

# Étude Comparative des Séries Temporelles de Coordonnées de Stations Doris Issues de Trois Centres D'analyse

B. Ghezali, W. Zerhouni, H. Taibi, A. Zeggai, S. Khelifa  
Centre National des Techniques Spatiales – Division de Géodésie  
BP 13, 31200 Arzew, Algérie - b\_ghezali@yahoo.fr

**Résumé :** Le thème développé à travers cet article consiste à une étude comparative entre trois solutions DORIS, représentant des séries temporelles de jeux de coordonnées de stations DORIS, issues de trois centres d'analyse (IGN-JPL, INASAN et LEGOS/CLS). Le but de ce travail est de déterminer une(s) solution(s) DORIS adéquate(s) parmi celles fournies par trois différents centres d'analyse en vue de la réalisation du système de référence terrestre international (ITRS) combinée à la détermination de paramètres de rotation de la terre. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté une méthodologie de comparaison des séries temporelles, basée sur des tests statistiques. Les résultats obtenus ont démontré que les solutions des deux centres d'analyses IGN-JPL et INASAN présentent les mêmes caractéristiques (corrélation, indice de stabilité) et que les combiner reviendrait à doubler le poids de la solution. Dans ce cas, opter pour une seule solution (IGN ou INA) est plus correct.

**Mots-clés :** Série temporelle, DORIS, ITRS, ITRF, corrélation, stabilité.

**Abstract :** The topic developed through this paper consists with a comparative study between three DORIS solutions, representative of the time series of DORIS stations coordinates, resulting from three analysis centers (IGN-JPL, INASAN and LEGOS/CLS). The goal of this work is to find a single sufficient solution of DORIS or more, which those provided by three various analysis centers for the realization of the International Terrestrial Reference System (ITRS) combined with the determination of the earth rotation parameters. To achieve this goal, we adopted a methodology of comparison of the time series, based on statistical tests. The results obtained showed that the solutions of the two analysis centers of IGN-JPL and INASAN show the same characteristics (correlation, index of stability) and that to combine them would amount doubling the solution weight. In this case, to choose only one solution (IGN or INA) is more correct.

**Key words:** Time series, DORIS, ITRS, ITRF, correlation, stability.

## 1. Introduction

L'exploitation des séries temporelles de coordonnées de stations issues des techniques spatiales a un double objectif :

- ces séries permettent de mettre en évidence, à partir de méthodes d'analyse, les phénomènes géodynamiques liés à la réponse de la croûte terrestre aux diverses excitations qu'elle subit (déplacements des masses océaniques et atmosphériques ou excitations locales, ...).

- Elles sont également intégrées dans la réalisation du Système de Référence Terrestre International (ITRS) combinée à la détermination des paramètres de rotation de la terre.

Dans le cadre de l'effort collectif pour la mise en place de réseaux mondiaux, le travail présenté dans cet article s'est focalisé autour du deuxième point qui consiste principalement à un traitement statistique de séries temporelles de coordonnées de stations DORIS pour déterminer une(s) solution(s) DORIS adéquate(s) parmi celles fournies par différents centres d'analyse en vue de la réalisation du système de référence terrestre international (ITRS).

Le traitement des mesures DORIS en vue de l'amélioration des coordonnées des stations et de la mesure de leur variation est assuré actuellement par trois centres d'analyse dans le monde (IGN-JPL, INASAN et LEGOS/CLS).

Afin d'assurer l'accord interne entre les trois solutions, nous avons mené une étude comparative entre les trois solutions DORIS avant de les intégrer directement au calcul combiné des paramètres géodésiques. Il s'agit essentiellement de définir les outils de comparaison permettant de savoir si la combinaison des trois solutions DORIS est nécessaire dans la réalisation de l'ITRS ou alors le choix d'une seule solution jugée de meilleure qualité est plus judicieux et suffisant.

## 2. Technique DORIS

DORIS (Détermination d'Orbite et Radio positionnement Intégrés par Satellite) est un système radioélectrique bi-fréquence ascendant, bénéficiant d'un fonctionnement tout temps. Le système est basé sur la mesure Doppler de grande précision représentant la variation de distance satellite-balise, c'est-à-dire la composante du mouvement d'éloignement ou de rapprochement, qu'on appelle "vitesse radiale". L'erreur maximale commise sur la mesure de la fréquence Doppler est de l'ordre de  $1.65 \times 10^{-3}$  Hz (1<sup>ère</sup> génération des récepteurs : Topex/Poseidon, Spot2 et Spot4), ce qui correspond à une erreur sur la vitesse de 0.24 mm/s (erreur de l'ordre 5 cm sur la composante radiale). Pour les nouvelles missions telles que JASON1 et SPOT5, l'erreur maximale sur la fréquence Doppler est de  $10^{-5}$  Hz (0.015 mm/s sur la vitesse radiale) qui correspond à une erreur de l'ordre de 0.1 cm sur la composante radiale [3]. La modélisation de la mesure DORIS fait intervenir principalement la marche des horloges, la propagation du signal radioélectrique et le battement des phases. L'expression des relations d'observation DORIS peut être formulée soit en nombre de cycles N, soit en vitesse radiale  $V_r$ , telle que [5] :

$$N = (\overline{f_b} - \overline{f_s}) \Delta T_c - \frac{\overline{f_b}}{C} (\rho_2 - \rho_1) + \Delta N_{corr}$$

$$V_r = \frac{C}{f_b} \left[ (\overline{f_b} - \overline{f_s}) - \frac{N}{\Delta T_c} + \frac{\Delta N_{corr}}{\Delta T_c} \right]$$

Avec :

N : comptage de cycles ou différence de phase ( $2\pi N$ ) pendant  $\Delta T_c$

$\Delta T_c = (t_2 - t_1)$  : durée de comptage (7 à 9 s)

$(\overline{f_b} - \overline{f_s}) \Delta T_c$  : Terme de battement

$\frac{\overline{f_b}}{C} (\rho_2 - \rho_1)$  : Terme de l'effet Doppler

$\rho_1$  : Distance entre les centres de phase des antennes de la balise à l'instant d'émission  $t_{c1}$  et de l'instrument embarqué à l'instant de réception  $t_{r1}$

$\rho_2$  : Distance entre les centres de phase des antennes de la balise à l'instant d'émission  $t_{c2}$  et de l'instrument embarqué à l'instant de réception  $t_{r2}$

$\overline{f_b}, \overline{f_s}$  : Fréquences théoriques de la balise "b" et du satellite "s"

$\Delta N_{corr}$  : Terme correctif rassemblant les effets dus:

- aux phénomènes locaux (mouvement des plaques, marées terrestres et océaniques, surcharge atmosphérique, marée polaire),
- au milieu de propagation des ondes (ionosphère, troposphère),
- à la déviation de l'onde électromagnétique en présence d'une masse d'un corps du système solaire (relativité générale),
- aux forces agissant sur le satellite (modèles d'orbite),
- et aux horloges (synchronisation, dérive, biais de fréquence, relativité), à la géométrie de l'antenne et à la propagation instrumentale.

Le modèle de la mesure DORIS [1] [2] a été conçu pour obtenir divers produits de haute qualité tels que les orbites de satellite, la position des balises et du pôle de rotation terrestre. On peut étendre le champ d'applications jusqu'à l'estimation des paramètres des phénomènes locaux tels que le retard zénithal troposphérique et le biais de fréquence des horloges.

## 3. Données utilisées pour l'analyse DORIS :

La communauté entourant DORIS s'agrandit, le nombre des centres d'analyses se développe (tableau 1). En effet, ces derniers exploitent les mesures DORIS pour ses diverses applications et ils contribuent à la réalisation de l'ITRS en fournissant des solutions de positions/vitesses des stations DORIS en format SINEX (Solution (Software/technique) INdependent EXchange format) avec les matrices de variance covariance.

Tableau 1. Centres d'analyse DORIS.

CENTRES D'ANALYSE	PAYS	LOGICIEL UTILISE
Opérationnels	LEGOS/CLS (LCA)	France GINS-DYNAMO
	IGN/JPL (IGN)	Usa GIPSY-OASIS
	INASAN (INA)	Russie GIPSY-OASIS
En cours de développement	Geosciences Australia	Australie MICROCOSM
	CNES	France ZOOM
	Geodetic Observatory Pecny	Republic Tchèque BERNESE

Les données DORIS utilisées dans le traitement sont constituées de 03 séries hebdomadaires de jeux de coordonnées résiduelles (dE, dN, dU) issues des 03 centres d'analyse (IGN-JPL, INASAN et LEGOS/CLS) conduites entre 1993 et 2004. Durant cette période, un total de 107 stations DORIS ont été observées.

Ces séries de jeux de coordonnées résiduelles sont exprimées dans le repère local, après enlèvement du modèle ITRF2000 de positions et vitesses.

#### 4. Méthodologie adoptée pour l'analyse des séries temporelles DORIS

L'objectif de cette application consiste à définir les outils statistiques nécessaires à l'étude comparative entre les 03 solutions dans le but de confirmer la (es) solution(s) qui soit (sont) conforme(s) aux critères de réalisation de l'ITRS.

La méthodologie adoptée est composée de trois étapes :

**1<sup>ère</sup> étape :** Représentation graphique des séries temporelles qui nous permet d'avoir une idée générale sur la répartition des coordonnées résiduelles pendant la période d'observation.

**2<sup>ème</sup> étape :** Calcul des coefficients de corrélations intra centres afin de déterminer le degré d'indépendance des solutions fournies par chaque centre d'analyse.

**3<sup>ème</sup> étape :** Indices de stabilité des stations de chaque centre d'analyse.

#### 5. Résultats :

**1<sup>ère</sup> étape :** *Présentation des graphes des séries temporelles DORIS.*

Cette étape consiste à représenter sur un graphique les coordonnées résiduelles (dE, dN et dU) des stations en fonction du temps afin d'effectuer un examen a priori sur la répartition de la série pendant la période d'observation.

Les graphes suivants (figures 1, 2, 3, 4, 5 et 6) représentant les coordonnées résiduelles (dE, dN, dU) de quelques stations Doris (KERB, KRUB, LIBB, SPIB, TLHA, YARA) qui ont été sélectionnées sur la base des critères suivants :

- Stations situées sur *différentes plaques*
- Stations observées durant de *longues périodes*
- Stations observées durant de *courtes périodes*
- Stations présentant des *trous d'observations*

Nous remarquons (figure 1) d'une part, que la composante Est (dE) est beaucoup plus perturbée que les deux autres composantes Nord (dN) et verticale (dU) et d'autre part, qu'au cours de l'année 1997 il y a un trou d'observations pour cette station et ce pour les 3 centres d'analyse.

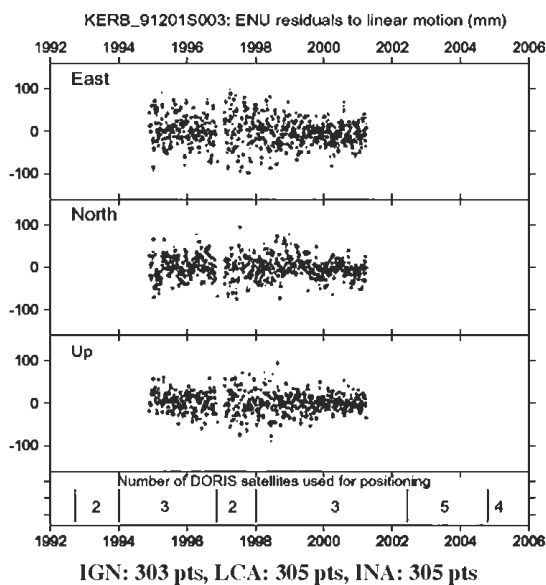


Fig. 1 Représentation des trois séries temporelles (station KERB)

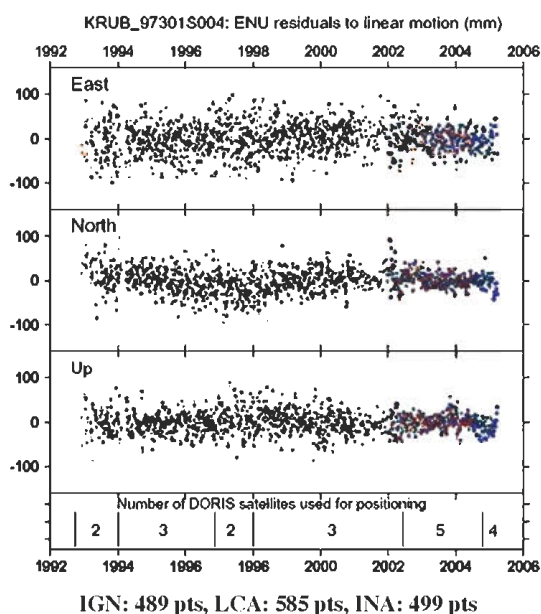


Fig. 2 Représentation des trois séries temporelles (station KRUB)

La durée des observations pour cette station est longue ( $\approx 12$  ans); sa composante Est (dE) est beaucoup plus perturbée que les deux autres composantes. Aussi pendant la période 2001-2002 les deux centres d'analyse (IGN et INA) ont des trous d'observations, ce qui n'est pas le cas pour le centre d'analyse LCA.

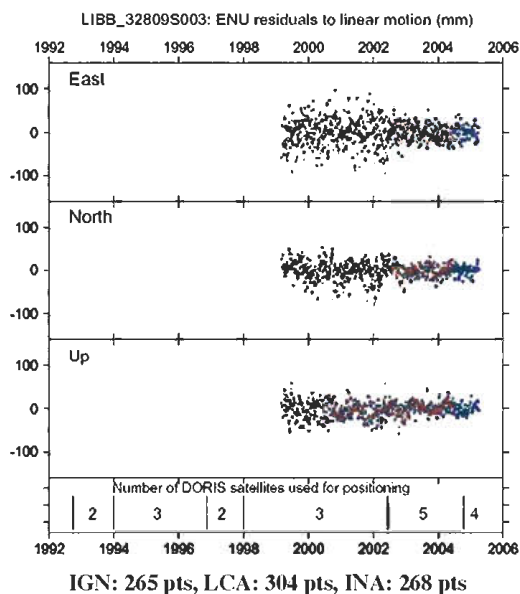


Fig. 3 Représentation des trois séries temporelles (station LIBB)

Il est clair que les deux composantes Nord (dN) et verticale (dU) sont plus stables que la composante Est (dE) durant la période 1999-2003. Par contre, à partir de l'année 2003, la composante Est (dE) s'est relativement stabilisée ce qui est probablement dû au fait que le nombre de satellites a augmenté à 5.

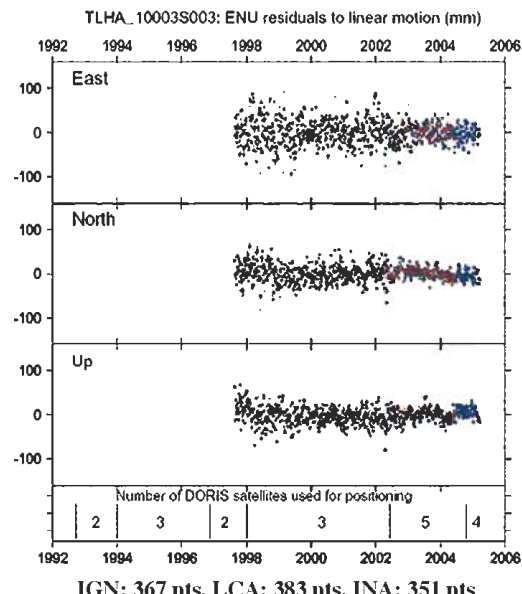


Fig. 5 Représentation des trois séries temporelles (station TLHA)

TLHA est une station maîtresse située à Toulouse, dont les composantes Nord (dN) et verticale (dU) sont beaucoup plus stables que la composante Est (dE) en particulier à partir de l'année 2002 jusqu'en 2005, ce qui est probablement dû à l'augmentation du nombre de satellites d'observation.

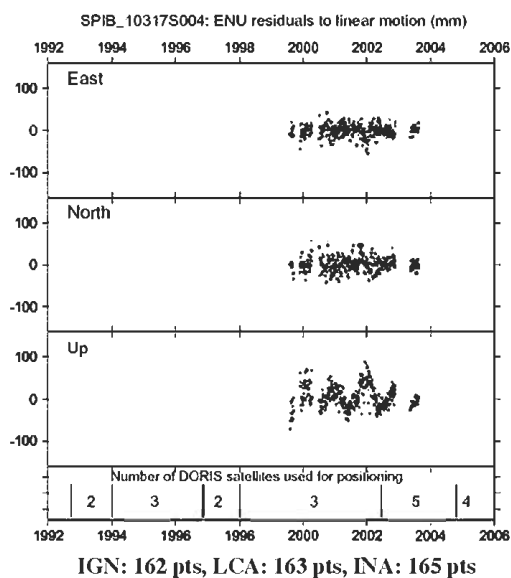


Fig. 4 Représentation des trois séries temporelles (station SPIB)

La durée des observations pour cette station est très courte. Mais nous remarquons facilement au niveau de la composante verticale (dU), qu'un signal périodique (annuel) se présente.

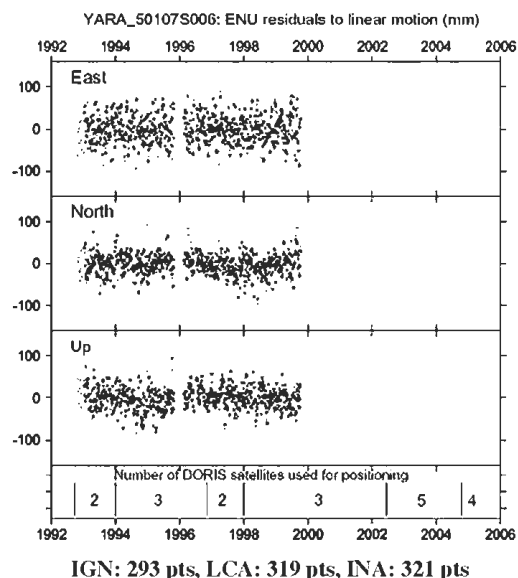


Fig. 6 Représentation des trois séries temporelles (station YARA)

Les composantes Nord (dN) et verticale (dU) sont plus stables que la composante Est (dE); Nous remarquons aussi qu'un trou d'observations se situe durant l'année 1996.

**2<sup>ème</sup> étape : Calcul des coefficients de corrélation Intra centres**

Dans notre cas, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les différents centres d'analyses (IGN, INA, LCA) deux à deux et ce pour pouvoir déterminer le degré d'indépendance entre les séries. Pour cela, nous avons pris les séries de *dates communes* et calculer leurs coefficients de corrélation avec la formule suivante (pour une corrélation entre LCA et IGN par exemple) :

$$r_{(LCA,IGN)} = \frac{Cov(LCA,IGN)}{\sigma_{LCA} \times \sigma_{IGN}} \text{ où } r \in [-1,1]$$

Cov et  $\sigma$  représentent respectivement la covariance et l'écart type.

Le graphe suivant (figure 7) représente les corrélations des 03 centres d'analyse comparés (LCA\_IGN, LCA\_INA, IGN\_INA) suivant les 03 composantes (dE, dN, dU) :

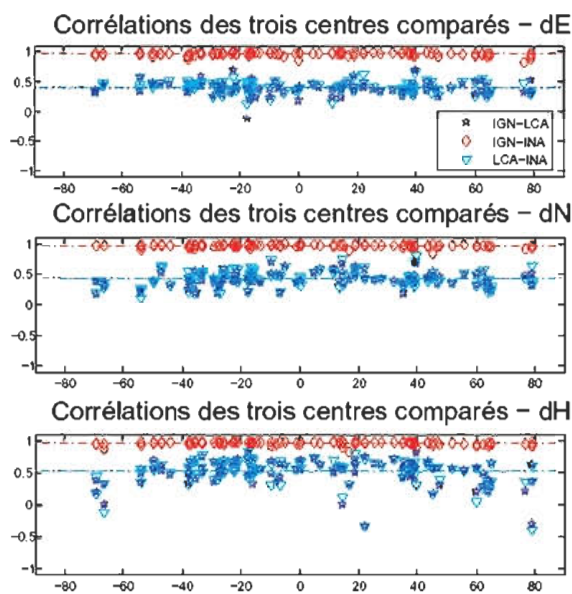


Fig. 7 Corrélations IGN\_LCA, IGN\_INA et LCA\_INA pour (dE, dN, dU)

Les intervalles de corrélation des trois centres comparés et pour les trois composantes (dE, dN, dU) sont fournis par le tableau suivant :

Tableau 2. Corrélations des 03 centres comparés.

	IGN_LCA	IGN_INA	LCA_INA
dE	[-0.20, 0.60]	[0.75, 0.99]	[0.18, 0.60]
dN	[0.20, 0.65]	[0.80, 0.99]	[0.15, 0.70]
dU	[-0.35, 0.75]	[0.75, 0.99]	[-0.40, 0.75]
Moy.	≈ 0.46	≈ 0.88	≈ 0.46

Nous constatons qu'il y a une forte corrélation entre les deux centres d'analyses IGN et INA qui atteint les 0.99. Par contre, la corrélation entre LCA et les deux autres centres IGN ou INA est relativement faible (en moyenne de l'ordre de 0.46). Ceci est dû principalement que les solutions de l'IGN et de l'INA utilisent le même logiciel d'ajustement (GIPSY-OASIS). Par contre, le centre d'analyse LCA utilise un autre logiciel (GINS-DYNAMO).

**3<sup>ème</sup> étape : Indice de stabilité**

Cette étape de traitement nous renseigne sur la stabilité des stations de chaque série. Plus l'indice de stabilité est petit, plus stable est la station. Les indices de stabilité des stations sont comparés entre deux centres d'analyses : (LCA\_IGN), (LCA\_INA) et (IGN\_INA) [4].

Les graphes suivants (figures 8, 9 et 10) représentent les indices de stabilité des stations comparés entre deux centres d'analyses : (LCA\_IGN), (LCA\_INA) et (IGN\_INA).

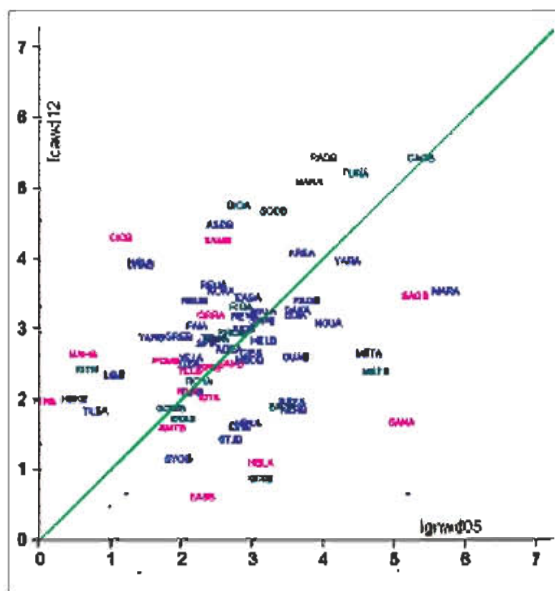


Fig. 8 Indices de stabilité des stations (IGN\_LCA).

L'axe des abscisses représente l'indice de stabilité des stations de la solution IGN

L'axe des ordonnées représente l'indice de stabilité des stations de la solution LCA

Nous constatons à partir de la figure (8) que la plupart des stations ont un indice de stabilité inférieur à 4. Cependant, la répartition des indices de stabilité de quelques stations par rapport à la diagonale (ligne verte) n'est pas homogène.

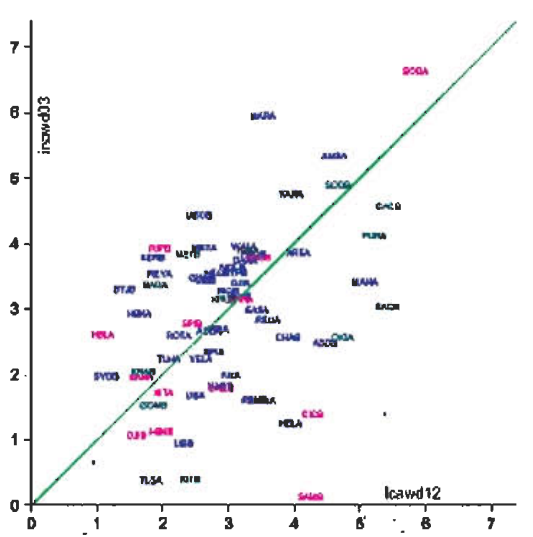


Fig. 9 Indices de stabilité des stations (LCA\_INA).

L'axe des abscisses représente l'indice de stabilité des stations de la solution LCA

L'axe des ordonnées représente l'indice de stabilité des stations de la solution INA

Nous remarquons à partir de la figure (9) que la répartition des indices de stabilité par rapport à la diagonale (ligne verte) n'est pas homogène. Ce qui montre que les deux centres (LCA, INA) sont en désaccord.

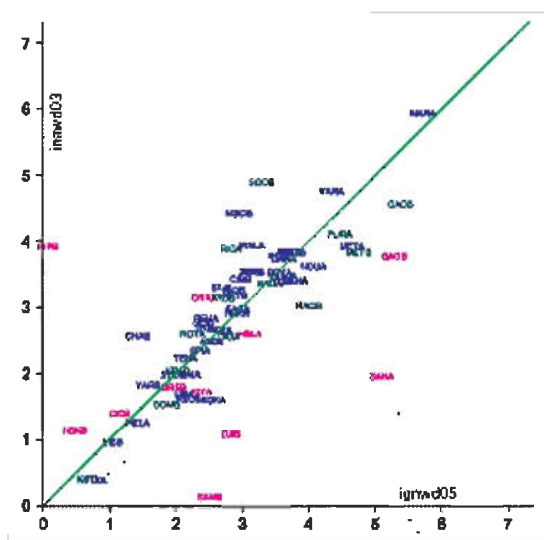


Fig. 10 Indices de stabilité des stations (IGN\_INA).

L'axe des abscisses représente l'indice de stabilité des stations de la solution IGN

L'axe des ordonnées représente l'indice de stabilité des stations de la solution INA

La figure (10) montre que la majorité des stations des deux centres d'analyse (IGN et INA) ont quasiment le même indice de stabilité.

### Remarque

Les stations pour lesquelles les séries sont courtes ou si elles comportent un trou d'observations important sont à prendre avec précaution car l'indice de stabilité n'est pas calculé avec suffisamment de données, il peut donc être faux (mal déterminé).

Plus l'indice de stabilité est bas, plus stable est la station. Dans les graphes précédents, nous avons mis en relation les indices de stabilité pour deux centres d'analyse. Si les stations montrent le même indice de stabilité pour les deux centres, elles sont sur la diagonale (la droite verte). Donc, plus les stations s'éloignent de cette droite, plus les deux centres sont en désaccord.

## 6. Analyse des résultats

Nous pensons que la mise en évidence des signaux (séries temporelles) et leur caractérisation peut nous aider à connaître la nécessité de combiner les solutions ou pas.

Après la détermination des coefficients de corrélation, nous avons constaté que les deux centres d'analyse IGN et INA sont fortement corrélés. Ce qui peut être expliqué par le fait qu'ils utilisent le même logiciel d'analyse de données Doris et adoptent la même méthodologie de traitement. Cela induit qu'on ne peut pas combiner leurs solutions car elles apportent les mêmes informations, et les combiner reviendrait à doubler le poids de ces solutions. Dans ce cas, le choix de la solution se fera sur IGN ou INA.

Par contre, les coefficients de corrélation entre le centre d'analyse LCA et l'IGN ou INA, ne sont ni trop forts, ni trop faibles (tableau 2). Cela est probablement dû au fait qu'ils n'utilisent pas le même logiciel (tableau 1) et n'adoptent pas la même stratégie de traitement.

De ce fait, dans le cadre de la réalisation de l'ITRS (ITRF : International Terrestrial Reference Frame), le choix de la (des) solution(s) la (es) plus adéquate(s) nécessite une étude sur la stabilité des stations de chaque centre d'analyse. Les figures (8, 9 et 10) représentent les indices de stabilité des stations comparés entre deux centres d'analyses : (LCA\_IGN), (LCA\_INA) et (IGN\_INA). La plupart des stations ont un indice de stabilité inférieur à 4.

La figure (10) montre bien que les deux centres d'analyses IGN et INA sont en parfait accord puisque les indices de stabilité de la majorité des stations sont quasiment identiques. Ce qui n'est pas le cas pour le centre d'analyse LCA (figures 8 et 9) avec les deux autres centres, puisque la répartition des indices de stabilité de la plupart des stations n'est pas linéaire.

## 7. Conclusion

Le choix entre la solution fournie par l'IGN et celle de INA est évident, puisque les séries correspondantes présentent les mêmes caractéristiques (corrélation, indice de stabilité). Dans ce cas, opter pour la solution de l'IGN ou celle de INA est exactement pareil.

Par contre, l'étude comparative entre la solution LCA et celles des deux autres centres (INA et IGN) reste difficile dans la mesure où les coefficients de corrélation ne sont ni trop forts ni trop faibles (tableau 2) et que la répartition des indices de stabilité par rapport à la diagonale n'est pas homogène (figures 8 et 9).

Pour atteindre l'objectif fixé, il est plus judicieux de considérer d'autres paramètres tels que la qualité de la modélisation de la mesure DORIS utilisée dans les logiciels de LCA (GINS) et IGN, INA (GIPSY), la stratégie de traitement adoptée par chaque centre d'analyse et éventuellement le taux de pourcentage de rejet de stations de chaque centre d'analyse.

## Références

- C. JAYLES, December 2004 : Modelling of DORIS instruments. Document technique CNES, 03/12/2004, Référence CO-SP-D0-OP-2460-CN
- C. JAYLES, P. SENGENES, December 2004: Modelling of DORIS 2GM and CRYOSAT instruments. Document technique CNES, 07/12/2004, Référence CO-SP-D0-OP-14815-CN
- Florence BOUILLE, 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 en Géophysique et techniques spatiales, soutenue le 07 Janvier 2000
- Martine FEISSEL VERNIER, Karine LE BAIL : Stability of DORIS stations, 1993-2005, Article soumis pour communication en AUSTRALIE, AOUT 2005
- K. LE BAIL, 2004 : Etude Statistique de la stabilité des stations de géodésie Spatiale -Application à DORIS, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris en Dynamique des Systèmes Gravitationnels, Spécialité : Géodésie Spatiale, soutenue le 12 Décembre 2004.
- ZERHOUNI W., 2005 : Etude du signal et analyse des séries temporelles DORIS, Mémoire d'Ingénieur d'Etat en sciences géodésiques et travaux topographiques, Option: petites Echelles, CNTS / Arzew, Juin 2005.