Analyse des séries temporelles de coordonnées des sites multi-techniques (SLR, VLBI, DORIS et GPS)

B. GOURINE
Division de Géodésie Spatiale, Centre des Techniques Spatiales (CTS), 31200 Arzew, Oran.
Email: bgourine@cts.asal.dz, bachirgourine@yahoo.com

ملخص : يهدف هذا المقال إلى تحليل السلاسل الزمنية لإحداثيات محطات التقنيات الفضائية لتحديد المواقع (نظام الليزر SLR، نظام VLBI، النظام الفرنسي DORIS و نظام تحديد المواقع GPS)، استنادا إلى التحديد الكمي للإشارة وتوصيف الضوضاء. تتعلق المعطيات المستعملة بالسلاسل الزمنية لإحداثيات 58 موقع مشترك متعدد التقنيات (يحتوي على 127 محطة)، ومرتبط بالمعلم المرجعي الدولي ITRF2000، على مدى فترة 13 سنة (ما بين عامي 1993 و 2006). لقد تم إجراء مقارنة بين الحلول المختلفة اعتمادا على مختلف التقنيات. و تم التعبير عن النتائج المتحصل عليها من حيث الانحرافات المعيارية (RMS)، السعة المقدرة للإشارات الدورية من قبل برنامج FAMOUS، و كذا نوع ومستوى الضوضاء التي تؤثر في هذه السلاسل الزمنية من قبل تباين Allan.

في المواقع المشتركة متعددة التقنيات، تعتبر الدقة ثلاثية الأبعاد للمحطات كافية و متجانسة بالنسبة لتقنيات SLR، VLBI و GPS، في حدود ± 1 سم. أما بالنسبة لمحطات DORIS، فإنها تقدر بـ ± 2 سم. حددت سعة الإشارات الدورية بعدة مليمترات، بالنسبة لكل تقنية على حدا. و يوضح تحليل الضوضاء على أساس تباين Allan و طريقة (TCH) Tricorne، عن هيمنة الضوضاء البيضاء في السلاسل الزمنية لـ SLR و DORIS. أما بالنسبة للسلاسل الزمنية المتعلقة بتقنيات VLBI و GPS، فتتواجد فيها ضوضاء ملونة من نوع وميض مع مستوى ضوضاء يقدر بالمليمتر.

الكلمات الأساسية : مواقع مشتركة متعددة التقنيات، تقنيات الجيوديزيا الفضائية، تحليل التردد، تباين Allan، طريقة Tricorne.

Résumé : Le présent article a pour objectif l'analyse des séries temporelles de coordonnées des stations issues des techniques spatiales de positionnement (SLR, VLBI, DORIS et GPS), basée sur la quantification du signal et la caractérisation du bruit. Les données utilisées concernent les séries chronologiques des coordonnées de 58 sites co-localisés (comprenant 127 stations), exprimées par rapport à l'ITRF2000, sur une période de 13 ans (entre 1993 et 2006). Une comparaison des différentes solutions en fonction des techniques est effectuée. Les résultats sont exprimés en termes d'écart-types (RMS), d'amplitudes des signaux périodiques estimées par le programme FAMOUS, et du type et du niveau de bruit, affectant ces séries temporelles, obtenus par la variance d'Allan.

Dans les sites co-localisés, la précision 3D des positions des stations est assez homogène pour les techniques SLR, GPS et VLBI, de l'ordre de ± 1 cm. Cependant, elle est de l'ordre de ± 2 cm pour celles de la technique DORIS. Les amplitudes des signaux périodiques sont de l'ordre de quelques millimètres, par technique. L'analyse du bruit, basée sur la variance d'Allan et la méthode du tricorne (TCH), montre qu'un bruit blanc dominant est détecté dans les séries temporelles des techniques SLR et DORIS. Cependant, pour celles des techniques VLBI et GPS, elles sont affectées par un bruit de scintillation avec un niveau de bruit millimétrique.

Mots-clés : Sites co-localisés, Techniques de Géodésie Spatiale; Analyse fréquentielle, Variance d'Allan, Méthode du Tricorne.

Abstract : The objective of the present paper is the analysis of the time series of station coordinates issued from space positioning techniques (SLR, VLBI, DORIS and GPS), based on signal quantification and noise characterizing. The data concern the time series of coordinates of 58 co-located sites (including 127 stations), expressed into the ITRF2000, for a 13 years period (1993-2006). A comparison of different solutions depending on the techniques is performed. The results are expressed in terms of standard deviations (RMS), amplitude of periodic signals estimated by FAMOUS program, type and level of noise affecting these time series obtained by Allan variance. In the co-located sites, the 3D position accuracy of the stations is fairly homogeneous for SLR VLBI and GPS techniques, of about of ± 1 cm.

However, it is about of ± 2 cm in the case of DORIS technique. The estimated amplitudes are of the order of a few millimeters per technique. The noise analysis, based on the Allan variance and Three-Corned Hat (TCH) methods, shows that a dominant white noise is detected in the time series of SLR and DORIS techniques. However, for those of VLBI and GPS techniques, they are affected by flicker noise with a millimeter noise level.

Keywords : Collocated sites; Space Geodesy Techniques; Frequency analysis; Allan variance; Three-Corned Hat (TCH) method.

1. Introduction

En géodésie, la notion des repères de référence terrestres joue un rôle clé dans le référencement des réseaux locaux et globaux basés sur les observations des techniques spatiales de positionnement et s'implique dans plusieurs applications en géosciences, telles que: le positionnement, l'orbitographie, la géodynamique, la rotation de la Terre, le champ de gravité, etc.

Ces repères sont établis par combinaison des solutions individuelles des techniques de géodésie spatiale, telles que la technique SLR *(Satellite Laser Ranging)*, VLBI *(Very Long Baseline Interferometry)*, GPS *(Global Positioning System)* et DORIS *(Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite)* [Altamimi et al., 2005a; 2005b; 2002]. La combinaison présente l'avantage de tirer profit au mieux des forces de chacune des techniques mises en jeu. Par exemple, la technique SLR ou LLR est connue d'être la plus précise pour la détermination de l'origine du repère (géocentre), le GPS et DORIS sont dédiés pour améliorer la distribution géographique des stations dans le réseau global et la distribution temporelle des mesures pour les sites en co-localisation [Coulot et al., 2007].

Cependant, plusieurs sources d'erreurs peuvent altérer les résultats d'une telle combinaison et concernent, principalement, les écarts systématiques qui peuvent exister entre les différentes réalisations, même au sein d'une même technique. Ils sont dus à l'utilisation des différents logiciels et stratégies d'observation et de calcul par les différents centres d'analyse. Enfin, les différents produits de l'IERS (repère international de référence terrestre *ITRF*, repère international de référence céleste *ICRF* et les paramètres de rotation de la terre *EOP*) sont calculés d'une façon indépendante, ce qui mène à des inconsistances entre eux.

Les mouvements des stations décrits par les séries temporelles de coordonnées 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, et les paramètres de rotation de la Terre (mouvement du pôle, temps universel *UT1* et la longueur du jour *LOD*).

L'utilisation de ces séries temporelles permet une meilleure interprétation géophysique des mouvements observés des stations. En effet, la composante horizontale est principalement liée aux mouvements des plaques tectoniques, tandis que la composante verticale est associée aux subsidences et aux phénomènes géophysiques locaux.

L'analyse des solutions individuelles permet de:
- Mettre en évidence les systématismes de chaque technique afin de les prendre en considération dans le processus de la combinaison pour une meilleure détermination du repère de référence;
- Etudier les phénomènes géophysiques qui altèrent les positions des stations du réseau.

Donc, les séries temporelles des produits géodésiques sont d'un intérêt primordial dans la compréhension du signal résiduel qui peut être lié à un phénomène géophysique local, à l'instrumentation ou aux stratégies d'analyse et de modélisation. Ce signal est composé, généralement, d'une tendance, des composantes saisonnières et des bruits. L'objectif de cet article s'articule sur l'estimation et la description de ces signaux périodiques et de ces bruits présents dans les séries temporelles des paramètres d'intérêt.

Plusieurs études ont été effectuées dans ce contexte. [Ding et al., 2005] ont réalisé une analyse fréquentielle des séries temporelles de positions de quelques stations en co-localisation (GPS et VLBI), en focalisant sur les composantes saisonnières et interannuelles dans ces séries. La transformée en ondelettes a été utilisée pour examiner le contenu spectral des données, ainsi que les magnitudes et les phases des signaux saisonniers ont été estimées par moindres carrés. [Collilieux et al., 2007] ont comparé les séries temporelles d'altitude fournis par les techniques GPS, SLR et VLBI, pour détecter les erreurs systématiques de chacune des techniques. Ils ont utilisé une nouvelle méthode basée sur le filtre de Kalman et l'estimation du maximum de vraisemblance (ou en Anglais, Maximum Likelihood Estimation: MLE) pour détecter les similarités dans les séries temporelles d'altitude et pour calculer les coefficients de corrélation.

[Feissel et al., 2006] 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 ceux fournies par l'analyse des mouvements globaux des fluides géophysiques.

[Ray & Altamimi, 2005] ont focalisé leurs efforts dans le rattachement entre les techniques VLBI et GPS dans les sites de co-localisation pour réaliser un repère précis avec seulement quelques années de données. Récemment, [Feissel et al., 2007] ont étudié la stabilité du positionnement par les techniques VLBI, SLR, DORIS et GPS, en se basant sur l'analyse de la variance d'Allan et la méthode du tricorne (TCH).
La méthode adoptée se base sur l'analyse spectrale pour l'estimation des signaux périodiques par le programme FAMOUS, établi à l'Observatoire de la Côte d'Azur OCA – France *(Frequency Analysis Mapping On Unusual Sampling)* [Mignard, 2004; 2005] et sur la variance d'Allan [Allan, 1966; 1987] pour l'étude du bruit (estimation du type et niveau de bruit) et ceci pour comprendre le comportement de ces mouvements et pour faciliter leur interprétation.

La section 2 décrit la méthodologie d'analyse adoptée pour l'étude des séries temporelles de position. Les données disponibles (relativement anciennes) sont décrites dans la section 3. Elles concernent les séries temporelles des coordonnées résiduelles de stations estimées à partir des observations des techniques SLR, GPS, VLBI et DORIS référées par rapport à l'ITRF2000. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les sections 4 et 5.

2. Méthodologie d'analyse

2.1 Analyse fréquentielle par FAMOUS

Le programme 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. Ce programme effectue une analyse fréquentielle d'un signal temporel à échantillonnage non régulier. En effet, les données à analyser qui concernent les séries temporelles des produits de géodésie spatiale ne sont pas régulièrement échantillonnées (présence des trous d'observations; c'est le cas des séries de GPS, SLR et DORIS; ou irrégularité d'échantillonnage; c'est le cas des séries VLBI).

Ce programme permet de détecter les périodes présentes dans le signal et estime par la suite les amplitudes et phases associées à ces dernières, en utilisant l'ajustement non linéaire de Levenberg-Marquardt. L'algorithme de FAMOUS (*cf.* Figure 1) décompose une série temporelle $y(t)$ sous forme d'une série de Poisson dont il η_k va déterminer les fréquences et les coefficients $C_k(t)$ et $S_k(t)$:

$$X(t) = C_0(t) + \sum_k \left[C_k(t).cos(2\pi.\eta_k.t) + S_k(t).sin(2\pi.\eta_k.t) \right] \qquad (1)$$

Où, $C_0(t)$, $C_k(t)$, $S_k(t)$ sont des polynômes dont le degré est fixé par l'utilisateur, de la forme suivante, par exemple :

$$C_k(t) = c_0 + c_1.t + c_2.t^2 + ... + c_n.t^n \qquad (2)$$

Avec, n étant le degré maximum fixé par l'utilisateur.

La première étape de l'algorithme consiste à soustraire une tendance polynomiale de la série temporelle, ajustée par la méthode des moindres carrés. Ensuite, un premier périodogramme de la série résiduelle est calculé par moindres carrés en un jeu de fréquences. Pour chaque fréquence, une constante et les coefficients des sinus et cosinus sont ajustés par moindres carrés. La fréquence possédant la plus grande amplitude est alors retenue et ré-estimée par un ajustement non-linéaire pour détecter la fréquence significative suivante. À chaque étape, toutes les fréquences, ainsi que la tendance, sont réajustés par la méthode de Levenberg-Marquard. L'algorithme s'arrête lorsqu'un nombre de fréquence imposé par l'utilisateur est estimé (*cf.* Figure 1).

La dernière étape consiste à analyser et filtrer les fréquences retenues suivant deux principaux critères: la résolution fréquentielle et le rapport signal sur bruit (SNR) des pics de fréquences. La signification de ces lignes spectrales est évaluée dans le domaine spectral en divisant l'amplitude par la valeur médiane du bruit calculé une fois la ligne spectrale retirée. La valeur adoptée du SNR est de 3.0 pour analyser les séries temporelles des produits de géodésie spatiale. Pour plus de détails sur ce logiciel, il est nécessaire de se référer à la documentation de FAMOUS [Mignard, 2005].

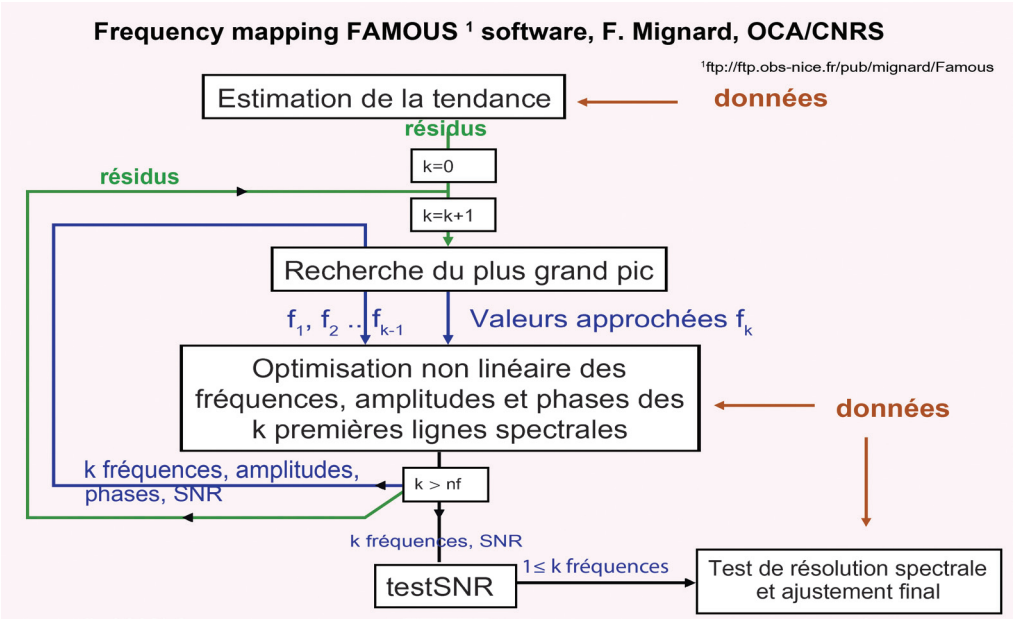

Fig. 1 Algorithme du programme FAMOUS. SNR: rapport signal sur bruit

2.2 Estimation du bruit par la variance d'Allan

La variance d'Allan est un outil très utilisé dans le domaine temporel et fréquentiel, notamment dans l'étude de la stabilité des horloges atomiques au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). C'est un *dépliement* de la variance usuelle dans le domaine temps.

Considérons $(X_j)_{j=1,N}$ un processus stochastique dont les réalisations X_j sont faites à intervalle de temps constant τ_0, figure (2). Pour un temps d'échantillonnage donné τ (τ est multiple de τ_0, tel que : $\tau = M\,\tau_0$), décomposons l'échantillon initial en sous-échantillons de longueur τ que l'on note : $(X_k)_{k=\{i,i+M-1\}}$, $i \in \{1, N-M+1\}$.

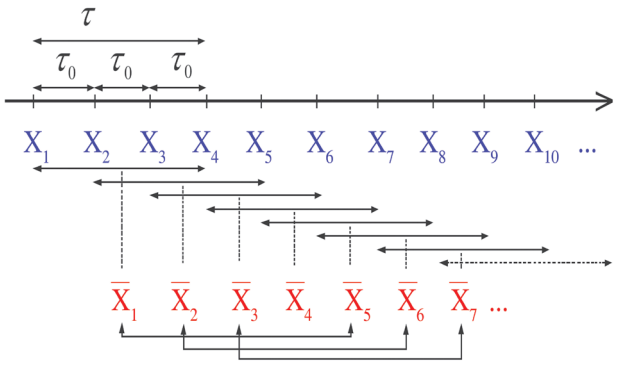

Fig. 2 Principe de sous-échantillonnage par la variance d'Allan

La variance d'Allan, pour le temps d'échantillonnage τ, est définie comme suit :

$$\sigma_{A_X}^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2M+1)} \sum_{k=1}^{N-2M+1} \left(\overline{X}_{k+M,M} - \overline{X}_{k,M}\right)^2 \qquad (3)$$

La détermination du type de bruit, affectant une série temporelle X, se base sur l'analogie de la variance d'Allan avec la densité spectrale de puissance S_X. D'après [LeBail, 2004], les bruits observés peuvent être de deux natures différentes:

– ***bruit blanc :*** c'est un bruit non corrélé avec le temps (i.e., invariant avec le temps) dont l'amplitude peut être facilement diminuée en augmentant le nombre de mesures faites.
– ***bruit coloré :*** bruit de scintillation *(ou flicker noise)* et marche aléatoire *(ou random walk)*: c'est un bruit corrélé avec le temps. Il présente un problème : si le nombre de mesures est trop grand, son amplitude augmente jusque tendre vers des valeurs infinies. Ces bruits sont bien connus dans le domaine spectral où on les détermine à partir de la fonction de densité spectrale de puissance.
L'expression de la variance d'Allan en fonction de la densité spectrale S_X est donnée par :

$$\hat{\sigma}_{A_X}^2(\tau) = \tau^{-2} \cdot 2\int_0^{+\infty} f^{-2} S_X(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{\pi^2} df = \tau^{-2} \cdot c^{te} \qquad (4)$$

En passant par la fonction logarithmique de l'équation précédente, on obtient :

$$\log\left[\hat{\sigma}_{A_X}^2(\tau)\right] = \mu \cdot \log(\tau) + c^{te} \qquad (5)$$

Le coefficient μ; généralement estimé par la méthode des moindres carrés; permet de déterminer le type de bruit :

– si $\mu = -1$, $\alpha = 0$: on a un bruit blanc ;
– si $\mu = 0$, $\alpha = -1$: on a un bruit de scintillation;
– si $\mu = 1$, $\alpha = -2$: on a une marche aléatoire.

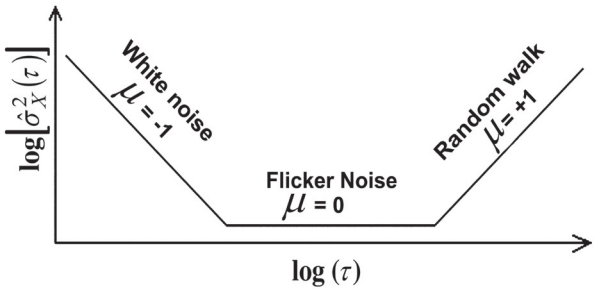

Fig. 3 Diagramme d'Allan : Représentation de la variance d'Allan en échelle Log-Log

2.3 Méthode TCH

[Gray & Allan, 1974] ont introduit pour la première fois la méthode classique du tricorne pour l'étude de la stabilité des horloges atomiques. [Weiss & Allan, 1986] ont utilisé cette méthode pour déterminer la précision des horloges GPS.

Quand plusieurs mesures sont disponibles pour le même signal, la variance et la covariance peuvent être évaluées directement à partir des ensembles de mesures sous certaines hypothèses algébriques: une telle méthode est connue sous le nom de Technique du tricorne *(Three-Corner Hat: TCH)* [Premoli & Tavella, 1993]. L'algorithme de cette technique permet, pour trois séries de mesures indépendantes décrivant le même phénomène, d'estimer la variance d'Allan de chacune d'elles [Feissel et al., 2007]. Il est basé sur l'hypothèse que la partie commune des trois séries de mesures est un signal vrai et que la partie non commune est considérée comme un bruit pur (i.e., séries non corrélées).

Pour chaque série temporelle $X_k(t)$, k=1,3, on a :

$$X_k(t) = X(t) + \varepsilon_k(t) \qquad (6)$$

Avec:

$X(t)$: est le signal vrai,
$\varepsilon_k(t)$: est le bruit de la série de mesures k.

En formant les différences entre ces séries et cherchant leurs variances d'Allan pour un temps d'échantillonnage τ, on obtient:

$$\sigma^2_A(X_1 - X_2, \tau) = \sigma^2_A(\varepsilon_1, \tau) + \sigma^2_A(\varepsilon_2, \tau)$$
$$\sigma^2_A(X_1 - X_3, \tau) = \sigma^2_A(\varepsilon_1, \tau) + \sigma^2_A(\varepsilon_3, \tau) \quad (7)$$
$$\sigma^2_A(X_2 - X_3, \tau) = \sigma^2_A(\varepsilon_2, \tau) + \sigma^2_A(\varepsilon_3, \tau)$$

La détermination des variances des bruits de chaque série est faite par la résolution du système (7) par la méthode de Cramer.

Cette technique peut être étendue à plus de trois séries, en gardant l'hypothèse d'indépendance des séries. Le système étant surdéterminé, on peut le résoudre par un ajustement par moindres carrés.

Cette méthode a été généralisée dans le domaine temps et fréquence sous l'hypothèse que les bruits des différentes séries sont corrélés mais cette corrélation est très faible [Premoli & Tavella, 1993]. Ce concept a été appliqué avec succès par [Koot et al., 2006] dans le domaine de la géodésie pour la validation des séries temporelles des moments angulaires atmosphériques et par [Feissel et al., 2007] dans l'évaluation de la stabilité du positionnement par les techniques de la géodésie spatiale.

3. Description des données utilisées

Les données utilisées concernent les séries temporelles des sites en co-localisation, décrites dans le tableau (1). La figure (4) illustre la distribution géographique de ces sites. Ces données regroupent l'ensemble des séries de coordonnées géographiques résiduelles (Latitude, Longitude, Altitude) de 127 stations réparties sur 44 sites, i.e., zones où se trouvent des stations proches l'une à l'autre d'une manière à les supposer appartenir au même voisinage physique. Dans ce cas, les distances intra-sites n'excèdent pas 5 km pour considérer que les signaux résiduels de ces stations ont un comportement commun [Feissel et al., 2007].

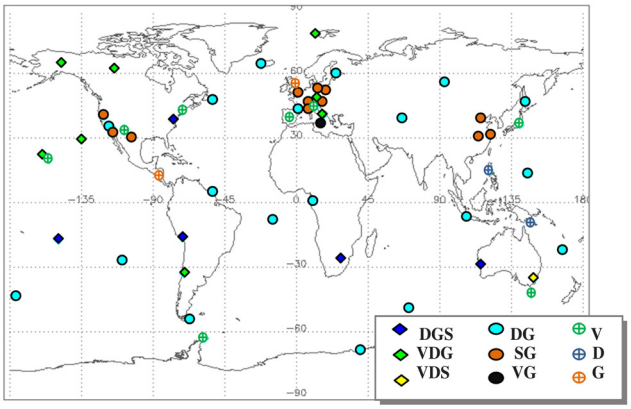

Fig. 4 Répartition des sites en co-localisation des techniques de Géodésie spatiale. Les techniques DORIS, GPS, VLBI et SLR sont désignées dans la figure, par les lettres D, G, V et S respectivement

Les données sont relativement anciennes et sont référées à l'ITRF2000. Elles concernent les séries temporelles de positions des stations, sur une période de 13 ans (entre 1993 et 2006). Ces solutions (archivées dans des fichiers SINEX) ont été calculées par les centres d'analyse officiels des services de l'Association Internationale de Géodésie (AIG) tels que (ILRS, IGS, IVS et IDS) et traitées par le logiciel CATREF *(Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames)* [Altamimi et al., 2005a; 2005b; 2002].

D'après la figure (4), il est clair que la répartition et le nombre des sites en co-localisation ne sont pas équitables entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud. On remarque aussi qu'il y a seulement deux sites sur tout le continent africain (Afrique du Sud et Gabon), par rapport à l'Europe qui abrite plus de 10 sites. Les réseaux DORIS et GPS sont plus denses par rapport à ceux de SLR et VLBI.

Les moyennes des précisions, mesurées par les erreurs moyennes quadratiques pondérées (WRMS), des coordonnées géographiques de toutes les stations et par technique sont listées dans le tableau (1). Les résultats montrent que les solutions GPS et VLBI sont les plus précises en positionnement horizontal, de l'ordre de ± 5-6 mm, et que celle du SLR est la plus précise en positionnement vertical de l'ordre de ± 5 mm.

Généralement, les moyennes des WRMS en position 3D de ces trois techniques sont du même ordre. Cependant, pour la technique DORIS le constat est différent. Les moyennes des précisions de cette technique sont de l'ordre de ± 15 mm, ± 11 mm et ± 19 mm, en positionnement horizontal, vertical et 3D, respectivement.

Tableau 1. Statistiques des séries temporelles de coordonnées des sites en co-localisation

Tech.	Sites	Début – Fin	Moy (σ_{LAT})	Moy (σ_{LON})	Moy (σ_{H})	Moy (σ_{3D})
DORIS	37	1993.1 – 2006.1	12.7	9.2	10.7	19.2
GPS	49	1996.2 – 2006.1	3.6	4.0	7.9	9.7
SLR	19	1993.1 – 2006.1	6.3	6.3	5.2	8.7
VLBI	22	1988.0 – 2006.2	4.3	5.0	7.2	9.8

On constate que la précision en altitude est moindre par rapport à celle des deux coordonnées horizontales dans le cas des techniques GPS et VLBI. Ceci est dû principalement au délai zénithal (effet troposphérique) sur la composante verticale. Dans le cas de la technique SLR, la précision est meilleure en composante verticale qu'en composantes horizontales, du fait que cette technique est moins sensible à l'effet atmosphérique et que les erreurs radiales de l'orbite des satellites, qui sont en corrélation avec la composante verticale de la position de la station,

sont moins importants que les erreurs tangentielles et normales. Les erreurs radiales sont les plus décisives pour garantir la précision de la technique Laser.

4. Estimation des signaux périodiques dans les positions des stations

L'analyse des séries temporelles des appoints des coordonnées géographiques de stations est d'un intérêt primordial pour l'étude des mouvements de ces stations qui sont dues à des phénomènes géophysiques.
La figure (5) illustre la distribution des signaux saisonniers annuels suivant les différentes techniques (GPS, VLBI, SLR et DORIS), en utilisant les conventions de représentation employées par [Collilieux et al., 2007]. Ainsi un vecteur pointant directement le Nord décrit un mouvement saisonnier ayant un maximum en janvier, ou un vecteur pointant l'Est décrit cependant un mouvement saisonnier maximum en Avril. La norme du vecteur représente l'amplitude du signal et son orientation désigne la phase, comptée positivement dans le sens rétrograde à partir du Nord, selon la formule $A * \cos(\omega(t - t_0) + \varphi)$. Ces vecteurs sont estimés par le programme FAMOUS.

Ces signaux périodiques sont liés aux modèles géophysiques résiduels tels que les effets de charges atmosphériques, océaniques ou hydrologiques pour la composante altimétrique et les effets des mouvements tectoniques et d'affaissements de l'écorce terrestre (subsidences) pour les composantes planimétriques. Ils ont été estimés avec un ratio signal sur bruit SNR >3.0 (i.e., signaux significatifs). D'après le tableau (2), la magnitude des signaux semi-annuels est de l'ordre de 8mm, 1mm, 4mm et 3mm en planimétrie, respectivement suivant les techniques, DORIS, GPS, SLR et VLBI. Elle est de l'ordre de 5 mm, 2 mm, 2 mm et 4mm, en altimétrie. Concernant la magnitude des signaux annuels, elle est de l'ordre de 11mm, 1mm, 5mm et 2mm en planimétrie, suivant les techniques, DORIS, GPS, SLR et VLBI, respectivement. En altimétrie, la magnitude obtenue est de l'ordre de 8mm, 3mm, 4mm et 3mm.

D'après la figure (5), on constate que les signaux estimés, suivant les différentes techniques, ne sont pas corrélés ou peu corrélés entre eux, c.-à-d., que les signaux d'origine géophysique ne sont pas reflétés de la même façon par ces techniques. Cela peut s'expliquer par le fait que ces techniques sont indépendantes entre elles en termes de principe de mesure, de modélisation, etc.
D'après [Altamimi et al., 2007], une investigation plus poussée de la partie non linéaire de ces séries temporelles peut révéler la présence d'effets systématiques de la technique utilisée au lieu des causes géophysiques.

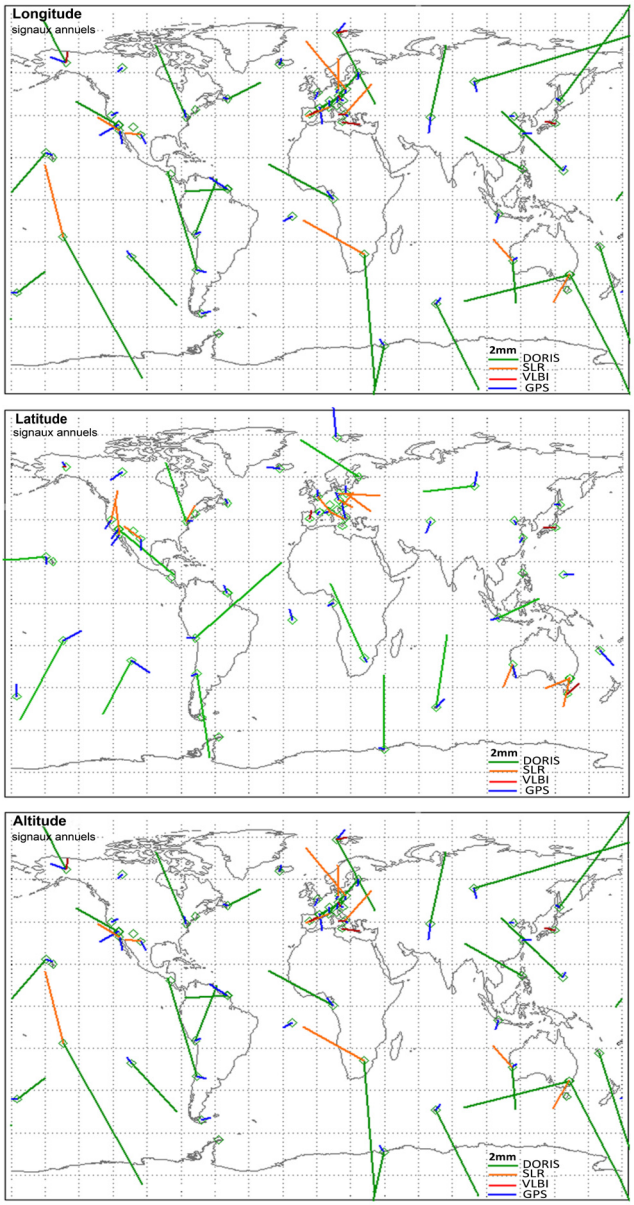

Fig. 5 Signaux annuels des coordonnées géographiques des sites en co-localisation

Le tableau (2) illustre les statistiques des amplitudes des signaux annuels et semi-annuels suivant les trois coordonnées géographiques et correspondantes aux différentes techniques. Il est clair que les valeurs les plus larges correspondent aux signaux détectés dans les séries temporelles DORIS, tandis que les amplitudes les plus petites concernent les signaux des séries GPS (*cf.* Figure 5).

En général, les valeurs des moyennes des amplitudes ne dépassent pas 1 cm. On constate aussi qu'il y a un facteur d'environ 2 entre les amplitudes moyennes des signaux annuels et semi-annuels, pour les différentes techniques.

Tableau 2. Statistiques des amplitudes estimées des signaux périodiques par technique

		Signaux semi-annuels			Signaux annuels		
Technique	Coordonnée	Min (mm)	Max (mm)	Moy (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Moy (mm)
DORIS	LAT	3.3	9.6	5.7	5.1	12.7	7.9
	LON	1.0	6.6	4.5	0.4	16.6	8.3
	H	3.2	10.0	5.4	3.4	16.1	8.3
GPS	LAT	0.2	1.3	0.6	0.2	3.0	1.0
	LON	0.3	1.1	0.5	0.4	2.4	0.9
	H	0.7	4.2	1.7	0.9	8.1	3.1
SLR	LAT	1.3	3.3	2.7	1.6	4.8	2.6
	LON	1.2	4.5	2.5	1.8	7.8	4.2
	H	1.1	3.6	2.0	1.1	6.8	3.6
VLBI	LAT	0.5	7.3	2.2	0.4	1.6	1.0
	LON	0.5	3.3	1.8	0.4	2.0	1.1
	H	1.3	7.8	3.7	1.6	6.9	3.4

La figure (6) montre les histogrammes, en coordonnées polaires, des signaux périodiques annuels des composantes géographiques suivant les différentes techniques. On constate une distribution assez uniforme des phases annuelles. Cependant, une distribution orientée, vers une direction spécifique, signifie la présence d'un signal artificiel causé, par exemple par un systématisme dans le traitement et dans la modélisation. Les modèles géophysiques décrivant la variation temporelle de la Terre solide n'indiquent aucune périodicité annuelle significative dans les coordonnées des stations.

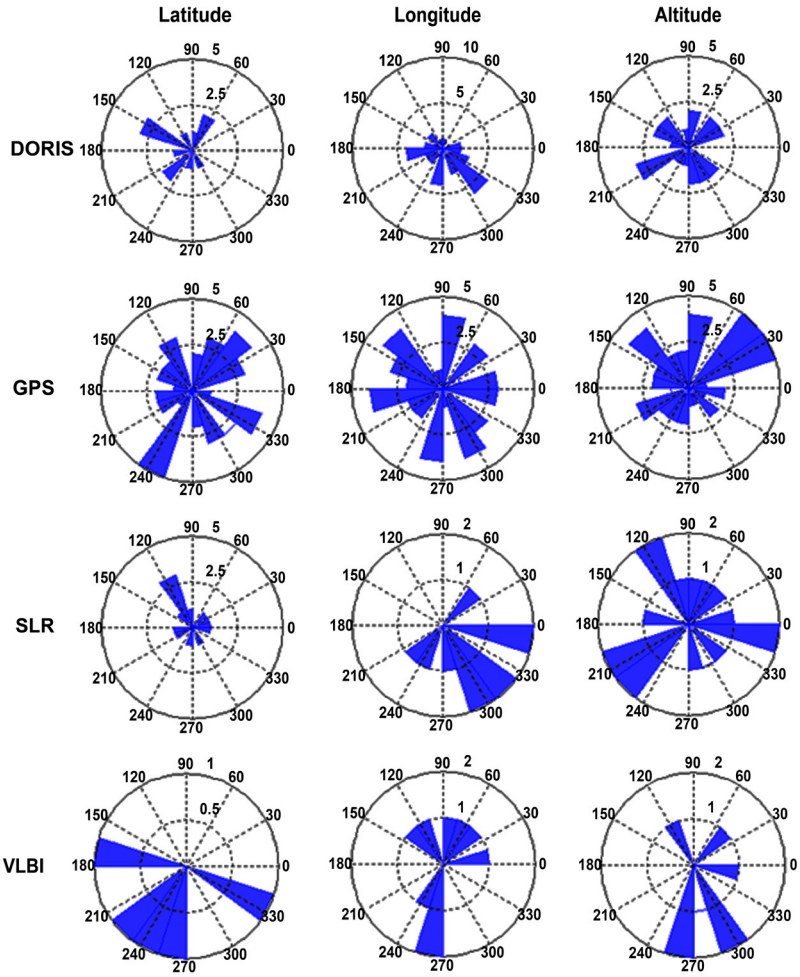

Fig. 6 Histogrammes polaires des distributions de phases (en degrés) des signaux annuels pour les coordonnées des sites en co-localisation

A titre d'exemple, la figure (7) illustre les séries temporelles de positions du site en co-localisation de Greenbelt (États Unis).

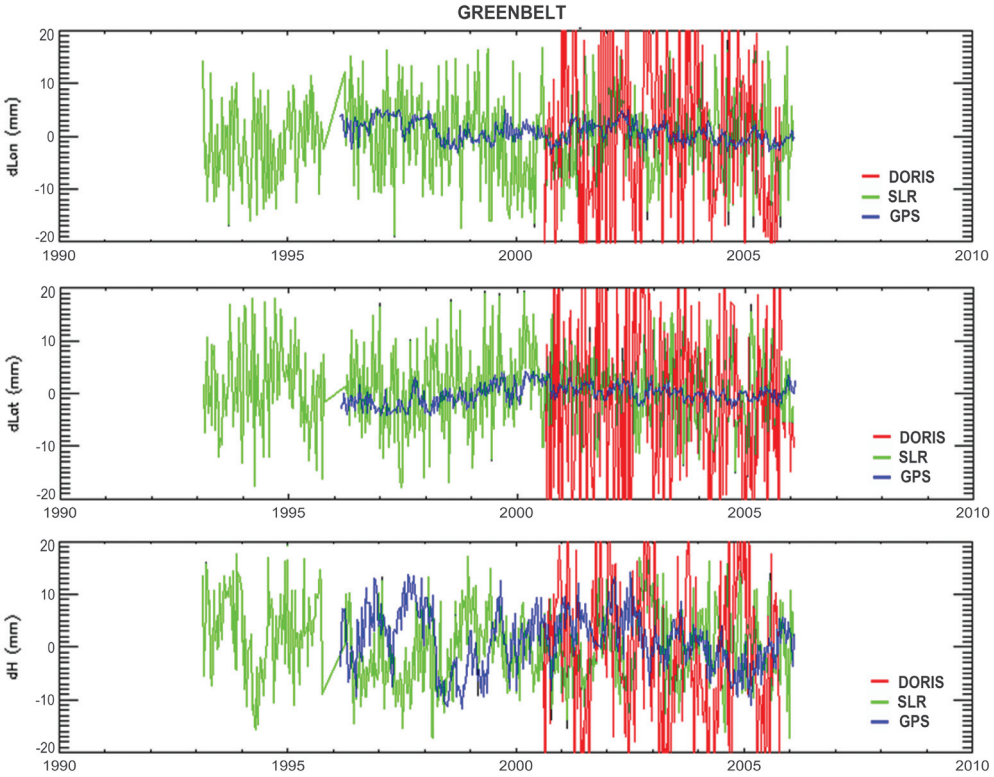

Fig. 7 Séries temporelles des coordonnées résiduelles du site en co-localisation de Greenbelt

5. Caractérisation des bruits dans les positions des stations

Dans cette partie de traitement, on s'intéresse aux bruits (type et niveau) qui affectent nos séries temporelles des positions des stations par technique. Dans ce contexte, l'analyse adoptée se base sur des méthodes statistiques telles que la variance d'Allan et la technique du tricorne (TCH) [Feissel et al., 2007; 2006; Le Bail, 2004]. Ceci permet d'accéder à la stabilité de chacune des techniques et de chacun des sites, par l'étude des types et des niveaux de bruit. Pour cela, nous avons corrigé ces séries de la tendance linéaire (exprimant le mouvement tectonique global) et des signaux saisonniers (principalement, des signaux annuels, semi-annuels).

Comme interprétation des résultats dans cette étude, un bruit blanc *(white noise)* dans les séries temporelles correspond aux erreurs aléatoires affectant les mesures (erreurs gaussiennes); tandis qu'un bruit coloré de scintillation *(flicker noise)* est dû à la géodynamique locale, à une défaillance instrumentale, ou à des erreurs systématiques de modélisation. Concernant le bruit de la marche aléatoire *(random walk noise)*, elle est causée par des sauts (non corrigés) dans les séries temporelles. Cependant, ce dernier type de bruit n'a pas été détecté dans nos séries.

Le tableau (3) donne les valeurs moyennes et les écarts types de l'estimation du niveau de bruit sur les coordonnées des stations pour chaque technique. La technique VLBI permet un positionnement 3D fiable et précis avec un niveau de 1 mm en horizontal et de 3 mm en vertical. Cependant, la technique DORIS est la plus bruitée donc la moins précise avec un niveau de 7-10 mm en horizontal et de 7 mm en vertical.

Tableau 3. Niveau de bruit, exprimé en mm, de toutes les stations par technique

	Niveau de bruit (mm)		
Technique	LAT	LON	H
DORIS	9.9 ± 3.9	7.6 ± 2.4	7.3 ± 2.3
GPS	2.0 ± 3.8	1.4 ± 2.5	2.5 ± 2.2
SLR	3.6 ± 1.6	3.9 ± 1.0	3.1 ± 1.1
VLBI	1.1 ± 0.7	1.1 ± 0.8	2.9 ± 1.6

La figure (8) illustre une vue synthétique des évaluations de la stabilité des stations. Le niveau de bruit est représenté en fonction de la pente du graphe d'Allan (ce qui est équivalent au type de bruit), suivant les trois coordonnées géographiques et pour chaque technique. À travers les résultats obtenus, on peut faire les constations suivantes:

- Les paramètres de stabilité représentés sous forme de triangles se regroupent en nuages de points assez compacts, ayant de différentes caractéristiques dépendantes de la technique et de la coordonnée, mais avec quelques valeurs aberrantes (élevées). Ces paramètres sont nécessaires pour la description de la qualité des mesures du mouvement des stations.

- Un bruit blanc dominant dans les trois coordonnées des positions des stations SLR et DORIS. Dans quelques stations de ces deux techniques, un bruit de scintillation existe, notamment dans la composante verticale des stations SLR. Ceci peut être la cause d'une erreur systématique liée à la modélisation. En effet, la composante verticale est très corrélée avec le biais en distance. Donc, il est judicieux d'appliquer la méthode de la décorrélation temporelle [Coulot, 2005], pour minimiser de tels bruits dans ces séries.

- Un mélange de bruits blancs et de Scintillation est fortement présent dans les trois composantes de la position des stations GPS et VLBI. Pour le GPS, le bruit de Scintillation est très fréquent dans la coordonnée latitudinale (ou composante Est, en termes de coordonnées géodésiques locales), avec un niveau de bruit assez élevé par rapport à la coordonnée longitudinale (ou composante Nord). On remarque aussi que le niveau de bruit dans la composante verticale est sensiblement important que celui des composantes horizontales puisque cette composante est la plus bruitée à cause de l'effet du délai troposphérique. Pour le VLBI, presque 40% des stations étudiées possèdent un bruit de Scintillation dans leurs coordonnées. Ceci est dû principalement à des défaillances instrumentales ou à des mouvements tectoniques locaux. Vraisemblablement, la présence de biais instrumental, du aux antennes utilisées, est la cause la plus probable. Dans ce cas, le niveau de bruit de la composante verticale est trois fois plus important que celui des deux autres composantes.

- Les niveaux de bruits des coordonnées des stations DORIS sont les plus élevés par rapport à ceux des autres techniques atteignant des valeurs de 7 à 9 mm, en moyenne, (*cf.* Tableau 3). Le type caractérisant ces bruits est le bruit blanc qui est dû aux erreurs de mesures de cette technique.

En termes de positionnement horizontal, les stations VLBI sont les plus stables, au niveau de 1 mm, par rapport aux stations GPS (de l'ordre de 2 mm). Le niveau de bruit de la technique SLR est de l'ordre de 4 mm. Cependant, les stations DORIS sont les moins stables avec un niveau de bruit moyen de 9 mm et avec des valeurs extrêmes qui dépassent 15 mm. On constate aussi que les stations DORIS sont moins stables dans la direction Est-Ouest que dans la direction Nord-Sud (9.9 mm et 7.6 mm, respectivement). Ceci résulte de la dominance des passages des satellites embarquant le système DORIS dans les directions Nord-Sud et Sud-Nord, au dessus des stations.

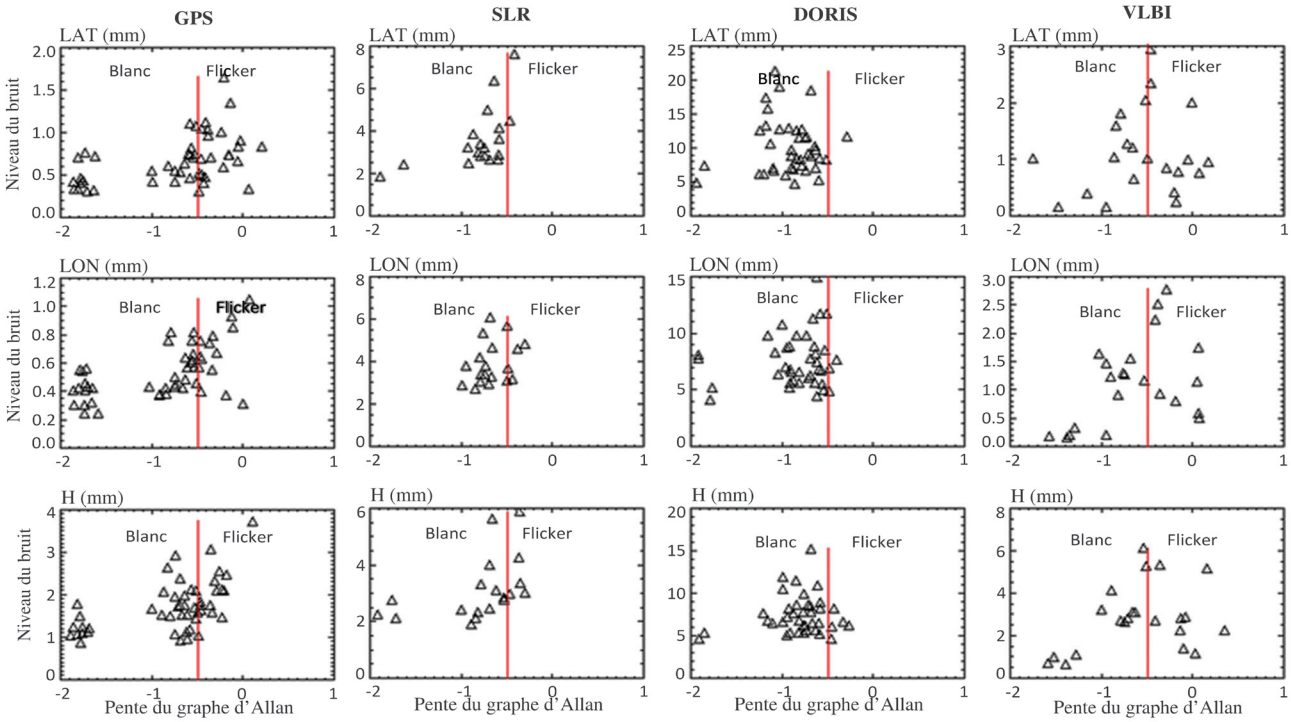

Fig. 8 Distribution du type de bruit (abscisse) et niveau de bruit (ordonnée) pour les coordonnées géographiques de l'ensemble des stations GPS, SLR, DORIS et VLBI

- En termes de positionnement vertical, les stations GPS, SLR et VLBI sont les plus stables avec un niveau de 3 mm. Par contre, on observe un niveau de bruit moyen de l'ordre de 7 mm pour DORIS. Les mesures GPS et DORIS peuvent être affectées d'une part du délai de la propagation troposphérique et d'autre part des corrections imprécises du centre de phase.

- Quelques anomalies (valeurs larges) du niveau de bruit, constatées dans quelques stations, sont dues principalement à l'existence des trous (manques de données de plusieurs mois) dans les séries temporelles, à des problèmes d'antenne, etc.

- L'application de la méthode du Tricorne est basée sur l'hypothèse que les séries temporelles des coordonnées des stations d'un site ont le même signal géophysique [Le Bail, 2004; Roberts et al. , 2002]. En effet, les sites de co-localisation traités ont été choisis sur la base de la proximité de leurs stations dans un rayon de 5 km (où on peut considérer que ces stations appartiennent au même site physique, géologiquement), de la durée commune entre les séries temporelles qui excède 2 ans et du nombre de 03 des techniques de géodésie spatiale installées *in-situ*. Ces sites concernent Greenbelt et Fort Davis (Amérique du nord), Wettzell et Matera (Eurasie), Yaragadee (Australie), Tahiti (Pacifique) et Arequipa (Amérique du sud). Le tableau (4) résume les résultats obtenus sur le calcul du niveau de bruit des techniques (SLR, DORIS et GPS) dans les sites co-localisés. On remarque une concordance entre les résultats de la méthode du tricorne (TCH) et de la variance d'Allan.

Tableau 4. Niveaux du bruit des techniques de quelques sites co-localisés

			Déviation d'Allan à un 1 an d'échantillonnage (mm)		
Station	Coordonnée	Méthode	SLR	DORIS	GPS
Greenbelt	LAT	TCH/site	3.1	6.9	1.4
(Etats Unis)		Niveau	3.2	6.7	0.8
	LON	TCH/site	3.4	6.6	1.6
		Niveau	3.4	6.5	0.9
	H	TCH/site	2.1	5.9	3.3
		Niveau	3.4	6.8	2.6
Yaragadee	LAT	TCH/site	3.3	10.8	0.7
(Australie)		Niveau	3.1	11.0	1.2
	LON	TCH/site	3.5	8.0	2.8
		Niveau	4.0	8.4	0.8
	H	TCH/site	2.3	8.5	2.8
		Niveau	3.4	8.5	3.3
Tahiti	LAT	TCH/site	6.0	9.9	2.2
(Pacifique)		Niveau	4.5	9.5	1.3
	LON	TCH/site	6.7	11.7	–
		Niveau	4.9	11.2	0.9
	H	TCH/site	2.9	8.9	3.2
		Niveau	3.5	7.8	3.0
Arequipa	LAT	TCH/site	2.7	19.8	4.2
(Pérou)		Niveau	4.4	21.6	1.7
	LON	TCH/site	3.4	10.4	0.4
		Niveau	3.3	10.9	0.9
	H	TCH/site	2.7	11.2	3.7
		Niveau	3.6	12.1	2.9
			SLR	GPS	VLBI
Matera	LAT	TCH/site	7.2	0.5	1.4
(Italie)		Niveau	6.7	0.8	1.1
	LON	TCH/site	5.5	0.6	1.4
		Niveau	5.9	0.5	1.3
	H	TCH/site	4.6	2.3	2.9
		Niveau	5.1	1.7	3.0
Wettzell	LAT	TCH/site	2.9	0.6	1.1
(Allemagne)		Niveau	3.1	0.6	1.2
	LON	TCH/site	3.8	0.6	1.2
		Niveau	4.1	0.5	1.3
	H	TCH/site	4.3	1.7	3.1
		Niveau	4.8	1.7	3.0

On constate une nette différence des niveaux de bruit entre les techniques (*cf.* Tableau 5). Les résultats montrent que les techniques (VLBI et GPS) sont les plus précises en positionnement 2D. Quant en positionnement vertical, les techniques SLR, VLBI et GPS sont très proches avec un niveau de bruit de l'ordre de 3 mm. Cependant, la technique DORIS reste la plus bruitée avec un niveau de bruit de l'ordre de 10.6 mm en planimétrie (2D) et de 8.6 mm en vertical.

Le ratio du niveau de bruit en composante verticale et la moyenne de niveau de bruit en horizontal est de 2.5 (pour VLBI), 2.2 (pour GPS), 0.7 (pour SLR) et 0.8 (pour DORIS). On constate que le niveau du bruit en altitude est plus important que celui en 2D pour les techniques radioélectriques (VLBI et GPS), à cause de la difficulté de modélisation de la propagation du signal dans la troposphère. D'après [Feissel-Vernier et al., 2007], les séries temporelles GPS peuvent encore contenir un signal dû aux variations interannuelles de l'échelle du système terrestre de référence sous-jacent, qui peut être interprété comme un bruit dans la composante verticale des stations.

Tableau 5. Moyennes des niveaux de bruit suivant la méthode TCH des sites de co-localisation

	Déviation d'Allan : méthode TCH (mm)			
Coordonnée	SLR	DORIS	GPS	VLBI
LAT	4.1	11.9	1.6	1.0
LON	4.3	9.2	1.0	0.9
2D	4.2	10.6	1.3	1.0
H	3.1	8.6	2.8	2.5
3D	**6.7**	**17.3**	**3.4**	**2.8**
Ratio: σ_H/σ_{2D}	0.74	0.82	2.15	2.5

6. Conclusion

Nous avons présenté les résultats de l'analyse des séries temporelles des coordonnées des stations issues des techniques de géodésie spatiale. Cette analyse est scindée en deux parties : analyse fréquentielle et étude du bruit de ces séries temporelles.

Les données traitées ont concerné des sites en co-localisation, réparties d'une façon non homogène entre les deux hémisphères nord et sud. La qualité 3D des séries temporelles des coordonnées de ces sites est assez homogène pour les techniques SLR, GPS et VLBI, de l'ordre de ± 10 mm. Cependant, pour la technique DORIS, elle est de l'ordre de ± 19 mm.

L'analyse fréquentielle a été utilisée pour détecter et estimer les signaux périodiques, dans les séries temporelles des positions des stations. Les résultats fournis par le programme FAMOUS sur les coordonnées résiduelles des stations, ont révélé la présence de termes saisonniers (annuels et semi-annuels) qui sont liés, généralement, aux modèles géophysiques résiduels tels que les effets de charges atmosphériques, océaniques ou hydrologiques, pour la composante verticale et les effets des mouvements tectoniques et de subsidences, pour les composantes horizontales. La magnitude de ces signaux, soit en planimétrie ou en altimétrie, est variable suivant la technique utilisée. Les signaux de petites amplitudes sont détectés dans les séries temporelles du GPS de l'ordre de 1–3 mm. Alors que pour DORIS, ils sont de l'ordre de 5–11 mm. Pour les techniques SLR et VLBI, les amplitudes sont équivalentes et de l'ordre de 2–5 mm. Un facteur d'environ 2 entre les amplitudes des signaux annuels et semi-annuels, a été constaté, pour les techniques DORIS, GPS et SLR, surtout en composante verticale.

L'analyse du bruit, qui se base sur la variance d'Allan, a été effectuée pour étudier la stabilité du positionnement des différentes techniques. Les résultats ont montré une dominance d'un bruit gaussien (bruit blanc), dû aux erreurs de mesures, dans la majorité des séries temporelles de coordonnées des stations, suivant les techniques SLR et DORIS. Cependant, un bruit de scintillation a été détecté, dans environ 30% et 40% des stations GPS et VLBI, respectivement. Ceci est dû probablement à des biais instrumentaux liés aux antennes. Le niveau du bruit du positionnement pour la technique VLBI est le plus faible, de l'ordre de 1 mm en planimétrie et de 3 mm en altimétrie. Cependant, il est le plus élevé dans le cas de la technique DORIS avec un niveau moyen de 7-10 mm en composantes horizontales et de 7 mm en composante verticale.

Généralement, le niveau du bruit de la composante verticale est plus important que celui des composantes horizontales, à cause de l'effet du délai troposphérique sur cette coordonnée et / ou des corrections imprécises du centre de phase dans la modélisation, surtout pour les techniques VLBI, GPS et DORIS. Cette constatation a été confortée par les résultats de la méthode du Tricorne (TCH) [Feissel et al., 2007; 2006]; appliquée sur un ensemble de sites en co-localisation. Cette méthode a montré que les techniques (VLBI et GPS) sont les plus précises en positionnement 2D. S'ajoute à ces deux techniques, la technique SLR dans le positionnement vertical avec un niveau de bruit de l'ordre de 3 mm. Par ailleurs, la technique DORIS est la plus bruitée avec un niveau de bruit de l'ordre de 11 mm en planimétrie et de 9 mm en altitude.

En perspectives, il serait intéressant d'aborder :

- Le traitement des données récentes des séries temporelles de positions des stations référées par rapport à l'TRF2008;
- L'utilisation de l'analyse en ondelettes de ces séries ;
- La comparaison des signaux périodiques des stations avec ceux des modèles géophysiques récents.

Remerciements

L'auteur exprime ses remerciements au Prof. Exertier P. et à son équipe de recherche de l'Observatoire de la Cote d'Azur (OCA - Grasse, France), pour leurs soutiens scientifique et technique.

Références bibliographiques

Allan, D.W., 1966: *Statistics of Atomic Frequency Standard*. Proceedings of the IEEE, 54, N°2, 221-231.

Allan, D.W., 1987: *Time and frequency characterisation, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators*. IEEE Trans UFFC, vol. 34, n.6.

Altamimi Z., C. Boucher, Daniel Gambis, *Long-term stability of the terrestrial reference frame*, Advances in Space Research, vol. 36, page 342-349, doi:10. 1016/j.asr.2005.03.068, 2005a.

Altamimi Z., C. Boucher, P. Willis, *Terrestrial reference frame requirements within* GGOS perspective, Journal of Geodynamics, vol. 40, page 363-374, doi:10.1016/J.jog.2005.06.002, 2005b.

Altamimi Z., P. Sillard, C. Boucher, ITRF2000 : *A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications,* Journal of Geophysical Research, vol. 107, number B10, page 2214, doi:10.1029/2001JB000561, 2002.

Altamimi Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher, 2007a: ITRF2005: *A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters*. Journal of Geophysical Research, Vol.112, B09401, doi: 10.1029/2007/JB004949.

Collilieux X, Altamimi Z, Coulot D, Ray J, Sillard P (2007) *Comparison of very long baseline interferometry, GPS, and satellite laser ranging height residuals from ITRF2005 using spectral and correlation methods*. Journal of Geophysical Res. 112:B12403. doi: 10.1029/2007JB004933.

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, IGN – Juin 2008.

Coulot D., 2005 : *Télémétrie Laser sur Satellites et Combinaison de Techniques Géodésiques: Contributions aux systèmes de référence terrestres et applications*. Thèse de Doctorat. Observatoire de Paris, France.

Coulot, D., Betrio, P., Biancale, R., Loyer, S., Soudarin, L., and Gountier, A.-M., 2007: *Toward a direct combination of space-geodetic techniques at the measurement level: Methodology and main issues*. Journal of Geophysical Research, Vol. 112, B05410, doi: 10.1029/2006JB004336, 2007.

Ding XL, Zheng DW, Dong DN, Ma C, Chen YQ, Wang GL (2005) *Seasonal and secular positional variations at eight co-located GPS and VLBI stations*. J of Geodesy 79:71{81. doi:10.1007/s00190-005-0444-3.

Feissel-Vernier M, Le Bail K, Berio P D. Coulot, G. Ramillien, J.-J. Valette, *Geocentre motion measured with DORIS and SLR, and predicted by geophysical models*. J Geodesy 80:637–648. doi: 10.1007/s00190-006-0079-z, 2006.

Feissel-Vernier, M., de Viron, O., Lebail, K., *Stability of VLBI, SLR, DORIS, and GPS positioning*. Earth Planets Space, 59, 475-497, 2007.

Gray, J.E and Allan D. W., *A method for estimating the frequency stability of an individual oscillator*, Proc. 28th Annual symp. On Frequency Control, May 1974, 243-246, 1974.

L. Koot, O. de Viron, V. Dehant, *Atmospheric angular momentum time-series: characterization of their internal noise and creation of a combined series*, Journal of Geodesy., 79, 663-674, 2006.

Le Bail, K., 2004: *Étude statistique de la stabilité des stations de géodésie spatiale: Application à DORIS*. Thèse de doctorat soutenue à l'Observatoire de Paris, 10 décembre 2004, France.

Mignard, F 2004, Proceedings of the symposium *'The three-dimensional Universe with GAIA'*, 15-22, 2004.

Mignard, F., 2005: *Guide d'utilisation du logiciel FAMOUS*. Rapport interne Observatoire de la Côte d'Azur Cassiopée, Nice, France, 2005.

Premolli, A and Tavella, P; *A revisited Three-Cornered-Hat method for estimating frequency standards instability*, IEEE Trans. On instrumentation and measurement, 42, 1-10, 1993.

Ray,J., Altamimi, Z, *Evaluation of co-location ties relating the VLBI and GPS reference frames* Journal of Geodesy, 79, 189-195, doi: 10.1007/s00190-005-0456-z, 2005.

Roberts, C., Morgan, P., Rizos, C., 2002: *Allan variance applied to time series baseline results for GPS-based deformation monitoring applications*, 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and structural Applications, Berlin, Allemagne, 21-24 mai, 299-311