

Analyse des séries temporelles SLR du géocentre et des EOP basées sur les mesures des satellites LAGEOS1/2 et Starlette

B. Gourine, S. Kahlouche & B. Ghezali
Centre des Techniques Spatiales – Division de Géodésie Spatiale
BP n°13, 31200 Arzew – ALGERIE, Fax : (213) 041 47 36 65
E-Mail: bachirgourine@yahoo.com

ملخص : الهدف من هذا المقال هو دراسة أثر القياسات الليزرية (SLR) للقمر الصناعي المنخفض Starlette في التعيين الدقيق للحسابات الجيوديزية (مركز الأرض-EOP) ، في مدة 14 سنة (1993-2007). بينت النتائج بأن التدقيق في مركبات النقل الثلاثة (حركة مركز الأرض) ، تكون على التوالي، بنحو 4 و 5 ملم بالنسبة لحللول LAGEOS1/2 و Starlette. فيما يخص EOP، يكون الانحراف المعياري لحللول LAGEOS1/2 و Starlette على التوالي بنحو 0.14 و 0.20 mas (4-6 ملم) في إحداثيات القطب، و 0.01 و 0.02 ms (5-10 ملم) في الزمن (UT1 و LOD). يعتمد تحليل النتائج من جهة على تحليل التردد، ومن جهة أخرى، على دراسة ضوء السلسلة الإحداثية للمتغيرات. قدرت الأجال الفصلية بنحو بعض الملمترات، في مكونات مركز الأرض بالمقارنة مع نماذج ديناميكية الأرض. نوع الضوء السائد هو الضوء الأبيض، بمستوى يقدر بنحو 2 ملم. تحلل الإشارة الدورية لـ EOP في أجال التداخل السنوي، سنويا وفي فترات قصيرة. يعد ضوء الإيماض الضوء المميز للسلسلة الإحداثية لـ EOP بمستوى يقدر بنحو 4 و 15 ملم في إحداثيات القطب و في LOD على التوالي، بالنسبة لحللول Starlette.

الكلمات الأساسية : LAGEOS1/2 ، Starlette ، EOP ، مركز الأرض ، تحليل التردد ، اختلاف Allan.

Résumé : L'objectif de cet article est d'étudier l'impact des mesures laser (SLR) du satellite bas Starlette dans la détermination précise des produits géodésiques (EOP et Géocentre), sur une période de 14 ans (1993-2007). Les résultats ont montré que la précision sur les trois composantes de la translation (Mouvement du Géocentre), est de l'ordre de 4 et 5 mm pour les solutions LAGEOS1/2 et Starlette, respectivement. Concernant les EOP, les écarts-types des solutions LAGEOS1/2 et Starlette sont respectivement de l'ordre de 0.14 et 0.20 mas (~ 4-6 mm) en coordonnées du pôle, et de 0.01 et 0.02 ms (~5-10 mm) en temps (UT1 et LOD). L'analyse des résultats est basée d'une part, sur l'analyse fréquentielle, et d'autre part, sur l'étude du bruit des séries temporelles des paramètres d'intérêt. Des termes saisonniers sont estimés, de l'ordre de quelques mm, sur les composantes du géocentre en comparaison avec des modèles géodynamiques. Le type de bruit dominant est le bruit blanc, avec un niveau de l'ordre de 2 mm. Le signal périodique des EOP est décomposé en termes

interannuel, annuel et courtes périodes. Le bruit de scintillation est le bruit caractérisant des séries temporelles des EOP avec un niveau de l'ordre de 4 et 15 mm en coordonnées du pôle et en LOD, respectivement, pour la solution Starlette.

Mots-clés : LAGEOS1/2, Starlette, EOP, Géocentre, Analyse fréquentielle, Variance d'Allan.

Abstract : The objective of this paper is to study the impact of Starlette laser measurements in the precise determination of geodetic products (EOP and Geocentre), over 14 years period (1993-2007). The results showed that the contribution of these observations is acceptable and satisfactory for SLR technique. Indeed, the precision, on the three translation components (Geocentre Motion), is about 4 and 5 mm for the LAGEOS1/2 and Starlette solutions, respectively. Concerning the EOP, the RMS of LAGEOS1/2 and Starlette solutions are about 0.14 and 0.20 mas (~ 4 - 6 mm) on pole coordinates, and 0.01 and 0.02 ms (~ 5 - 10 mm) on time (UT1 and LOD), respectively. The analysis of the results is performed on two steps : (i) the frequency analysis and (ii) the noise study of the time series of the parameters of interest. Seasonal terms are estimated, about a few mm, on the Geocentre components compared to geodynamic models. The type of dominating noise is the white one, with a level of about 2 mm. The EOP periodic signal is decomposed into terms of inter-annual, annual and short periods. The flicker noise is the characterizing noise of the EOP time series with a level of about 4 and 15 mm on pole coordinates and LOD, respectively, for the Starlette solution. In the light of these encouraging results, the objective is to re-compute the geodetic products, over a long period, on the basis of observations of LEO satellites, namely Starlette, Stella, TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, etc. in addition to LAGEOS1/2 ones.

Key words : LAGEOS1/2, Starlette, EOP, Geocentre, Frequency Analysis, Allan variance.

1. Introduction

La technique de télémétrie laser (SLR) est l'une des techniques phares de géodésie spatiale pour l'établissement et la maintenance de l'ITRF, comme VLBI, GPS et DORIS. Elle contribue dans la détermination du repère de référence en fournissant les séries temporelles des coordonnées des stations terrestres et les paramètres d'orientation de la Terre (EOP : Earth Orientation Parameters). Pour une telle détermination, il est d'usage d'employer seules les mesures sur les satellites de haute altitude (par exemple, LAGEOS-1 et LAGEOS-2, 6000 km). L'objectif de cette étude est d'étudier la contribution des mesures laser effectuées sur les satellites à basse altitude comme Starlette (altitude 800 km) dans la détermination précise des produits géodésiques : paramètres de rotation de la Terre (EOP) et variations du géocentre (i.e., paramètres de translations entre les repères hebdomadaires de référence calculés et celui de l'ITRF2005), sur une période relativement longue.

Ce travail concerne d'une part, la détermination du réseau de l'ILRS et les EOP, basé sur les mesures des satellites LAGEOS-1 & -2 et Starlette, durant une période de 14 années ; Ce calcul est effectué suivant différentes solutions de combinaison inter-satellites, notées LA-1 (LAGEOS-1), LA-1&-2 (LAGEOS-1 & -2) et LA-1&STAR (LAGEOS-1 & Starlette). D'autre part, la méthodologie d'analyse des séries temporelles des paramètres géodésiques (géocentre et EOP) est basée sur l'étude du signal saisonnier par

une analyse spectrale et du bruit par la méthode de la variance d'Allan. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et discutés.

2. Données

Le calcul du réseau laser (coordonnées des stations) et des paramètres d'orientation de la Terre (EOP), réalisé par le logiciel MATLO (Coulot, 2005), comporte deux étapes :

- La première concerne l'utilisation des contraintes minimales pour la résolution des systèmes normaux hebdomadaires : ± 1 mm ($\pm 0,33$ mas) sur les rotations (R_x , R_y et R_z) et de ± 1 cm sur les biais en distance par station. Le repère de référence est défini par les stations Laser : 7090 – 7840 – 7080 – 7110 – 7105 – 7810 – 7839 – 7237, (cf. Figure 1). Les résultats obtenus sont des séries temporelles exprimant des solutions hebdomadaires individuelles. Chaque solution génère un repère de référence terrestre propre à elle.

- La deuxième phase consiste à appliquer une transformation à sept paramètres (3 translations, 1 facteur d'échelle et 3 rotations) sur les solutions hebdomadaires individuelles. Les résultats des traitements effectués représentent les séries temporelles des paramètres suivants :

- (i) les paramètres de transformation (translations et facteur d'échelle par rapport à l'ITRF2005);
- (ii) le mouvement du pôle : variations en x_p , y_p et LOD par rapport à la solution EOPC04;

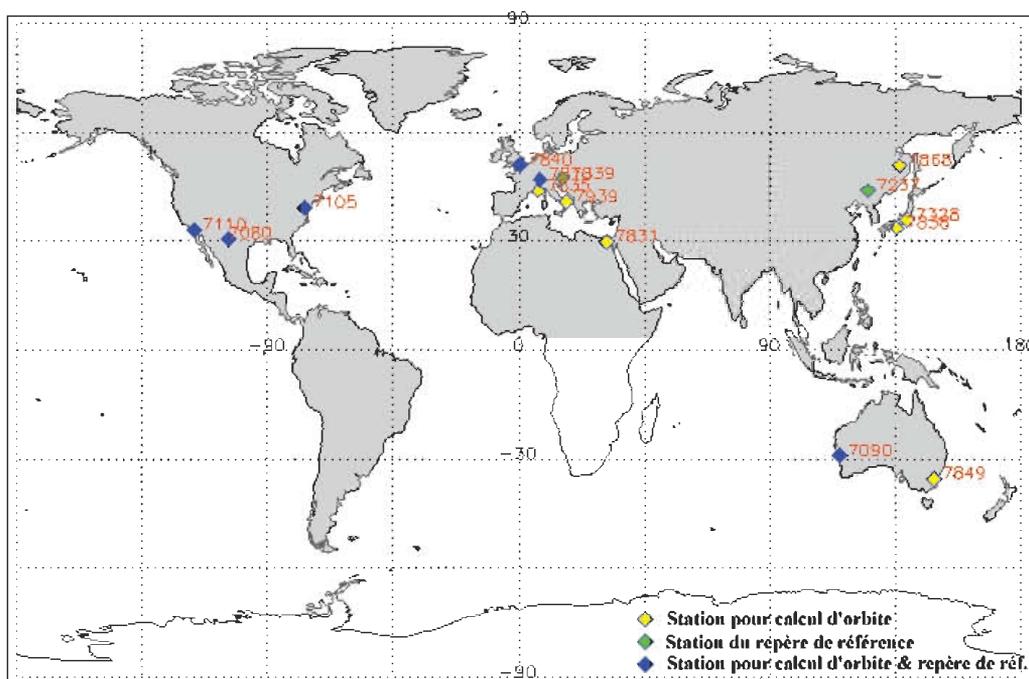


Fig. 1 Réseau de stations SLR pris en compte pour le calcul d'orbite des satellites et pour définir le repère de référence du réseau ILRS.

La durée des observations est de 14 années (du 02/10/1993 au 24/02/2007). Différentes combinaisons inter-satellites ont été adoptées: LAGEOS-1 (LA-1), LAGEOS-1&-2 (LA-1&-2), LAGEOS-1 & Starlette (LA-1&STAR) et avec les mesures pondérées de starlette (LA-1&STARpond).

2.1 Paramètres de transformation

Le tableau 1 récapitule les statistiques des séries hebdomadaires des paramètres de transformation d'Helmert entre les solutions des différentes combinaisons et celle de l'ITRF2005.

Tab 1. Statistiques des paramètres de transformation (Translations : TX, TY, TZ ; facteur d'échelle : D) correspondantes aux différentes combinaisons. Les valeurs dans chaque case représentent, respectivement, le minimum, le maximum, la moyenne et l'écart-type pondéré.

Solution	TX (cm)		TY (cm)		TZ (cm)		D (ppb)	
LA-1	-0.93 0.12	1.19 ±0.49	-1.19 -0.27	1.19 ±0.48	-0.90 0.11	1.12 ±0.46	-2.40 -0.66	1.03 ±0.69
LA-1&LA-2	-0.92 0.03	1.00 ±0.39	-0.85 -0.15	1.00 ±0.35	-0.79 0.00	0.78 ±0.37	-1.87 -0.59	0.76 ±0.56
LA-1 &STAR	-1.04 0.30	1.65 ±0.47	-1.22 -0.15	1.65 ±0.46	-1.22 -0.04	1.17 ±0.47	-2.18 -0.26	1.80 ±0.75
LA-1 &STARpond	-0.85 0.39	1.68 ±0.50	-1.39 -0.10	1.68 ±0.50	-1.08 0.23	1.51 ±0.49	-5.10 -2.03	1.09 ±0.78

• Variation du Géocentre

Les paramètres de translation revêtent une importance particulière, parmi les paramètres de transformation hebdomadaires calculés entre nos repères de référence terrestres et l'ITRF2005. En effet, ils permettent de mettre en évidence les mouvements du Géocentre. La redistribution de masses dans l'atmosphère, les océans mais aussi dans les réservoirs hydrologiques (rivières, bassins, etc. et précipitations sous forme de pluie, de neige ou de glace) sont autant de sources de variations annuelle et semi-annuelle (de l'ordre de quelques mm) de la position du centre des masses terrestres par rapport à une référence fixe.

Pourquoi s'intéresser à l'étude d'un tel phénomène ? L'intérêt de cette étude concerne trois domaines, d'après (Bouillé, 2000) :

- Effets des variations du géocentre sur l'estimation du niveau de la mer,
- Stabilité du système de référence,
- Contraindre les redistributions de masse à l'intérieur et à la surface de la Terre.

Les figures 2 et 3 illustrent les séries temporelles des translations suivant les combinaisons de différentes mesures des satellites laser (LAGEOS-1 & -2 et Starlette). D'après ces figures, nous constatons que la solution de la combinaison (LA-1&STAR) est

légèrement plus large par rapport à la solution de référence (LA-1&-2). En effet, dans le cas de la combinaison LA-1&STAR, la dispersion est de l'ordre de 2.7 cm en TX, 2.8 cm en TY et 2.4 cm en TZ. Par contre, dans le cas de la solution de référence, elle est de l'ordre de 2 cm en TX, 1.9 cm en TY et 1.6 cm en TZ, seulement (cf. Tableau 1). En ce qui concerne la précision, il est bien clair que la solution de référence reste précise avec un écart type moyen de l'ordre de ± 4 mm pour les trois composantes de la translation alors qu'elle est de l'ordre de ± 5 mm dans le cas de la solution (LA-1 &STAR).

La figure 3 illustre une comparaison entre les séries temporelles des translations issues des solutions (LA-1&STAR) et (LA-1&STARpond). Cette dernière solution est obtenue par un test qui a consisté à affecter les observations laser de Starlette d'écart types deux fois plus importants que celui de LAGEOS-1, pour évaluer l'effet de la pondération sur les résultats. On constate que les résultats sont sensiblement équivalents pour les paramètres (TX et TY) avec un degré moins pour la composante TZ.

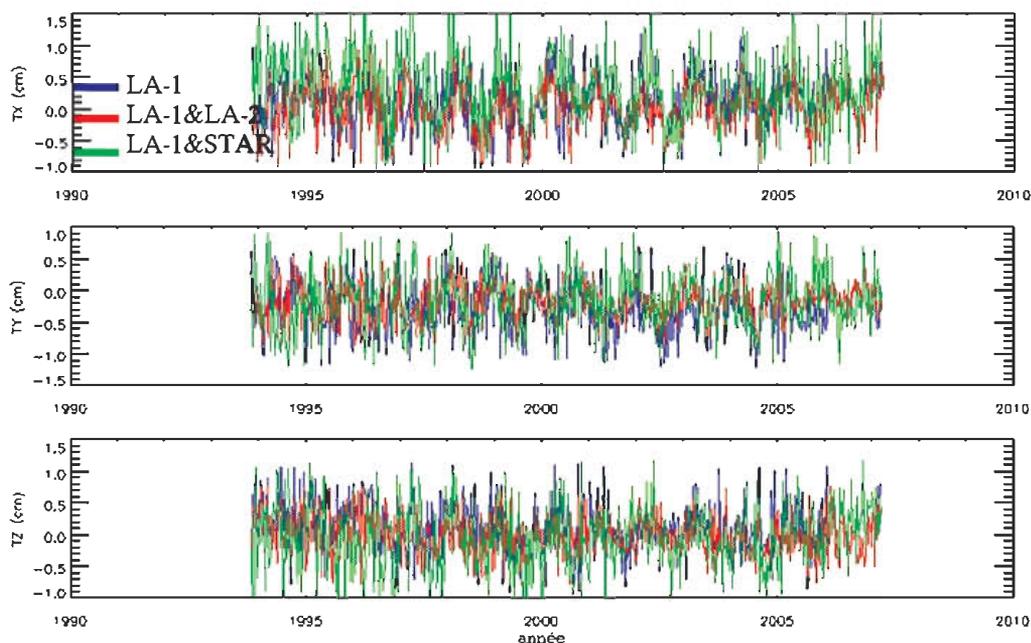


Fig. 2 Séries temporelles des composantes des variations du géocentre (TX, TY, TZ).

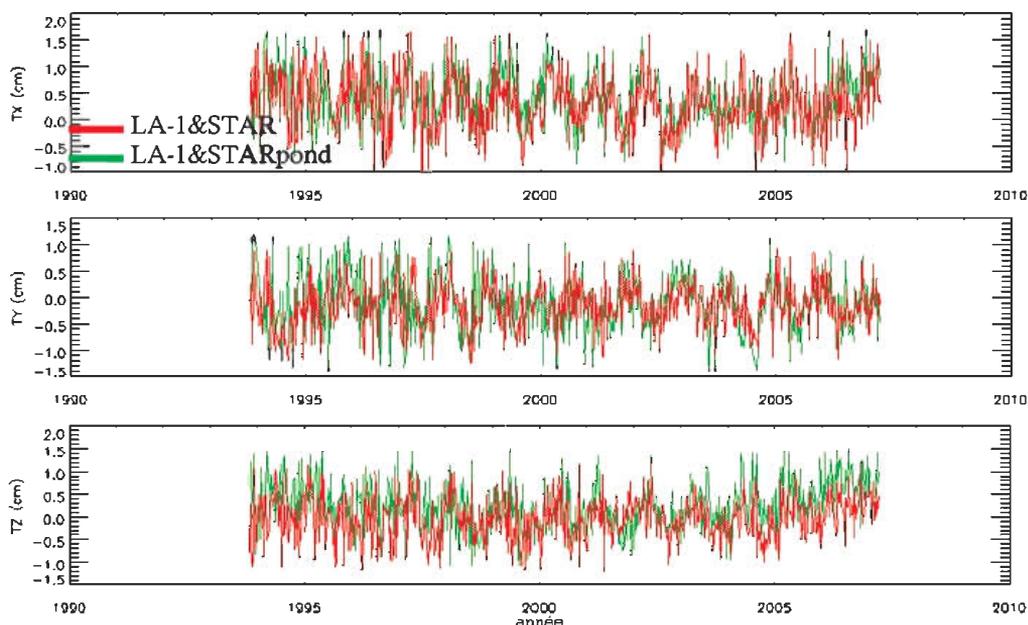


Fig. 3 Comparaison des composantes des variations du géocentre entre les solutions LA-1&STAR et LA-1&STARpond.

• **Facteur d'échelle**

Généralement, les variations de l'échelle du repère de référence sont affectées par les erreurs de détermination des composantes verticales des stations (Coulot, 2005). Ainsi, les biais en distance et les erreurs sur les composantes radiales dues aux erreurs orbitales résiduelles, limitant la précision sur les composantes verticales, influent sur les variations d'échelle. D'autre part, l'effet du réseau est un autre facteur qui peut affecter aussi l'échelle. La figure 4 illustre les graphes des séries temporelles du

facteur d'échelle, correspondantes aux différentes combinaisons.

D'après le tableau 2, la dispersion de la série (LA-1 &STAR) est de l'ordre de 4.0 ± 0.56 ppb (soit 24 ± 5 mm). Dans le cas de la solution LAGEOS, elle est de l'ordre de 2.7 ± 0.75 ppb (soit 16 ± 3 mm). Ceci montre que les mesures de starlette sont plus bruitées. La figure 4b et le tableau 2 montrent la présence d'un décalage en magnitude d'environ 1.8 ppb (ou 11 mm) entre les deux séries de Starlette (mesures pondérées et non pondérées).

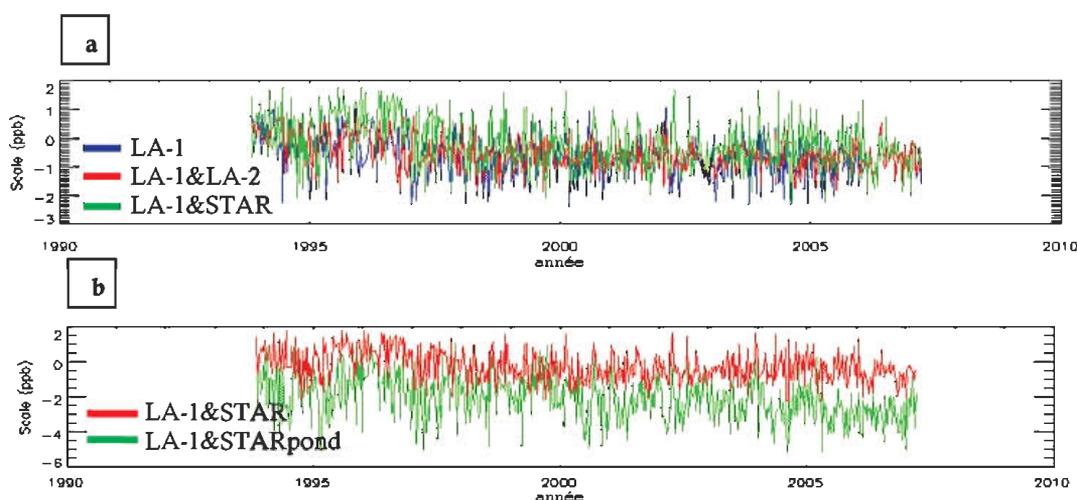


Fig. 4 Séries temporelles du facteur d'échelle suivant (a) les solutions des différentes combinaisons (LA-1, LA-1&LA-2 et LA-1&STAR) (b) les solutions issues des observations pondérées et non pondérées (LA-1&STAR et LA-1&STARpond).

2.2 Paramètres du pôle

La figure 5 illustre les séries temporelles d'appoints sur les coordonnées du pôle (X_p , Y_p), le temps universel $UT1$ et la longueur du jour LOD . Ces appoints ont été calculés par rapport à la solution standard EOPC04, série temporelle de référence de l'IERS et ramenés dans un repère de référence cohérent avec l'ITRF2005. D'après le tableau 2, les écarts-types de la solution LA1&LA-2 sont respectivement de l'ordre 0.14 mas (~ 4mm), et de 0.01 ms (~5mm) en coordonnées du pôle et en temps. Concernant, la solution LA-1&STAR, les précisions sont un peu plus larges, de l'ordre de 0.20 à 0.23 mas (ou bien, 6-7mm) en coordonnées du pôle, et de 0.02 ms (soit 10mm) en temps ($UT1$ et LOD). Ces

valeurs sont satisfaisantes pour la technique SLR et elles s'accordent avec les valeurs publiées par l'IERS (Gambis, 2004).

La figure 6 montre qu'il y a une certaine concordance entre les deux séries temporelles de la solution LA1&STAR : cas des observations pondérées et non pondérées de Starlette. En effet, en termes de précision, les deux séries sont de l'ordre de 5-6 mm en coordonnées du pôle et de l'ordre de 10 mm en temps (cf. Tableau 2). On peut dire que les solutions des EOP, obtenues par la méthode mono-technique (SLR), restent en incohérence avec la solution de référence EOPC04 à un niveau de 5 à 10 mm (~ 200 – 300 μ s) (Gambis, 2004).

Tab 2. Statistiques des paramètres du pôle. Les valeurs dans chaque case représentent, respectivement, le minimum, le maximum, la moyenne et l'écart type suivant les différentes combinaisons.

Solution	X_p (mas)	Y_p (mas)	UT (ms)	LOD (ms)
LA-1	-0.66 0.80 0.07 ±0.26	-0.74 0.80 - 0.01 ±0.22	-0.08 0.07 -0.00 ±0.02	-0.15 0.16 0.00 ±0.03
LA-1&LA-2	-0.50 0.61 0.05 ±0.14	-0.52 0.61 - 0.02 ±0.13	-0.05 0.05 0.00 ±0.01	-0.11 0.11 0.00 ±0.01
LA-1&STAR	-0.65 0.92 0.14 ±0.23	-0.72 0.92 0.02 ±0.20	-0.06 0.06 0.00 ±0.02	-0.16 0.17 0.00 ±0.02
LA-1 &STARpond	-0.64 0.83 0.10 ±0.15	-0.65 0.83 0.05 ±0.15	-0.06 0.06 -0.00 ±0.01	-0.15 0.15 0.00 ±0.02

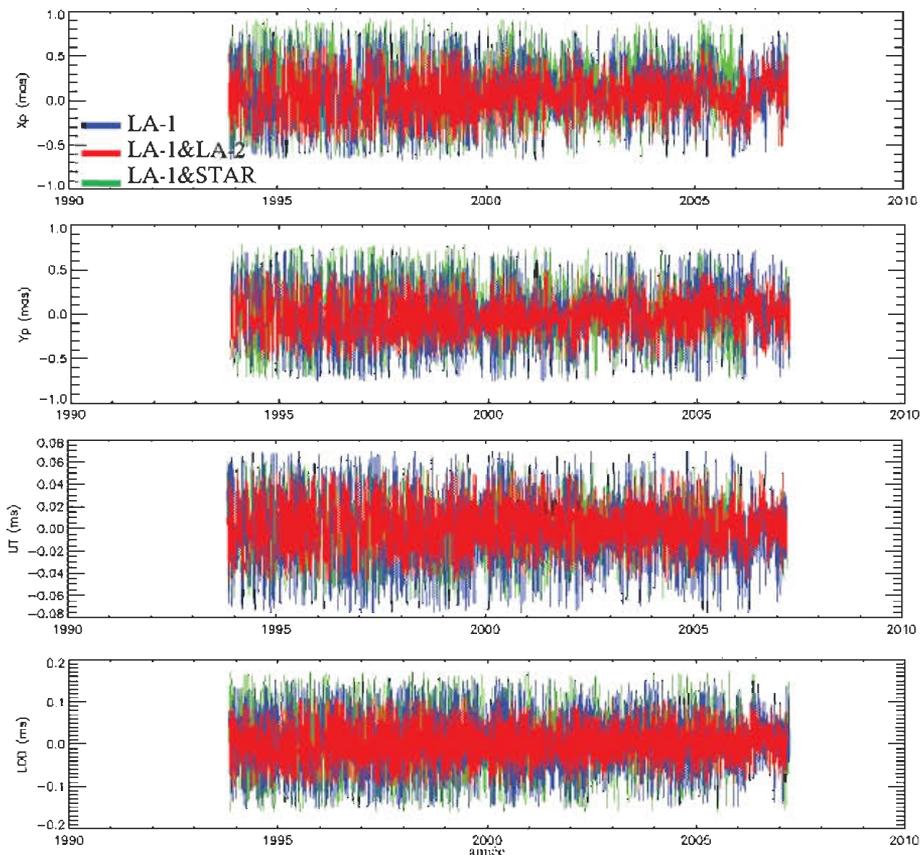


Fig. 5 Séries temporelles des paramètres du pôle (X_p , Y_p , UT et LOD).

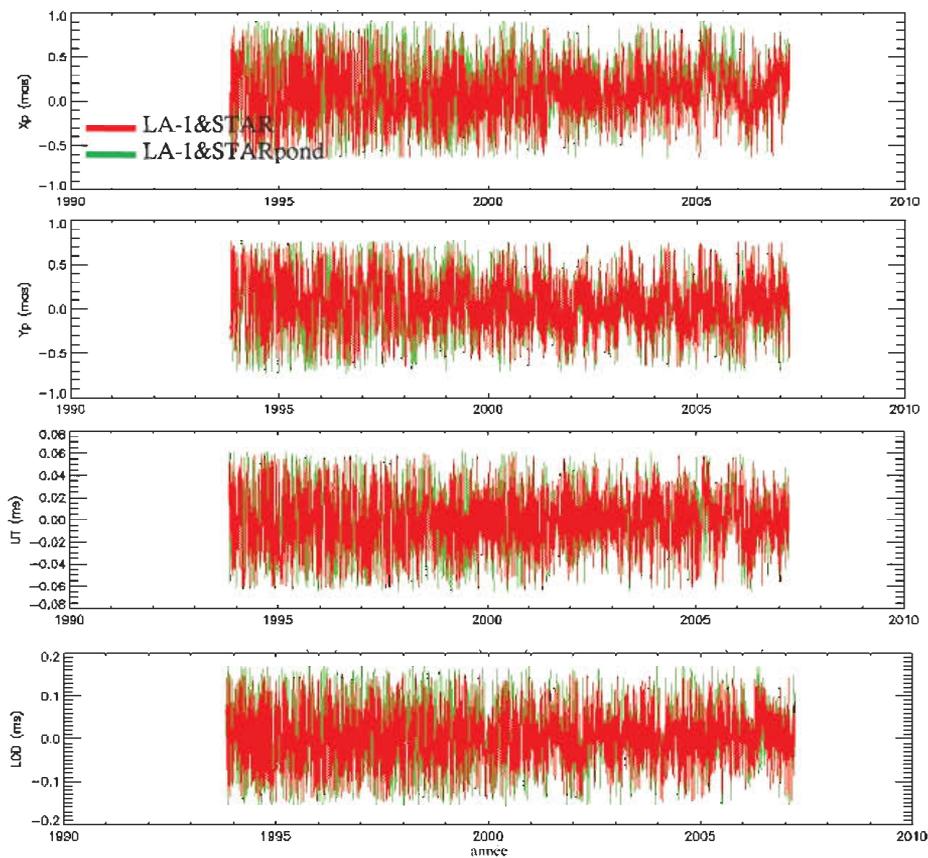


Fig. 6 Séries temporelles des paramètres du pôle (X_p , Y_p , UT et LOD) suivant les solutions LA-1&STAR et LA-1&STARpond.

3. Résultats et discussion

La méthodologie d'analyse, adoptée à travers cet article, repose sur deux aspects:

- (i) l'analyse fréquentielle pour estimer les signaux périodiques (amplitude et phase) des séries temporelles des paramètres d'intérêt, en utilisant le logiciel FAMOUS (Mignard, 2005),
- (ii) l'étude du bruit affectant ces séries, par la méthode de la variance d'Allan (LeBail, 2004).

3.1 Résultats des paramètres de transformation

• Variation du géocentre

La comparaison entre les valeurs de la solution (LA-1&STAR) et celles des autres auteurs a permis de révéler des accords de l'ordre du millimètre pour les amplitudes (voire mieux pour le terme annuel sur la composante TY). Concernant les phases, les accords sont moins probants. Ceci est probablement dû au choix du repère de référence et des modèles physiques utilisés dans les calculs (Figure 7 et tableau 3).

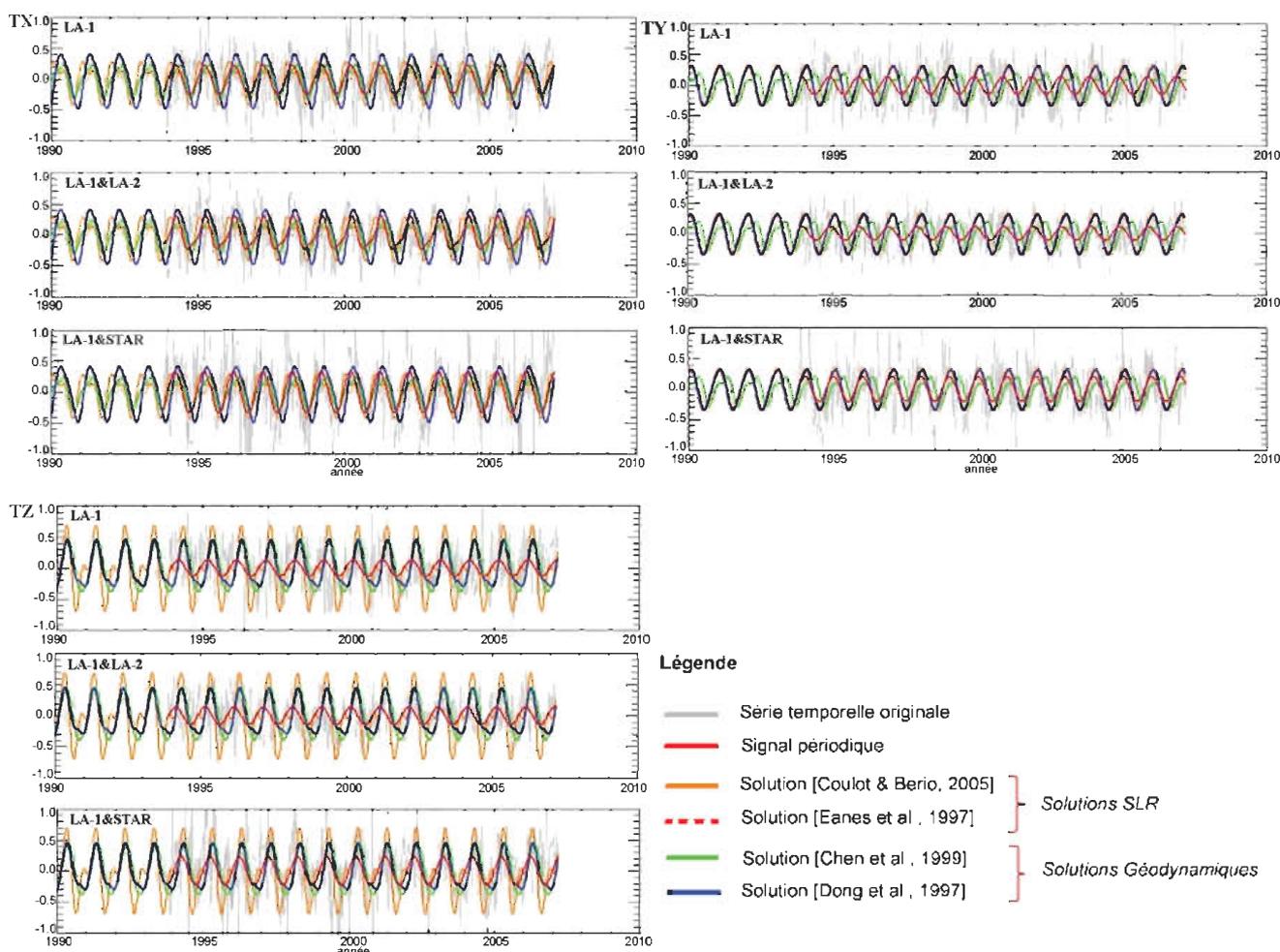


Fig. 7 Comparaison des signaux périodiques estimés par FAMOUS, des solutions obtenues avec celles d'autres auteurs et des modèles géodynamiques.

Tab 3. Amplitudes et phases des termes annuels et semi-annuels et leurs précisions sur les trois paramètres de translation pour notre solution, les solutions de [Coulot & Berio 2005] & [Eanes et al. 1997] et les deux modèles géodynamiques [Dong et al. 1997] & [Chen et al. 1999]. La formule adoptée est la suivante : $A * \cos(\omega(t - t_0) + \varphi)$, A en mm et φ en degrés, $t_0 = 1$ er janvier 1990.

Paramètre	Notre solution				Coulot & Berio 2005	Eanes et al. 1997	Chen et al. 1999	Dong et al. 1997
	LA-1	LA-1&-2	LA-1&STAR	LA-1&STAR _{pond}				
TX A 1 an	2.3 ± 0.3	2.4 ± 0.3	3.3 ± 0.4	2.4 ± 0.4	2,8	2,2	2,4	4,2
TX φ 1 an	279.5 ± 16.7	280.4 ± 13.7	300.5 ± 11.9	296.4 ± 15.7	284	211	244	224
TX A ½ an	.	0.7 ± 0.2	.	0.8 ± 0.3	1,5	1,1	0,7	0,8
TX φ ½ an	.	277.6 ± 42.9	.	96.2 ± 50.6	352	344	1	210
TY A 1 an	1.5 ± 0.2	1.1 ± 0.3	2.0 ± 0.2	3.1 ± 0.6	3,2	3,2	2,0	3,2
TY φ 1 an	88.9 ± 25.0	65.1 ± 22.2	0.1 ± 20.4	51.9 ± 10.9	340	331	270	339
TY A ½ an	.	.	.	0.9 ± 0.4	<< 0,1	0,8	0,9	0,4
TY φ ½ an	.	.	.	337.7 ± 43.8	.	33	41	206
TZ A 1 an	1.3 ± 0.5	1.3 ± 0.3	2.3 ± 0.4	2.2 ± 0.3	4,8	2,8	4,1	3,5
TZ φ 1 an	322.9 ± 23.3	332.1 ± 17.6	290.9 ± 16.8	261.4 ± 21.0	276	225	228	235
TZ A ½ an	.	.	.	.	3,2	0,4	0,5	1,1
TZ φ ½ an	.	.	.	.	102	193	58	133

Le comportement spectral des séries temporelles du mouvement du géocentre, décrit par la méthode de la variance d'Allan, est illustré par la figure 8a suivant les différentes combinaisons. Après avoir enlevé la tendance (estimée par une régression linéaire) et les composantes périodiques (annuelles et semi-annuelles), on a appliqué la variance d'Allan sur les séries du mouvement du géocentre résultantes. Le type de bruit dominant dans ces séries est le bruit blanc.

Cependant, le bruit affectant les trois composantes du géocentre de la série de LA-1&STAR est légèrement important (~2mm). La série LA-1&-2 reste la moins perturbée avec un niveau de bruit de 1mm. D'autre part, le tableau 4 et la figure 8b montrent que la pondération des mesures n'a affecté que la composante TZ où le type de bruit est un bruit de scintillation (*flicker noise*), avec le même ordre de 2mm.

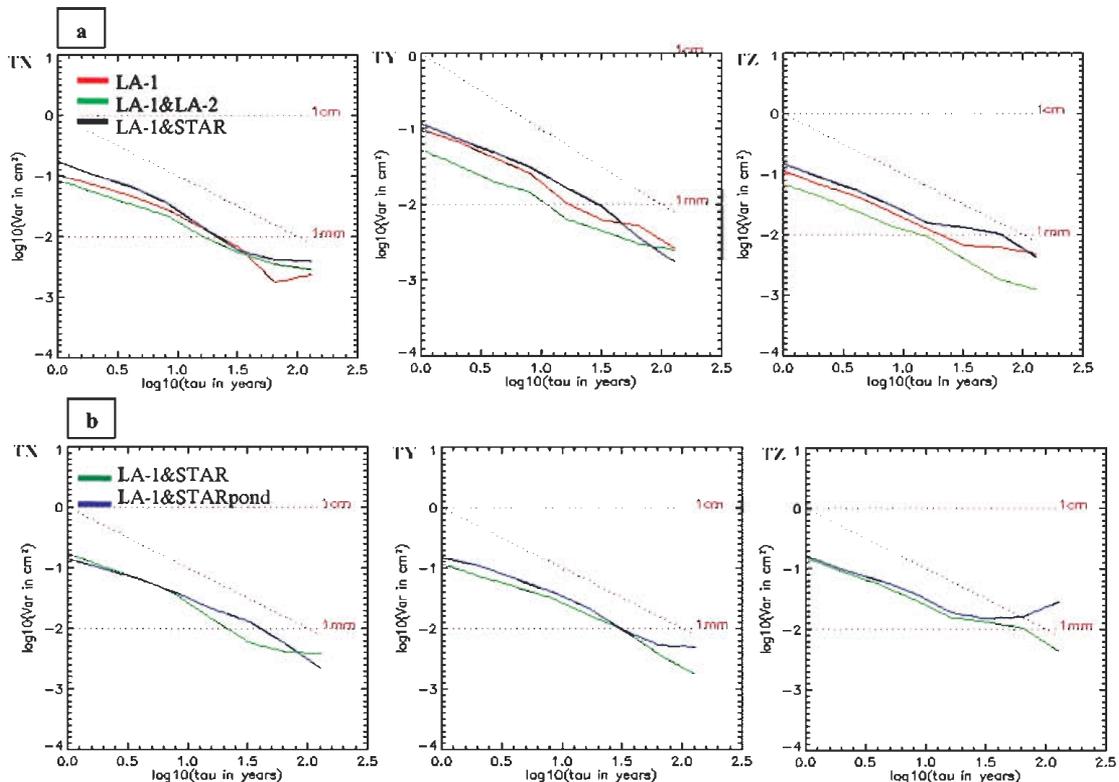


Fig. 8 Variance d'Allan des translations suivant : (a) les solutions (LA-1, LA-1&-2 et LA-1&STAR) (b) les solutions (LA-1&STAR et LA-1&STARpond).

Tab 4. Bruit des séries temporelles des paramètres de transformation : pente du graphe log-log de la variance d’Allan et niveau de bruit.

Solution	TX (cm)		TY (cm)		TZ (cm)		D (ppb)	
	Pente	Niveau	Pente	Niveau	Pente	Niveau	Pente	Niveau
LA-1	-0.9	0.16 ±0.01	-0.8	0.16 ±0.01	-0.7	0.16 ±0.01	-0.6	0.28 ±0.02
LA-1 & LA-2	-0.7	0.14 ±0.01	-0.7	0.12 ±0.004	-0.9	0.12 ±0.01	-0.6	0.22 ±0.01
LA-1 & STAR	-0.7	0.19 ±0.02	-0.8	0.17 ±0.01	-0.7	0.19 ±0.01	-0.8	0.32 ±0.04
LA-1 & STARpond	-0.8	0.19 ±0.01	-0.8	0.19 ±0.01	-0.5	0.22 ±0.01	-0.8	0.46 ±0.08

• **Facteur d’échelle**

Le tableau 3 fournit les valeurs des signaux annuels et/ou semi-annuels (amplitudes et phases) des séries temporelles du facteur d’échelle. La solution LA-1&STAR est la seule qui contient les deux composantes périodiques avec une amplitude de l’ordre de 0.17ppb/an et de 0.15ppb/06mois (soit 1mm/an et 0.9 mm/06 mois; valeurs légèrement supérieures par rapport à celles des solutions de LAGEOS mais de même précision). En revanche, l’amplitude annuelle correspondant à la combinaison LA-1&STAR avec pondération est environ deux fois plus importante. Les biais et les pentes d’échelle, correspondants aux différentes combinaisons sont sensiblement équivalents avec une légère différence pour la solution LA-1&STAR. Les précisions

estimées sur ces composantes sont en moyenne de même ordre de grandeur.

Généralement, l’existence de pentes dans les séries temporelles des paramètres de transformation est liée principalement à la géométrie du réseau de poursuite SLR. En effet, il a été à montrer que le choix de la distribution géographique des stations laser influe considérablement sur l’estimation des paramètres d’intérêt (Coulot, 2005). Cependant, d’après le tableau 5, on constate que la valeur maximale des pentes des différents paramètres de transformation est très faible (~ 1mm/an). Par conséquent, le choix du réseau qui a servi comme repère de référence dans nos calculs, a été optimal grâce aussi à la bonne qualité des observations des stations de poursuite de ce réseau.

Tab 5. Amplitudes et phases des termes annuels et semi-annuels du facteur d’échelle et leurs écarts types, suivant les différentes combinaisons. La formule adoptée est : $A * \cos(\omega(t - t_0) + \varphi)$, A en ppb et φ en degrés, $t_0 = 02$ octobre 1993.

Solution	A (ppb) & période	φ (°)	Pente (ppb/an)	Biais (ppb)
LA-1	0.12 ± 0.05 (0.8 an)	201.7 ± 35.8	-0.05	1.03
	0.12 ± 0.05 (½ an)	20.7 ± 33.2		
LA-1 & LA-2	0.10 ± 0.03 (0.8 an)	96.1 ± 35.8	-0.04	0.82
LA-1 & STAR	0.17 ± 0.05 (1an)	189.4 ± 29.6	-0.06	1.17
	0.15 ± 0.05 (½ an)	257.9 ± 32.7		
LA-1 & STARpond	0.34 ± 0.09 (1an)	29.0 ± 17.6	-0.06	1.15

La figure 9 illustre le graphe de la variance d'Allan des séries temporelles du facteur d'échelle. On peut constater que le bruit dominant pour les combinaisons utilisant les mesures de Starlette est un bruit

blanc de l'ordre de 2-3 mm. Par contre, pour les solutions LAGEOS, on remarque qu'il y a présence, en plus du bruit blanc, d'un bruit de scintillation à un niveau de 1-2 mm, (tableau 4).

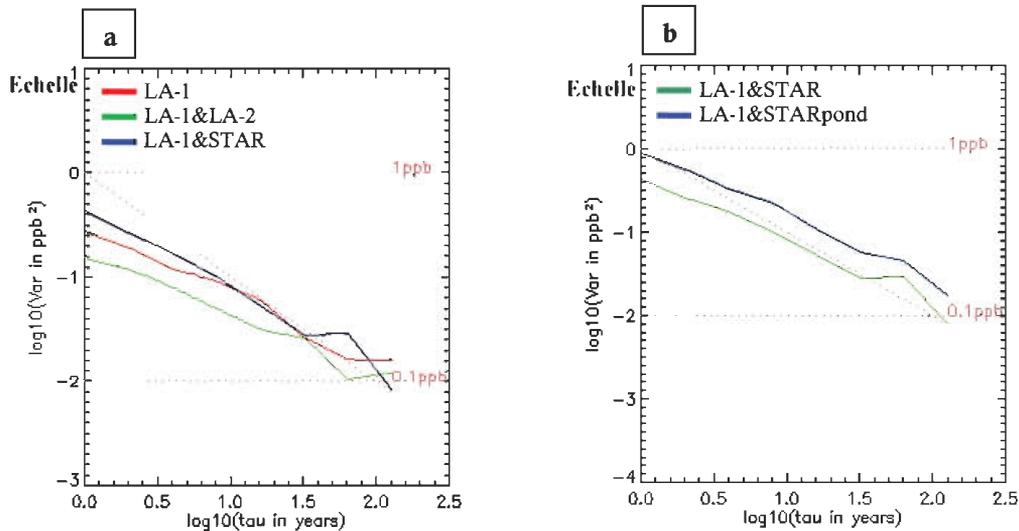


Fig. 9 Variance d'Allan des séries temporelles du facteur d'échelle suivant: (a) les solutions (LA-1, LA-1&LA-2 et LA-1&STAR) (b) les solutions (LA-1&STAR et LA-1&STARpond).

3.2 Paramètres du Pôle

Le tableau 6 représente la décomposition du signal périodique des séries temporelles du mouvement du pôle suivant trois gammes de périodes : interannuelles, annuelles et courtes périodes (de quelques jours à quelques mois < 100 jours). Le choix de cette décomposition est lié aux périodes des phénomènes géophysiques intervenant dans les variations du mouvement du pôle qui sont principalement dues à des redistributions de masses dans la Terre et de ses couches fluides. Dans ce cas, les oscillations annuelles et semi-annuelles sont dues essentiellement aux variations de l'atmosphère, des océans et des eaux souterraines (Frède, 1999). Les termes à courtes périodes sont liés aux marées gravitation-

nelles océaniques, atmosphériques et lunisolaires (Coulot, 2005). Tous ces phénomènes sont pris en compte dans nos calculs (Gourine et al., 2009). D'après le tableau 6, les résultats relatifs aux différentes combinaisons sont très proches, car les amplitudes maximales des différents signaux des variations du mouvement du pôle n'excèdent pas 74 μ s (i.e., 2.2 mm). Ceci montre que les effets résiduels des phénomènes géophysiques, cités précédemment, sur le mouvement du pôle sont faibles et d'ordre millimétrique. En ce qui concerne la durée du jour (LOD), les variations sont induites par la friction des vents et des courants océaniques à la surface de la Terre solide. De même, les variations de ce paramètre peuvent être décomposées en trois termes.

Tab 6. Signaux périodiques des paramètres du pôle (résidus sur les coordonnées du pôle X_p , Y_p et sur la Longueur du jour LOD).
* : correspond au terme semi-annuel.

Paramètre	Période	LA-1	LA-1&LA-2	LA-1&STAR	LA-1 & STARpond
X_p (μ s)	Interannuelle	56.3	30.1 – 40.8	36.1 – 48.3	33.2 – 36.6
	Annuelle	–	31.9	46.7	32.6*
	Courtes périodes	30.4 – 34.1	23.6 – 28.5	34.5 – 41.3	31.7
Y_p (μ s)	Interannuelle	46.0	–	39.0	33.0
	Annuelle	39.7	35.0	72.9	74.4
	Courtes périodes	31.4 – 34.0	10.6 – 22.2	31.3 – 36.1	28.1 – 37.2
LOD (μ s)	Interannuelle	6.4	–	6.5	–
	Annuelle	5.9	6.0	–	7.2
	Courtes périodes	5.4 – 6.0	3.5 – 4.1	6.1 – 13.8	5.8 – 13.7

D'après (Frède, 1999), les processus atmosphériques sont la cause principale des variations interannuelles de *LOD*. Quant aux variations saisonnières (annuelles et semi-annuelles), elles sont induites par des variations dans les vents zonaux et stratosphériques, pour le terme annuel, et par la contribution des océans pour le terme semi-annuel. Les variations à courtes périodes (inférieurs à 100 jours) sont principalement attribuées aux échanges de moment cinétique entre la Terre solide et l'atmosphère.

Ces phénomènes d'origine géophysique sont inclus dans la série de référence EOPC04 du terme *LOD* et aussi dans celle calculée par chaque solution. Les amplitudes estimées des différents termes de variations du *LOD* sont de l'ordre de 4 – 6 μ s (soit

environ 2 – 3 mm) pour les combinaisons LAGEOS et de l'ordre de 7 – 14 μ s (soit environ 4 – 7 mm) pour les combinaisons Starlette et LAGEOS-1. Ces valeurs restent très faibles vis-à-vis des amplitudes des différents termes (Frède, 1999) car elles décrivent les signaux résiduels des phénomènes en question.

L'étude du bruit, affectant les séries temporelles des paramètres de rotation de la Terre, a permis de nous fournir le type de bruit et son niveau (cf. Tableau 7). Le bruit dominant pour la solution LA-1&LA-2 est le bruit de scintillation avec un niveau de l'ordre de 3 mm en coordonnées du pôle et de 9.5 mm en *LOD*. Alors que pour les solutions Starlette, les niveaux de ce bruit sont de l'ordre de 4 mm en coordonnées du pôle et de 14.5 mm en *LOD*.

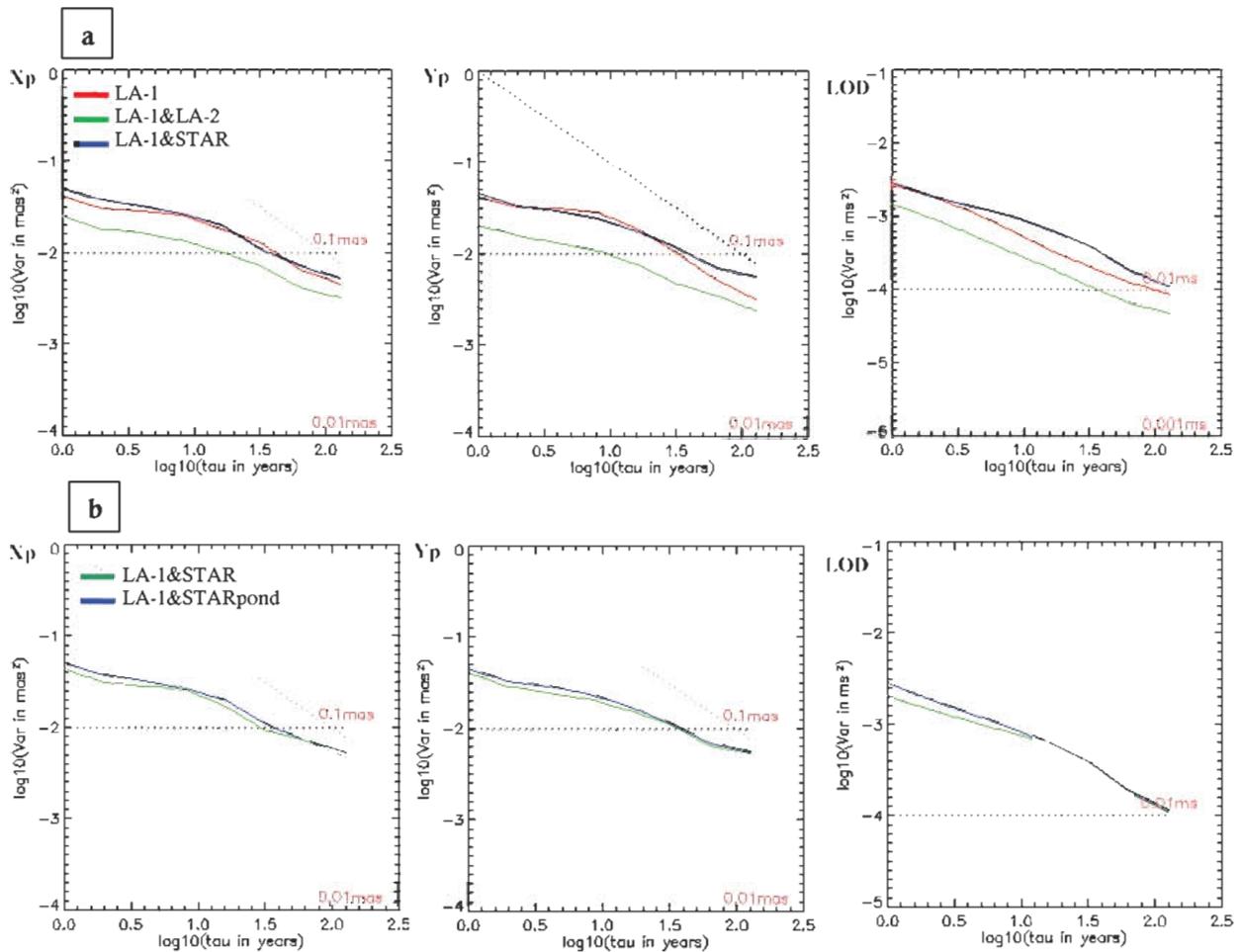


Fig. 10 Variance d'Allan des paramètres du pôle suivant (a) les solutions (LA-1, LA-1&-2 et LA-1&STAR) (b) les solutions (LA-1&STAR et LA-1&STARpond).

Tab 7. Bruit des paramètres du pôle.

Solution	Xp (μ as)		Yp (μ as)		LOD (μ s)	
	Pente	Niveau	Pente	Niveau	Pente	Niveau
LA-1	-0.4	140 \pm 2	-0.5	130 \pm 3	-0.7	26 \pm 0.3
LA-1&LA-2	-0.4	110 \pm 1	-0.4	90 \pm 1	-0.7	19 \pm 0.1
LA-1&STAR	-0.5	140 \pm 3	-0.4	0.14 \pm 2	-0.7	29 \pm 0.2
LA-1 &STARpond	-0.5	140 \pm 3	-0.4	0.13 \pm 2	-0.6	27 \pm 0.1

4. Conclusion

Cette étude a concerné le traitement de 14 années de données laser des satellites LAGEOS-1&-2 et Starlette pour l'étude des produits géodésiques (Géocentre et EOP). Malgré que l'orbite du satellite bas Starlette est sujette à l'influence de nombreuses forces gravitationnelles et non gravitationnelles, les résultats obtenus ont révélé que l'apport des mesures de ce satellite a un niveau acceptable sur la qualité des paramètres estimés. En outre, l'analyse de ces séries temporelles a montré qu'il est intéressant d'utiliser les mesures de Starlette pour l'étude du comportement des variations du géocentre et des paramètres de rotation de la Terre (EOP). Sur la base de ces résultats, nous pouvons conclure que les observations issues des satellites bas (Starlette, Stella, TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, etc.) peuvent être utilisées dans la détermination précise des produits géodésiques (géocentre et EOP).

Remerciements

Les auteurs remercient les chercheurs de GEMINI/OCA – France, plus particulièrement, Prof. Exertier P., Berio Ph., Deleflie F., Coulot D. et Feraudy D., pour leurs soutiens scientifique et technique à ce travail de recherche.

Références bibliographiques

- Bouillé, F.: *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, soutenue le 7 Janvier 2000, France.
- Coulot, D.: *Télémétrie laser sur satellites et combinaison de techniques géodésiques*. Thèse de Doctorat, Observatoire de Paris, 2005.
- Frède, V.: *Apport de l'analyse non linéaire à l'étude géophysique de la rotation de la Terre*. Thèse de doctorat, Observatoire de Paris, France 1999.
- Gourine, B., Kahlouche, S., and Belbachir, M.F.: *Determination and analysis of stations coordinates based on Starlette and Lageos-1 & -2 satellites laser ranging data*. Bulletin des sciences géographiques, N°24, 2e semestre 2009, pp 9-15.
- Le Bail, K.: *Etude statistique de la stabilité des stations de géodésie spatiale – Application à DORIS*. Thèse de Doctorat, Observatoire de Paris, 2004.
- McCarthy, D.D. : *IERS Conventions*. IERS technical note 21, Observatoire de Paris, 1996.
- Mignard, F.: *Guide d'utilisation du logiciel FAMOUS*. Rapport interne de l'OCA- France, 2005.