémétrie Laser sur Satellites et Combinaison de Techniques Géodésiques: Contributions aux systèmes de référence terrestres et applications*. Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, 200, France.
- Crétaux, J., Soudarin, L., Davidson, F.J.M., Gennero, M., Bergé Nguyen, M. and Cazenave, A., 2002: *Seasonal and interannual geocenter motion from SLR and DORIS measurements: Comparison with surface loading data*. Journal of Geophysical Research 107: doi : 10.1029/2002JB001820. ISSN : 0148-0227, 2002.
- Dong, D., Dickey, J. O., Chao, Y & Cheng, K., 1997 : *Geocenter Variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water*. Geophysical Research Letters, 24(15) : 1867-1870, 1997.
- Feissel-Vernier, M., De Viron, O., Lebaill, K., 2007 : *Stability of VLBI, SLR, DORIS, and GPS positioning*. Earth Planets Space, 59, 475-497, 2007.
- Frède, V., 1999 : *Apport de l'analyse non linéaire à l'étude Géophysique de la rotation de la Terre*. Thèse de doctorat, Observatoire de Paris, 1999, France.
- Gambis, D., 2004 : *Monitoring earth orientation using space geodetic techniques : state-of-the-art and prospective*. Journal of Geodesy, 78: 295-305, 2004.
- Gobinddass M. L., P. Willis, O. De Viron, A. Sibthorpe, J.C. Ries, N.P. Zelensky, Y.E. Bar-Sever, M. Diament, R. Ferland, 2009 : *Systematic biases in DORIS-derived Geocenter time series related to solar pressure mis-modeling*. Journal of Geodesy, vol. 83, number 9, page 849--858, doi:10.1007/s00190-009-0303-8, 2009.
- Gourine, B. 2011 : *Combinaison des données spatiales De positionnement en vue de l'optimisation des réseaux géodésiques: Modélisation, Filtrage, Traitement et Analyse*. Thèse de Doctorat USTO-MB, Oran, 2011, Algérie.
- Gourine, B. 2012 : *Use of Starlette and LAGEOS-1&2 laser measurements for determination and analysis of stations coordinates and EOP time series*. Comptes Rendus Geosciences 344 (2012) 319-333, 2012.
- Mignard, F., 2005 : *Guide d'utilisation du logiciel FAMOUS* Rapport interne de l'OCA- France, 2005.
- Press, W. H. B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W.T.Vetterling, 1992 : *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge (UK) and New York: Cambridge University Press, 2nd edition, 1992.
- Rutman, J., 1978 : *Characterization of phase and Frequency instabilities in precision frequency sources - Fifteen years of progress*. IEEE, Proceedings, vol. 66, Sept. 1978, P. 1048-1075, 1978.