



HAL
open science

DORIS et la géodésie globale

Pascal Willis

► **To cite this version:**

Pascal Willis. DORIS et la géodésie globale. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003. tel-00423668

HAL Id: tel-00423668

<https://theses.hal.science/tel-00423668>

Submitted on 12 Oct 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DOSSIER D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Université Pierre et Marie Curie
Électronique et Sciences de l'Univers

DORIS et la géodésie globale

Pascal Willis

Présenté le 25 novembre 2003 devant le Jury composé de:

| | |
|------------------------|-------------------|
| M. François Barlier | Rapporteur |
| Mme Nicole Capitaine | |
| Mme Anny Cazenave | Rapporteur |
| M. Jean Lacroix | Rapporteur |
| M. Jean-Louis Le Mouél | |
| M. Bruno Sicardy | Président du jury |

SOMMAIRE

| | |
|--|-------|
| • Remerciements | p. 4 |
| • Avant-propos | p. 5 |
| • Curriculum Vitae | p. 6 |
| • Liste des publications | p. 8 |
| Publications internationales à comité de lecture | p. 8 |
| Articles publiés (journaux et revues sans comité de lecture) | p. 11 |
| Autres publications (actes de congrès) | p. 15 |
| Présentations dans des congrès (résumés) | p. 19 |
| Notes techniques | p. 25 |
| Rapports de fin de contrats | p. 27 |
| Propositions de recherche acceptées | p. 28 |
| Séminaires | p. 29 |
| Cours et vulgarisation | p. 30 |
| • Enseignement et encadrement de chercheurs | p. 32 |
| Enseignement | p. 32 |
| Encadrement de thésards et jurys de thèse | p. 33 |
| Encadrement de stagiaires | p. 36 |
| • Articles associés | p. 39 |
| IGEX International GLONASS Experiment, Scientific Objectives and Preparation | p. 40 |
| Potential interest of the IGS for the Galileo system | p. 46 |

| | |
|---|-------|
| TOPEX/JASON combined GPS/DORIS orbit determination in the tandem phase | p. 51 |
| • Dossier de recherche: DORIS et la géodésie globale | p. 58 |
| Mots clés, <i>Keywords</i> | p. 58 |
| Résumé | p. 58 |
| <i>Summary</i> | p. 58 |
| DORIS et la géodésie globale | p. 59 |
| Conclusions et perspectives | p. 83 |
| Références | p. 85 |
| Glossaire | p. 96 |
| Sites Web d'intérêt | p. 97 |

«Avant de s'endormir, il pensa qu'il devrait maintenant lire des ouvrages plus volumineux. Il mettrait ainsi plus de temps à les finir, et ce seraient des oreillers plus confortables pour la nuit»
Paulo Coelho, L'alchimiste

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais remercier ici Yoaz Bar-Sever pour m'avoir invité au Jet Propulsion Laboratory pour continuer mes recherches au sein de son équipe. Mes remerciements s'adressent aussi à Jacques Poulain, Directeur Technique de l'IGN pour m'avoir fait confiance au moment de ma carrière où j'en avais le plus besoin et qui m'a incité à rédiger ce document pour préparer l'avenir.

Je remercie Claude Boucher pour l'aide matérielle qu'il m'a apportée dans la rédaction de ce document, en particulier pour toutes les recherches bibliographiques dans les archives de l'IGN.

Enfin, je remercie ma femme Michèle et mes enfants Xavier, Hélène et Lucille qui n'ont pas hésité à me suivre au bout du monde pour me permettre de continuer mon activité de chercheur dans les meilleures conditions possibles.

À la mémoire de Jean-Jacques Levallois en regrettant de ne pas avoir tenu ma promesse en soumettant à temps un article à l'Académie des Sciences par son intermédiaire.



«There is nothing like a good old fashionable quote to create a chapter heading»
Graeme Buckley, Multiple Chess Choice II

AVANT-PROPOS

Le but d'un dossier d'habilitation à diriger des recherches est souvent multiple et parfois difficile à cerner ce qui en retarde automatiquement la rédaction. Il comporte toujours une partie professionnelle (reconnaissance par ses pairs d'un parcours de recherche) ainsi qu'une partie plus personnelle. Qu'a-t-on pu apporter au niveau scientifique et au niveau humain au cours des 10 ou 15 dernières années? Qu'en restera-t-il éventuellement? Quelles sont les idées directrices personnelles qui ont guidé une personne dans sa carrière? J'espère que les idées directrices apparaîtront naturellement dans la suite de ce dossier de recherche.

C'est aussi un exercice délicat car on veut jouer un certain rôle pédagogique et être accessible au plus grand nombre, tout en restant rigoureux en fournissant des raisonnements et des conclusions acceptables par les experts de ce domaine. À courir deux lièvres, souvent on n'en attrape aucun!

Le plus difficile reste toutefois le choix personnel du sujet lui-même, tout particulièrement lorsqu'on a eu l'occasion d'aborder plusieurs sujets différents, soit d'un point de vue scientifique, soit d'un point de vue organisationnel. Enfin, il faut arrêter la rédaction à un certain moment, même si de nouveaux résultats surgissent et mériteraient certainement plus de publicité. Ce document est le fruit de tous ces compromis.



CURRICULUM VITAE

WILLIS Pascal
Né le 7 janvier 1960
Marié, trois enfants

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées à l'Institut Géographique National

DIPLOMES UNIVERSITAIRES

1983 Diplôme d'ingénieur de l'Ecole Polytechnique (91^{ème})
1985 Diplôme d'Ingénieur Géographe de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques
1986 DEA d'Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie de l'Observatoire de Paris
1989 Doctorat (nouvelle thèse) en Géodésie de l'Observatoire de Paris: Méthode de traitement de la phase GPS pour la localisation relative (statique et cinématique). Applications à la géodésie.

FONCTIONS

1985-1986 Chercheur à l'IGN
1986-1990 Chef du Département Etudes et Méthodes au Service de la Géodésie et du Nivellement de l'IGN
1987-1988 Coordinateur des travaux préparatoires au percement du Tunnel sous la Manche pour l'IGN et l'Ordnance Survey of Great Britain (OSGB, Angleterre)
1990-1991 Chef de projet GPS à l'IGN
1991-1994 Chef du Laboratoire de Recherche en Géodésie (création du LAREG) à l'IGN
1995-2000 Chercheur à l'IGN
2000-2001 Mis à disposition auprès du CNES (50%: Applications scientifiques du système Galileo)
depuis 2001 En mission au Jet Propulsion Laboratory (JPL, USA) pour une durée de 3 ans: JASON, DORIS, Galileo/GPS.

RESPONSABILITÉS SCIENTIFIQUES

- Coordinateur international DORIS pour l'IERS (International Earth Rotation Service) 1994-2000
- Co-Investigateur «Systèmes de référence terrestre» (IGN) de la mission d'océanographie spatiale Topex/Poseïdon (PI C. Boucher, IGN), 1992.
- Co-Investigateur «Orbitographie précise GPS» (Jet Propulsion Laboratory) de la mission d'océanographie spatiale Topex/Poseïdon (PI B. Melbourne, JPL/USA), 1992.
- Investigateur Principal «Terrestrial References for future Altimetric Missions» de la mission

d'océanographie spatiale JASON depuis avril 1998

- Investigateur principal «*Geodetic and Geophysical Applications of the DORIS/ENVISAT data*» pour la mission d'océanographie spatiale ENVISAT, 2001.
- Responsable de la campagne internationale d'observations des satellites GLONASS (International Earth Rotation Service, International GPS Service, Institute of Navigation) IGEX-98 de 1997 à 1999
- Investigateur principal «*Improved Estimation of Global Geophysical Parameters Using Optimal Integration of Space Geodetic Techniques*», proposition NASA, NRA-01-OES-05, 2003.
- Organisateur de nombreuses sessions dans des colloques scientifiques (IAG, COSPAR, ION, DORIS,...).

SOCIÉTÉS SCIENTIFIQUES ET PROFESSIONNELLES

International:

- Association Internationale de Géodésie: Secrétaire Général Adjoint de 1991 à 1995, Editeur des Travaux de l'Association Internationale de Géodésie (1995 et 1999), Editeur du Geodesist's Handbook (1996), Editeur de l'IAG Newsletter (de 1996 à 1999), Membre du Bureau éditorial du Journal of Geodesy (de 1995 à 2003), Secrétaire de la Section II (Techniques Spatiales) de 1995 à 2003, Président de la sous-Commission «*Precise Microwave Satellite Systems*» de 1995 à 2003, Vice-Président de la Commission 4 de l'AIG «*Positioning and Applications*» de 2003 à 2007, Fellow de l'AIG.
- *International Earth Rotation Service*: Membre du *Directing Board* de 1994 à 2000
- *International GPS Service*: Membre du *Governing Board* de 1995 à 1999
- *International Union for Surveys and Mapping*: Secrétaire Exécutif de 1997 à 1999.
- *Civil GPS Service Interface Committee*, représentant français depuis 1994.
- *Institute of Navigation*, membre depuis 1993.

France:

- Conseil National de l'Information Géographique: Président du Groupe de Travail Permanent «*Positionnement Statique et Dynamique*» de 1990 à 1999.
- Bureau des longitudes: Membre correspondant depuis 1997, Secrétaire du Bureau des longitudes de 2000 à 2001.
- Membre de la Société des Explorateurs Français depuis 1998.
- Comité National Français de Géodésie et de Géophysique, Section 1, Géodésie, membre.
- Association Française de Topographie: Membre du conseil d'orientation scientifique de la revue XYZ, depuis 1997.
- Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (propositions GPS, DORIS, GLONASS; membre du Conseil Scientifique).

DISTINCTIONS

- Chevalier dans l'ordre des Palmes Académiques.

DIVERS

- Echecs: élo FFE 1990 en mai 1999.
- Course à pied: marathons (12 dont meilleur temps de 4:22:30 en 2001), 100 Km (1).

«Quand ma mère sut que j'avais réussi mon certificat d'études, elle me pressa contre elle et me dit: A présent, je suis tranquille. Tu ne mourras pas de faim!»
Louis Nucera, Mes ports d'attache

LISTE DES PUBLICATIONS

Publications internationales à comité de lecture

1987

Geodetic applications of the Global Positioning System, P. Willis, C. Boucher, *Annales Geophysicae*, Terrestrial and Planetary Physics, 5, B, 6, pp. 517-522, 1987.
<http://www.cesr.fr/~anngéo/index.html>

1989

Méthodes de traitement de la phase GPS pour la localisation relative (statique et cinématique). Applications à la géodésie, P. Willis, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, 177 p., 1989.

1994

First Assessment of GPS-Based reduced dynamic orbit determination on Topex/Poseidon, T. Yunck, W.I. Bertiger, S.C. Wu, Y. Bar-Sever, E.J. Christensen, B.J. Haines, S.M. Lichten, R.J. Muellerschoen, Y. Vigue, P. Willis, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 7, pp. 541-544, 1994.
http://www.agu.org/journals/gl9407/gl_21_7.html

GPS Precise Tracking Of Topex/Poseidon: Results and Implications, W.I. Bertiger, Y.E. Bar-Sever, E.J. Christensen, E.S. Davis, J.R. Guinn, B.J. Haines, R.W. Banez-Meier, J.R. Jee, S.M. Lichten, W.G. Melbourne, R.J. Muellerschoen, T.N. Munson, Y. Vigue, S.C. Wu, T.P. Yunck, B.E. Schutz, P.A.M. Abusali, H.J. Rim, N.M. Watkins, P. Willis, *J. of Geophys. Res.*, 99, C12, pp. 24449-24464, Dec. 15, 1994.
http://www.agu.org/journals/jc/jc_99_12.html

1996

Le système DORIS, présentation, rôle et recherches menées à l'IGN, P. Willis, *Revue Internationale de Géomatique*, 6, 2-3, pp. 289-304, 1996.
<http://www.geo.e-revues.com>

1999

IGEX: International GLONASS Experiment, Scientific Objectives and Preparation, P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan J. Slater, in *Satellite Dynamics, Orbit Analysis and*

Combination of Space Techniques, J. Dow, G. Beutler (Eds), *Adv. Space Res.*, 23, 4, pp. 659-663, 1999.
<http://www.sciencedirect.com>

2000

The IGEX-98 Campaign, highlights and perspectives, P. Willis, J.A. Slater, G. Beutler, W. Gurtner, C. Noll, R. Weber, R.E. Neilan, G. Hein, *Proc. of IAG Symposium 121*, Geodesy beyond 2000, The Challenge of the First Decade, K.P. Schwarz (Ed.), Birmingham, UK, July 1999, Springer-Verlag, 2000.
<http://www.springerlink.com>

2001

Potential interests of the IGS for the Galileo system, P. Willis, J. Dow, *GPS Solutions*, 4, 4, pp. 68-71, 2001.
<http://www.springerlink.com>

Foreword, P. Willis, Special Issue on GLONASS, *J. of Geod.*, 75, 11, pp. 557-558, 2001.
<http://www.springerlink.com>

2002

Parameter sensitivity of TOPEX orbit and derived mean sea level to DORIS stations coordinates, L. Morel, P. Willis, in *New Trends in Space Geodesy*, H. Drewes (Ed), *Adv. Space Res.*, 30, 2, pp. 255-263, 2002.
<http://www.sciencedirect.com>

Current status of the DORIS Pilot Experiment, G. Tavernier, L. Soudarin, K. Larson, C. Noll, J. Ries, P. Willis, in *New Trends in Space Geodesy*, H. Drewes (Ed), *Adv. Space Res.*, 30, 2, pp. 151-156, 2002.
<http://www.sciencedirect.com>

2003

Topex/Jason combined GPS/DORIS orbit determination in the tandem phase, P. Willis, B. Haines, Y. Bar-Sever, W. Bertiger, R. Muellerschoen, D. Kuang, S. Desai, in *Satellite Dynamics in the Era of Interdisciplinary Geodesy*, P. Visser, P. Moore (Eds), *Adv. Space Res.*, 31, 8, pp. 1941-1946, 2003.
<http://www.sciencedirect.com>

Initial Orbit Determination Results for Jason-1: Towards a 1-cm Orbit, B.J. Haines, W.I.B. Bertiger, S. Desai, D. Kuang, T. Munson, L. Young, P. Willis, *Navigation*, 2003, accepted for publication.
<http://www.ion.org/publications/toc/journal.htm>

Comportement de l'oscillateur DORIS/JASON au passage de l'anomalie Sud-Atlantique, P. Willis, B. Haines, J.P. Berthias, P. Sengenès, J.L. Le Mouél, *CR Acad Sci*, soumis à publication.

The proposed International DORIS Service, P. Willis, G. Tavernier, M. Feissel-Vernier, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin, IUGG General Assembly 2003, Sapporo, Japon, Juillet 2003, *Proc. Of IAG Symp.*, Springer-Verlag, soumis à publication.

DORIS as a potential part of a Global Geodetic Observing System, P. Willis, Y Bar-Sever, G. Tavernier, in IGGOS Science Rationale, H. Drewes (Ed.), *J. of Geodyn.*, soumis à publication.
<http://www.sciencedirect.com>

Terrestrial Reference Frame Requirements within IGGOS, Z. Altamimi, C. Boucher, P. Willis, in IGGOS Science Rationale, H. Drewes (Ed.), *J. of Geodyn.*, soumis à publication.
<http://www.sciencedirect.com>

Articles publiés dans des journaux et revues sans comité de lecture

1986

Wild et le géomètres: Tous dans le même bateau, Le Mont-Blanc réévalué, C. Boucher, P. Willis, *revue XYZ*, 28, 9, pp.14, 1986.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Le système GPS et son impact en géodésie, topométrie et cartographie, C. Boucher, P. Willis, *revue XYZ*, 29, 12, pp.23-29, 1986.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

1988

Application de la technique GPS pour la localisation précise, P. Willis, *Revue Géomètre*, Numéro spécial GPS, 3, pp. 41-48, 1988.

Le système GPS et son impact sur les travaux topographiques, C. Boucher, P. Willis, *revue XYZ*, 36, 7, pp.3-13, 1988.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

1989

Utilisation du GPS en mode cinématique de précision, P. Willis, *Revue Géomètre*, Numéro spécial GPS, 3, pp.17-59, 1989.

1990

Evolution du Réseau Géodésique National: Réalisation, Maintenance et utilisation par techniques de géodésie spatiale, J.J. Levallois, C. Boucher, P. Willis, *Revue XYZ*, 42, 1, pp.10-45, 1990.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

1992

Travaux de l'Association Internationale de Géodésie, Tome 29, Rapports généraux et rapports techniques établis à l'occasion de la vingtième Assemblée Générale, Vienne, Autriche, Août 1991, P. Willis (Ed.), Paris, 583 p., 1992.

Impact du système GPS sur la topographie (stratégie à court terme et perspectives d'avenir), P. Willis, Journée rencontre de l'Association Française de Topographie, Cachan, Novembre 1991, *Revue XYZ*, 51, pp. 7-14, 1992.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Activités du LAREG, P. Willis, *Bulletin d'Information de l'IGN*, 60, pp. 48-53, 1992.

1993

Le système DORIS, résultats récents de la mission océanographique Topex/Poseïdon, P. Willis, *Bulletin d'Information de l'IGN*, 62, 1, pp. 45-48, 1993.

1995

L'unification des références géodésiques: l'exemple du tunnel sous la Manche, P. Willis, C. Boucher, 3ème CITOP, Paris-Londres, Novembre 1994, *Revue XYZ*, 62, pp. 15-21, 1995.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Le système DORIS: Applications actuelles à l'IGN et perspectives d'avenir, P. Willis, *Bulletin d'Information de l'IGN*, 65, 4, pp. 65-72, 1995.

1996

IAG Newsletter, P. Willis, *J. of Geod.*, de 1996 à 1999.
<http://www.spingerlink.com>

GPS-GNSS et les références géodésiques: problèmes ou progrès pour les topographes, P. Willis, C. Boucher, *Revue XYZ*, 67, 2, pp. 57-62, 1996.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Présentation du Groupe de Travail Permanent du CNIG Positionnement Statique et Dynamique, P. Willis, *Revue XYZ*, 68, 3, pp. 23-25, 1996.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

The Geodesist's Handbook, Le Manuel du Géodésien, P. Willis (Ed.), *J. of Geod.*, 70, 12, pp. 1039-1036, Springer-Verlag, 1996.
<http://www.spingerlink.com>

Travaux de l'Association Internationale de Géodésie, Tome 30, Rapports généraux et rapports techniques établis à l'occasion de la vingt-et-unième Assemblée Générale, Boulder, USA, Juillet 1995, P. Willis (Ed.), Paris, 507 p., 1996.

1997

Informations récentes et réflexions personnelles sur le système GPS, P. Willis, *revue XYZ*, 71, 2, pp. 75-76, 1997.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

GPS-GNSS et les références géodésiques: problèmes ou progrès pour les topographes, P. Willis, C. Boucher, *Revue Navigation*, 45, 177, pp. 60-69, 1997 (republication).

Le système GPS de navigation par satellites, P. Willis, in Dossier: du traitement du signal aux applications grand public, *Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE)*, 6, pp. 48-54, 1997.
<http://www.see.asso.fr/htdocs/main.php/61997.php>

Sur le GPS en question, deux réunions importantes, P. Willis, *Revue XYZ*, 73, 4, pp. 15, 1997.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Applications scientifiques du système DORIS, P. Willis, *Revue XYZ*, 73, 4, pp. 67-74, 1997.
<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

1998

International Call for Participation to the IGEX-98 Campaign, P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R.E. Neilan, J. Slater, *J. of Geod.*, IAG Newsletter, 72, 5, p. 318, Springer-Verlag, 1998.

<http://www.spingerlink.com>

Geodetic Reference systems for altimetric missions, P. Willis, C. Boucher, P. Sillard, G. Wöppelmann, AVISO Newsletter, 6, Avril 1998.

<http://www->

[avisocnes.fr:8090/HTML/information/frames/publication/news/news6/welcome_uk.html](http://www-avisocnes.fr:8090/HTML/information/frames/publication/news/news6/welcome_uk.html)

1999

International GLONASS Experiment, P. Willis, *GPS Solutions*, 3, 2, pp. 66-68, 1999.

<http://www.spingerlink.com>

Report of the Activities of the Subcommission on Precise Satellite Microwave Systems, P. Willis, *CSTG Bull.*, 15, pp. 40, 1999.

http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/cstg/www/cstg_bull_list.html

The IGEX-98 GLONASS Campaign of Observation, P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan, J. Slater, *CSTG Bull.*, 15, pp. 41, 1999.

http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/cstg/www/cstg_bull_list.html

La campagne internationale GLONASS, IGEX-98, P. Willis, *Revue XYZ*, 81, 4, pp. 27-29, 1999.

<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

2000

La campagne internationale GLONASS, IGEX-98, P. Willis, *Revue Navigation*, 48, 189, pp. 47-52, 2000 (republication).

L'impact en géodésie des systèmes de radionavigation par satellite, GPS et GLONASS, un défi pour Galileo, P. Willis, *Revue XYZ*, 84, 3, pp. 42-45, 2000.

<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Report of the Activities Related to the Joint CSTG/IERS DORIS Pilot Experiment, G. Tavernier, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin, P. Willis, *CSTG Bull.*, 16, pp. 64-66, 2000.

http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/cstg/www/cstg_bull_list.html

CGSIC (Civil GPS System Interface Committee), ION (Institute of Navigation), IGS (International GPS Service), P. Willis, *Revue XYZ*, 85, 4, pp. 24-26, 2000.

<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

2001

Special Issue on GLONASS, P. Willis (Ed), *J. of Geod.*, 75,11, pp. 557-627, Springer-Verlag, 2001.

<http://www.spingerlink.com>

2002

Report of the DORIS Coordination Center, G. Tavernier, M. Feissel, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin, P. Willis, *CSTG Bull.*, 17, pp. 70-75, 2002.

http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/cstg/www/cstg_bull_list.html

EOP Alignment Campaign, IDS/IGS/ILRS/IVS EOP combinations, systematic errors, A. Nothnagel, R. Dill, M. Feissel-Vernier, R. Ferland, R. Noomen, P. Willis, *IERS Techn. Note*, 30, pp. 32-34, 2003.

2003

Compte-rendu de congrès, 41ème réunion du CGSIC, Arlington, 19-20 Mars 2003, P. Willis, *revue XYZ*, 95, 2, pp. 25-26, 2003.

<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Report of the IAG Section II, Advanced Space Technology, C.K. Shum, P. Willis (Eds), Travaux de l'AIG, IUGG General Assembly, Sapporo, Japon, Juillet 2003, 106 p., sous presse.

<http://www.gfy.ku.dk/~iag/Travaux/index.htm>

Report of the Coordinating Centers, DORIS, in CSTG Report, G. Tavernier, M. Feissel, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin, P. Willis, Travaux de l'AIG, IUGG General Assembly, Sapporo, Japon, Juillet 2003, 106 p., sous presse.

International DORIS Service in IERS, P. Willis, IERS Annual Report 2002, sous presse.

<http://www.iers.org/iers/publications/reports/2002/>

Book review, The Man Who Flattened the Earth, Maupertuis and the Sciences in the Enlightenment, by M. Terral, P. Willis, in IAG Newsletter, *J. of Geod.*, Springer-Verlag, accepté pour publication.

<http://www.spingerlink.com>

Livres, The Man Who Flattened the Earth, Maupertuis and the Sciences in the Enlightenment, by M. Terral, P. Willis, *revue XYZ*, 96, accepté pour publication.

<http://perso.club-internet.fr/aftopo/publications/xyz/revue.html>

Autres articles (actes de congrès)

1986

The IGN geodetic software for GPS data analysis, P. Willis, C. Boucher, C. Le Cocq, *Proc. 4th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, 28 Avril - 2 Mai 1986, Austin, USA, pp. 1181-1188, 1986.

1987

Tide gauge connection using GPS, P. Willis, C. Boucher, *XIXth International Union for Geodesy and Geophysics General Assembly*, Vancouver, Canada, Août 1987, (actes non publiés), IGN CC/G n° 25, 1987.

1988

The use of GPS at IGN: Geodesy, Geophysics, Engineering, C. Boucher, P. Willis, in *GPS Techniques applied to Geodesy and Surveying*, E. Groten, R. Strauss (Eds.), *Lectures Notes in Earth Sciences*, Springer-Verlag, pp. 59-70, 1988.

Contribution of space data to RETRIG and EUREF, C. Boucher, P. Willis, Z. Altamimi, RETRIG/EUREF Symposium, Lisbonne, Mai 1988, *International Association of Geodesy Subcommittee for the new adjustment of the European Triangulation*, 18, pp. 137-145, 1988.

1989

Rattachement des marégraphes au système géodésique mondial BTS par les systèmes GPS et DORIS, P. Willis, C. Boucher, Actes des *Journées systèmes de référence spatio-temporels de l'Observatoire de Paris*, Paris, Septembre 1988, pp. 95-100, 1989.

Connection of the two levelling systems datum IGN69 and ODN through the Channel by using GPS and other techniques, P. Willis, C. Boucher, G. Petit, *First International Workshop on Geodesy for the Europe-Africa fixed link feasibility studies in the strait of Gibraltar*, Madrid, Mars 1989, (Actes non publiés), IGN CC/G n° 540, 1989.

The establishment of a Survey Network for use on the Cross Channel project, R.R. Christie, R.F. Bordley, C. Boucher, C.E. Calvert, P. Willis, G. Petit, *First International Workshop on Geodesy for the Europe-Africa fixed link feasibility studies in the strait of Gibraltar*, Madrid, Mars 1989, (Actes non publiés), IGN CC/G n° 541, 31 p., 1989.

The DORIS system: Overview and plans, P. Willis, R. Biancale, C. Boucher, A. Cazenave, M. Dorrer, M. Kasser, F. Nouël, *Proc. 5th International Geodetic Symposium on satellite positioning*, Las Cruces, USA, Mars 1989, pp. 19-27, 1989.

High precision kinematic positioning using GPS at the IGN: recent results, P. Willis, C. Boucher, International Association of Geodesy 125th Anniversary General Meeting, Edinburgh, Août 1989, in *Positioning systems, an Overview*, *Proc. of IAG Symposium*, Springer-Verlag, 102, pp. 340-350, 1989.

The DORIS radio tracking system: Status and plans, P. Willis, C. Boucher, M. Kasser, R. Biancale, A. Cazenave, M. Dorrer, F. Nouël, International Association of Geodesy 125th Anniversary General

Meeting, Edinburgh, Août 1989, in Positioning systems, an Overview, *Proc. of IAG Symposium*, Springer-Verlag, 102, pp. 391-399, 1989.

1990

Projet de campagne GPS en Méditerranée occidentale, F. Barlier, C. Boucher, H. Seeger, P. Wilson, P. Willis, *4ème Symposium International sur la Géodésie en Afrique*, Tunis, Mai 1990, (Actes non publiés), IGN CC/G n° 555, 20 p.

Traitement d'une campagne GPS comportant plusieurs types de récepteurs GPS bifréquences - Campagne préliminaire EUREF, K. M'Bra, P. Willis, C. Boucher, *4ème Symposium International sur la Géodésie en Afrique*, Tunis, Mai 1990, (Actes non publiés) IGN CC/G n° 554, 11 p., 1990.

Positioning with the DORIS system: Present status and first results, P. Willis, C. Boucher, H. Bagard, M. Gavoret, G. Imbert, M. Kasser, G. Balmino, R. Biancale, A. Cazenave, M. Dorrer, F. Nouël, J.J. Valette, *Proc. 2nd International Symposium on Precise Positioning with GPS*, Ottawa, Canada, Septembre 1990, pp. 131-144, 1990.

Precise Positioning in the Afar region with the DORIS system, J.J. Valette, A. Cazenave, C. Boucher, P. Willis, M. Dorrer, F. Nouël, *Proc. 2nd International Symposium on Precise Positioning with GPS*, Ottawa, Canada, Septembre 1990, pp. 145-155, 1990.

1991

Le système GPS pour le positionnement statique, P. Willis, *4ème Journée nationale de la recherche géographique, Conseil National de l'Information Géographique, Repères du futur, Nouveau Réseau de Référence Géodésique en France et en Europe, Techniques de positionnement*, Paris, Mai 1991, pp. 23-28, 1991.

GPS network operation for the International GPS Service for Geodynamics, R. Neilan, J.M. Bosworth, M. Chin, T.A. Herring, W. Presscott, C. Rocken, W. Schluter, M. Bevis, S. Fisher, B. Schupler, P. Willis, *XXth International Union for Geodesy and Geophysics General Meeting*, Vienne, Autriche, Août 1991, in Permanent satellite tracking networks for geodesy and geodynamics, Ed G. Mader, *Proc. of IAG Symposium*, Springer-Verlag, 109, pp. 33-36, 1991.

1992

Etude des systèmes de référence terrestres liés au projet Topex/Poseidon, P. Willis, C. Boucher, F. Adot, *Actes des Journées Systèmes de Référence de l'Observatoire de Paris*, Paris, Juin 1992, pp. 42-47, 1992.

1993

Early results from the Topex/Poseidon GPS Precise Orbit Determination Demonstration, W.I. Bertiger, S.C. Wu, T. Yunck, R. Muellerschoen, P. Willis, Y. Bar-Sever, A. Davis, B. Haines, T. Munson, S. Lichten, R. Sunseri, *Proc. American Astronautical Society, American Institute of Astronautics and Aerodynamics, Spaceflight Mechanics Meeting*, Pasadena, USA, Février 1993, AAS/AIAA #93-154, 1993.

http://www.space-flight.org/AAS_meetings/1993_winter/abstracts/93-154.html

Intercomparaisons GPS et DORIS dans le cadre de la mission océanographique Topex/Poseidon, Résultats préliminaires, P. Willis, C. Boucher, J.P. Dufour, *Journée Recherche de l'IGN*, Saint-Mandé, Mars 1993, (actes non publiés), IGN CC/G n° 586, 11 p., 1993.

The First Low Earth Orbiter with Precise GPS Positioning: Topex/Poseidon, W.I. Bertiger, P. Abusali, Y. Bar-Sever, B. Haines, R. Ibanez-Meier, R. Muellerschoen, T. Munson, H.J. Kim, B. Schutz, P. Willis, S. Wu, T. Yunck, *Proc. Institute of Navigation*, Salt Lake City, USA, Septembre 1993 (awarded «ION Best Paper»), pp. 669-277, 1993.

1994

Processing DORIS data with the GIPSY/OASIS II software: recent results for point positioning and orbit determination, P. Willis, W. Bertiger, *Proc. Institute of Navigation*, National Technical Meeting, Navigating the Earth and Beyond, San Diego, USA, Janvier 1994, pp. 615-624, 1994.

The RRF network: Status report of the EUREF-F 93 campaign and its inclusion in the RRF, P. Willis, C. Boucher, S. Botton, M. Le Pape, H. Fagard, Z. Altamimi, *Report of the Symposium of the international Association of Geodesy Subcommission for the European Reference Frame (EUREF)*, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Varsovie, Pologne, Juin 1994, pp. 150-156, 1994.

1995

Le système spatial DORIS, applications à la géodésie, A. Cazenave, R. Biancale, J.F. Crétaux, L. Soudarin, C. Boucher, P. Willis, Z. Altamimi, J.J. Valette, P. Escudier, Comité National de Géodésie et de Géophysique, Rapport quadriennal 1991-1994, Munsch, Sauter, Schlich (Eds.), pp. 25-38, 1995.

1997

The International GLONASS Experiment (IGEX), P. Willis, *Institute Of Navigation Meeting, GPS'97*, Kansas City (USA), September 16-19, 1997, IGN/LAREG CM047, 1997.

1998

Using DORIS data for determining the tropospheric delay: Implications on climatology and meteorology, P. Willis, Y. Bar-Sever, E. Doerflinger, J. Zumberge, *Actes des Journées DORIS*, Toulouse, 27-29 Avril, 9 p., 1998.

Weekly DORIS solutions for stations coordinates: Early results and perspectives, P. Willis, P. Sillard, *Actes des Journées DORIS*, Toulouse, 27-29 Avril, 9 p., 1998.

Measurement techniques panel 1: Radiopositioning techniques: GPS, DORIS, PRARE, S. Talmant, P. Willis, *Report of the Asian-Pacific Space Geodynamics Program*, Tahiti, French Polynesie, May 12-16, pp. 57-61, 1998.

<http://center.shao.cn/APSG/meeting-199805.htm>

The International GLONASS Experiment: IGEX-98, J.A. Slater, P. Willis, W. Gurtner, C. Koll, G. Beutler, G. Hein, R.E. Neilan, *Proc. Institute of Navigation, ION GPS-98*, Nashville, USA, Septembre 1998, pp. 1637-1643, 1998.

1999

Monitoring geocenter and scale variations using DORIS data, Monthly and weekly comparisons towards ITRF references, P. Willis, P. Sillard, IERS Technical Note 25, IERS Analysis Campaign

to investigate Motions of the Geocenter, J. Ray (Ed.), Observatoire de Paris, juin 1999, pp. 105-115, 1999.

DORIS, a contribution to IERS (International Earth Rotation Service), M. Costes, P. Willis, J.F. Crétau, Int. Astron. Fed., Proc. of the 50th Int. Astron. Congress, Amsterdam, Pays-Bas, Octobre 1999, IAF-99-B.1.08, 1999.

Présentation générale du GPS, perspectives pour le futur, P. Willis, Actes du Colloque MARI 99, pp. 2-4, 1999.

Techniques spatiales de la géodésie spatiale, DORIS, GLONASS and Laser Ranging, P. Exertier, F. Barlier, P. Bonnefond, P. Willis, Comité National Français de Géodésie et de Géophysique, Rapport quadriennal 1995-1998, XXII^{ème} Assemblée Générale de l'UGGI, Birmingham, UK, Août 1999, J.P. Barriot (Ed.), pp. 39-46, 1999.

<http://www.obs-mip.fr/cnffgg/Doc/s1exerti.pdf>

The International GLONASS Experiment (IGEX-98), Organization, preliminary results and future plans, J.A. Slater, P. Willis, W. Gurtner, W. Lewandowski, C. Noll, R. Weber, G. Beutler, R.E. Neilan, G. Hein, Proc. Institute of Navigation, ION GPS-99, Nashville, USA, Septembre 1999, pp. 2293-2302, 1999.

2000

Interaction between scientific research and services, M. Feissel, P. Willis, Proc. DORIS Day 2000, Toulouse, 2-3 mai 2000, 9 p., 2000.

Current status of the DORIS Pilot Experiment, G. Tavernier, K. Larson, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin, P. Willis, Proc. DORIS Day 2000, Toulouse, 2-3 mai 2000, 8 p., 2000.

The GLONASS IGEX-98 campaign, from its genesis to its realization, P. Willis, J.A. Slater, W. Gurtner, C. Noll, G. Beutler, R. Weber, R.E. Neilan, G. Hein, Proc. International GLONASS Experiment, IGS Publications, pp. 3-10, 2000.

<http://igsbc.jpl.nasa.gov/overview/igex98.html>

The future of IGEX-98, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R.E. Neilan, C. Noll, J. Slater, R. Weber, P. Willis, Proc. International GLONASS Experiment, IGS Publications, pp. 327-338, 2000.

<http://igsbc.jpl.nasa.gov/overview/igex98.html>

2002

Initial Orbit Determination Results for Jason-1: Towards a 1-cm Orbit, B.J. Haines, W.I.B. Bertiger, S. Desai, D. Kuang, T. Munson, L. Young, P. Willis, Proc. ION GPS 2002, Portland, USA, September 2002, pp 2011-2021, 2002.

http://gipsy.jpl.nasa.gov/igdg/papers/Jason_ION_2002.pdf

2003

Vers une orbitographie centimétrique des satellites océanographiques, Toward a centimetrical orbitography for oceanographical Satellites, P. Exertier, J. Nicolas, P. Bonnefond, P. Willis, J.P. Berthias, O. Laurain, and F. Barlier, Rapport Quadriennal Pour L'Union Géodésique et Géophysique Internationale, 1999-2003, pp. 71-79, 2003.

Présentations dans des congrès (résumés)

1988

Geophysical applications of GPS at the Institut Géographique National, P. Willis, C. Boucher, *Chapman Conference on GPS measurements for Geodynamics*, Fort Lauderdale, USA, Septembre 1988, (transparent), IGN CC/G n° 536, 1988.

1990

Choice of VLBI and GPS observations sites for studying geodynamics in western mediterranean area, *4ème Symposium International sur la Géodésie en Afrique*, N. Rebaï, C. Boucher, G. Petit, P. Willis, F. Barlier, H. Seeger, P. Wilson, A. Bellebna, Tunis, Mai 1990, (abstract) pp. 32-33, 1990.

Combining different types of GPS receivers for precise positioning, P. Willis, C. Boucher, K. M' Bra, *Proc. 2nd International Symposium on Precise Positioning with GPS*, Ottawa, Canada, Septembre 1990, (abstract) p. 493, 1990.

1991

Revue sur les moyens en positionnement statique, P. Willis, *4ème Journée nationale de la recherche géographique, Conseil National de l'Information Géographique, Repères du futur, Nouveau Réseau de Référence Géodésique en France et en Europe, Techniques de positionnement*, Paris, Mai 1991, présentation invitée, (abstract), 1991.

Initial steps toward integrating DORIS and GPS data: Preparation for Topex/Poseidon, P. Willis, W. Bertiger, C. Boucher, F. Nouël, A. PiuZZi, J.T. Wu, *XXth International Union for Geodesy and Geophysics General Meeting*, Vienne, Autriche, Août 1991, (Poster), IGN CC/G n° 566, 1991.

1992

Localisation Géodésique à l'aide du système DORIS, J.P. Dufour, C. Boucher, P. Willis, M. Favoret, M. Lansmann, *Journée Recherche de l'Institut Géographique National*, Février 1992, IGN CC/G n° 568 (transparent), 1992.

First results for the GPS Flight Experiment on Topex/Poseidon, W.G. Melbourne, W. Bertiger, E. Davis, S.M. Lichten, R.J. Muellerschoen, T.M. Munson, S.C. Wu, T.P. Yunck, B.G. Williams, B.D. Tapley, B.E. Schutz, P. Abusali, H. Rim, P. Willis, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, USA, Décembre 1992 (abstract).

1993

Comparaisons between ITRF91 and recent DORIS solutions, J.P. Dufour, C. Boucher, P. Willis, *International Earth Rotation Service Workshop*, Paris, Mai 1993, IGN CC/G n° 582 (poster), 1993.

Processing DORIS data with the GIPSY/OASIS II software for Precise Point Positioning and Orbit Determination: First results and Intercomparaisons, P. Willis, W. Bertiger, B. Haines, R. Muellerschoen, T. Yunck, C. Boucher, J.P. Dufour, H. Bagard, *XXth International Association of Geodesy General Meeting*, Beijing, China, Août 1993, (transparent) IGN CC/G n° 594, 1993.

A first Topex/Poseidon terrestrial reference frame including SLR, DORIS, GPS tracking and tide gauges, C. Boucher, P. Willis, J.P. Dufour, G. Wöppelmann, *Satellite Altimetry and Oceanography, Science Working Team*, Toulouse, Novembre 1993 (abstract).

1994

Recent results for DORIS processing at IGN using the GIPSY/OASIS II software: Stations coordinates and Earth rotation determination, P. Willis, *International Earth Rotation Service and International GPS Service for Geodynamics Workshop*, Paris, Mars 1994, (transparent) IGN CC/G n° 604, 1994.

The RRF Network: A densification of the ITRF for France, P. Willis, C. Boucher, S. Botton, H. Bagard, *International Earth Rotation Service and International GPS Service for Geodynamics Workshop*, Paris, Mars 1994, (transparent) IGN CC/G n° 603, 1994.

The contribution of the DORIS system to the global terrestrial reference frame, P. Willis, C. Boucher, J.Ph. Dufour, Z. Altamimi, N. Bondarenko, *DOSE meeting* (Dynamic Of the Solid Earth), Boulder, USA, September 1994, IGN CC/G n° 610 (transparent), 1994.

1995

DORIS: nouvelle technique de l'IERS, P. Willis, Journée de la Recherche à l'IGN, Saint-Mandé, Mars 1995, IGN/LAREG, CM004 (transparent), 1995.

GPS pour la production et l'utilisation des canevas nationaux, P. Willis, *Forum rencontre: l'évolution des canevas nationaux face aux levés par GPS*, Saint-Mandé, Mars 1995, IGN/LAREG, CM001 (transparent), 1995.

Guide de l'utilisateur du GPS pour la localisation, P. Willis, F. Duquenne, S. Botton, M. Even, J.Y. Egels, M. Dutot, *Forum rencontre: l'évolution des canevas nationaux face aux levés par GPS*, Saint-Mandé, Mars 1995, IGN/LAREG, CM002 (transparent), 1995.

DORIS nouvelle technique de l'IERS: Implications pour l'altimétrie radar, P. Willis, *Réunion préparatoire au SWT Topex/Poseidon*, Toulouse, 24 Avril 1995, IGN/LAREG, CM014 (transparent), 1995.

DORIS and IERS Terrestrial Reference Frame: Open questions and comments, P. Willis, *ITRF Workshop*, Saint-Mandé, 8-9 Mai 1995, IGN/LAREG, CM013 (transparent), 1995.

Polar motion derived from DORIS technique, P. Willis, D. Gambis, *International Earth Rotation Service Workshop*, Paris, 10-12 Mai 1995, IGN/LAREG, CM012 (poster), 1995.

1996

Site velocities estimation using the DORIS system in a multisatellite mode, P. Willis, Z. Altamimi, *American Geophysical Union Spring Meeting*, Baltimore, USA, Mai, 1996, (abstract) EOS, 23, p. 72, Avril 1996.

GPS stations versus DORIS beacons, Absolute and relative motion of Geodetic sites on both sides of a fast subduction zone (New Hebrides trench, SW Pacific), S. Calmant, J.J. Valette, D. Maillard, P. Lebelbard, A. Cazenave, L. Soudarin, J.F. Crétaux, C. Boucher, P. Willis, J. Recy, 1996 Western Pacific Geophysics Meetings, Brisbane, Australia, July 23-27, G32-A06 (abstract), 1996.

1997

Localisation DORIS à l'IGN, P. Willis, Groupe de revue d'exploitation des missions DORIS/SPOT et TOPEX/POSEÏDON, Toulouse, 29 Janvier 1997, IGN/LAREG CM037 (transparentes), 1997.

Présentations du LAREG au Groupe Géodésie du CST et aux journées de la recherche 1997, Z. Altamimi, S. Botton, C. Boucher, M.N. Bouin, L. Daniel, P. Sillard, P. Willis, Marne-la-Vallée, 11 Mars 1997, IGN/LAREG CM042 (transparentes), 1997.

Geodetic Reference Frames for futures altimetric missions (poster), P. Willis, C. Boucher, P. Sillard, *JASON Science Working Team*, Baltimore, USA, 29-30 May, IGN/LAREG CM044, (transparentes), 1997.

Estimation of the tropospheric delay using the DORIS system in a multi-satellite mode, P. Willis, J. Zumberge, *IAPSO/IAMAS Conference*, Melbourne, Australie, Juillet 1997, IGN/LAREG CM042, (transparentes), 1997.

Impact and deficiencies of the new ITRF-96 geodetic reference frame for oceanographic purposes, P. Willis, P. Sillard, C. Boucher, SWT Topex/Poseïdon (poster), Actes du Symposium International sur la Surveillance des Océans à l'horizon 2000, Biarritz, 13-17 Octobre 1997.

GPS and DORIS combined geocenter motion from reference frame time series analysis, P. Sillard, P. Willis, C. Boucher, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, USA, 8-12 Décembre 1997, IGN/LAREG CM051 (transparentes), 1997.

Processing DORIS/IERS Data in a Free Network approach for geocenter variations monitoring, P. Willis, P. Sillard, C. Boucher, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, USA, 8-12 Décembre 1997, IGN/LAREG CM052 (transparentes), 1997.

1998

The great Shikotan Earthquake and tsunami, October 4, 1994 and Earth crust deformation detected by Topex/Poseïdon, V. Kaistrenko, N. Vasilenko, P. Willis, Actes des Journées DORIS (poster), Toulouse, 27-29 Avril, 1998.

MOTEVAS: Mouvements tectoniques verticaux par altimétrie satellitaire, S. Calmant, A. Cazenave, J.J. Valette, P. Willis, Actes des Journées DORIS (poster), Toulouse, 27-29 Avril, 1998.

Terrestrial reference frame differences for Topex/Poseïdon, L. Morel, C. Boucher, P. Willis, J.P. Berthias, SWT JASON (poster), Keystone, USA, Octobre 1998, IGN/LAREG CM 068, 1998.

Preliminary investigation on erroneous ITRF station coordinates of the DORIS tracking network, L. Morel, P. Willis, SWT JASON (poster), Keystone, USA, Octobre 1998, IGN/LAREG CM 067, 1998.

Possible choice for Terrestrial Reference Frame for JASON and Topex/Poseïdon, P. Willis, SWT Jason, Keystone, USA, Octobre 1998 (abstract), 1998.

1999

The DORIS network and its geodetic and geophysical applications, P. Willis, H. Fagard, A. Orsoni, EGS meeting, (abstract) 1999.

Systematic effects of terrestrial reference frames on mean sea level determination, L. Morel, P. Willis, SWT JASON, San Raphael, Octobre 1999 (poster), 1999.
<http://www-aviso.cls.fr/documents/swt/posters/1999/morel.pdf>

Effect on systematic error (stations coordinates and Earth Orientation Parameters), L. Morel, P. Willis, SWT JASON, San Raphael, Octobre 1999 (poster), 1999.
<http://oceanobs99.cls.fr/swt/abstract/pod-geoid.html>

The DORIS Pilot Experiment, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin, G. Tavernier, P. Willis, SWT JASON, San Raphael, Octobre 1999 (poster), 1999.
<http://www-aviso.cls.fr/documents/swt/posters/1999/tavernier1.pdf>

Current status of the DORIS Pilot Experiment, the future International DORIS Service (poster), G. Tavernier, L. Soudarin, K. Larson, C. Noll, J. Ries, P. Willis, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, décembre 1999.

2000

DORIS weekly point positioning at IGN (poster), P. Willis, Proc. DORIS Day 2000, Toulouse, 2-3 mai 2000.

Geodetic applications of the DORIS system in the polar regions, P. Willis, Gravity, Geoid and Geodynamics 2000 (poster), Banff, Canada, Août 2000.

The International DORIS Service for geodetic applications (poster), G. Tavernier, L. Soudarin, P. Willis, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, décembre 2000.

2001

Present Mean Sea Level Indetermination coming from ITRF Reference Frame uncertainties on TOPEX/POSEIDON orbits, P. Willis, L. Morel, JASON Science Working Team Meeting, Solvang, USA, December 2001 (poster).
http://www.jason.oceanobs.com/html/swt/posters2001_fr.html

Current status of the DORIS Pilot Experiment, The future International DORIS Service, G. Tavernier, L. Soudarin, K. Larson, C. Noll, J. Ries, P. Willis, IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hongrie, 2-7 septembre 2001.
<http://www.sztaki.hu/conférences/iag2001/prelprog-thursday.html>

International DORIS Service on Web, J.J. Valette, L. Soudarin, G. Tavernier, J.P. Granier, C. Noll, J.C. Ries, K. Larson, H. Fagard, P. Willis, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2001 (abstract).
http://www.agu.org/meetings/fm01/fm01_pdf/fm01_G22B.pdf

2002

International DORIS Service evolving, J.P. Granier, G. Tavernier, J.J. Valette, L. Soudarin, C. Noll, F. Lemoine, J.C. Ries, M. Feissel, P. Willis, European Geophysical Society Meeting, Nice, Avril 2002.
http://ids.cls/html/report/meeting/EGS_2002_IDS.pdf

DORIS contributions in integrated Earth monitoring, M. Feissel, J.P. Berthias, F. Lemoine, J. Ries, L. Soudarin, J.J. Valette, P. Willis, AGU Spring meeting, Baltimore, USA, June 2002, # AGU-10150664, (poster) 2002.

Early Results from the TurboRogue Space Receiver on Jason-1: Is a 1-cm Orbit Within Reach, B.J. Haines, S. Desai, P. Willis, D. Kuang, T. Munson, W. Bertiger, JASON-Science Working Team, Precise Orbit determination group, Biarritz, (abstract), juin 2002.

IDS Data Center Update, C. Noll, P. Willis, IDS Workshop, Biarritz, juin 2002, présentation invitée, abstract # IDS-0242, 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/CN_DPE2002.pdf

IDS contribution to global monitoring of planet Earth Analysis, M. Feissel, Z. Altamimi, J.P. Berthias, J.F. Crétaux, P. Exertier, R. Ferland, F. Lemoine, J.M. Lemoins, J. Ries, L. Soudarin, J.J. Valette, P. Willis, P. Yaya (présentation orale), IDS Workshop, Biarritz, juin 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/MF_EARTH_IDS2002.pdf

The DORIS Pilot Experiment Status, G. Tavernier, M. Feissel, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin, P. Willis, IDS Workshop, Biarritz, juin 2002, présentation orale, abstract # IDS-047, 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/GT_DPE2002.pdf

Preliminary results of simultaneous Precise Orbit Determination of TOPEX and JASON in the tandem mode using the DORIS data, P. Willis, JASON Science Working Team meeting, Precise Orbit Determination, Biarritz (présentation orale), juin 2002.

Processing DORIS data in a multi-satellite mode: Time scale issues, P. Willis, W. Bertiger, Y. Bar-Sever, B. Haines, R. Muellerschoen, D. Kuang, IDS Workshop, Biarritz, juin 2002, présentation invitée, abstract # IDS-046, 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html

Current activities at the IGN/JPL DORIS data analysis center, P. Willis, Y. Bar-Sever, W. Bertiger, B. Haines, D. Kuang, R. Muellerschoen, IDS Workshop, Biarritz, Juin 2002, (poster), abstract # IDS-047.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html

Results from the Jason-1 BlackJack GPS Receiver: Towards a 1-cm Orbit, B.J. Haines, S. Desai, P. Willis, D. Kuang, T. Munson, W. Bertiger, JASON Science Working Team meeting, New Orleans, poster, Octobre 2002.
http://www.joss.ucar.edu/joss_psg/meetings/TOPEX2002/haines_1.htm

DORIS/JASON clock behavior assessment in the South Atlantic Anomaly region, P. Willis, B. Haines, Y. Bar-Sever, L. Young, JASON Science Working Team meeting, New Orleans, poster, Octobre 2002.
http://www.aviso.oceanobs.com/documents/swt/posters2002_2/willis.pdf

Evaluation of GPS-based orbits for the Jason-1 Mission with Application to Near Real-Time Sea Surface Heights, S. Desai, B. Haines, W. Bertiger, D. Kuang, R. Muellerschoen, P. Willis, AGU Fall meeting, San Francisco, décembre 2002 (poster), #OS52A-0196, 2002.

2003

DORIS time series elaboration with the GOA software: Summary of station related problems (1993-2002), P. Willis, Y. Bar-Sever, IDS Analysis Workshop, Marne-la-Vallée, 20-21 février 2003.

http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/2003_files/PWseries_Feb03.pdf

http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/abstr_2003.html

DORIS/JASON data, What is happening in the South Atlantic Anomaly region?, P. Willis, B. Haines, Y. Bar-Sever, L. Young, IDS Analysis Workshop, Marne-la-Vallée, 20-21 février 2003.

http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/2003_files/PWjason_Feb03.pdf

http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/abstr_2003.html

The Future International DORIS Service, EGS/AGU meeting, G. Tavernier, M. Feissel-Vernier, J.M. Lemoine, C. Noll, J. Ries, P. Willis, Nice, Avril 2003, EAE03-A-10949, publié dans Geophysical Research Abstracts, Volume 5, 2003. (presentation orale)

<http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/02771/EAE03-A-10949.pdf>

Precise Orbit Determination for JASON-1: GPS and the 1-cm challenge, B. Haines, S. Desai, P. Willis, W. Bertiger, T. Munson, EGS/AGU meeting, Nice, Avril 2003, EAE03-A-12378, publié dans Geophysical Research Abstracts, Volume 5, 2003. (poster)

<http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/02771/EAE03-A-12378.pdf>

Estimating tropospheric delays from DORIS data in a multi-satellite mode, P. Willis, Y. Bar-Sever, EGS/AGU meeting, Nice, Avril 2003, EAE03-A-02771, publié dans Geophysical Research Abstracts, Volume 5, 2003. (poster)

<http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/02771/EAE03-A-02771.pdf>

The Future of the International DORIS Service, G. Tavernier, M. Feissel-Vernier, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, P. Willis, EGS/AGU meeting, Nice, Avril 2003, EAE03-A-10949, publié dans Geophysical Research Abstracts, Volume 5, 2003. (presentation orale)

<http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/10949/EAE03-A-10949.pdf>

Notes techniques

1985

Modélisation des mesures du récepteur GPS TR5S de la SERCEL, C. Boucher, P. Willis, IGN NT/G n° 46, 1985.

1987

Campagne GPS de Haute-Provence 1987, P. Willis, IGN CR/G n° 12, Décembre 1987.

1988

Relation between BTS87, WGS84 and GPS activities, C. Boucher, Z. Altamimi, P. Willis, Rapport annuel du Bureau International de l'Heure, pp. 131-140, Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale, NT n° 10, 1988.

Compte-rendu d'expérimentation du GPS cinématique - Tests GPS entre la Tour et le toit de la Logistique à l'IGN, P. Willis, IGN CR/G n° 9, 1988.

2ème Compte-rendu d'expérimentation du GPS cinématique - Tests GPS entre la Tour et le toit de la Logistique à l'IGN - Mesures effectuées le 24 et 25 mai 1988, P. Willis, IGN CR/G n° 10, Juillet 1988.

Spécifications techniques pour la rédaction d'un compte-rendu de mission GPS, P. Willis, IGN IT/G n° 54, Août 1988.

Analyse d'un logiciel de combinaison de jeux de coordonnées tridimensionnelles, C. Boucher, P. Willis, IGN IT/G n° 58, Octobre 1988.

1989

Essai des récepteurs GPS TANS, H. Sec, P. Willis, IGN CR/G n° 14, Janvier 1989.

1990

Compte-rendu de la mission Ashtech Turtmann de juin 1990, S. Botton, C. Boucher, P. Willis, IGN CR/G n° 30, 1990.

Eléments de validation d'un calcul GPS, P. Willis, IGN IT/G n° 119, Novembre 1990.

1991

Spécifications pour le calculateur GPS, S. Botton, C. Boucher, F. Bourassin, L. Daniel, P. Willis, IGN IT/G n° 107, Juin 1991.

Eléments d'interprétation des erreurs de fermeture dans le cas du positionnement relatif statique par GPS, P. Willis, IGN IT/G n° 120, Juillet 1991.

Aide à la notice Ashtech, S. Botton, P. Willis, F. Bourassin, IGN IT/G n° 106, Décembre 1991.

1992

Instructions techniques pour le chef de mission d'une campagne de géodésie par GPS, P. Willis, S. Botton, IGN IT/G n° 93, Janvier 1992.

1993

Recent DORIS data processing results using the GIPSY-OASIS II software, P. Willis, W. Bertiger, JPL Interoffice Memorandum, 335.8-93-005, Avril 1993.

The JCOD5 station coordinates solution of the DORIS network, C. Boucher, J.P. Dufour, P. Willis, Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale, Note Techn. n°11, Juin 1993.

1995

Script TUESTA: creating a stacov file containing the local tie information (position and velocity), P. Willis, IGN/LAREG, MM007, juin 1995.

DORIS: Nouvelle technique de l'IERS. Compte-rendu d'activité au Conseil Scientifique National du Bureau Central de l'IERS, Paris 26 Avril 1995, P. Willis, IGN/LAREG, CM015, 1995.

Basic considerations on the problem of geodetic references and its implication for the European RadioNavigation Plan, P. Willis, Annexe du document European Radio Navigation Plan, IGN/LAREG, MM012, 5 p., Juin 1995

1996

Définition d'un protocole de tests visant à définir une procédure optimale pour obtenir des coordonnées DORIS mensuelles dans un système de référence mondial maintenu de manière fiable dans le temps, P. Willis, IGN/LAREG, SP003, Avril 1996.

1997

Compte-rendu de mission au JPL, 8-22 Janvier 1997, P. Willis, IGN/LAREG CR014, 1997.

2000

Conversion altimétrique RGF93-IGN69, Correction des altitudes GPS en France, J.M. Nocquet, H. Duquenne, C. Boucher, A. Harmel, P. Willis (Ed.), Groupe de Travail Permanent du CNIG, Positionnement Statique et Dynamique, mars 1999, Conseil National de l'Information Géographique, 68 p. 2000.

<http://www.esgt.cnam.fr/sites/CNIG/cnig.psd/CIAG/CNIG.PSD/cnig.htm>

2002

DORIS Time tags, JASON/TOPEX common processing, P. Willis, JPL, February 25, 2002.

Possible improvement of DORIS orbits by estimating TOPEX and JASON orbits in a single run, P. Willis, W. Bertiger, B. Haines, Y. Bar-Sever, D. Kuang, JPL, March 8, 2002.

Rapports de fin de contrats

1987

Contract Trans Manche Link pour les travaux préliminaires au percement du Tunnel sous la Manche, Partie Planimétrie, C. Boucher, P. Willis, IGN/SGN, 1987.

Contract Trans Manche Link pour les travaux préliminaires au percement du Tunnel sous la Manche, Détermination du décalage altimétrique entre les systèmes de nivellement anglais et français dans la zone Calais-Douvres, C. Boucher, P. Willis, IGN/SGN, 1987.

1988

Rapport final de la campagne GPS - Test SERCEL: Janvier-Février 1988, Calcul IGN/Logiciel GDVS, S. Botton, C. Boucher, P. Willis, IGN CR/G n° 11, Août 1988.

1989

Spécifications du logiciel de localisation DORIS, Partie I, Modèle d'estimation physique et d'estimation, C. Boucher, P. Willis, S. Botton, IGN IT/G n° 68, Juin 1989.

Spécifications du logiciel de localisation DORIS, Partie II, Description fonctionnelle, C. Boucher, P. Willis, S. Botton, IGN IT/G n° 69, Juin 1989.

1990

Projet DORIS, Spécifications de recette des performances de la localisation DORIS, P. Willis, M. Favoret, IGN IT/G n° 70, Mai 1990.

1993

Spécifications de recette informatique du logiciel CLS/Argos de localisation DORIS, P. Willis, IGN IT/G n° 138, Septembre 1993.

1997

Influence des anomalies de gravité sur les équipements de navigation inertielle, Etude du document «Etude des caractéristiques de la déflexion de la verticale», P. Willis, Contrat d'expertise pour la SAGEM, IGN/LAREG 97.207, avril 1997.

1999

Orbitographie précise avec le logiciel Gipsy/Oasis II, P. Willis, formation Alcatel, Toulouse, IGN/LAREG SC 10 (transparents), Juin 1999.

Propositions de recherche acceptées

1989

Terrestrial Reference Frame, Contribution to FLINN, C. Boucher, Z. Altamimi, P. Willis, L. Boloh, A. Cazenave, M. Lefebvre, F. Barlier, F. Pierron, C. Veillet, NASA Dynamic of the Solid Earth (DOSE), 1989.

http://denal.gsfc.nasa.gov/research/DOSE_int0.html

1990

Terrestrial Reference Systems related to the Topex/Poseidon project, Science Working Team Topex, C. Boucher, P. Willis, F. Barlier, P. Mazzega, 1990.

GPS/DORIS possible intercomparison for Topex/Poseidon, P. Willis, proposition de co-Investigation scientifique pour la partie GPS (PI W. Melbourne, JPL/USA), 4 p., 16 mars 1990.

1991

Orbitographie GPS au Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale, 1991.

Response for the International Call for Participation to the International GPS Service for Geodynamics (IGS), P. Willis, C. Boucher, L. Daniel, L. Boloh, H. Burger, IGN/SGN, 10 juin 1991.

1994

Proposal to include DORIS as a new technique in IERS (International Earth Rotation Service), C. Boucher, A. Cazenave, J.P. Dufour, N. Essaiifi, M. Feissel, D. Gambis, P. Willis, Rapport Technique GRGS, RT 94-02, March 1994.

1997

Références géodésiques pour les futures missions altimétriques, P. Willis, proposition JASON au CNES, JASON Science Working Team, IGN LAREG 97.647, 5 décembre 1997.

1998

Geodetic and geophysical applications of the DORIS/ENVISAT data within the International Earth Rotation Service, P. Willis, proposition ENVISAT à l'Agence Spatiale Européenne, IGN/LAREG 98.396, ENVISAT Science Working Team, 5 juin 1998.

1999

Proposition GLONASS au Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale, 1999.

2002

Improved Estimation of Global Geophysical Parameters Using Optimal Integration of Space Geodetic Techniques, P. Willis, Y. Bar-Sever, O. Sovers, R. Gross, B. Haines, NASA Solid Earth and Natural Hazards Research Announcement, NRA-01-OES-05, February 2002.

Séminaires

Présentation du système GPS, *Séminaire Ecole Normale Supérieure*, Paris, juin 1990.

Séminaire IGN, Géodésie Spatiale par méthode dynamique: Application au positionnement DORIS, 1ère partie, Saint-Mandé, le 4 avril 1996, P. Willis, IGN/LAREG, CM024 et CM025 (transparentes).

Le système GPS: Présentation générale, P. Willis, *Journée d'information SCETAUROUTE*, GPS: Applications aux travaux routiers, Saint-Quentin-en-Yvelines, 7 octobre 1997, IGN/LAREG CM046 (transparentes).

Positionnement par satellites, P. Willis, *Réunion plénière du Conseil National de l'Information Géographique*, Paris, 25 Novembre 1997, IGN/LAREG CM053 (transparentes).
<http://www.bureau-des-longitudes/conference.html>

Les applications scientifiques du système DORIS, P. Willis, *Conférence du Bureau des longitudes*, Paris, avril 1997, texte publié dans la *revue XYZ*, 73, 4, pp. 67-74, 1997.

Géodésie spatiale, systèmes, mesures et modélisation, P. Willis, *Séminaire ETCA*, Paris, Mai 1998.

La campagne internationale GLONASS IGEX-98, P. Willis, Institut Français de Navigation, Paris, 11 mai 1999.

Nouvelles perspectives de positionnement précis, GPS, GLONASS, Galileo, P. Willis, Forum GPS de l'ENSG, Marne-la-Vallée, 30 septembre 1999.

Positionnement par satellite, GPS, Des applications grand public aux applications scientifiques, P. Willis, Espace et Guyane, l'Univers d'Ariane II, Lycée Emile Combes de Pons, 19 octobre 1999.
<http://www.lycee-pons.org/espacecult.html>

Géodésie globale et systèmes de référence, P. Willis, Journée Espace et Société, MENRT, Paris, 2 février 2000, Utilisation scientifique des systèmes de localisation/navigation par satellite, 2000.

Systèmes de navigation par satellite: Les enjeux de Galileo, P. Willis, Journée scientifique du Bureau des longitudes, 18 juin 2002.
<http://www.bureau-des-longitudes/conference.html>

Cours et vulgarisation

- Notice d'information sur le système GPS, C. Boucher, P. Willis, IGN NT/G n° 12, 1986.
- Les applications du GPS à l'IGN - Etat actuel et perspectives, P. Willis, C. Boucher, IGN NT/G n° 15, Mai 1988.
- Glossaire des termes relatifs à la localisation par GPS (version 3.0), P. Willis, J.G. Affholder, M. Le Pape, S. Botton, F. Bourassin, L. Daniel, D. Marcel, I. Veillet, IGN IT/G n° 121, janvier 1992.
- Le système GPS - Stage de perfectionnement V14 de l'ENSTA - Géodésie et Astronomie en vue de la navigation (transparents), P. Willis, IGN CC/G n° 21, Janvier 1992.
- Introduction à la géodésie spatiale, P. Willis, IGN CC/G n° 23 (transparents), Août 1992.
- Formation générale au GPS, Méthodes Modernes de Positionnement Géodésique, Février 1992, P. Willis, IGN CC/G n° 24 (transparents), Août 1992.
- Le système DORIS, Méthodes Modernes de Positionnement Géodésique, P. Willis, IGN CC/G n° 27, Février 1994 (transparents).
- Le système GPS, Méthodes Modernes de Positionnement Géodésique, P. Willis, IGN CC/G n° 30, Février 1994 (transparents).
- Introduction à la Géodésie Spatiale (transparents), Fascicule n° 1 et 2, Méthodes Modernes de Positionnement Géodésique, P. Willis, IGN CC/G n° 28 et 29, Février, 1994.
- GPS: Localisation et navigation, S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even, P. Willis, Groupe de Travail Permanent du CNIG Positionnement Statique et Dynamique, *Editions Hermès*, Librairie Eyrolles, ISBN 2-86601-570-3, 159 p., 1996.
- Géodésie, A. Cazenave, P. Willis, Encyclopédie Universalis, Albin Michel, *Dictionnaire des Sciences de la Terre*, ISBN 2-226-10094-6, pp. 254-266, 1998.
- La boussole high-tech, P.Y. Lautrou, L'Express, pp. 28-29, 23 juillet 1998.
- Satellite Navigation, An Overview, P. Willis, European Space Agency Summer-School, Alpbach, Autriche, 17-26 juillet 2001
<http://www.asaspace.at/alpbach2001/alpbach2001rep.html>
- La géodésie, Bilan et perspectives, Bureau des longitudes, J.J. Levallois, G. Balmino, F. Barlier, C. Boucher, B. Guinot, M. Lefebvre, P. Willis, Z. Altamimi, N. Capitaine, A. Cazenave, P. Exertier, J.C. Husson, A. Lebeau, 129 p., décembre 2001.
- Les systèmes de navigation par satellite, P. Willis, Encyclopaedia Universalis, Une année d'actualités scientifiques et techniques, Edition 2002, pp. 158-162, 2002.
- Satellite navigation systems, P. Willis, pp. 15.24-15.33, in The Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineers, M. Davies (Ed.), Mc Graw-Hill, Octobre 2002, ISBN-0-07-136229-0, 1360 p., 2002.

Un système de positionnement, Galileo, Un enjeu stratégique, scientifique, technique, Académie de marine, Bureau des longitudes, Académie nationale de l'air et de l'espace, Bureau des longitudes (ouvrage collectif), Paris, juin 2003.

GPS: Localisation et navigation, S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even, P. Willis, Groupe de Travail Permanent du CNIG Positionnement Statique et Dynamique, *Editions Hermès*, 2^{ème} édition, sous presse.

*«Il y a deux choses que l'on n'arrive pas à prendre chez les autres: les sous-vêtements usagés et l'expérience»
Jack Weightman, géodésien anglais*

ENSEIGNEMENT ET ENCADREMENT DE CHERCHEURS

ENSEIGNEMENT

| | |
|----------------|---|
| de 1987 à 1990 | 15 heures annuelles «Moindres Carrés» dans le tronc commun du DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie (Observatoire de Paris) |
| de 1987 à 1990 | 15 heures annuelles «Introduction à la Géodésie Spatiale» dans le DEA Méthode Modernes en Télédétection (Jussieu). |
| de 1987 à 2000 | 15 heures annuelles «Géodésie Spatiale» dans le tronc commun du DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie (Observatoire de Paris) |
| De 1996 à 2001 | 9 heures annuelles «Navigation et positionnement par satellite» à l'Institut Galilée (Université Paris XIII, Saint-Denis), Option Ingénieurs télécom. |
| en 1997 | 9 heures «Introduction à la Géodésie Spatiale» dans le module d'ouverture sur l'astrométrie et la géodésie spatiale de l'Institut Gérard Desargues (Université Claude Bernard, Lyon-1, 1 ^{er} cycle) |
| De 1997 à 2001 | 5 heures annuelles «Présentation des systèmes navigation par satellite» dans le module V-14 (Géodésie et Astronomie en vue de la navigation) de la Société des Amis de l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées |
| De 1998 à 2001 | 9 heures annuelles «Applications topographiques et géodésiques du système GPS» dans le Mastère Communication, Navigation, Surveillance (Ecole Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse), en anglais à partir de 1999. |
| De 2000 à 2001 | 3 heures, Localisation par GPS, Mastère Systèmes Intelligents de Transport, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. |

*«La seule révolution c'est de s'améliorer soi-même,
en espérant que les autres feront la même chose»*
Georges Brassens

ENCADREMENT DE THESARDS ET JURY DE THESE

- 1986** **Noëlle Ramamisson**
Comparaison de temps par divers récepteurs du système GPS
Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Ecole Nationale des Sciences
Géographiques soutenue le 13 Juin 1986.
Jury: C. Boucher, Ingénieur en Chef Géographe de l'IGN (Président du
jury); B. Guinot, Directeur du BIPM (Rapporteur); M. Granvaud,
Directeur du LPTF (Directeur de thèse); H. Duquenne, Ingénieur
Géographe à l'IGN, P. Willis, Ingénieur Géographe à l'IGN.
- 1990** **Zuheir Altamimi**
Combinaison de techniques spatiales pour la détermination et la
maintenance d'un système de référence terrestre centimétrique
Thèse de l'Observatoire de Paris, soutenue le 8 Janvier 1990 à l'Institut
Géographique National
Jury: B. Guinot, Directeur du BIPM (Président du jury); C. Boucher,
Ingénieur en Chef Géographe à l'IGN (Directeur de thèse); F. Barlier,
Astronome au CERGA (Rapporteur); M. Heissel, Astronome à
l'Observatoire de Paris (Rapporteur); P. Willis Ingénieur Géographe à
l'IGN (Rapporteur)
- 1991** **Kouadio S. M'Bra**
Utilisation des mesures du système GPS pour la localisation relative
précise. Combinaison de récepteurs bi-fréquences, amélioration des
orbites radiodiffusées
Thèse de l'Observatoire de Paris, soutenue le 16 Avril 1991 à l'Institut
Géographique National
Jury: F. Barlier, Astronome au CERGA (Président du jury); A. Fontaine,
Ingénieur Géographe Général à l'IGN (Rapporteur); F. Nouël, Ingénieur
au CNES (Rapporteur); P. Willis, Ingénieur Géographe à l'IGN
(Directeur de thèse); C. Boucher, Ingénieur en Chef Géographe à l'IGN,
B. Guinot, Directeur du BIPM; J. Lavergnat (CEPT)
- 1993** **Jean-François Crétaux**
Orbitographie des satellites d'altitude 500 à 1500 km à l'aide du système
de positionnement global (GPS)
Thèse de l'Université Paul Sabatier, soutenue à Toulouse le 20
Septembre 1993
Jury: F. Barlier, Astronome au CERGA (Président du jury, rapporteur);
G. Balmino, Ingénieur au CNES/GRGS; J. Bernussou (Directeur de
thèse); G. Beutler, Directeur de l'AIUB; D. Gambis, Astronome à
l'Observatoire de Paris (Rapporteur); F. Nouël, Ingénieur au CNES (co-
direction de thèse); P. Willis, Ingénieur Géographe à l'IGN (co-direction
de thèse).

- 1990-
(non soutenue)** **Ahmed Bellebna**
Compensation géodésique des données historiques du bassin méditerranéen occidental
Thèse (non soutenue) de l'Observatoire de Paris
Directeur de thèse: P. Willis
NB: Le candidat n'a plus donné de ses nouvelles depuis son inscription en thèse et son retour en Algérie en 1990.
- 1991-
(non soutenue)** **Didier Burtin**
Utilisation des techniques inertielles et du GPS en géodésie
Thèse (non soutenue) de l'Observatoire de Paris
Directeur de thèse: P. Willis
Co-directeur de thèse René Forsberg (KMS, Suède)
NB: Le candidat a arrêté sa thèse au moment de son embauche (en 1994)

Intégration du GPS et des Techniques inertielles, D. Burtin, Conférence du Service de la Recherche de l'IGN, IGN CC/G n°25, Août 1992.
Intégration of the Global Positioning System and Inertial Navigation Systems, D. Burtin, Université de Copenhague, Institut de Géophysique, Danemark, Avril 1993
- 1997** **Marie-Françoise Jozeau**
Géodésie au XIXème siècle, de l'hégémonie française à l'hégémonie allemande, regards belges, compensation et méthode des moindres carrés
Thèse de l'Université Paris VI (Epistémologie et histoire des sciences), soutenue le 18 juin 1997.
Jury: P. Crépel (CNRS, Président du jury), B. Bru (Paris VI, rapporteur), M. Bougeard (Lyon I), J.J. Driesbeke (U. Libre de Bruxelles), C. Houzel (Paris VII), P. Willis (IGN)
- 2001** **Laurent Morel**
Références géodésiques pour les futures missions altimétries, Applications à la mission JASON
Thèse de l'Observatoire de Paris, soutenue le 3 octobre 2001
Jury: N. Capitaine (Observatoire de Paris, Président), G. Beutler (AIUB, Suisse), J.F. Crétaux (CNES), V. Dehant (ROB, Belgique), P. Exertier (CERGA), P. Vincent (CNES), P. Willis (IGN, Directeur de thèse)

Sensitivity of Topex/Poseidon orbit and derived mean sea level to DORIS stations coordinates, L. Morel, P. Willis, *Adv. Space Res.*, 30, 2, pp 255-263, 2002
Terrestrial Reference Frame Effects on Global Sea Level Rise determined by Topex/Poseidon, L. Morel, P. Willis, soumis au *J. Geod.*
- 2002** **Jean-Pierre Chauveau**
Amélioration de la précision de localisation d'un récepteur GPS en mouvement par résolution de l'ambiguïté sur les mesures de phases
Thèse ONERA (Directeur: J. Lacroix, Paris VI, parrain: P. Willis), Soutenue le 22 janvier 2002
Jury: B. Christophe (ONERA), M. Kasser (IGN, Président), J. Lacroix (Paris VI, Directeur de thèse), B. Lapeyre (CERMIS/INRIA, rapporteur), C. Macabiau (ENAC, rapporteur), F. Peyret (LCPC)

2003

Stéphane Durand

Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS, Etude détaillée des équations d'observation et du problème de résolution des ambiguïtés entières
Thèse de l'Observatoire de Paris, co-financée IGN/LCPC, soutenue le 13 janvier 2003

Jury: J. Lacroix (Paris VI), I. Nikiforov (U. Troyes), F. Duquenne (ESGT), A. Gomez (Observatoire de Paris, Président du jury), A. Lannes (CERFACS), P. Willis (IGN, Directeur de thèse), F. Peyret (LCPC, co-directeur de thèse), J.P. Barboux (SERCEL), M. Heddebaut (INRETS)

A. Lannes, S. Durand, Dual algebraic formulation of Differential GPS, *J. of Geod.*, 77, 1-2, pp. 22-29, 2003.

ENCADREMENT DE STAGIAIRES

- 1986** **Jean-François Bru**
Traitement des données GPS en mode non différencié, modélisation et algorithmes
Mémoire de DEA Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie,
Observatoire de Paris
- 1986** **Julien Veaux**
Usage de la gravimétrie et des satellites NAVSTAR/GPS en géodésie fine
Mémoire de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes
- 1987** **Aimé Naima Andriamparany**
Mise sous format standard des données GPS du récepteur SERCEL
Stage d'Ingénieur Géographe de l'Ecole des Sciences Géographiques
- 1987** **Mwaka di Mavinga**
Traitement des mesures du système NAVSTAR/GPS
Stage d'Ingénieur des Travaux de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques
- 1988** **Jean-Philippe Picon**
Traitement d'observation de géodésie spatiale (Djibouti, 1987), Analyse de la
précision
Stage de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg
- 1988** **Laurence Lefeurmou**
Projet DORIS: Etude du positionnement permanent
Stage d'Ingénieur de l'Ecole Supérieur des Géomètres et Topographes
- 1988** **Marie-Noëlle Loaec**
Simulation des erreurs de positionnement
Stage de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg
- 1989** **Bruno Mouly**
DORIS: Application au volcanisme d'Hawaii
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/SGN 105064
- 1989** **A. Bellebna**
Détermination de modèles numériques régionaux de l'ionosphère à partir
d'observations bifréquences effectuées sur les satellites GPS et TRANSIT
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie

- 1989** **Didier Burtin**
Utilisation du GPS en mode cinématique total, hybridation avec les systèmes de navigation inertiels
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
- 1990** **Kouadio M’Bra**
Amélioration régionale des orbites GPS
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
- 1991** **Laurent Duhem**
(co-direction de stage)
Réalisation du système de référence terrestre: aspect cinématique (prise en compte des déformations)
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
- 1992** **Florence Cadot**
Combinaison de systèmes de référence terrestres à partir de données d’orbite de satellites: Application au projet franco-américain Topex/Poseïdon
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/SGN 105095
- 1992** **Guy Wöppelmann**
(co-direction de stage)
Traitement des données GPS de la campagne GIG’91 en mode géodésique ultraprécis
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
- 1994** **Nicolas Bondarenco**
Estimation du délai troposphérique dans le traitement des données DORIS, Octobre 1994
IGN/LAREG MS004
- 1996** **Laurent Morel**
Etude de l’influence des jeux de référence sur les résultats DORIS (pôle de la rotation terrestre, orbitographie, positionnement)
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/LAREG MS002
- 1997** **Olivier Dorie**
Recherche d’une procédure optimale pour transformer les coordonnées mensuelles DORIS dans un système de référence maintenu de manière stable dans le temps
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/LAREG MS006
- 1997** **Romain Garmier**
Modélisation et estimation du frottement atmosphérique sur les satellites SPOT-2 et SPOT-3 dans le cadre du système DORIS
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/LAREG MS007
- 1998** **Nicolas Gruel**
Positionnement géodésique avec le système PRARE
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/LAREG MS009

- 1999** **Ali M. Sammuneh**
Intérêts scientifiques de la campagne GLONASS IGEX-98, Implication pour les systèmes de référence
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/LAREG MS14
- 1999** **Rafik Zerhouni**
Traitement et analyse des données de la campagne DORIS en Polynésie française
Rapport de stage de DEA Astronomie Fondamentale Mécanique Céleste et Géodésie
IGN/LAREG MS 13

ARTICLES ASSOCIÉS

IGEX: International GLONASS Experiment, Scientific Objectives and Preparation, P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan J. Slater, in Satellite Dynamics, Orbit Analysis and Combination of Space Techniques, J. Dow, G. Beutler (Eds), *Adv. Space Res.*, 23, 4, pp. 659-663, 1999.

«[Avec le GPS, on sait où on va](#)»
(en parlant du Grand Parti Socialiste)
Lionel Jospin, Libération, 3 avril 2003

Potential interest of the International GPS Service for the Galileo system, P. Willis, J. Dow, *GPS Solutions*, 4, 4, pp. 68-71, 2001.

Topex/Jason combined GPS/DORIS orbit determination in the tandem phase, P. Willis, B. Haines, Y. Bar-Sever, W. Bertiger, R. Muellerschoen, D. Kuang, S. Desai, in *Satellite Dynamics in the Era of Interdisciplinary Geodesy*, P. Visser, P. Moore (Eds), *Adv. Space Res.*, 31, 8, pp. 1941-1946, 2003.

*«J'aime ma profession et comme tous les professionnels, j'aime les causes et les cas difficiles»
Jacques Vergès, Europe-Echecs, 59, Janvier 2003*

DOSSIER DE RECHERCHE

Mots clés: Géodésie spatiale, DORIS, IGGOS, système de référence terrestre, géocentre, série temporelle de coordonnées, GPS.

Keywords: Satellite geodesy, DORIS, IGGOS, Terrestrial Reference Frame, Geocenter, time series of coordinates, GPS.

Résumé:

DORIS est un système français d'orbitographie précise. Il a été l'un des éléments clés du succès de la mission franco-américaine d'altimétrie satellitaire Topex/Poseidon produisant une avancée significative dans le domaine encore rapidement évolutif de l'océanographie spatiale. Le but de ce document est de présenter les résultats obtenus en géodésie, en expliquant certains problèmes actuels d'estimation en réseau libre et en s'interrogeant sur les limitations actuelles de la précision. En particulier, l'utilisation du système DORIS pour la maintenance du système de référence terrestre (géocentre, échelle) est analysée. Certains exemples récents d'applications géophysiques sont aussi présentés (détection de mouvements co-sismiques). Finalement, nous nous interrogerons sur le rôle que peut jouer à l'avenir le système DORIS comme composante du nouveau système global d'observation géodésique (IGGOS) en tenant compte de la nouvelle dynamique issue de la création récente de l'International DORIS Service (IDS).

Summary:

DORIS is a French system for Precise Orbit Determination. It has been a key component in the success of the US-French Topex/Poseidon satellite altimetry mission allowing a significant improvement in the rapidly evolving field of satellite oceanography. The purpose of this document is to present recent geodetic results, explaining present problems in free-network data analysis and assessing its present limitations in precision. In particular, the use of the DORIS system in the maintenance of the terrestrial reference frame (geocenter and scale) is discussed. Some recent examples of geodetic and geophysical applications are presented (co-seismic displacement detection). Finally, we will discuss the role that DORIS could play in the future as a component of the new International Global Geodetic Observing System (IGGOS), taking into account the actual impulse created since the recent establishment of the International DORIS Service (IDS).

Introduction

Le 22 janvier 1990, le Centre national d'études spatiales (CNES) effectua le lancement du satellite SPOT2 d'observation de la Terre. À son bord se trouvait le premier récepteur DORIS embarqué en préparation de la mission altimétrique franco-américaine Topex/Poseidon. Lancé pour des besoins d'orbitographie opérationnelle précise, ce récepteur fonctionne toujours, bien au-delà de son espérance de vie et de ses spécifications initiales. Depuis cette date, le système DORIS a démontré de nouvelles applications scientifiques, en particulier dans le domaine de la géodésie.

Au cours des dix dernières années, le système militaire américain de navigation par satellite GPS (*Global Positioning System*) est devenu omniprésent comme technique géodésique de localisation précise (Hoffmann-Welenhof, 1992; Parkinson et al, 1996). Cette technique a su fédérer, de manière souvent incompréhensible pour des observateurs extérieurs, une large communauté scientifique, réellement internationale, sur une base de volontariat, pour créer le Service scientifique IGS (*International GPS Service*) de l'Association Internationale de Géodésie.

Beaucoup plus récemment, en juillet 2003, l'Association Internationale de Géodésie (AIG) s'est restructurée pour mieux valoriser et mettre en évidence ces nouveaux types de services scientifiques (Beutler et al, 1999). En particulier, il est symptomatique de constater que le premier projet créé par cette nouvelle structure de l'AIG concerne le projet IGGOS (*Integrated Global Geodetic Observing System*) visant à réaliser une infrastructure globale d'observations géodésiques de toute nature (Rummel et al, 2002a) en s'inspirant de l'exemple réussi de l'IGS.

Le but de ce document est d'analyser la qualité actuelle des résultats géodésiques du système français DORIS et de s'interroger sur le rôle que ce système peut jouer à l'avenir dans le contexte du projet IGGOS de l'AIG en tenant compte de la concurrence déjà existante et bien établie du GPS au sein du service IGS.

Principes de la géodésie spatiale

Tout d'abord, il n'est pas inutile de présenter rapidement, sans aucune équation mathématique, les principes de base de la géodésie spatiale. Pour simplifier, la mesure de base correspond à une différence de temps (durée) entre deux événements reliant deux objets: l'un lié à la Terre et tournant avec elle dans le système inertiel, l'autre dans l'espace (émetteur ou récepteur) soumis au principe fondamental de la dynamique, dont le mouvement peut donc être entièrement défini à partir de la connaissance des forces du mouvement ainsi que de la position et de la vitesse à un instant donné de référence (vecteur d'état à l'époque du début de l'arc d'orbite considéré). Les paramètres que l'on cherche donc potentiellement à déterminer sont de nature assez différents (Exertier, 1999; Dufour, 2001):

- La position des stations de poursuite au sol (position géodésique, vitesse moyenne de déplacement),
- Les horloges au sol et dans l'espace (modèle polynomial d'horloge: différence de marche des horloges, biais en fréquence, dérive de fréquence due au vieillissement des oscillateurs,...),
- Le satellite ou les satellites en orbite (le vecteur d'état, soit la position et la vitesse à l'instant initial de référence de l'arc d'orbite),
- Le milieu atmosphérique (correction troposphérique, correction ionosphérique).

Il s'agit donc typiquement d'un problème inverse (Tarantola, 1987). À partir de différentes mesures (en général en grand nombre), on essaye d'en déduire une estimation de la valeur de certains paramètres, ainsi que leur précision. Il faut noter que le problème est en général

surdéterminé car la position du satellite n'est pas estimée à chaque instant de mesure mais uniquement à l'instant de référence de début de l'arc. On utilise donc explicitement la connaissance des forces agissant sur le mouvement du satellite (approche dynamique ou plutôt semi-dynamique lorsque certains modèles de forces ne sont pas entièrement connus et lorsque l'on estime en plus un nombre de paramètres complémentaires en nombre limité). Par opposition, une approche différente, désormais possible avec les systèmes de navigation par satellite, comme le système GPS ou le futur système Galileo, serait appelée cinématique. Dans ce cas, on ne suppose pas connues les forces agissant sur le mouvement, on se contente simplement d'estimer la trajectoire du satellite point par point en utilisant le fait que ces systèmes permettent d'effectuer un nombre suffisant de mesures simultanées (Konig et al, 2002; Byun, 2003) pour résoudre entièrement le problème d'estimation.

Suivant les paramètres recherchés, il y a plusieurs années, on aurait décomposé le problème général en plusieurs sous-problèmes distincts, résolus de manière séparée et consécutive:

- calculer d'abord la position des satellites (orbitographie) en fixant la position des stations de poursuite à des valeurs de référence, puis
- déterminer la position des stations en sol en utilisant l'information sur les positions successives du ou des satellites.

Une approche plus récente (Heflin et al, 1992; Blewitt et al, 1992) consiste à estimer simultanément tous les paramètres en prenant la précaution d'introduire initialement des contraintes faibles (100 m sur la position approchée du satellite, 100 m sur la position approchée des stations de poursuite au sol, etc.) sur chacun des paramètres afin de rendre le problème réellement estimable. C'est ce que l'on appelle communément la résolution du problème géodésique en «réseau libre». C'est l'approche que nous avons utilisée avec le logiciel Gipsy/Oasis (Webb et al, 1995) dans la totalité des résultats présentés dans ce document de synthèse.

Les résultats obtenus concernant les paramètres non éliminés sont stockés sous forme de matrice de covariance (valeur estimée, écart-type estimé, corrélation entre paramètres). Cette matrice est généralement une matrice pleine de grande dimension exprimée en format SINEX dont la description détaillée peut être trouvée sur le site de l'IERS (*International Earth rotation Reference systems Service*): <http://alpha.fesg.tu-muenchen.de/iers/>. On peut ainsi échanger de telles matrices (*Software Independent Exchange Format*) ou leur appliquer toutes sortes de manipulations mathématiques: contraintes a posteriori (provenant d'une autre source d'information), projection (Sillard et al, 2001) ou transformation (Altamimi, 1991; Dufour, 2001) suivant le système de référence choisi pour exprimer les résultats (voir plus loin).

Il est intéressant de noter que cette approche est très souple et permet de nombreuses utilisations a posteriori sans avoir à retraiter l'ensemble des mesures considérées de géodésie spatiale. Ceci est un clair avantage par rapport à l'approche classique qui consistait à fixer des paramètres a priori (longitude d'une station, paramètres de la rotation terrestre, vitesse de certaines stations, etc.). Cette méthode plus ancienne introduisait des erreurs systématiques et ne permettait pas d'échanger des résultats intermédiaires si les paramètres fixés par les différents centres d'analyse étaient différents ou seulement incompatibles (eg paramètres de la rotation terrestre, position et ou vitesse d'une ou plusieurs stations, etc.).

L'inconvénient de la technique de réseau libre est la complexité de la méthode ainsi que l'augmentation significative du temps de calculs qui en découle. D'autres approches plus opérationnelles sont aussi possibles, par exemple la localisation par point («*point positioning*») développée au JPL (Zumberge et al, 1997) qui permet de gérer efficacement de très grands réseaux de stations d'observation, typiquement plusieurs milliers de récepteurs GPS en Californie ou au Japon. L'approche de type réseau libre permet quant à elle de calculer les corrélations entre tous les paramètres estimés et en particulier les corrélations entre stations au sol ce qui n'est pas possible dans la méthode de localisation par point.

Le système DORIS: présentation historique et principes de base

Le système DORIS est un système français qui a été développé par le CNES en collaboration avec l'IGN et le GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale) pour des besoins initiaux d'orbitographie scientifique opérationnelle. Il a été conçu pour optimiser la collecte des données sur satellite bas en se basant sur le principe du système ARGOS déjà existant mais en améliorant la précision des mesures (Dorrer et al, 1991). À la différence du système GPS, c'est un système ascendant. Les balises au sol émettent un signal dans toutes les directions de l'espace alors que les mesures sont réalisées directement à bord du satellite, sans avoir besoin de passer par un système de télécommunication supplémentaire et coûteux.

Cette particularité du système DORIS est très intéressante d'un point de vue technique car elle permet pour la première fois d'effectuer un traitement des données directement à bord du satellite. C'est la méthode qui a été développée par le CNES avec succès dans le cadre du navigateur DIODE (Détermination Immédiate d'Orbite par DORIS Embarqué) et qui a été testée pour la première fois sur le satellite SPOT-4 en 1998 (Jayles et al, 2002). Ces premiers essais montraient déjà une précision de 1 à 5 m (3-D RMS) en début de mission à partir de modèles simplifiés et surtout un taux de réussite de 99,4%, y compris durant les phases de manoeuvre montrant ainsi la très grande fiabilité de cette technique. Cela permet ainsi d'obtenir des orbites précises très rapidement (de plus en proche du temps réel), ce qui correspond à une demande grandissante des utilisateurs opérationnels mais aussi scientifiques. Ces premiers résultats ont ensuite été améliorés en utilisant un modèle de forces plus complet dans le logiciel embarqué (Jayles et al, 2002a) montrant alors des précisions de l'ordre de 15 cm pour la composante radiale et un taux de réussite très proche de 100%. Pour le satellite Jason, des résultats récents (Tavernier et al, 2003a) montrent des précisions comprises entre 8 et 25 cm pour la composante radiale pour 100% du temps pendant plusieurs mois. De tels résultats sont difficiles à obtenir en GPS, y compris avec le satellite Jason (Haines et al, 2003) et tout particulièrement avec une intégrité aussi importante.

L'histoire du système DORIS est très liée avec celle de l'océanographie spatiale (Bureau des longitudes, 2001). En particulier, DORIS a été conçu initialement pour fournir une contribution française à la mission franco-américaine Topex/Poseidon (Fu et al, 1994; Barlier et al, 1996). Ce nouveau système représentait le pendant de la contribution américaine du Laser (Schutz, 1997), le système GPS n'étant embarqué sur le satellite que dans un but expérimental (Bertiger et al, 1994).

Le succès de l'orbitographie précise DORIS réalisée par le CNES (Nouël et al, 1994) a réellement permis d'obtenir une multitude de nouveaux résultats scientifiques dont nous ne pouvons donner ici qu'un aperçu:

- Niveau moyen des mers (Minster et al, 1995, Nerem et al, 1997, Cazenave, 1999; Cabanes et al, 2001),
- Topographie dynamique des océans (Minster et al, 1991; Tapley et al, 1994; Boulanger et al, 1995, Chelton et al, 1996),
- Circulation océanique (Stammer et al, 1994; Wunsch et al, 1998; Ducet et al, 2000),
- Marées océaniques (Le Provost et al, 1994; Egbert et al, 1994; Shum et al, 1997),
- Changements climatiques globaux (Ménard et al, 1995; Vincent et al, 2002).

Cette mission Topex/Poseidon a réellement apporté une profusion de nouveaux résultats scientifiques et surtout préparé l'arrivée du satellite JASON ainsi que l'utilisation simultanée de plusieurs missions altimétriques et dégagé un nouveau besoin d'océanographie spatiale opérationnelle de plus en plus axée vers des produits temps réels de très grande qualité dans le cadre d'une approche multi-missions (Le Traon et al, 2001; Rosmorduc et al, 2003). En particulier, la qualité exceptionnelle des orbites obtenues à été un des éléments clés de cette réussite. Très rapidement après le lancement de la mission Topex/Poseidon, les premiers résultats (Nouël et al,

1993) se sont montrés bien supérieurs (< 10 cm) aux spécifications initiales (13,3 cm) et tout particulièrement pour la composante radiale.

D'un point de vue plus technique, le système DORIS est un système de type Doppler (Dufour, 2001): la mesure de base correspond à une différence de phase entre deux instants (début et fin de comptage) fournissant ainsi une information sur la vitesse relative du satellite par rapport aux balises au sol. C'est l'équivalent d'une simple différence de phase GPS par rapport au temps (Willis, 1989). On s'affranchit ainsi de tous les problèmes liés à la détermination des ambiguïtés entières de phase (Durand, 2003). Il s'agit de plus d'un système scientifique qui n'a donc pas comme pour le GPS une utilisation civile potentiellement dégradée par rapport à son utilisation militaire. Pour être plus précis, il n'y a pas de dégradation volontaire du signal de type SA («*Selective Availability*») (Botton et al, 1996; Andréani, 2001) qui dégraderait les performances civiles (Neilan et al, 2000).

Le système possède aussi un réseau de poursuite de nature très différent des autres techniques de IERS. Les systèmes VLBI (Schluter et al, 2002) et Laser (Pearlman et al, 2002) possèdent des réseaux implantés principalement en Europe et Amérique du Nord pour des raisons sociaux-économiques évidentes. Le système GPS possède un réseau encore inhomogène pour lequel certaines zones géographiques comme le continent africain sont encore clairement sous-représentées (Beutler et al, 1999). Le réseau DORIS a été optimisé dès son origine, avant même le lancement du premier satellite. Il a été mis en place sous la responsabilité de l'IGN (Fagard, 2003; Fagard, 2003a), en prenant en compte des critères de répartition géographique ainsi que des critères de colocation sur des sites fondamentaux de géodésie spatiale (autres techniques de l'IERS, marégraphes, ...) dans le cadre d'une large coopération scientifique internationale.

Le réseau DORIS comporte actuellement 56 stations réparties sur 33 pays différents. Il permet une poursuite quasi-continue des satellites DORIS. Ce réseau est resté extrêmement stable dans le temps, permettant d'effectuer de longues séries d'observations géodésiques sur une même station. La figure ci-dessous montre la répartition géographique du réseau d'observation DORIS en 2003.

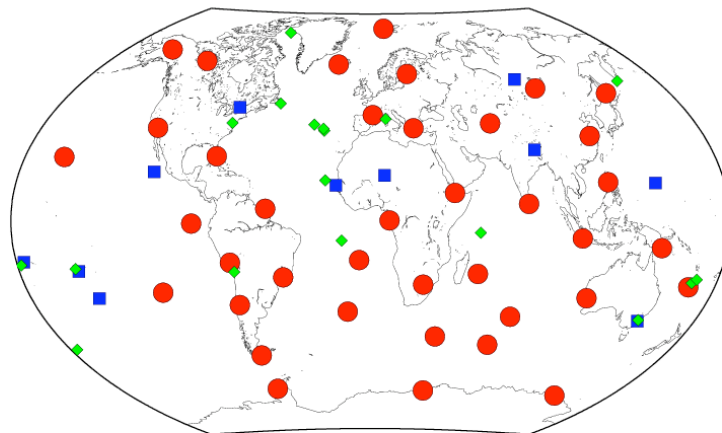


Figure1: Réseau permanent d'orbitographie DORIS (classification par durée d'observation par station). Juillet 2003.

Pour chaque site, la durée d'observation est indiquée par une couleur différente:

- en rouge = plus de 10 ans d'observations (39 stations)
- en bleu = de 5 à 10 ans d'observations (11 stations)
- en vert = moins de 5 ans d'observations (18 stations)

On peut ainsi constater la stabilité temporelle de ce réseau, ce qui est clairement un avantage pour les applications géodésiques et géophysiques. De plus, il existe seulement 2 types d'antennes (Alcatel et Starec) et les modifications d'équipement sont rares. Dans le cas du GPS, les changements de récepteurs ou seulement de radomes de protection des antennes produisent des discontinuités dans les séries temporelles qui peuvent aller jusqu'à 2 cm en altitude (Kaniuth et al, 2003) qui risquent d'être interprétés à tort comme des signaux géophysiques (voir plus loin).

Enfin, le réseau DORIS possède de nombreuses colocations avec les autres techniques de l'IERS: 6 avec le VLBI, 7 avec le Laser et 33 avec le GPS, dont 11 sites comportant au moins 3 techniques différentes (Fagard, 2003).

Orbitographie précise: l'exemple de JASON

JASON est la mission océanographique qui prolonge la mission Topex/Poseidon. Le récepteur DORIS à bord possède plusieurs améliorations technologiques importantes (Sengenès et al, 2002; Tavernier et al, 2002): un meilleur rapport signal sur bruit, un récepteur multi-canal permettant désormais de mesurer simultanément les signaux provenant de 2 balises même proches en utilisant alors la possibilité de décalage en fréquence possible sur les balises de nouvelle génération. Toutes ces améliorations ont permis de se rapprocher un peu plus d'une orbite presque centimétrique pour la composante radiale (celle qui intéresse directement les océanographes). Le centimètre devient maintenant l'objectif scientifique clairement défini pour les nouvelles missions d'altimétrie radar.

À ce niveau de précision, il devient critique de pouvoir comparer et évaluer les différentes orbites calculées et être capable de caractériser leur qualité en précision comme en exactitude. Par exemple, nous montrons ici des résultats récents obtenus au JPL.

Les calculs d'orbite étant faits pour des arcs de 30 heures (de 21:00 la veille jusqu'à 03:00 le lendemain), il est possible de comparer durant la période de recouvrement de 6 heures la position du satellite calculée principalement à partir des données du jour précédent ou de celles du jour suivant. Les positions du satellite étant estimées toutes les minutes, on peut ensuite, pendant ces 6 heures obtenir une statistique simple et fiable (361 valeurs) en calculant leur écart moyen quadratique (Morel, 2001). On a ainsi accès à une estimation, souvent un peu optimiste de la précision des calculs d'orbite.

Les figures suivantes montrent les résultats obtenus récemment au JPL (Haines et al, 2003) avec le logiciel Gipsy/Oasis II. La figure du haut montre les statistiques de recouvrement d'orbite estimée à partir des mesures GPS seules. La figure du bas montre les statistiques obtenues à partir d'une combinaison optimum des mesures GPS et DORIS (notre contribution).

On voit tout d'abord que ces orbites respectent les spécifications initiales de la mission JASON (25 mm sur la composante radiale). De plus, la valeur médiane est inférieure à 10 mm, alors que des tests équivalents ne montraient qu'une précision de l'ordre de 1,5 cm pour Topex/Poseidon (Bertiger et al, 1994; Morel, 2001). Finalement, on voit aussi que DORIS malgré la précision déjà très importante de l'orbite GPS apporte encore une information de très grande qualité grâce à la précision de ses mesures. Bien que l'orbite GPS soit déjà au niveau centimétrique, l'orbite GPS/DORIS présente un histogramme des erreurs amélioré: le point médian passe de 7,1 mm à 6,3 mm. De plus, la partie droite de l'histogramme qui correspondait à une plus faible observabilité par GPS, due à des mesures moins nombreuses, a nettement tendance à disparaître grâce à l'ajout des mesures DORIS, même en nombre plus faible.

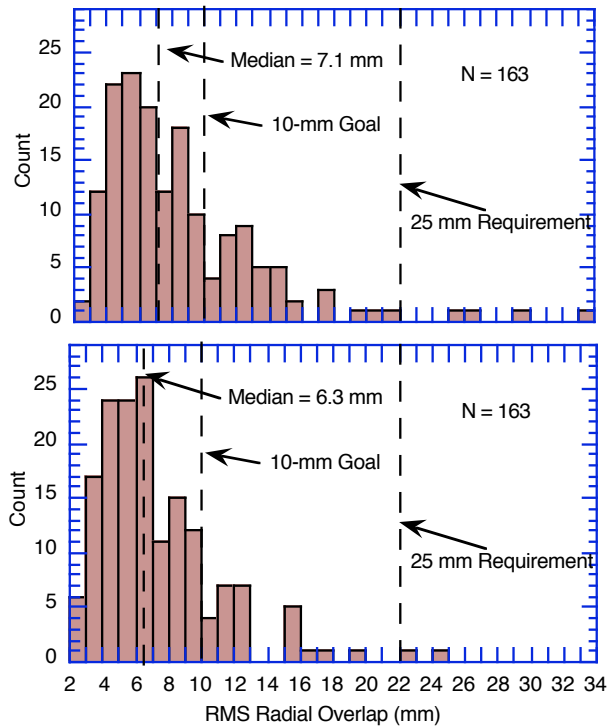


Figure 2a et 2b: histogramme des erreurs de recouvrements d'orbites JASON (résidus moyens quadratiques) pour la composante radiale. En haut avec l'orbite estimée à partir des mesures GPS seules. En bas, avec l'orbite estimée à partir des mesures GPS et DORIS.

Une manière différente de tester ces orbites consiste à comparer les résidus calculés à partir de chaque orbite pour des mesures qui n'ont pas déjà été utilisées dans le calcul d'orbite considéré. On a ainsi accès à une information sur la précision de type externe qui se rapproche beaucoup plus d'une estimation de l'exactitude du résultat. Ce n'est d'ailleurs pas tout à fait une exactitude car certains modèles restent communs et pourraient introduire des erreurs systématiques qui resteraient encore indétectables par ce type de test. En tout état de cause, on obtient une borne inférieure de l'exactitude. Actuellement, ce genre de tests, par exemple à partir des mesures Laser, confirme que les orbites JASON sont pour les exemples cités plus haut d'une exactitude proche du centimètre: les résidus moyens quadratiques des mesures Laser à haute élévation (pour n'estimer que l'erreur radiale) sont compris entre 1,3 et 1,7 cm (Haines, 2003).

Il est aussi possible de confirmer ces résultats par toute une série d'autres types de tests: comparaison des données de l'altimètre sur les points de croisement entre les passages ascendants et descendants (Fu et al., 2001; Klokonick et al., 2002), calibration Laser par technique d'arcs courts (Bonfond et al., 1999), utilisation de bouées flottantes équipées de récepteur GPS sous la trace du satellite,... Cette activité de validation des orbites est devenue désormais un réel défi compte tenu de la précision actuelle des résultats.

Actuellement des études sont en cours pour comparer les orbites obtenues par les différents centres d'analyse (Otten et al., 2003), soit entre elles, soit à partir de données non déjà utilisées dans les calculs d'orbites. On peut penser raisonnablement que la meilleure orbite sera obtenue en utilisant toutes les données disponibles à bord du satellite Jason (DORIS+Laser+GPS) voire peut-être en combinant plusieurs orbites différentes de la même manière que les orbites des différents centres d'analyse de l'IGS sont combinées (Kouba, 1999; Springer et al., 2001). La question qui se pose alors est la validation d'une telle solution à partir de données réellement externes.

L'étude détaillée des erreurs d'orbite est généralement difficile. Compte tenu du type de calcul (dynamique ou semi-dynamique), les modèles de forces créent des corrélations spatio-temporelles (Marshall et al, 1997) qui risquent d'être interprétées à tort par des signaux géophysiques si on n'y prend pas garde.

Localisation géodésique à partir des mesures du système DORIS

Bien avant le lancement du premier satellite DORIS, il était clair qu'un tel système, s'il permettait d'estimer efficacement l'orbite précise d'un satellite, pouvait aussi permettre d'estimer la position précise de stations au sol pour des applications géodésiques et géophysiques. Des premières simulations avaient été conduites à l'IGN pour montrer qu'une précision de l'ordre de 10 cm était possible en cumulant les mesures du satellite sur une durée d'un mois (de Moegen et al, 1985).

Dés les premières mesures DORIS/SPOT2, plusieurs groupes dans le monde comme le GRGS/LEGOS à Toulouse (Cazenave et al, 1992; Soudarin et al, 1993) et l'Université du Texas aux Etats-Unis (Watkins et al, 1992) ont traité les premières mesures DORIS/SPOT2 pour tester avec succès ces nouvelles applications géodésiques et géophysiques.

Nous allons présenter ici plus en détail les résultats récents obtenus au JPL en nous attachant à décrire la méthode dans ses détails. Nous verrons ainsi toute la souplesse de cette technique de réseau libre ainsi qu'en contrepartie la difficulté réelle à exprimer les résultats de localisation DORIS dans un système de référence terrestre prédéfini. Une description plus détaillée peut-être trouvée dans Willis, 1996. Dans le cas du système DORIS il est utile de cumuler les mesures sur une durée suffisante (typiquement une semaine ou un mois) pour obtenir des résultats de précision géodésique. On ne peut pas comme dans le cas du GPS obtenir des résultats très précis pour des durées d'observation très courtes, voire de manière continue en temps quasi-réel (Bock et al, 2000).

La première étape consiste à traiter les mesures DORIS proprement dites avec un logiciel de géodésie spatiale (Gipsy/Oasis dans notre cas). C'est une étape clé car elle nécessite dès ce niveau le choix des modèles (champ de gravité terrestre, modèles de surcharges dues aux marées terrestres océaniques (Scherneck, 1991), corrections diverses,...) ainsi que le choix de la stratégie d'estimation (choix des paramètres, contraintes a priori, contraintes spatio-temporelles additionnelles). Toutefois, la quantité de mesures DORIS est beaucoup plus faible que celles des mesures GPS de l'IGS. Le temps de calcul (environ 90 secondes CPU pour 1 seul satellite et pour 1 seul jour d'observation) devient rapidement important lorsque l'on traite les données en mode multi-satellite (Willis et al, 2003c) en prenant en compte la totalité des mesures (typiquement de 30 jours de calculs CPU pour l'ensemble des données de 1993 à 2003,5 pour un seul processeur). Il est donc indispensable de prendre un grand soin dans cette étape de calcul dans le choix des modèles à utiliser, en adoptant par exemple les recommandations de l'IERS (McCarthy, 1996; McCarthy et al, 2003).

Cette remarque sur les temps de calcul n'est pas anodine. Dans le cas du système DORIS, il est encore possible de retraiter régulièrement (mais pas trop souvent quand même) la totalité des mesures existantes, tout particulièrement lorsque l'on a la possibilité d'utiliser plusieurs ordinateurs en parallèle. Dans le cas de GPS, ce n'est déjà plus envisageable. Les séries temporelles de résultats sont alors potentiellement incohérentes, puisque l'on ne retraite pas les mesures passées, en fonction des différentes évolutions du logiciel et des nouvelles options de traitements.

À la fin de cette première étape, on dispose de solutions journalières de localisation en réseau libre. On cumule ensuite ces solutions hebdomadaires (matrices variance-covariance des positions

de stations et de paramètres de la rotation terrestre) pour obtenir des solutions hebdomadaires en réseau libre.

Ces solutions hebdomadaires que l'on pourrait appeler de niveau 1 sont déjà des produits géodésiques d'intérêt car ils sont directement exploitables (en format SINEX) par des groupes (Altamimi et al, 2003a; Angerman et al, 2003) qui combinent de telles solutions en réseau libre ou peu contraintes avec d'autres solutions de ce type provenant d'autres groupes (autres solutions DORIS), d'autres techniques (VLBI, SLR, GPS) ou d'autres types d'information (rattachements géodésiques locaux). C'est le type de solution appelé IGNWD02 et disponible par ftp anonyme au CDDIS (cddisa.gsfc.nasa.gov) qui contiennent donc les positions des stations DORIS estimées par semaine et les paramètres de la rotation terrestre (et leur dérive dans le temps) estimés par jour.

Le problème est que dans ces solutions libres, le système de référence n'est pas totalement défini. Les écarts types des coordonnées de stations sont très grands (typiquement de l'ordre du mètre alors que la précision interne est réellement de l'ordre du cm, voire moins) et les coordonnées peuvent différer de plusieurs mètres aussi par rapport à une référence comme l'ITRF2000. L'information interne de position est excellente mais on n'a pas encore fait le choix du système de référence. C'est l'objet de l'étape suivante.

La deuxième étape de ce calcul est ensuite une étape itérative dans laquelle on commence par projeter la solution (Sillard et al, 2001), ce qui ne modifie que les écarts types des coordonnées mais pas leurs valeurs, puis on transforme (Altamimi, 1991; Dufour, 2001) la solution obtenue dans un système de référence terrestre, par exemple l'ITRF2000. On obtient alors des solutions de niveau 2 (série IGNWD03 disponible aussi au CDDIS) pour les groupes ne voulant pas réaliser les différentes étapes de calcul que nous allons décrire maintenant. Cette étape de transformation à 7-paramètres est cruciale en termes de précision car une erreur ou une imprécision sur ces paramètres de transformation rejaillira sur les coordonnées finales au même titre qu'une erreur sur la position issue du calcul DORIS seul (étape 1).

Il y a tout d'abord un important travail de validation des résultats qui consiste à retirer des solutions initiales certains points aberrants dans une ou plusieurs solutions hebdomadaires. Il s'agit par exemple de retirer les périodes liées à des problèmes d'instabilité physique des antennes (voir plus loin), les périodes de début d'observation durant lesquelles l'oscillateur de la balise n'était pas encore stabilisé ou les périodes pendant lesquelles la station, pour des raisons géophysiques, a un comportement qui s'éloigne d'un comportement linéaire (voir quelques exemples plus loin). Cette élimination est faite au niveau de la matrice de covariance des résultats (élimination de Gauss). Il est d'ailleurs plus intéressant de retirer la station de cette manière plutôt que de ne pas utiliser les mesures DORIS dans le calcul de la première étape. Dans notre cas, on utilise bien toutes les mesures disponibles. Par contre on ne suppose pas que la position de la station est connue et que le paramètre de position est corrélé avec d'autres paramètres (position de la même station à une date ultérieure). On n'a donc pas perdu d'information dans le système, ce qui aurait été le cas si on avait éliminé les données a priori.

Une étude récente et exhaustive de tous les problèmes rencontrés se trouve dans Willis et al, 2003a. Au cours de cette étape, on peut aussi renommer une balise pour prendre en compte une discontinuité dans la série temporelle d'une station (voir plus loin l'exemple de la station de Fairbanks). De plus, pour améliorer la précision des paramètres de transformation estimés et pour accélérer ce processus itératif, on n'estime les paramètres que sur un sous-réseau DORIS en retirant dans la solution de référence pour chaque semaine les 3 ou 6 stations qui comportent les résidus les plus importants. Par contre, on applique la transformation à l'ensemble des stations du réseau pour ne pas perdre d'information.

Il est essentiel de disposer d'une solution de référence position/vitesse de grande qualité, ce qui est extrêmement difficile à obtenir lorsque l'on souhaite obtenir une précision sub-centimétrique de localisation. Une solution de type ITRF2000 ne convient pas pour les raisons suivantes:

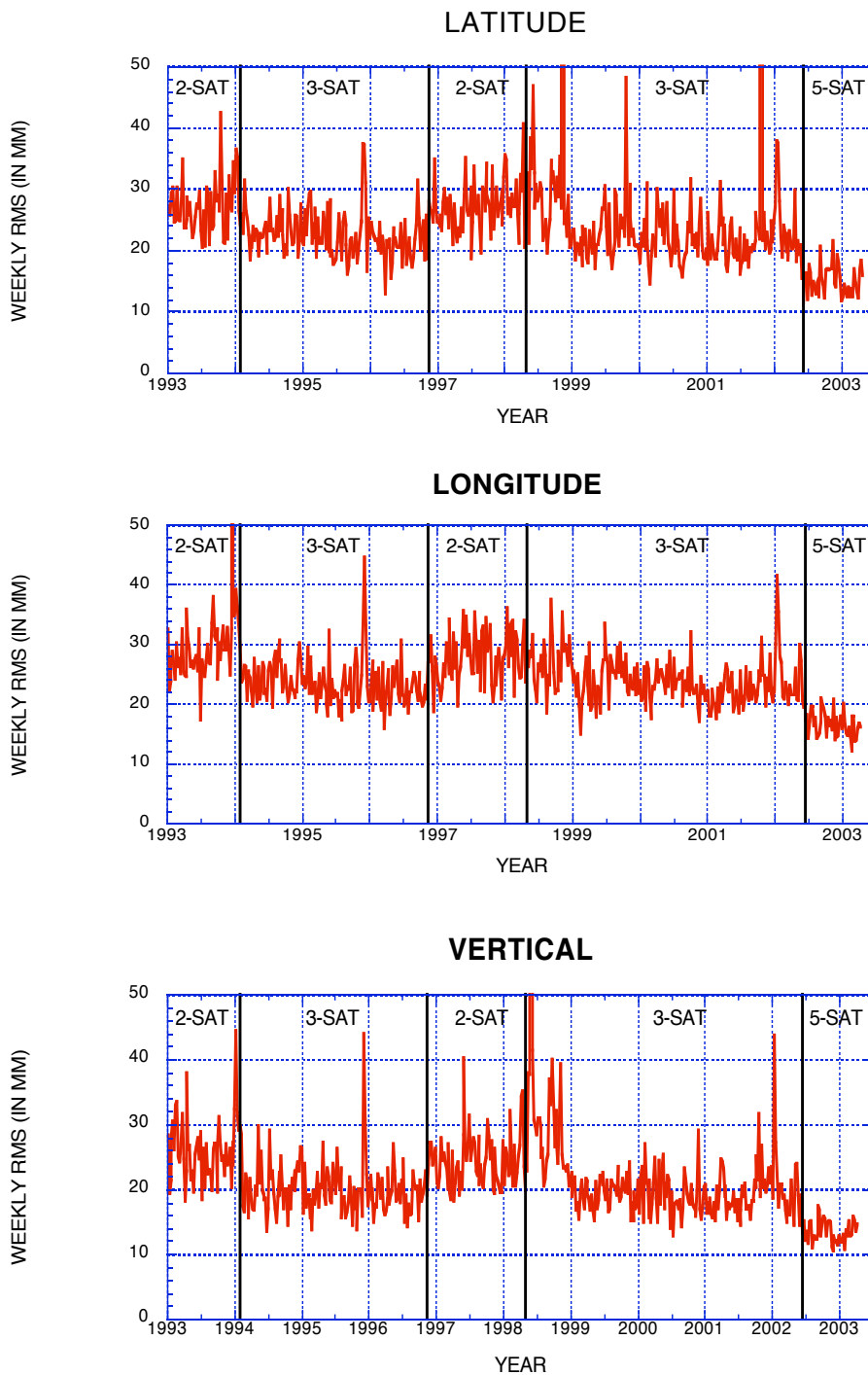
- certaines erreurs systématiques dans l'ITRF (autres techniques, rattachements locaux) et dans la solution DORIS considérée (modèle de champ, modèles de surcharges, corrections ionosphérique, \square .) sont presque du même ordre de grandeur que les précisions recherchées.
- l'ITRF comme toute référence est une réalisation ancienne: certaines nouvelles balises n'apparaissent pas dans cette solution, d'autres balises qui avaient trop peu de mesures pour estimer de manière fiable la vitesse de déplacement de la station ont des coordonnées imprécises. Leur qualité se dégrade donc progressivement dans le temps en fonction de la différence entre la date de variance minimum dans le jeu ITRF2000 et l'époque des observations que l'on considère.
- Il reste des erreurs dans l'ITRF2000 qui ne pouvaient pas être détectées par les centres d'analyse DORIS au moment du calcul à cause d'un nombre insuffisant d'observations (Willis et al, 2003).

Pour résoudre ce problème de référence, on construit alors une solution interne de positions et de vitesses qui prend en compte la totalité des mesures DORIS considérées (ainsi que si on le désire les rattachements locaux DORIS-DORIS pondérés en fonction de la qualité estimée par le SIMB). On projette ensuite cette solution et on la transforme dans l'ITRF2000 à une date de référence quelconque en utilisant cette fois 14 paramètres comme décrit par Altamimi, 1991. On obtient donc à la fin une solution interne qui est cohérente (mêmes erreurs systématiques) avec chacune des solutions hebdomadaires de la série temporelle mais dont le système de référence sous-jacent est aligné par construction sur celui de la référence initiale (ITRF2000).

On voit donc ainsi apparaître toute la difficulté de l'exercice puisque la qualité de la solution de référence dépend de la validation des solutions hebdomadaires et que cette validation ne peut être faite qu'avec une solution de référence de bonne qualité (Morel, 1996; Dorie, 1997). Il s'agit donc d'un problème qu'il faut résoudre par méthode itérative. Il est aussi possible de construire une solution interne seule en imposant des contraintes globales de non-rotation pour définir le système de référence (Altamimi et al, 2003) en s'appuyant ou non en moyenne sur des modèles géophysiques de type NUVEL-1 (Argus et al, 1991).

D'autres méthodes beaucoup plus simples consistent à sélectionner un sous-réseau fiable pour lequel l'accord avec l'ITRF2000 reste acceptable sur le long terme (position et vitesse) et qui respectent d'autres conditions d'observation (continuité, durée). Cette approche, dérivée de ce qui est fait avec succès dans le cas du VLBI est sous-optimale dans le cas du système DORIS car le nombre de stations utilisées dans la transformation serait alors plus faible puisqu'on utilise par construction qu'un sous-réseau, les paramètres de transformation sont donc moins bien déterminés. De plus, dans le cas de DORIS, certains problèmes liés aux stations ne sont que temporaires (instabilité physique de l'antenne). Il n'y a pas de raison de ne pas utiliser une station comme point d'appui pour le calcul des paramètres de transformation simplement parce que cette station présentait un problème particulier en début d'observation (stabilisation de l'oscillateur).

Un des critères importants de validation des solutions temporelles est calculé sur l'ensemble de toutes les stations DORIS en estimant un écart moyen quadratique des écarts entre la solution temporelle et la solution de référence ramenée à l'époque des mesures. Les 3 figures ci-dessous montrent l'évolution temporelle de ce paramètre au cours de la période considérée (1993 – 2003,5).



Figures 3a, 3b et 3c: Précision de la localisation DORIS hebdomadaire

On peut constater sur les figures 3a, 3b et 3c que la précision interne de localisation DORIS (accord entre une solution hebdomadaire et la solution interne de référence) peut être estimée entre 1 et 3 cm. En regardant plus attentivement, on constate que cette précision varie principalement en fonction du nombre de satellites disponibles dans le calcul. Pour l'altitude, on obtient typiquement 2,5 cm pour 2 satellites, 2,0 cm pour 3 satellites et beaucoup plus récemment entre 1 et 1,5 cm pour 5 satellites.

Lorsque l'on ne prend pas en compte les précautions décrites précédemment et que l'on compare directement avec une solution de type ITRF, on constate les problèmes suivants:

- On ne peut plus distinguer sur la figure les périodes à 2, puis 3, puis enfin 5 satellites. Les erreurs sur les paramètres de transformation sont du même ordre de grandeur que les erreurs de localisation DORIS.
- La solution DORIS semble se dégrader lentement dans le temps. En fait, les vitesses de l'ITRF n'étant pas parfaites, la précision des coordonnées ITRF va se dégrader progressivement dans le temps (propagation de la variance) et les résidus par rapport à la solution DORIS vont donc augmenter, comme ils augmenteraient si on utilisait des mesures DORIS antérieures aux premières mesures DORIS utilisées dans l'ITRF2000. Dans le cas d'une solution de référence interne, toutes les données DORIS sont utilisées. On est donc en interpolation des résultats et non plus en extrapolation. Le problème d'effet de bord évoqué plus haut n'est pas visible dans les figures 3a, 3b et 3c grâce à l'utilisation d'une solution interne intermédiaire.

Il peut être utile de préciser au passage que rajouter une observation dans la série temporelle (SINEX hebdomadaire) modifie (améliore) la solution interne de référence et par voie de conséquence tous les produits dérivés: coordonnées de chaque observation de la série temporelle, géocentre (voir plus loin,...).

On peut aussi noter que la précision des résultats DORIS pour la composante verticale est aussi bonne, voire meilleure que celle de la composante horizontale. Pour d'autres techniques, comme GPS, l'estimation de la composante verticale est souvent de moins bonne qualité, dans un facteur 2 à 5 suivant les précautions que l'on a prises pour la correction troposphérique (couche basse de l'atmosphère, Botton et al, 1996). Ce problème est parfaitement connu et documenté (Schwarz et al, 1993; Rothacher et al, 2002). Pour une discussion détaillée sur les altitudes ellipsoïdales (GPS et DORIS) et les altitudes orthométriques (nivellement) ainsi que leurs relations, on pourra se reporter à Nocquet et al, 2000. De plus, dans le cas du GPS certaines études ont montré que le type d'équipement (antenne et radome de protection des antennes) modifie l'estimation de l'altitude de la station, produisant ainsi des erreurs systématiques pouvant aller jusqu'à 2 cm (Hatanaka et al, 2001; Kaniuth et al, 2003). Cette remarque est aussi vraie dans le cas d'adoption d'un nouveau modèle de variation du centre de phase des antennes en azimut et élévation (Rothacher, 2001).

Afin de montrer l'importance de certains modèles utilisés dans ce type de calculs, nous présentons dans le tableau suivant une comparaison préliminaire obtenue très récemment sur quelques semaines (du 30 mars au 10 mai 2003) de deux calculs séparés de localisation hebdomadaire du réseau global DORIS. Le premier calcul utilise le modèle de champ EGM96 (Lemoine et al, 1998), le deuxième calcul utilise le nouveau modèle GGM01. Le champ GGM01 est issu des mesures de la mission GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*). C'est une solution préliminaire obtenue uniquement avec 111 jours de données comme décrit par Reigber et al, 2003. À partir de ce jeu réduit de données, un champ de gravité statique a été estimé jusqu'aux harmoniques 120. L'un des objectifs majeurs de la mission GRACE est l'étude des variations temporelles du champ de gravité (Wahr et al, 1998). Cette mission de gradiométrie satellitaire était attendue par la communauté scientifique internationale depuis de nombreuses années (Nerem et al, 1995; Balmino, 2001; Rummel et al, 2002) et sera suivie dès 2006 par la mission européenne GOCE (Rebhan et al, 2000; Woodworth et al, 1998; Albertella et al, 2002).

Pour chaque semaine, nous avons comparé pour l'ensemble de stations DORIS la position issue de la série hebdomadaire avec la solution de référence (position/vitesse exprimée à l'époque des observations). Nous avons ensuite déduit un écart moyen quadratique pour l'ensemble des stations DORIS, pour chacune des composantes.

| Semaine | Période | EGM96 | | | GGM01 | | |
|---------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | N (mm) | E (mm) | V (mm) | N (mm) | E (mm) | V (mm) |
| 1213 | 6 au 12 avril 2003 | 12,4 | 15,1 | 13,0 | 13,8 | 13,6 | 5,8 |
| 1214 | 13 au 19 avril 2003 | 14,0 | 19,0 | 13,7 | 17,9 | 16,9 | 6,5 |
| 1215 | 20 au 26 avril 2003 | 13,9 | 17,6 | 14,2 | 9,3 | 12,6 | 7,8 |
| 1216 | 27 avril au 3 mai 2003 | 17,9 | 20,4 | 11,9 | 9,0 | 11,9 | 9,1 |
| 1217 | 4 au 11 mai 2003 | 12,8 | 19,0 | 13,0 | 5,6 | 9,9 | 6,1 |

Table 1: Comparaison de la précision de localisation hebdomadaire DORIS en fonction du champ de gravité utilisé dans les calculs (EGM96 ou GGM01).

On voit que les résultats obtenus sont très sensiblement améliorés en précision, montrant ainsi pour la première fois des résultats DORIS hebdomadaires sub-centimétriques. Les figures 3a, 3b et 3c sont basés sur l'utilisation du champ EGM96.

Le modèle de champ de gravité est important dans le cas de DORIS, car les satellites ont une altitude relativement basse: SPOT (830 Km), JASON+TOPEX/JASON (1330 Km), ENVISAT (750 Km). Dans le cas du système GPS, les satellites ont une altitude plus importante (20000 Km) et le modèle de force joue alors un rôle mineur, sauf lorsqu'on traite les mesures GPS simultanément avec celles de récepteurs embarqués sur des satellites bas (Konig et al, 2003).

Enfin, les résultats présentés dans le tableau 1 sont des résultats préliminaires car pour EGM96 la référence est établie sur 10 ans alors que pour GGM01 la référence n'est établie que sur quelques semaines. Le tableau 1 a donc ainsi tendance à minimiser les erreurs de type périodiques ou moyen terme dans le cas du modèle GGM01. Par contre, utiliser la même référence dans ce tableau n'aurait pas de sens car les erreurs liées au champ étant des erreurs de type systématique. Les erreurs sur les paramètres de transformations domineraient alors les estimations de précision.

D'un autre côté, il faut aussi noter que cette amélioration en précision s'est aussi traduite par une amélioration en exactitude.

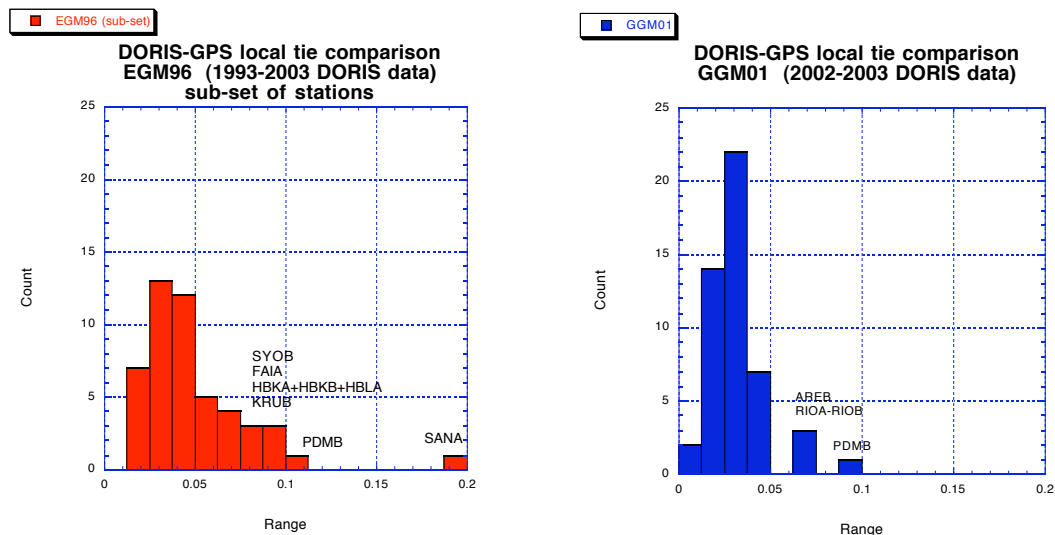


Figure 3a et 3b: Histogramme des erreurs de rattachement DORIS/GPS. À gauche, en utilisant le modèle de champ EGM96. À droite, en utilisant le modèle de champ GGM01.

Les deux figures précédentes montrent une comparaison directe entre les coordonnées DORIS issues de chacun des deux calculs (EGM96 et GGM01) et exprimées dans l'ITRF2000, et celles qui sont calculées à partir de mesures GPS de récepteurs en colocation (résultats équivalents issus de la solution IGS de la même semaine d'observation) et corrigées des valeurs de rattachement géodésique local effectué par le SIMB (Fagard, 2003a). Dans ces comparaisons, nous avons pris soin de ne sélectionner que les mêmes stations en colocation.

On observe que l'histogramme des erreurs s'améliore de manière très significative. Le point médian passe de 4.4 cm à 3.2 cm. De plus certaines stations pour lesquelles on aurait pu auparavant penser avant que le rattachement n'avait pas été fait correctement ont désormais des valeurs de résidus de quelques centimètres: Hartebeestoech (Afrique du Sud), Santiago du Chili (Chili). L'erreur était donc une erreur systématique provenant du champ de gravité EGM96 utilisé précédemment et non à une erreur dans le rattachement géodésique local que les différents groupes ont trop souvent tendance à mettre en cause en cas de désaccord entre les différentes techniques de géodésie spatiale.

Finalement, les dernières stations qui posent encore problème avec le nouveau champ GGM01 sont actuellement en cours d'évaluation mais d'ores et déjà certaines pistes sont suivies:

- Punta Delgada (PDMB): l'erreur constatée est uniquement de 10 cm en altitude ce qui correspond exactement à la différence entre le haut et le bas du radome de protection de l'antenne («*choke ring* GPS») et qui pourrait laisser penser à une erreur d'identification du point de rattachement GPS. Des premiers éléments de réponse de la part du SIMB semblent confirmer cette hypothèse.
- Rio Grande (RIOB): le rattachement est de moins bonne qualité que les autres rattachements du SIMB (3-4 mm).
- Arequipa (AREB): peut-être lié au tremblement de terre du 23 juin 2001 qui a produit un déplacement de 40 cm en horizontal et un changement dans la vitesse géodésique du point (Bilek et al, 2002; Willis, 2002; Heflin, 2003).

Enfin, il faut noter que ces résultats n'utilisent pas les mesures DORIS/JASON pour des raisons qui sont présentées dans le document de référence (Willis et al, 2003a) et expliquées dans un document plus récent (Willis et al, 2003d) soumis à publication. Pour simplifier, nous pouvons dire que le passage de l'oscillateur DORIS/JASON dans la zone SAA (Anomalie Sud Atlantique) provoque une accélération de l'horloge qui perturbe les résultats de localisation. Une explication mathématique plus détaillée sortirait du cadre de ce document de synthèse et peut-être trouvée dans le document en annexe.

Exemple d'utilisation géophysique: tremblement de Terre d'Alaska

L'un des intérêts de ces séries temporelles de coordonnées de stations est qu'elles ne font plus l'hypothèse implicite d'un comportement linéaire a priori. En comparant cette série temporelle avec un modèle linéaire simple, on peut chercher à détecter des mouvements spécifiques (discontinuités, changement de pentes, mouvements périodiques) qui peuvent ensuite être interprétés par des études géophysiques ultérieures. L'étude des déformations saisonnières ou passagères de la Terre (Davies et al, 2000; Blewitt et al, 2001) devient un nouvel objectif clairement établi dans le cadre du projet IGGOS (Rummel et al, 2002a).

Pour présenter ce que peut actuellement fournir ce type de série temporelle DORIS, nous montrons sur la figure suivante l'évolution temporelle de la latitude de la station DORIS de Fairbanks en Alaska. On voit tout d'abord clairement le mouvement séculaire dû à la tectonique des plaques (aucune vitesse n'a été retirée dans ces résultats bruts). On se contente simplement de constater l'évolution des coordonnées de la station dans un système terrestre de référence. On peut

aussi constater le brusque déplacement de la station qui a eu lieu le 3 novembre 2002 à l'occasion du tremblement de Terre de la faille de Denali (Ebehart et al, 2003; Jones et al, 2003) d'une magnitude de 7.9.

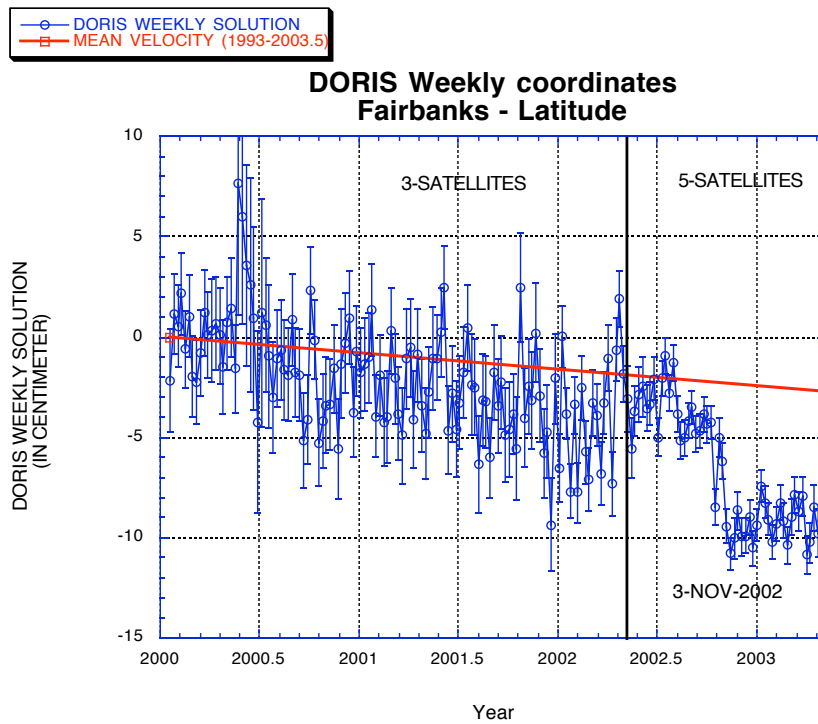


Figure 5: Détection du déplacement co-sismique de la balise DORIS de Fairbanks consécutif au tremblement de Terre en Alaska du 3 novembre 2002 de magnitude 7.9 (Denali Fault).

On constate aussi sur cette figure l'amélioration très nette de la précision de localisation DORIS en 2002,4 (passage de 3 à 5 satellites disponibles simultanément). Ceci se traduit à la fois par une diminution des barres d'erreurs (écarts types a posteriori) mais aussi par une moins grande dispersion des résultats.

Cette station DORIS a la particularité de se trouver à moins d'1 Km d'une station GPS du réseau permanent IGS, qui a donc été soumise au même déplacement. Le tableau suivant compare les amplitudes en tridimensionnel du mouvement co-sismique estimé des mesures DORIS et GPS.

| | Déplacement en latitude (in mm) | Déplacement en longitude (in mm) | Déplacement en altitude (in mm) |
|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| GPS (Bock, 2003) | -53.5 ± 4 | +15.1 ± 4 | 0 |
| DORIS (Willis et al, 2003c) | -50 | +20 | 0 |

Table 2: Détermination par GPS et DORIS du déplacement co-sismique de la station de Fairbanks (Denali Earthquake, 3 novembre 2002, magnitude 7.9)

Une telle étude avait été menée de 1993 à 2003 sur la totalité des stations du réseau de poursuite DORIS (Willis et al, 2003). Elle avait mis en évidence la détection d'un certain nombre de phénomènes géophysiques intéressants (tremblements de Terre: Colombo, Arequipa, Fairbanks) mais aussi malheureusement un certain nombre de problèmes liés à l'instabilité de certaines

antennes DORIS (Ottawa, Amsterdam, Hawaii, Sainte-Hélène), qui faute d'avoir été détectées plus tôt avaient limité jusqu'à présent l'exactitude des résultats DORIS (Altamimi et al, 2003a).

Certains problèmes particuliers avaient déjà été détectés sur la station de Socorro Island (Willis, 1998). Une étude basée sur l'utilisation conjointe de données marégraphiques et de cartes de niveau des mers issues de l'altimétrie radar avait confirmé que le mouvement en altitude détecté par le système DORIS était bien réel et pouvait être imputé à une déflation du volcan proche (Cazenave et al, 1994). D'autres études détaillées de ce type restent à faire.

Plus la précision de localisation DORIS s'améliorera plus la détection de tels phénomènes transitoires sera facile. On pourra ainsi utiliser DORIS non seulement pour la détection de mouvements globaux comme ceux qui sont liés à la tectonique des plaques (Soudarin et al, 1995; Crétaux et al, 1998) ou à des mouvements verticaux périodiques (Soudarin et al, 1999) mais aussi à des mouvements plus locaux et transitoires.

Maintenance du système de référence terrestre à partir du système DORIS

L'un des buts fondamentaux de la géodésie est de réaliser un système de référence terrestre accessible aux utilisateurs, d'exactitude maximale (actuellement sub-centimétrique) et d'intégrité suffisante (en évitant de diffuser une coordonnée fautive). Cela est réalisé depuis plusieurs années par le calcul et la diffusion des différents ITRF (International Terrestrial Reference Frame) à l'IGN dans le cadre de l'IERS (Boucher et al, 1996). Les différentes réalisations successives sont des améliorations successives dues à des durées d'observations plus longues pour chaque station, des améliorations dans les calculs des différents centres d'analyse (par technique ou multi-technique) ou à l'amélioration du logiciel de combinaison (eg CATREF) et des stratégies de combinaison. Les réalisations récentes les plus importantes sont celle de l'ITRF96 (Sillard et al, 1998) ou plus récemment celle toujours utilisée de l'ITRF2000 (Altamimi et al, 2002). Pour l'ITRF2000, les relations avec d'autres systèmes de référence importants ont été estimées (Boucher et al, 2001). C'est le cas du WGS84 (Slater et al, 1998) réalisé par éphémérides radiodiffusées GPS et celui du PZ-90 réalisé par les éphémérides radiodiffusées GLONASS (Langley, 1997) De plus, l'ITRF servira à l'avenir de référence pour le futur système européen Galileo (Hilbrecht, 2001).

Nous allons maintenant présenter ici comment DORIS peut participer à cette maintenance du système de référence terrestre, en réalisant en particulier l'origine du repère (position de l'origine par rapport au centre des masses) et le facteur d'échelle du repère (définition du mètre SI).

Concernant l'origine du système, il faut distinguer deux concepts très différents (Malla et al, 1993; Dong et al, 2003; Blewitt et al, 2003):

- le centre des masses (barycentre du système Terre-Océan-Atmosphère),
- l'origine du système, quelquefois appelé centre de figure qui correspond au point de localisation (0,0,0) et proche du centre des masses

Le système Terre-Océan-Atmosphère étant considéré comme isolé, le centre des masses est fixe dans le système inertiel. C'est le point de référence naturel utilisé par les géophysiciens car il peut être déterminé à partir d'une équation mathématique simple et qu'il a une nature physique importante dans toute une série de modèles géophysiques. Il faut toutefois noter que les variations temporelles des masses de ce système, en particulier les variations liées aux océans et à l'atmosphère, font que la Terre, en tant que solide indéformable, va se déplacer par naturellement par rapport à ce centre de masses (Chao et al, 1995; Chen et al, 1999). Dans un tel repère, les coordonnées de toutes les stations fixes sur la croûte terrestre vont avoir des variations temporelles, principalement de période annuelle et d'amplitude de quelques mm (Dong et al, 2002). Les géodésiens et topographes, et en général toutes les personnes, chercheurs ou professionnels utilisant

un géo-référencement souhaite plutôt exprimer les coordonnées des stations dans un repère qui ne génère pas de telles variations temporelles mais seulement (au pire) des mouvements linéaires.

Lorsque l'on effectue un calcul de géodésie spatiale (localisation DORIS en réseau libre comme décrit précédemment) pour une semaine particulière, on utilise un modèle de champ (EGM96, GRIM5, GGM01,...) qui place de facto le centre des masses à l'origine du repère de calcul, en annulant les termes d'ordre 1. Lorsque l'on calcule en réseau libre (faible contrainte a priori sur les paramètres estimés) l'origine du repère correspond au centre des masses. Si on compare maintenant cette solution temporelle à un repère de référence (calcul estimé sur plusieurs années), on estime une translation entre les deux repères (en X, Y et Z) qui va donc être fonction du temps et dans lequel les stations terrestres n'ont pas de mouvements périodiques globaux mais seulement un mouvement linéaire (par intervalle).

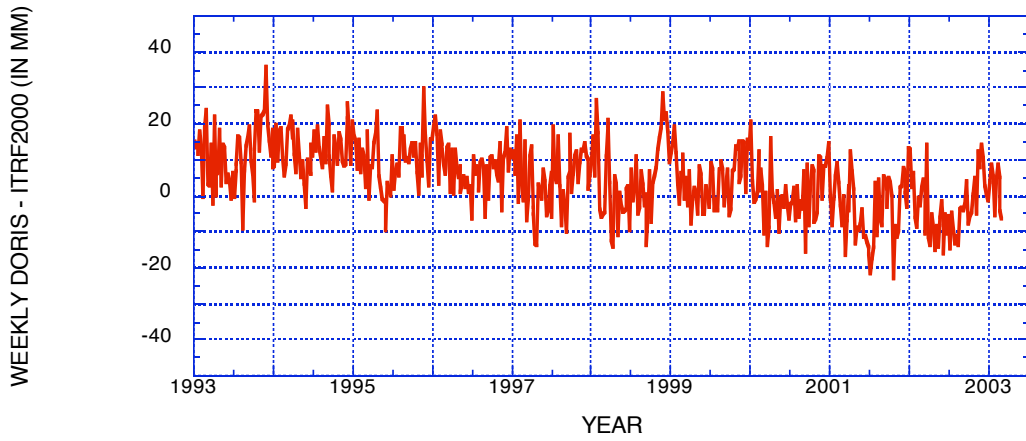
Le mouvement du géocentre (origine du repère par rapport au centre des masses) correspond donc à l'opposé de la transformation qui serait estimée en comparant la solution temporelle (par exemple hebdomadaire) par rapport à une solution de référence position/vitesse exprimée à l'époque des observations. Cette différence de signe est souvent une source d'incompréhension entre les géodésiens et les géophysiciens.

Les 3 figures ci-dessous montrent les résultats obtenus en X, Y et Z en fonction du temps, par rapport au nombre de satellites DORIS disponibles. On constate tout d'abord que les variations du géocentre mesurées par DORIS sont faibles (quelques millimètres) et d'amplitude compatible avec les estimations géophysiques issues des modèles de répartition temporelles du système Terre-Océan-Atmosphère (Dong et al, 1997; Bouille et al, 2000).

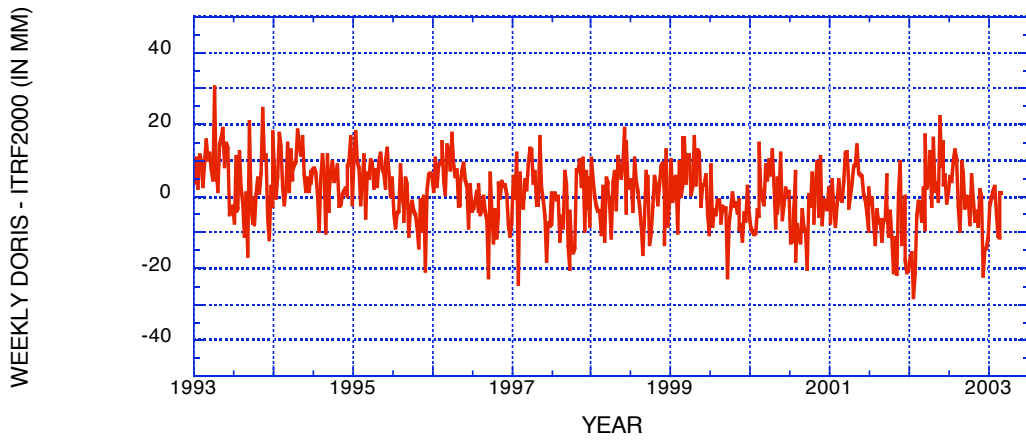
On constate de plus, principalement en X, que le passage à 5 satellites en 2002,4 permet de mieux mettre en évidence le signal annuel qui semblait plus bruité auparavant dans cette série. Enfin il est utile de préciser que certains points qui semblent aberrants à première vue, on en fait des écarts types a posteriori plus importants et correspondent simplement à une observabilité plus faible (perte de mesure sur 1 ou plusieurs satellites DORIS pendant 1 ou plusieurs jours de cette même semaine, souvent liée à des manœuvres de remise en poste des satellites). De notre point de vue, il n'y a pas de raison de retirer de tels points dans la série. Par contre au moment de calculer une statistique globale, il convient de bien analyser les différences d'observabilité au cours du temps afin de ne pas fausser la statistique en fournissant un estimateur trop pessimiste sur la qualité réelle des résultats.

La composante Z est quant à elle beaucoup plus bruitée. Ceci est caractéristique des résultats de géodésie spatiale. Une erreur systématique sur la position du satellite va avoir tendance à se moyenniser sur les résultats de localisation en X et Y à cause de la rotation terrestre, alors que ce ne sera pas le cas pour la composante Z (quasiment identique dans le repère inertiel et dans le système terrestre). Il est facile de mettre en évidence ce phénomène à partir de simulations simples (Morel, 2001). De plus, on peut montrer mathématiquement que l'utilisation de paramètres de forces (accélérations) empiriques (Créaux et al, 1994) crée une corrélation naturelle avec le paramètre de translation TZ. Nous pouvons citer un exemple malheureux récent mais très instructif: Lors d'une soumission précédente de solutions hebdomadaires DORIS multi-satellites, nous avons oublié dans les calculs d'estimer le paramètre de coefficient de pression de radiation solaire du satellite Topex/Poseidon. La précision des résultats de la localisation multi-satellites n'était pas affectée par cette erreur. Par contre, le paramètre estimé de translation TZ possédait un signal très important (20 cm d'amplitude) d'une période de 120 jours (l'angle entre le plan d'orbite de ce satellite et le soleil possède une période de 60 jours) qui était clairement visible (Meise et al, 2002). Ce phénomène avait été mis en évidence auparavant par une analyse des fréquences du signal (périodogramme) (Willis, 2002).

TX TRANSLATION



TY TRANSLATION



TZ TRANSLATION

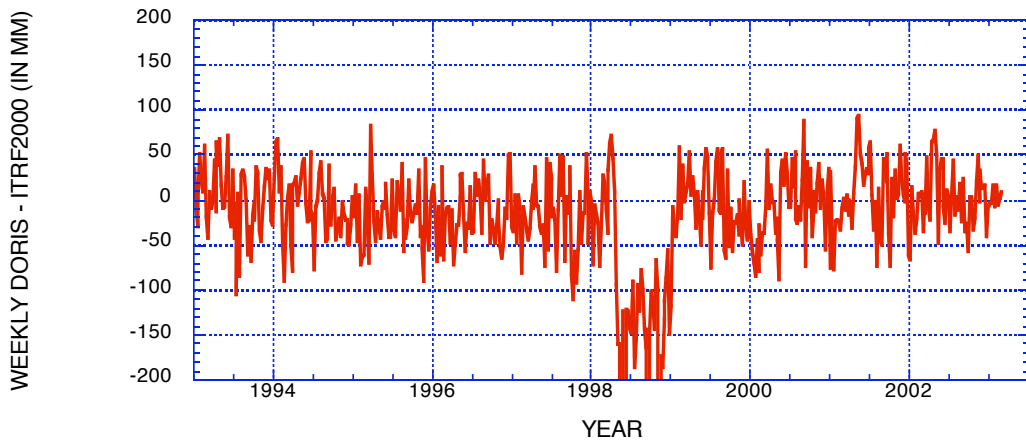


Figure 7a, 6b et 6c: Paramètres de transformations estimés à partir de séries hebdomadaires DORIS (en X, Y et Z) pour la série IGNWD03 par rapport à l'ITRF2000.

Concernant la composante TZ, il est aussi utile de noter que durant la période 1998,4-1999,0, la composante de translation comporte une erreur systématique très importante (environ 20cm). Après étude, cette période correspond aux premières données DORIS/SPOT4 entre le début des premières mesures disponibles (1/5/1998) et le début de l'année 1999 (1/1/1999). Lorsque l'on traite les mesures SPOT2 et Topex/Poseidon soit seules soit simultanément, aucune erreur systématique n'est visible. Lorsque l'on traite les données SPOT4 seules, on obtient en réseau libre une erreur systématique d'environ 60 cm (d'où les 20 cm en moyennant avec les autres satellites qui ne sont pas affectés par cette erreur). Lorsque l'on traite simultanément les mesures SPOT2 et Topex/Poseidon, il n'y a aucun systématisme visible sur la composante TZ en 1998.

Les causes exactes de ce problème ne sont pas encore entièrement connues. Toutefois, le fait que le problème s'arrête exactement le 1/1/1999 (saut de seconde UTC) laisse penser à une erreur dans le traitement des données ou dans le prétraitement des données effectué par le CNES en amont avant de mettre les données DORIS à disposition des différents centre d'analyse au CDDIS. Une manière simple de répondre à cette question consisterait à faire traiter à Toulouse en utilisant le logiciel GINS les données DORIS du satellite SPOT4 en réseau libre ou peu contraint, soit en utilisant les données prétraitées, soit en utilisant les données brutes (non disponibles en dehors de Toulouse).

Un autre paramètre physique d'intérêt est le facteur d'échelle du système de référence terrestre (Altamimi, 1991) et qui correspond à la manière dont on a été capable de réaliser le mètre S.I. au cours du temps. Ce paramètre peut aussi être vu comme une erreur constante sur l'altitude de toutes les stations du réseau, compte-tenu de la faible rapport entre les montagnes les plus hautes dans le monde et le rayon terrestre moyen.

La figure ci-dessous montre l'évolution temporelle de ce facteur d'échelle pour chacune des solutions hebdomadaires.

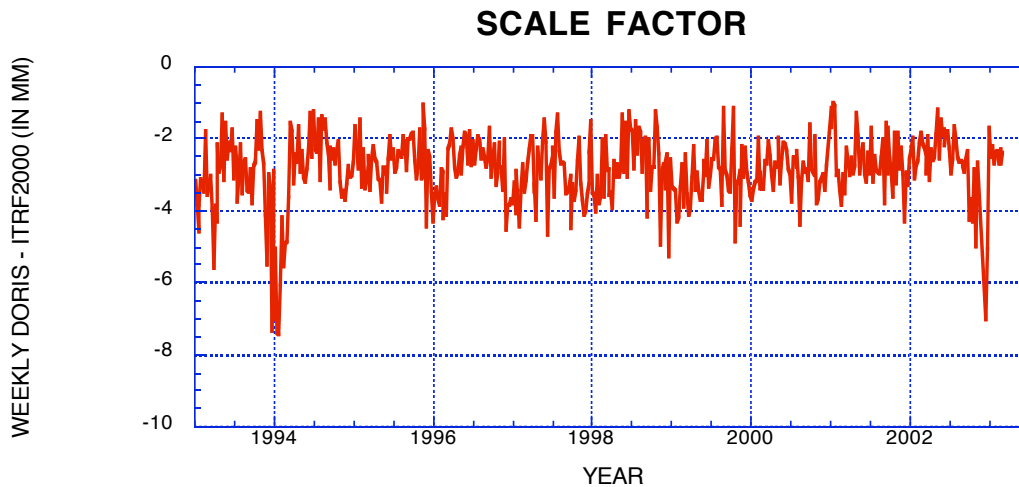


Figure 1: Evolution temporelle du facteur d'échelle du système de référence terrestre déduit de la série hebdomadaire DORIS IGNWD03 par rapport à l'ITRF2000.

L'ordre de grandeur de ce paramètre est de quelques ppb (1 ppb = 10^{-9} , soit 6 mm en altitude pour chaque station DORIS). On constate tout d'abord que ce paramètre est très constant dans le temps. Les variations sont de l'ordre de 1 ppb (6 mm) ou moins. Grâce à la bonne correction ionosphérique DORIS (les deux fréquences du système sont 2GHz et 400 MHz et donc assez distante), il n'existe plus d'erreurs variant avec le temps en fonction du nombre de tâches

soltaire. De telles erreurs avaient été mises en évidence sur le système précédent TRANSIT/NNSS (Tscherning et al, 1985; Soler et al, 1987) et avaient créé des imprécisions dans la réalisation initiale du système de référence WGS84 (Sillard et al, 1996).

De plus, la pente estimée est très faible, environ 0,06 ppb soit encore 0,6 mm/an montrant ainsi une excellente stabilité à très long terme, meilleure que celle du système GPS (Heflin et al, 2002).

On constate par contre, un décalage systématique important par rapport à la référence (ITRF2000) de l'ordre de $-2,5$ ppb (-16 mm). La cause exacte de ce biais est partiellement inconnue. La valeur de ce biais dépend des centres d'analyse DORIS (choix des modèles principalement). Par exemple d'autres groupes, comme celui du LEGOS, obtiennent un biais presque 2 fois plus grand mais de signe opposé (Meise et al, 2003).

Il est intéressant de noter que dans le cas du GPS l'écart avec la référence est plus faible et proche de -1 ppb (Heflin et al, 2002). En fait, le biais réel a été masqué dans les résultats en estimant (une fois pour toute) et pour chaque satellite GPS un écart entre le centre de masse du satellite et le centre de phase de l'antenne à bord sans le fixer aux valeurs de spécifications technologiques fournies par les constructeurs de satellites (Bar-Sever, 1998a). Cette étude a montré que si les valeurs estimées différaient peu des spécifications (quelques cm) pour la plupart des satellites, d'autres possédaient des écarts beaucoup plus importants jusqu'à environ 2 m et dépendant de la nature (bloc II-R) du satellite GPS (Bar-Sever, 1997; Bar-Sever, 1998a). Dans le cas de DORIS, on pourrait bien sûr faire de même: Utiliser quelques données DORIS pour chaque satellite et estimer ainsi la correction centre de phase / centre de masse à bord du satellite qui réaliserait l'échelle terrestre la plus proche possible de celle de l'ITRF. Le fait que la figure ne montre pas de dérive dans le temps assurerait alors de réaliser l'échelle du système de référence terrestre à une exactitude (absence de biais) inférieure à 0,1 ppb et à une précision inférieure à 1 ppb. Toutefois, le fait que les différents centres d'analyse DORIS obtiennent des biais différents montre qu'il faudra d'abord calibrer les biais inter logiciels avant d'initier une telle campagne de calibration des antennes satellites. Cette intercalibration des logiciels pourrait être l'un des objectifs de l'IDS.

Toutes ces questions sont actuellement fondamentales pour déterminer comment les différentes techniques de géodésie spatiale peuvent à elles seules réaliser l'échelle du système de référence terrestre (Heflin et al, 2002 pour GPS; Angermann et al, 2002 pour le Laser) et aussi pour définir comment on peut maintenir dans le temps l'échelle d'un tel système de référence terrestre dans le temps (Altamimi, 1991; Ray, 1998). Chaque technique possède ses propres faiblesses: corrections centres de phase et altitudes des stations pour GPS, calibrations internes et externes pour le Laser.

Autres applications scientifiques du système DORIS

Le système DORIS possède aussi d'autres applications scientifiques, soit celles déjà bien connues comme celle liée à la détermination du champ de gravité terrestre, soit d'autres encore en cours de développement et d'évaluation liée à la détermination de la rotation terrestre ou celle du milieu atmosphérique.

Concernant le champ de gravité, DORIS a été utilisé très tôt à cause de la précision de sa mesure, de la qualité de son réseau de poursuite (dense et réparti de manière homogène sur le globe) et des orbites particulières de ses satellites (orbites basses). Les données DORIS ont ainsi été utilisées dans les modèles majeurs de champs récents: JGM3 (Tapley et al, 1996), EGM96 (Lemoine et al, 1998), GRIM5 (Biancale et al, 2000). À elle seule cette application de DORIS pourrait faire l'objet d'un tel document.

Concernant la détermination des paramètres de la rotation terrestre, en particulier pour la position instantanée de l'intersection du pôle de la rotation terrestre avec la surface terrestre, les résultats DORIS sont actuellement encore un peu difficiles à interpréter.

Les résultats récemment produits par les centres d'analyse DORIS par l'IERS (Gambis, 2003) montrent des résultats encore contradictoires. Certaines séries montrent une excellente précision interne, mais présentent aussi des systématismes et des dérives importantes avec la série de référence C04 de l'IERS. D'autres montrent une stabilité étonnante (pas de biais ni de dérive sur les 10 ans de résultats) mais un bruit de mesure plus important. À notre avis, ces différences proviennent de

- la manière dont les différents centres d'analyse estiment ces paramètres (position et dérive dans le temps ou seulement position moyenne dans la journée),
- la quantité de mesures réellement utilisée dans l'estimation (1 jour ou 3 jours),
- ainsi que de la manière dont ils réalisent le système de référence interne (position des stations fixée, ou contrainte, voire estimée en réseau libre).

Une comparaison plus systématique de ces résultats ainsi qu'une discussion plus étroite entre les différents centres d'analyse DORIS de l'IDS pourrait résoudre ce problème et s'approcher de résultat de l'ordre du mas (millième de seconde d'arc) ou être légèrement inférieur dans une solution de type multi-satellites (Willis, 2002). Il reste toutefois dans ces solutions des erreurs à la période de 5 et 60 jours (Willis, 2003) indiquant des erreurs systématiques résiduelles dans les calculs d'orbitographie pour SPOT (5 jours) et TOPEX (60 jours). Améliorer les orbites, améliorerait ainsi les résultats sur les EOP. Ces performances restent toutefois très en dessous de ce qui peut être avec GPS dans le cadre de l'IGS. Ces résultats GPS sont typiquement à l'heure actuelle de l'ordre de 0,1 à 0,2 mas. De plus, on peut les obtenir avec une définition temporelle plus importante au bout de quelques heures de mesures, voire moins (Rothacher, 2001).

Il est aussi possible avec le système DORIS de déterminer de manière très précise le paramètre de correction troposphérique zénithal, fournissant ainsi une information sur la quantité d'humidité dans la partie basse de l'atmosphère (troposphère) au-dessus de chaque station du réseau.

Les résultats obtenus depuis plusieurs années (Willis et al, 1998a) montrent que des précisions de l'ordre du cm sont possibles en mode multi-satellite.

Pour illustrer notre propos, nous présentons ici une comparaison entre la correction troposphérique estimée à partir de mesures GPS et celle estimée à partir de mesures DORIS (Willis et al, 2003c) pour une station en colocation (figure 8).

Pour exprimer la correction troposphérique zénithale en fonction de l'allongement du trajet mesuré dans la direction du satellite, on suppose connue la fonction de rabattement (Botton et al, 1996; Niell et al, 1996).

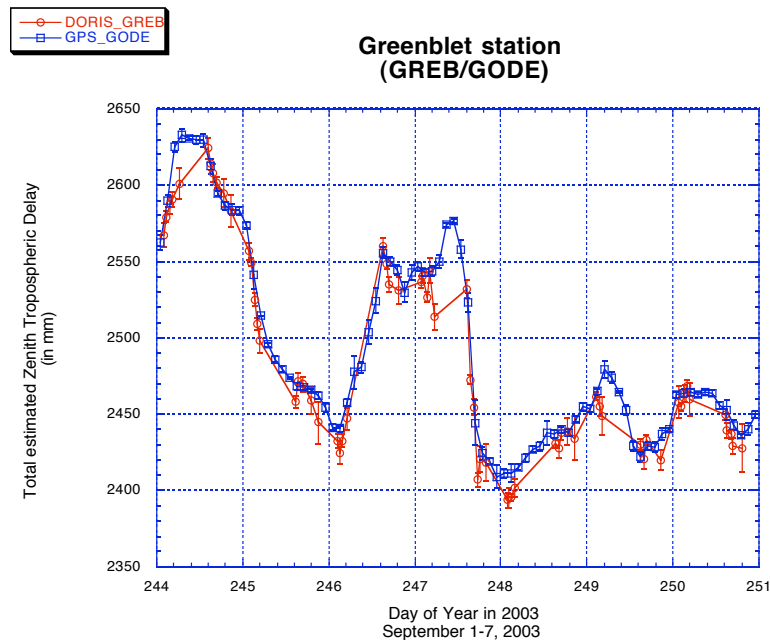


Figure 8: Comparaison de la correction troposphérique zénithale au-dessus de la station de Greenbelt estimée à partir des mesures GPS et celle estimée à partir des mesures DORIS (1 au 7 septembre 2002).

On voit que les 2 estimations de correction troposphérique sont tout à fait compatibles. GPS permet une estimation continue de ce paramètre alors que le système DORIS est limité par le faible nombre de passages de satellites par jour (satellites bas). L'accord entre les 2 systèmes est de l'ordre de 1 cm pour la composante zénithale soit à peine 2 à 3 fois moins bien que les meilleures estimations par GPS ou par VLBI. Cette exactitude des mesures VLBI et GPS a été confirmée par d'autres sources de mesures que sont les radiomètres à vapeur d'eau (WVR = *Water Vapor Radiometer*) à de nombreuses occasions (Bevis et al, 1992; Tralli et al, 1992; Emdarson et al, 1998; Niell et al, 2001). On voit sur la figure 8 que le système DORIS est aussi parfaitement capable de rendre mesurer le signal atmosphérique à chaque passage de satellite.

On peut noter aussi dans des études systématiques de type incluant la totalité des stations DORIS en colocation qu'il existe aussi un très faible systématisme entre les deux systèmes, de l'ordre de 5 mm, qui a été confirmé par une étude systématique sur les différentes stations en colocation (Willis et al, 2003a). Ce biais peut s'expliquer par le biais déjà présenté dans ce document entre l'échelle du système de référence ITRF et celle réalisée de manière interne par le système DORIS (corrélation entre l'altitude des stations de géodésie spatiale et la correction troposphérique zénithale).

Toutefois cette application ne peut pas comme pour GPS être utilisée dans des modèles de prédiction météorologique compte tenu du délai trop important pour disposer des mesures. DORIS peut toutefois jouer un rôle en climatologie en permettant de surveiller sur le long terme l'exactitude des résultats GPS. En effet, le paramètre de correction troposphérique est très corrélé dans les calculs de géodésie spatiale avec le paramètre de position verticale de la station ainsi qu'avec le paramètre de décalage d'horloge. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'altitude des stations GPS reste actuellement un point faible de cette technique (Schwarz et al, 1993; Heflin et al, 2003).

Il est important de distinguer ce type de détermination du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère d'un autre type d'application qui consiste à utiliser les mesures de récepteurs GPS embarqués sur des satellites bas pour réaliser une tomographie de la troposphère (Yunck et al, 1996).

Enfin, DORIS peut aussi déterminer de manière très précise la correction ionosphérique en utilisant le fait que le signal est diffusé sur deux fréquences (Dufour, 2001). Cette possibilité a été utilisée dès le début de la mission Topex/Poseidon pour corriger les mesures de l'altimètre français monofréquence grâce aux mesures DORIS (Foucher et al, 1991).

Malgré la nature Doppler de la mesure DORIS (on n'estime que des variations temporelles du TEC = *Total Electron Content*), ce système permet d'apporter informations complémentaires à ce qui est déjà obtenu par GPS. En effet, les satellites DORIS sont suffisamment bas pour se trouver à l'intérieur de l'ionosphère. Le TEC mesuré par DORIS ne comprend donc pas la totalité de l'ionosphère comme c'est le cas avec les GPS situés à 20000 Km d'altitude. On obtient alors par différence des 2 techniques, une information nouvelle sur la protonosphère (Warnant et al, 2003) qui reste une partie de l'atmosphère encore assez mal connue à l'heure actuelle. Le fait qu'un grand nombre de stations DORIS soit en colocation avec des récepteurs GPS permanents de l'IGS pourrait ainsi amener un grand nombre de mesures de ce type nouveau.

Perspective d'évolution des résultats DORIS

Comme nous allons tout d'abord le montrer, les performances géodésiques du système DORIS ont évolué progressivement au cours du temps. Le tableau et la figure ci-dessous montrent cette évolution au cours du temps (comparaison de solutions hebdomadaires de localisation par rapport à une solution globale de référence incluant la position et la vitesse moyenne des stations, exprimées à l'époque des observations). Nous n'avons choisi volontairement que des solutions issues du logiciel Gipsy/Oasis afin de s'assurer de l'estimation de la qualité des solutions est réalisée à partir de critères rigoureusement identiques au cours du temps. D'autres groupes (en particulier celui du LEGOS en France) obtiennent des résultats de localisation équivalents mais souvent exprimés sous forme de solutions mensuelles car mieux adaptées jusqu'à présent pour les applications géophysiques.

| Date | Précision (en cm) | Type de série | Référence | Commentaire |
|--------|-------------------|---------------|---------------------|---|
| 1990.5 | 10 | Mensuel | Lefeurmou, 1988 | Simulation avant lancement |
| 1995.5 | 10 | Hebdomadaire | Willis, 1995 | 1 satellite |
| 1996.5 | 2.5 - 3.0 | Hebdomadaire | Willis, 1996 | 3 satellites combinaison de matrices normales |
| 1998.5 | 2.0 - 2.5 | Hebdomadaire | Willis et al, 1998 | Multi-satellite au niveau des équations de mesure |
| 2003.0 | 1.0 - 1.5 | Hebdomadaire | Willis et al, 2003c | 5 satellites |
| 2003.5 | 0.5 - 1.2 | Hebdomadaire | Willis, 2003 | Champ GGM01 |

Table 3: Evolution de la précision des solutions DORIS hebdomadaires en fonction des améliorations techniques et logicielles.

La figure suivante présente l'évolution temporelle de ces améliorations successives.

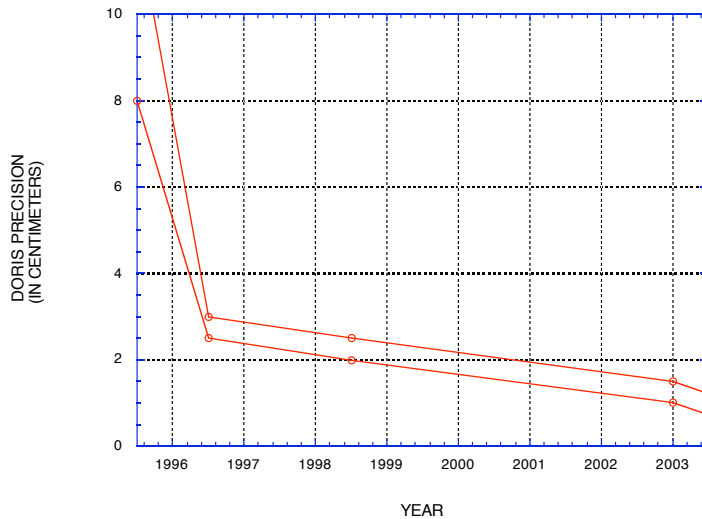


Figure 9: Amélioration de la précision des solutions DORIS hebdomadaires au cours du temps

Les deux courbes indiquées sur la figure 9 correspondent aux précisions minimum et maximum que l'on peut obtenir pour l'ensemble des stations. En effet, la précision dépend principalement du nombre de mesures DORIS disponibles et donc de la latitude de la station (Morel, 2001). En effet, les satellites SPOT étaient presque polaire, les stations équatoriales possèdent beaucoup moins de données par jour.

On voit clairement sur cette figure l'amélioration très nette due à l'utilisation de données réelles (par rapport aux données simulées pour lesquelles le bruit de mesure avait été très surévalué), puis l'amélioration en 1996 en traitant les mesures de plusieurs satellites simultanément, en cumulant les équations normales obtenues par satellite. Cette stratégie de calcul a été ensuite améliorée en traitant simultanément les mesures de tous les satellites de manière plus optimale. La différence principale avec la stratégie précédente est que certains paramètres ne sont plus éliminés (correction troposphérique) avant la combinaison. On utilise ainsi l'information sur le paramètre troposphérique provenant des mesures d'un satellite par rapport à celles du passage successif, quel que soit le satellite: la troposphère ne dépend pas du satellite mais bien de l'état de l'atmosphère au cours du temps. Plus les passages sont proches, plus la contrainte a priori entre les paramètres estimés est forte et donc meilleure sera la détermination des 2 paramètres (et par voie de conséquence de l'ensemble des paramètres estimés). À la limite, si on avait comme pour le système GPS des observations continues dans le temps, on pourrait déterminer ce paramètre de correction troposphérique à des intervalles réguliers dans le temps, typiquement toutes les 2 heures (Beutler et al., 1999).

La progression lente mais régulière dans le temps entre 1995 et 2003 masque en fait des améliorations successives dans la stratégie d'estimation des paramètres, comme indiqué plus haut afin de mieux prendre en compte l'augmentation du nombre de mesures (et donc de la quantité d'information) par station. Plus récemment, le changement de modèle de champ permet d'augmenter la précision du résultat, en utilisant le modèle de champ GGM01 issu des mesures de la mission GRACE (Reigber et al, 2003) par rapport au modèle précédemment utilisé: EGM96 (Lemoine et al., 1998) ou GRIM5 (Biancale et al, 2000).

Nous allons maintenant essayer d'avoir une vision plus prospective et nous interroger sur les raisons objectives qui pourraient apporter désormais une amélioration de la qualité des résultats de localisation DORIS rendrait ainsi cette technique encore plus compétitive par rapport au système GPS.

À notre avis, les améliorations futures peuvent provenir des différents points suivants:

1. Le réseau DORIS: amélioration de la stabilité de la monumentation des antennes DORIS. Depuis 1999, L'IGN, par l'intermédiaire de l'équipe du SIMB (Service d'Installation et de Maintenance des Balises DORIS) a entrepris d'améliorer la stabilité des supports d'antennes DORIS (Fagard, 2003). Ceci consiste à adopter des règles d'installation plus proches de celles récemment adoptées par l'IGS pour son réseau primaire d'observation («*Core network*»): éviter les installations sur des bâtiments, et en général sur des endroits instables. Fin 2002, cet effort important commence à porter ses fruits puisque plus de la moitié des stations DORIS est considérée comme excellente en utilisant la classification développée par le SIMB (Fagard, 2003).
2. La constellation des satellites: comme nous l'avons vu précédemment, le nombre de satellites disponibles est un point critique pour la précision de la localisation DORIS. Depuis 2002, 4, 5 satellites DORIS sont utilisables simultanément (sans compter Jason, compte tenu des problèmes liés aux problèmes de l'oscillateur DORIS au cours des passages au-dessus de la SAA évoqués précédemment). À l'avenir, d'autres satellites sont prévus (Tavernier et al, 2003), comme Cryosat, Jason-2 ou les satellites de la future constellation Pléiade. Toutefois, il faut noter que la plupart des satellites ont déjà dépassé leur durée de vie nominale, souvent depuis plusieurs années et risquent donc de s'arrêter de fonctionner du jour au lendemain. De plus, aucune décision stratégique n'a été prise par le CNES, dans un contexte budgétaire difficile, pour maintenir un nombre minimum de satellites DORIS en orbite dans les prochaines années. On peut donc considérer malheureusement que le nombre actuel de satellites DORIS se trouve probablement à un maximum et devrait probablement être amené à se réduire au cours des prochaines années, les lancements prévus ne remplaçant probablement pas les satellites défectueux.
3. Les améliorations technologiques: le multi-canal DORIS disponible sur les nouveaux récepteurs Jason, ENVISAT et SPOT5 a clairement permis une amélioration des résultats de localisation en augmentant le nombre de mesures disponibles pour une même station et pour une période d'observation donnée. À notre connaissance, il n'est toutefois pas prévu à court terme d'évolution majeure du système DORIS dans le domaine technologique (Sengenès et al, 2002, Tavernier et al, 2003). Les améliorations futures devront donc avoir lieu au niveau du traitement des mesures existantes.
4. Les améliorations des modèles: L'amélioration significative des résultats observés tout récemment grâce à la disponibilité du nouveau modèle de champ GGM01 montre que des améliorations en précision sont encore possibles, bien que souvent sous-estimées par les fournisseurs mêmes de tels modèles. Nous pouvons citer ici plusieurs exemples de modèles dont l'amélioration pourrait favoriser la localisation DORIS: champ de gravité statique, prise en compte des variations temporelles du champ de gravité, prise en compte de la surcharge atmosphérique dans le logiciel Gipsy/Oasis (cela est déjà fait dans d'autres logiciels comme le logiciel GINS à Toulouse, le logiciel GAMITT du MIT ou le logiciel Bernese de l'Université de Berne). Il faut noter que ces améliorations de modèles sont très importantes, non seulement pour la précision des résultats mais aussi pour leur exactitude. En connaissant mieux certains modèles, il sera alors plus facile de contraindre certains paramètres empiriques, voire à terme de ne plus avoir besoin de les estimer ce qui augmentera l'observabilité des autres paramètres.

5. Les stratégies d'estimation des paramètres: Il est clair que de nouvelles stratégies peuvent encore émerger à l'avenir en fonction des différents résultats de recherche dans les centres d'analyse DORIS. Nous avons vu toutefois que de telles évolutions sont en général relativement faibles et nécessitent un effort de recherche soutenu dans le temps. On peut toutefois espérer qu'avec l'entrée en fonction de l'IDS (International DORIS Service) (Willis et al, 2003b), une saine émulation s'installe entre les différents centres d'analyse DORIS dans le monde, comme cela avait été le cas entre les groupes d'analyse GPS lors de la création officielle de l'IGS (International GPS Service) en 1994 (Beutler et al, 1999). On peut penser à des estimations plus complexes prenant en compte d'autres effets, comme la dissymétrie de l'atmosphère au cours d'un même passage, en estimant des gradients horizontaux pour la correction troposphérique (Davis et al, 1993; Bar-Sever et al, 1998), à la sélection d'un angle de coupure optimal pour les mesures DORIS (ne plus prendre en compte les mesures en dessous d'une certaine inclinaison au-dessus de l'horizon, ou une dépendance des mesures à basse élévation). D'autres pistes sont aussi à envisager comme celles de la détermination (sous contraintes à définir) de paramètres empiriques additionnels permettant d'introduire des calculs de type «dynamique réduite» (Barroto et al, 1998) comme cela est déjà fait avec succès pour GPS (Yunck et al, 1994, Haines et al, 2003) ou celle de l'estimation de paramètres additionnels (sous contraintes spatio-temporelles à définir) sur certains modèles comme ceux de modèles de champ de gravité (Perosanz et al, 1997) ou de ceux de frottement (Berger, 1998; Willis, 2002).

6. L'accès aux données DORIS brutes: Les données DORIS disponibles pour la communauté scientifique internationale (à l'exception des groupes Toulousains) sont des données déjà prétraitées et partiellement sélectionnées (Berthias, 2002). Il est prévu à terme de diffuser la totalité des données DORIS dans un format plus proche de celui des mesures brutes. Ces nouvelles mesures, plus proches de la physique, pourraient apporter une amélioration dans les méthodes de traitement. En particulier, l'accès aux pseudo-distances DORIS (même très imprécises) permettrait à chaque groupe de réaliser leur propre datation des mesures à partir de leur propre stratégie de calcul (par exemple: multi-satellite, voire multi-technique dans le cas de JASON) et d'apporter en parallèle des informations directes de distances dans l'espace (et non plus de différences de distances dans le temps) changeant radicalement ainsi la nature même de l'estimation de géodésie spatiale.

Enfin, il faut noter que nous n'avons principalement parlé dans ce document que d'applications utilisant le système DORIS seul. Il est bien sûr possible de traiter les données DORIS simultanément avec d'autres données, non pas seulement en cumulant les matrices normales de résultats (SINEX) obtenues de manière indépendante par technique mais en estimant tous les paramètres dans un ajustement commun. Dans ce cas, on profite de toute l'information commune (position de stations via les rattachements, rotation terrestre, troposphère, horloge, ionosphères) qui était éliminée par la première méthode. Ce type de traitement est déjà effectué par plusieurs groupes, pour l'orbitographie (Haines et al, 2003) ou pour la localisation des stations à l'Université du Texas (J.C. Ries) ou au GRGS/LEGOS (R. Biancale) ou par d'autres groupes (Andersen, 2000). Cela représente aussi une partie importante de nos recherches actuelles.

Conclusions et perspectives

En conclusion, il est clair que le système DORIS a dépassé ses objectifs scientifiques initiaux d'orbitographie précise. Son apport essentiel dans les missions Topex/Poseidon et Jason a permis d'ouvrir une très grande gamme d'applications océanographiques nouvelles qui préfigurent la mise en place d'une océanographie précise opérationnelle pour les décades à venir.

Concernant la géodésie elle-même, la précision des résultats de localisation s'est progressivement améliorée au cours des dix dernières années, grâce au développement de nouvelles technologies (bi-canal numérique), à la disponibilité de nouveaux satellites, à l'amélioration de

modèles et en particulier celui du champ de gravité ainsi que par le développement de nouvelles stratégies d'estimation (multi-satellites).

Avec une semaine de mesures DORIS, les résultats s'approchent désormais du niveau sub-centimétrique, permettant ainsi de nouvelles applications géodésiques et géophysiques (maintenance du système de référence terrestre, tectonique globale, déformation co-sismiques,...).

D'ores et déjà de nouvelles améliorations matérielles et logicielles sont prévues, rendant ainsi ce système plus performant et compétitif face à l'omniprésence du système GPS, récompensant ainsi les efforts développés principalement au sein de la communauté française au cours de 10 dernières années.

REFERENCES

Albertella, A., F. Migliaccio, F. Sansò (2002), GOCE, The Earth Gravity field by space gradiometry, Celest. Mech. Dyn. Astron., 83, 1-4, pp. 1-5.

Altamimi, Z. (1991), Combinaison de techniques spatiales pour la détermination et la maintenance d'un système terrestre centimétrique, Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris.

Altamimi, Z., P. Sillard, C. Boucher (2002), ITRF2000, A new release of the International Earth Rotation Service for Earth Sciences, J. Geophys. Res., Solid Earth, 107, B10, 2214.

Altamimi, Z. (2003), TRF and EOP comparaison analysis between DORIS and other space geodesy technique, IDS Analysis Workshop, 20-21 février 2003.
http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html

Altamimi, Z., P. Sillard, C. Boucher (2003), The impact of No-Net Rotation condition on ITRF2000, Geophys. Res. Lett., 30, 2, 1064.

Altamimi, Z., C. Boucher, P. Willis (2003a), Terrestrial Reference Frame Requirements within IGGOS, in IGGOS Science Rationale, H. Drewes (Ed), J. of Geodyn., soumis à publication.

Andersen, P.H. (2000), Multi-level arc combination with stochastic parameters, J. of Geod., 74, 7-8, pp. 531-551.

Andréani, A. (2001), Le GPS, une révolution, Ed J. Jary, Paris, 160 p.

Angermann, D. M. Gerstl, R. Kelm, H. Muller, W. Seemuller, M. Vei (2002), Time evolution of an SLR reference frame, Adv. Space Res., 30, 2, pp. 201-206.

Angermann, D., M. Krugel, B. Meise, H. Muller, U. Tesman (2003), Time evolution of the Terrestrial Reference Frame, Proc. IAG Symp., Sapporo, in press.

Argus, D., R. Gordon, (1991), No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, Geophys. Res. Lett., 18, 11, 2039-2042.

Balmino, G. (2001), New space missions for mapping the Earth's gravity field, CR Acad. Sci., 2, 9, pp. 1353-1359.

Bar-Sever, Y., (1997), Information regarding Block IIR modeling, IGS Mail #1653.
<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1998/msg00127.html>

Bar-Sever, Y. (1998), New estimated values for the GPS43 antenna phase center offset, IGS Mail #1900.
<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1998/msg00127.html>

Bar-Sever, Y. (1998a) Estimation of the GPS transmit antenna phase center, AGU Fall Meeting, abstract.

Bar-Sever, Y., P. Kroger, J. Borjesson (1998), Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver, *J. of Geophys. Res.*, 103, pp. 5019-5035.

Barlier, F., P.Y. Le Traon, A. Cazenave (1996), Review of the satellite altimetry missions Topex/Poseidon and ERS-1, *CR Acad. Sci.*, IIA, 323, 9, pp. 737-753.

Barroto, B., J.P. Berthias (1996), First results of reduced dynamics with DORIS on Topex/Poseidon and SPOT, *J. of Guidance and Dynamics*, 19, 6, pp. 1296-1302.

Berger, C., R. Biancale, M. Ill, F. Barlier (1998), Improvement of the empirical thermospheric model DTM, DTM94, A comparative review of various temporal variations and prospects in space geodesy applications, *J. of Geodesy*, 72, pp. 161-178.

Berthias, J.P. (2002), DORIS observations, SOD/CNES data processing, IDS Workshop, Biarritz, 13-14 juin 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html

Bertiger, W.I., Y.E. Bar-Sever, E.J. Christensen, E.S. Davis, J.R. Guinn, B.J. Haines, R.W. Hanez-Meier, J.R. Jee, S.M. Lichten, W.G. Melbourne, R.J. Muellerschoen, T.N. Munson, Y. Vigue, S.C. Wu, T.P. Yunck, B.E. Schutz, P.A.M. Abusali, H.J. Rim, N.M. Watkins, P. Willis (1994), GPS Precise Tracking Of Topex/Poseidon: Results and Implications, *J. of Geophys. Res.*, Topex/Poseidon, 99, C12, pp. 24449-24464.

Beutler, G., M. Rothacher, S. Schaer, T.A. Springer, J. Kouba, R.E. Neilan (1999), The International GPS Service (IGS), An interdisciplinary service in support of Earth Sciences, *Adv. Space Res.*, J. Dow, G. Beutler (Eds), 23, 4, pp. 631-653.

Beutler, G., F. Brunner, J. Dickey, M. Feissel, R. Forsberg, I.I. Mueller, R. Rummel, F. Sanso, K.P. Schwarz (2002), The IAG review 2000-2001, Executive Summary, Proc of IAG Symp., 125, pp. 603-608.

Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, R.H. Ware (1992), GPS meteorology, remote sensing of atmospheric water-content using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, Atmos, 97, D14, pp. 15787-15801.

Biancale, R., G. Balmino, J.M. Lemoine, J.C. Marty, B. Moynot, F. Barlier, P. Exertier, O. Laurain, P. Gegout, P. Schwintzer, C. Reigber, A. Bode, R. König, F.H. Massmann, J.C. Raimondo, R. Schmidt, S.Y. Zhu (2000), A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations, GRIM5-S1, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 22, pp. 3611-3614.

Bilek, S.L., L.J. Ruff (2002), Analysis of the 23 June 2001 Mw = 8.4 Peru underthrusting earthquake and its aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 20, 1960.

Blewitt, G., M. Heflin, W. Bertiger, F. Webb, U. Lindqwister, R. Malla (1992), Global coordinates with centimeter accuracy in the International Terrestrial Reference Frame using the Global Positioning System, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 9, pp. 853-856.

Blewitt, G., D. Lavalee, P. Clarke, K. Nurutdinov (2001), A new global mode of earth deformation, Seasonal cycle detected, *Science*, 294, 5550, pp. 2342-2345.

Blewitt, G. (2003), Self-consistency in reference frames, geocenter definition and surface loading of the solid earth, J. Geophys. Res., 108, B2, 2103.

Bock, Y., R.M. Nikolaidis, P.J. de Jonge, M. Bevis (2000), Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System, J. Geophys. Res., Solid earth, 105, B12, pp. 22223-28253.

Bock Y. (2003, Private Communication.
<http://sopac.ucsd.edu/processing/coordinates/>

Bonnefond, P., P. Exertier, F. Barlier (1999), Geographically correlated errors observed from a laser-band short-arc technique, J. Geophys. Res., Oceans, 104, C7, pp. 15885-15893.

Botton, C., F. Duquenne, Y. Egels, Y. Even, P. Willis (1996), GPS, Localisation et navigation, Hermès, Paris, Conseil National de l'Information Géographique, 159 p.

Boucher, C., Z. Altamimi (1996), International Terrestrial Reference Frame, GPS World, 7, 9, pp. 71-74.

Boucher, C., Z. Altamimi (2001), ITRS, PZ-90 and WGS84, Current realizations and the related transformation parameters, in Special Issue on GLONASS, P. Willis (Ed), J. of Geod., 75, pp. 613-619.

Bouille, F., A. Cazenave, J.M. Lemoine, J.F. Crétaux (2000), Geocenter motion from the DORIS space system and laser data to the Lageos satellite, Comparison with surface loading data, Geophys. J. Int., 143, 1, pp. 71-82.

Boullanger, J.P. C. Menkes (1995), Propagation and reflexion of long equatorial waves in the Pacific Ocean during the 1992-1993 El Nino, J. Geophys. Res., Oceans, 100, C12, pp. 25041-25059.

Bureau des longitudes (2001), La géodésie, Bilan et perspectives, Paris, 129 p.

Byun, S.H. (2003), Satellite orbit determination using tripple difference of GPS carrier phase in pure kinematic mode, J. of Geod., 76, 9-10, pp. 569-585.

Cabanes, C., A. Cazenave, C. Le Provost (2001), Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in-situ observations, Science, 294, 5543, pp. 840-842.

Cazenave, A., J.J. Valette, C. Boucher (1992), Positioning with DORIS data on SPOT-2 after first year of mission, J. of Geophys. Res., pp. 7109-7119.

Cazenave, A., K. Dominh, L. Soudarin, F. Ponchaut, C. Le Provost (1994), Sea level changes from Topex/Poseidon altimetry and tide gauges and vertical motions from DORIS, Geophys. Res. Lett., 26, 14, pp. 2077-2080.

Cazenave, A. (1999), Les variations actuelles du niveau des mers, C.R. Acad. Sci., IIA, 329, 7, pp. 457-469.

Chao, B.F., R.J. Eanes (1995), Global gravitational changes due to atmospheric mass redistribution as observed by the LAGEOS nodal residuals, J. Geophys. Int., 122, pp. 755-764.

Chelton, D.B., M.G. Schlax (1996), Global observations of oceanic Rossby waves, Science, 272, 5259, pp. 234-238.

Chen, J.L., C.R. Wilson, R.J. Eanes, R.S. Nerem (1999), Geophysical interpretation of observed geocenter variations, J. Geophys. Res.

Crétaux, J.F., F. Nouël, C. Valorge, P. Janière (1994), Introduction of empirical parameters deduced from the Hill's equations for satellite orbit determination, Manusc. Geod., 19, pp. 135-156.

Crétaux, J.F., L. Soudarin, A. Cazenave, F. Bouille (1998), Present day tectonic plate motions and crustal deformations from the DORIS space system, J. Geophys. Res., 103, pp. 30167-30181.

Davies, P., G. Blewitt (2000), Methodology for global geodetic time series estimation, A new tool for geodynamics, J. Geophys. Res., Solid Earth, 105, B5, pp. 11083-11100.

Davis, J.L., G. Elgered, A.E. Niell, C.E. Kuehn (1993), Ground-based measurements of gradients in the wet radio refractivity of air, Radio Science, 28, 6, pp. 1003-1018.

De Moegen, N., C. Boucher (1985), Localisation absolue et différentielle de balises DORIS, Etude et simulations, stage de l'ESGT, IGN NT/G n°3.

Dong, D., J.O. Dickey, Y. Chao, M.K. Cheng (1997), Geocenter variations caused by atmosphere, oceans and surface ground water, Geophys. Res. Lett., 24, 15, pp. 1867-1870.

Dong, D., P. Fang, Y. Bock, M. Cheng, S. Miyazaki (2002), Anatomy of apparent seasonal variations from GPS derived site position time series, Geophys. Res. Lett., 107, B4, 2075.

Dong, D., T. Yunck, M. Heflin (2003), Origin of the International Terrestrial Reference Frame, J. of Geophys. Res., Solid Earth, 108, B4, 2200.

Dorie, O. (1997), Recherche d'une procédure optimale pour transformer les coordonnées mensuelles DORIS dans un système de référence terrestre maintenu de manière fiable dans le temps, Rapport de DEA, Astronomie fondamentale, mécanique céleste et géodésie, Observatoire de Paris, IGN/LAREG MS006.

Dorrer, M., B. Laborde, P. Deschamps (1991), DORIS (Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated from Space), system assessment results with DORIS on SPOT-2, Acta Astron., 25, 8-9, pp. 495-504.

Ducet, N., P.Y. Le Traon, G. Reverdin (2000), Global high resolution mapping of ocean circulation from Topex/Poseidon and ERS-1 and -2, J. Geophys. Res., Solid Earth, 105, C8, pp. 19477-19498.

Dufour, J.P. (2001), Introduction à la géodésie, Hermès, Collection IGN/ENSG, 335 p.

Durand, S. (2003), Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS, Etude détaillée des équations d'observation et du problème de résolution des ambiguïtés entières, thèse de Doctorat, Observatoire de Paris.

Ebehart-Philips, D., P.J. Haeussler, J.T. Freymueller et al (2003), The Denali Fault Earthquake, Alaska, A large magnitude slip-partitioned event, Science, 300, 5622, pp. 1113-1118.

Egbert, G.D., A.F. Bennet, M.G.G. Foreman (1994), Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model, J. Geophys. Res., 99, C12, pp. 24821-24852.

Emardson, T.R., G. Elgered, J.M. Johansson (1998), Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receivers, J. Geophys. Res., Atmosphere, 103, D2, pp. 1807-1820.

Exertier, P. (1999), Le mouvement orbital des satellites et l'observation de la Terre, Dossier d'habilitation à diriger des recherches, Université de Nice, Sophia-Antipolis, 23 juin 1999.

Fagard, H. (2003), The DORIS network, status report on renovation and collocation, IDS Analysis Workshop, 20-21 février 2003.

http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html

Fagard, H. (2003a), DORIS Sites logs

<http://ids.cls.fr/html/doris/sitelog.html>

Ferland, R., J. Kouba, D. Hutchinson (2000), Analysis methodology and recent results of the IGS network combination, Earth Planets Space, 52, 11, pp. 953-957.

Foucher, F., J.F. Ciavaldini (1991), Modeling the ionospheric electron-content for the correction of altimetric measurements, Pure and Applied Geophys., 135, 3, pp. 475-491.

Fu, L.L., E.J. Christensen, C.A. Yamarone, M. Lefebvre, Y. Ménard, M. Dorner, P. Escudier (1994), Topex/Poseidon mission overview, J. of Geophys. Res., 99, C12, pp. 24369-24381.

Fu, L. A. Cazenave (2001), Satellite Altimetry And Earth Sciences, A Handbook of techniques and applications, Academic Press, Int. Geophys. Series, 69, 463 p.

Gambis, D. (2003), DORIS/EOP in the IERS context, IDS Analysis Workshop, 20-21 février 2003.

http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html

Haines, B.J., W.I.B. Bertiger, S. Desai, D. Kuang, T. Munson, L. Young, P. Willis (2003), Initial Orbit Determination Results for Jason-1: Towards a 1-cm Orbit, Navigation, accepté pour publication.

Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita, M. Kusaka (2001), Calibration of antenna-radome and monumentation-multipath effects on GEONET, Part 1, Measurement of phase characteristics, Earth Planet Space, 53, pp. 13-21.

Heflin, M., W. Bertiger, G. Blewitt, A. Freedman, K. Hurst, S. Lichten, U. Linqwister, Y. Vigue, F. Webb, T. Yunck, J. Zumberge (1992), Global Geodesy using GPS without fiducial sites, Geophys. Res. Lett., 19, PP; 131-134.

Heflin, M., D. Argus, D. Jefferson, F. Webb, J. Zumberge (2002), Comparison of a GPS-derived global reference frame with ITRF2000, GPS Solutions, 6, pp. 72-75.

Heflin, M. (2003). GPS time series.

<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>

<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/AREQ.html>

Herring, T., D. Dong, R.W. King (1991), Sub-milliarcsecond determination of pole position using Global Positioning System data, Geophys. Res. Lett., 18, 10, pp. 1893-1896.

Hilbrecht, H. (2001), Galileo, a satellite navigation system for the world, Sea Tech., 44, 3, pp. 10-13.

Hoffmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, J. Collins (1992), GPS, Theory and practice, Springer-Verlag.

Jayles, C., J.P. Berthias, D. Laurichesse, S. Nordine, P. Cauquil, G. Tavernier (2002a), DORIS-DIODE, two years results of the European navigator, in *New Trends in Space Geodesy*, H. Drewes (Ed), *Adv. Space Res.*, 30, 2, pp. 301-306.

Jayles, C., F. Roza (2002a), Ten centimeters orbits in real-time on-board a satellite, DORIS-DIODE current status, IDS Workshop, Biarritz, 13-14 juin 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html

Jones, C.H. (2003), How faults accommodate plate motion, *Science*, 300, 5622, pp. 1105-1106.

Kaniuth, K., S. Huber (2003), An assessment of radome effects on heights estimates in the EUREF network, *Mitt. Bundensamt für Kartographie und Geodäsie*, EUREF, 29, 12, pp. 97-102.

Klokocnik, J., C. Reigber, P. Schwintzer, C.A. Wagner, J. Kostelecky (2002), Evaluation of pre-CHAMP gravity models GRIM5-S1 and GRIM5-C1 with satellite crossover altimetry, *J. of Geod.*, 76, 4, pp. 189-198.

Konig, R., S. Zhu, C. Reigber, K.H. Neumayer, H. Meixner, R. Galas, G. Banstert, P. Schwintzer (2002), Champ rapid orbit determination for GPS atmospheric limb sounding, in *New trends in Space Geodesy*, H. Drewes (Ed), *Adv. Space Res.*, 30, 2, pp. 289-293.

Kouba, J. (1999), Analysis Center and Research Improvement, IGS 1998 Annual Report, JPL Pasadena, pp. 13-17.
<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/overview/pubs.html>

Langley, R. (1997), GLONASS, review and update, *GPS World*, 8, 7, pp. 46-51.

Larson, K., J.T. Freymueller, S. Philipson (1997), Global velocities from the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 102, B5, pp. 9961-9981.

Le Provost, C., M.L. Genco, F. Lyard, P. Vincent, P. Canceil (1994), Spectroscopy of the world ocean tides from a finite-element hydrodynamic model, *J. Geophys. Res.*, Oceans, 99, C12, pp.24777-24797.

Le Traon, P.Y., G. Dibabour, N. Ducet (2001), Use of a high resolution model to analyze the mapping capabilities of multiple-altimetry missions, *J. Atmos. Ocean Techn.*, 18, pp. 1277-1288.

Lefeurmou, L. (1998), Projet DORIS, étude du positionnement permanent, stage d'Ingénieur de l'ESGT.

Lemoine, F.G., S.C. Kenyon, J.K. Factor, R.G. Trimmer, N.K. Pavlis, D.S. Chinn, C.M. Cox, S.M. Klosko, S.B. Luthke, M.H. Torrence, Y.M. Wang, R.G. Williamson, R.H. Rapp, T.R. Olson (1998), The development of the joint NASA/GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential models, EGM96, NASA, TP-1998-206861, 575 p.

Malla, R.P., S.C. Wu, S.M. Lichten (1993), Geocenter location and variations in Earth observations using the Global Positioning System measurements, *J. Geophys. Res.*, Solid Earth, 98, B3, pp.4611-4617.

Marshall, J.A., N.P. Zelenski, S.M. Klosko, D.S. Chin, S.B. Luthke, K.E. Rachlin, R.G. Williamson (1995), The temporal and spatial characteristics of Topex/Poseidon radial error, *J. Geophys. Res.*, Oceans, 100, C12, pp. 25331-25352.

McCarthy, D.D. (1996), International Earth Rotation Service (IERS) Conventions 1996, IERS Techn. Note, 21, Paris Observatory.

McCarthy, D.D., G. Petit (2003), International Earth Rotation Service (IERS) Conventions 2000, IERS Techn. Note, in press.
http://maia.usno.navy.mil/conv_2000.html

Meise, B., D. Angermann, H.Müller, V. Tesmer (2002), Comparison of DORIS site position and reference frame time series with other space techniques, IDS Workshop, Biarritz, 13-14 juin 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html

Meise, B., D. Angermann (2003), Intra-technique combination at DGFI, Some aspects related to DORIS, IDS Analysis Workshop, 20-21 février 2003.
http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html

Ménard, Y., M. Lefebvre, P. Escudier, L. Fu (1995), Ocean and climate, a quantitative answer, Topex/Poseidon, *Acta Astron.*, 37, pp. 293-299.

Minster, J.F., M. Lefebvre, J. Benveniste, J. Beerge, R. Biancale, C. Boissier, C. Brossier, P. Demery, E. Dombrowsky, M. Etchegorry, M.CX. Gennero, S. Houry, D. Jourdan, E. Lansard, E. Mazzega, C. Périgaut, F. Remy, M.C. Rouquet, P. Vincent (1991), Satellite altimetry observation of ocean dynamic topography, *Int. J. Remote Sensing*, 12, 8, pp. 1619-1629.

Minster, J.F., C. Brossier, P. Rogel (1995), Variation of the mean sea level from Topex/Poseidon data, *J. Geophys. Res.*, Oceans, 100, C12, pp. 25153-25161.

Morel, L. (1996), Etude de l'influence des jeux de référence sur les résultats DORIS, Pôle de la rotation terrestre, orbitographie, positionnement, Rapport de DEA, Astronomie fondamentale, mécanique céleste et géodésie, Observatoire de Paris, IGN/LAREG MS002.

Morel, L. (2001), Références géodésiques pour les futures missions altimétriques, Applications à la mission JASON, thèse de doctorat, Observatoire de Paris.

Neilan, R.E., A. Moore, T. Springer, J. Kouba, J. Ray, C. Reigber (2000), International GPS Service 2000, Life without SA, Proc. ION GPS 2000, pp. 438-446.

Nerem, R.S., C. Jekeli, W.M. Kaula (1995), Gravity field determination and characteristics, retrospective and prospective, *J. Geophys. Res.*, Solid Earth, 100, B8, pp. 15053-15074.

Nerem, R.S., B.J. Haines, J. Hendricks, J.F. Minster, G.T. Mitchum, W.B. White (1997), Improved determination of global mean sea level variations using Topex/Poseidon altimeter data, *Geophys. Res. Lett.* 24, 11, pp. 1331-1334.

Niell, A. (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. of Geophys. Res.*, 100, pp. 3227-3246.

Niell, A.E., A.J. Coster, F.S. Solheim, V.B. Mendes, P.C. Toor, R.B. Langley (2001), Comparison of measurements by radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS and VLBI, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 18, 6, pp. 830-850.

Nocquet, J.M., H. Duquenne, C. Boucher, A. Harmel, P. Willis (Ed.), Conversion altimétrique RGF93-IGN69, Correction des altitudes GPS en France, Groupe de Travail Permanent du CNIG, Positionnement Statique et Dynamique, mars 1999, Conseil National de l'Information Géographique, 68 p. 2000.

<http://www.esgt.cnam.fr/sites/CNIG/cnig.psd/CIAG/CNIG.PSD/cnig.htm>

Nouël, F. (1993), DORIS group calculate orbits better than 10 cm, AVISO Newsletter, 1993, 2.

<http://www->

[aviso.cnes.fr:8090/HTML/information/frames/publication/news/news2/welcome_uk.html](http://www-aviso.cnes.fr:8090/HTML/information/frames/publication/news/news2/welcome_uk.html)

Nouël, F., J.P. Berthias, M. Deleuze, A. Guitart, P. Laudet, A. Piuze, D. Pralines, C. Valorge, C. Dejoie, M.F. Susini, D. Taburiau (1994), Precise CNES orbits for Topex/Poseidon, is reaching 2cm still a challenge? J. Geophys. Res., 99, C12, pp. 24405-24419.

Otten, M., H. Boomkamp (2003), Multi-technique comparisons of JASON-1 orbits, IDS Analysis Workshop, 20-21 février 2003.

http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html

Parkinson, W., J.J. Spilker (1996), Global Positioning System, Theory and applications, 2 volumes, in Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 164.

Pearlman, M.R., J.J. Degnan, J.M. Bosworth (2002), The International Laser Ranging Service, in New Trends in Space Geodesy, H. Drewes (Ed), Adv. Space Res., 30, 2, pp. 135-143.

Perosanz, F., J.C. Marty, G. Balmino (1997), Dynamic orbit determination and gravity field model improvement for GPS, DORIS and laser measurements on Topex/Poseidon satellite, J. of Geod., 71, 3, pp. 160-170.

Ray, J. (1998), IERS Working Group on ITRF Datum, Final report, July 15, 1998.

http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/wg_datum_report.txt

Rebhan, H., M. Aguirre, J. Johannessen (2000), The Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer mission, GOCE, ESA Earth Observations Quarterly, 66, pp. 6-11.

http://www.esa.int/export/esaLP/GTCVCKSC_goce_0.html

Reigber, C., R. Schmidt, F. Flechtner, F. König, R. Meyer, U. Neumayer, P. Schwintzer, S.Y. Zhu (2003), First EIGEN Gravity Field model based on GRACE mission data only, soumis à Geophys. Res. Lett.

Rosmorduc, V., F. Hernandez (2003), Two altimetric satellites minimum are needed for ocean observation and forecasting, AVISO Newsletter, 9, pp. 12-14.

Rothacher, M. (2001), Combination of absolute and relative antenna phase center variations, GPS Solutions, 4, 4, pp. 55-60.

Rothacher, M., G. Beutler, R. Weber, J. Hefty (2001), High-frequency variations in earth rotation from Global Positioning System data, J. Geophys. Res., Solid Earth, 106, B7, pp. 13711-13738.

Rothacher, M. (2002), Estimation of station heights with GPS, in Vertical Reference Systems, H. Drewes, A. Dodson, L. Fortes, L. Sanchez, P. Sandoval (Eds), Proc. of IAG Symp., Springer-Verlag, 124, pp. 81-90.

Ruegg, J.C., M. Olcay, D. Lazo (2001), Co-, Post- and Pre(?)-Sesismic displacements associated with the Mw 8.4 Southern Peru Earthquake of 23 June 2001, Seism. Res. Lett., 72, 6, pp. 673-694.

Rummel, R., G. Balmino, J. Johannessen, P. Visser, P. Woodworth (2002), Dedicated gravity field missions, principles and aims, J. Geodyn., 33, 1-2, pp. 3-20.

Rummel, R., H. Drewes, G. Beutler (2002a), Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS), A candidate IAG project, Proc. of IAG Symp., 125, Springer-Verlag, pp. 609-614.

Scherneck, H.G. (1991), A parametrized solid earth tides model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements, Geophys. J. Int., 106, 3, pp. 677-694.

Schluter, W., E. Himlich, A. Nothnagel, N. Vandenberg, A. Withney (2002), IVS and its important role in the maintenance of the global reference systems, in New Trends in Space Geodesy, H. Drewes (Ed), Adv. Space Res., 30, 2, pp. 145-150.

Schutz, R.E. (1997), New observational techniques and precise orbit determination of artificial satellites, Celest. Mech. Dyna. Astron., 66, 1, pp. 79-85.

Schwarz, K.P., M. Sideris (1993), Heights and GPS, GPS World, 4, 2, pp. 50-56.

Sengenès, P., G. Tavernier, J.P. Granier (2002), A brief overview of DORIS system evolutions, IDS Workshop, Biarritz, 13-14 juin 2002.
http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html

Shum, C.K., P.L. Woodworth, O.B. Andersen, G.D. Egbert, O. Francis, C. King, S.M. Klosko, C. Le Provost, X. Li, J.M. Molines, M.E. Parker, R.D. Ray, M.G. Schlax, D. Stammer, C.C. Tierney, P. Vincent, C.I. Wunsch (1997), Accuracy assessment of recent ocean tide models, J. Geophys. Res., Oceans, 102, C11, pp. 25173-25194.

Sillard, P., C. Boucher (1996), Improvement of the transformation between ITRF and Doppler-realized WGS84, J. of Geod., 70, 11, pp. 768-780.

Sillard, P., Z. Altamimi, C. Boucher (1998), The ITRF96 realization and its associated velocity field, Geophys. Res. Lett., 25, 17, pp. 3223-3226.

Sillard, P., C. Boucher (2001), A review of algebraic constraints in terrestrial reference frame datum definition, J. of Geod., 75, 2-3, pp. 63-73.

Slater, J., S. Malys (1998), WGS84, past, present and future, in Advances in positioning and reference frames, F.K. Brunner (Ed), Proc of IAG Symp., 118, Springer-Verlag.

Soler, T., B.H.W. Vangelder (1987), On differential scale changes and the satellite Doppler system zeta-shift, Geophys. J. Royal Astron. Soc., 91, 3, pp. 639-656.

Soudarin, L., A. Cazenave (1993), Global geodesy using DORIS data on SPOT-2, Geophys. Res. Lett., 20, pp. 289-292.

Soudarin, L., A. Cazenave (1995), Large scale tectonic plate motions measured with the DORIS space geodesy system, Geophys. Res. Lett., 22, pp. 469-472.

Soudarin, L., J.F. Crétau, A. Cazenave (1999), Vertical crustal motions from the DORIS space geodesy system, Geophys. Res. Lett., 26, pp. 1207-1210.

Springer, T.A., U. Hugentobler (2001), The IGS Ultra-rapid products for (near-) real-time applications, Physics Chem. Earth, A, 26, 6-8, pp. 623-628.

Stammer, D., C. Wunsch (1994), Preliminary assessment of the accuracy and precision of Topex/Poseidon altimeter data with respect to the large-scale ocean circulation, J. Geophys. Res., Oceans, 99, C12, pp. 24584-24604.

Tapley, B.D., M.M. Watkins, J.C. Ries, G.W. Davies, R.J. Eanes, S.R. Poch, H.J. Rim, B.E. Schutz, C.K. Shum (1996), The Joint Gravity Model 3 (JGM3), *J. Geophys. Res.*, 101, B12, pp. 28029-28049.

Tapley, B.D., D.P. Chambers, C.K. Shum, R.J. Eanes, J.C. Ries, R.H. Stewart (1994), Accuracy assessment of the large-scale dynamic ocean topography from Topex/Poseidon altimetry, *J. Geophys. Res.*, 99, C12, pp. 24605-24617.

Tarantola, A., *Inverse problem theory* (1987), Elsevier, 2nd edition, 614 p.

Tavernier, G., L. Soudarin, K. Larson, C. Noll, J. Ries, P. Willis (2002), Current status of the DORIS Pilot Experiment, *Adv. Space Res.*, 30, 2, pp 151-156.

Tavernier, G., J.P. Granier, P. Sengenès, F. Rozo (2003), Present and future IDS, IDS Analysis Workshop, 20-21 février 2003.
http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html

Tavernier, G., J.P. Granier, C. Jayles, P. Sengenès (2003a), DORIS, New DIODE navigation and beacon network developments, *AVISO Newsletter*, 9, pp. 15-16.

Tralli, D.M., S.M. Lichten, T.A. Herring (1992), Comparison of Kalman filter estimates of zenith atmospheric path delays using the Global Positioning System and Very Long Baseline Interferometry, *Radio Science*, 27, 6, pp. 999-1007.

Tscherning, C.C., C.C. Goad (1985), Correlation between time dependent variations of Doppler-determined height and sun-spot numbers, *J. Geophys. Res.*, Solid Earth, 90, NB6, pp. 4589-4596.

Vincent, P. M. Costes, A. Auriol, Y. Ménard, P. Escudier (2002), Impact of the DORIS system on climate change studies, *Acta Astron.*, 51, pp. 275-283.

Wahr, J., M. Molenaar, F. Bryan (1998), Time variability of the Earth's gravity field, hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *J. Geophys. Res.*, Solid Earth, 103, B12, pp. 30205-30229.

Warnant, R., L. Morel, S. Stankov, J.C. Jadogne, H. Nebdi, N. Jacowki (2003), The use of DORIS as a tool to study the Earth ionosphere, IDS Analysis Workshop, 20-21 février 2003.
http://lareg.ensg.ign.fr/IDS/events/prog_2003.html

Watkins, M., J.C. Ries, G.W. Davies (1992), Absolute positioning using DORIS data, *Geophys. Res. Lett.*, 19, pp. 2039-2042.

Webb, F., J. Zumberge (Eds) (1995), An introduction to GIPSY/OASIS II, JPLM D-11088, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.

Willis, P. (1989), Méthodes de traitement de la phase GPS pour la localisation relative (statique et cinématique), Applications à la géodésie, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, 177 p.

Willis, P. (1995), Compte-rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA, 30 novembre – 8 novembre 1995, 1995, IGN/LAREG CM n°12.

Willis, P. (1996), Le système DORIS, présentation, rôle et recherches menées à l'IGN, *Revue Int. Géomatique*, 6, 2-3, pp. 289-304.

Willis, P., P. Sillard (1998), Weekly DORIS solutions for stations coordinates: Early results and perspectives, Actes des Journées DORIS, Toulouse, 27-29 Avril, 9 p.

Willis, P., Y.E. Bar-Sever, E. Doerflinger, J. Zumberge (1998a), Using DORIS data for determining the tropospheric delay, Implications on climatology and meteorology, Proc. DORIS Day, Toulouse, 27-29 avril 1998.

Willis, P. (2002), Compte-rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, mars 2002 – août 2002.

Willis, P. (2003), Compte-rendu de mission au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, février 2003 – juillet 2003.

Willis, P., Y. Bar-Sever (2003), DORIS Time series analysis with the Gipsy/Oasis II software, Summary of stations related problems, IDS Analysis Workshop, IGN, Paris.

Willis, P., B. Haines, Y. Bar-Sever, W. Bertiger, R. Muellerschoen, D. Kuang, S. Desai (2003a), Topex/Jason combined GPS/DORIS orbit determination in the tandem phase, in Satellite Dynamics in the Era of Interdisciplinary Geodesy, P. Visser, P. Moore (Eds), Adv. Space Res., 31, 8, pp. 1941-1946.

Willis, P., G. Tavernier, M. Feissel-Vernier, F. Lemoine, C. Noll, J. Ries, L. Soudarin (2003b), The proposed International DORIS Service, Proc. of IAG Symp., Sapporo, Juillet 2003, sous presse.

Willis, P., Y. Bar-Sever, G. Tavernier (2003c), DORIS as a potential part of a Global Geodetic Observing System, in IGGOS rationale, H. Drewes (Ed), soumis à J. of Geodyn.

Willis, P., B. Haines, J.P. Berthias, P. Sengenès, J.L. Le Mouél (2003d), Comportement de l'oscillateur DORIS/JASON au passage de l'anomalie Sud-Atlantique, C.R. Acad. Sci., soumis à publication.

Woodworth, P.L., J. Johannessen, P. Le Grand, C. Le Provost, G. Balmino, R. Rummel, R. Sabadini, H. Sünkel, C.C. Tscherning, P. Visser (1998), Towards the definitive space gravity mission, International WOCE Newsletter, 33, pp. 37-40.
http://www.esa.int/export/esaLP/GTCVCKSC_goce_0.html

Wöppelmann, G. (1997), Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par technique de géodésie spatiale, thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris, 23 juin 1997, 263 p.

Wunsch, C., D. Stammer (1998), Satellite altimetry, the marine geoid and the oceanic general circulation, Ann. Rev. Earth Planets Sciences, 26, pp. 219-253.

Yunck, T.P., W.G. Melbourne (1996), Spaceborne GPS for Earth Sciences, IAG Symp. 115, Springer-Verlag, pp. 113-122.

Yunck, T.P., W.I. Bertiger, S.C. Wu, Y.E. Bar-Sever, E.J. Christensen, B.J. Haines, S.M. Lichten, R.J. Muellerschoen, Y. Vigue, P. Willis (1994), First assessment of GPS-based reduced dynamic orbit determination on Topex/Poseidon, Geophys. Res. Lett., 21, 7, pp. 541-544.

Zumberge, J., M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins, F. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data for large networks, J. Geophys. Res., Solid Earth, 102, B3, pp. 5005-5017.

GLOSSAIRE

| | |
|-------------|--|
| AVISO | Archivage, Validation, Interprétation des données des Satellites Océanographiques |
| CDDIS | <i>Crustal Dynamics Data Information System</i> |
| CHAMP | <i>CHAllenging Mini-satellite Payload</i> |
| CNES | Centre National d'Etudes Spatiales |
| CSTG | <i>International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics</i> |
| DIODE | Détermination Immédiate d'Orbite par DORIS Embarqué |
| DORIS | Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré sur Satellite |
| ECMFW | <i>European Center for Medium range Weather Forecast</i> |
| EGM | <i>Earth Gravity Model</i> |
| ENVISAT | <i>ENVironmental Remote sensing SATellite</i> |
| GIPSY/OASIS | <i>GPS Inferred Positioning Software/Orbit Analysis and Simulation Software</i> |
| GOCE | <i>Gravity field and steady-state Ocean Circulation Mission</i> |
| GPS | <i>Global Posirtioning System</i> |
| GRACE | <i>Gravity Recovery And Climate Experiment</i> |
| GRGS | Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale |
| IAG | <i>International Association of Geodesy</i> |
| IDS | <i>International DORIS Service</i> |
| IERS | <i>International Earth rotation and Reference systems Service</i> |
| IGEX | <i>International GLONASS EXperiment</i> |
| IGN | Institut Géographique National |
| IGS | <i>International GPS Service</i> |
| ITRF | <i>International Terrestrial Reference Frame</i> |
| ITRS | <i>International Terrestrial Reference System</i> |
| JGM | <i>Joint Gravity Model</i> |
| JPL | <i>Jet Propulsion Laboratory</i> |
| NASA | <i>National Aeronautic and Space Administration</i> |
| PRARE | <i>Precise Range and Range-rate Equipment</i> |
| SA | <i>Selective Availability</i> |
| SAA | <i>South Atlantic Anomaly</i> |
| SSALTO | Segment Sol multi-mission d'ALTimétrie, d'Orbitographie et de localisation précise |
| SIMB | Service de Maintenance et d'Installation des Balises |
| SINEX | <i>Software INdependent EXchange format</i> |
| SPOT | Satellite Pour l'Observation de la Terre |
| SWT | <i>Science Working Team</i> |
| TEC | <i>Total Electron Content</i> |
| TOPEX | <i>ocean TOPographic Experiment</i> |
| WVR | <i>Water Vapor Radiometer</i> |

SITES WEB D'INTERET

DORIS Mail

<http://list.ensg.ign.fr/wws/arc/dorismail>

DORIS Network

<http://ids.cls.fr/html/doris/sitelog.html>

Publications relatives au système DORIS

<http://ids.cls.fr/html/reports.html>

Bibliographie DORIS

<http://ids.cls.fr/html/report/publications.html>

International DORIS Service

<http://ids.cls.fr>

International Earth rotation and Reference systems Service

<http://www.iers.org>

IERS Conventions 2000

<http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>

International GPS Service

<http://igs.cb.jpl.nasa.gov>

International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

<http://lareg.ensg.ign.fr>

Séries temporelles de coordonnées

DORIS/LEGOS

http://ids.cls.fr/html/doris/legos_cls_solutions.html

GPS/SOPAC

<http://sopac.ucsd.edu/processing/coordinates>

GPS/JPL

<http://sideshow.jpl.nasa.gov>

Altimétrie TOPEX/JASON

<http://www.jason.oceanobs.com>

International Association of Geodesy

<http://www.iag-aig.org>

<http://www.gfy.ku.dk/~iag>

«The miracle is not that I finished...The miracle is that I had the courage to start»
(en parlant du marathon)
John «The Penguin» Bingham, Runners World