



Rapport d'Activité

2012-2016

Février 2017

Présenté par

Guillaume RAMILLIEN

Président du Conseil Scientifique

Richard BIANCALE

Directeur Exécutif

Réalisation technique : Agnès PATU

AVANT-PROPOS

Depuis sa création en février 1971, le Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS) qui comptait quatre membres fondateurs : le Bureau des longitudes (Bdl), le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), l'Institut Géographique National (IGN), l'Observatoire de Paris (OP), s'est étendu à onze organismes scientifiques signataires d'une charte de coopération avec l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU/CNRS), l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), l'Université de la Polynésie Française (UPF), le Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) et l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) .

Les objectifs du GRGS sont la coordination des activités en géodésie spatiale à l'échelle nationale, et le développement de coopérations internationales dans ce domaine. Suivant sa charte d'organisation, le Comité Directeur est constitué par les Directeurs et Présidents des organismes membres du GRGS, et il se réunit une fois par an. Son Bureau Exécutif est chargé de la mise en œuvre matérielle des décisions du Comité Directeur et du Conseil Scientifique, les réunions semestrielles de ce dernier permettant le rassemblement de représentants de chaque organisme, pour discussions sur des actions de recherche.

Le GRGS organise également des manifestations scientifiques sur des thèmes spécifiques tel l'atelier de « Géodésie millimétrique » à Sorrèze (81) en 2014 ainsi que des Ecoles d'Eté biennales depuis 2002 sur des thèmes variés : « Localisation précise par moyens spatiaux » en 2012, « Altimétrie spatiale » en 2014, « Trajectoires planétaires et interplanétaires » en 2016 ; et ouvertes à une large communauté – y compris aux jeunes chercheurs en géophysique spatiale. De plus, le GRGS apporte son soutien à la mise en place d'instruments géodésiques, notamment l'installation d'une antenne VLBI dans le cadre du redéploiement de l'Observatoire Géodésique à Tahiti et il est également source de propositions de missions spatiales vers le CNES ou l'ESA.

Tous les cinq ans dorénavant, la charte prévoit une évaluation des activités du GRGS par un Groupe d'Evaluation Scientifique (GES) dont les membres nommés sont des experts dans le domaine de la géodésie. Leur rôle est de donner des avis sur les résultats et le fonctionnement du GRGS à travers le présent rapport quinquennal. Leur évaluation est ensuite transmise au Comité Directeur. Nous remercions Michel Diament (IPGP), Frank Lemoine (NASA), Jérôme Benveniste (ESA), Gabriel Tobie (Université de Nantes) et Olivier de Viron (Université de La Rochelle) d'avoir accepté de faire partie du GES cette année.

De par son statut, le GRGS a pour mission de fédérer au niveau national les équipes ayant des activités de géodésie spatiale. Outre le Bdl et l'INSU-CNRS auxquels du personnel est rattaché, 9 organismes abritent des équipes qui travaillent en synergie sur les thématiques recensées dans le tableau ci-dessous et qui constituent l'organisation du rapport.

| | CNES | IGN | OP | OCA | SHOM | OMP | UPF | ESGT | EOST | Total |
|-------------------------|------|-----|----|-----|------|-----|-----|------|------|-------|
| Observatoire géodésique | | | | 15 | 12 | 1 | 4 | | | 32 |
| Mécanique orbitale | 7 | 2 | 4 | 5 | | 4 | | | | 22 |
| Systèmes de référence | 3 | 7 | 11 | | | | | | | 21 |
| Traitement de données | 9 | 2 | 6 | 9 | | 2 | | 6 | 1 | 35 |
| Océans / Hydrologie | 6 | | | 4 | 9 | 9 | | | | 28 |
| Géodésie planétaire | 3 | | | | | | 1 | | | 4 |
| Physique fondamentale | | | 2 | 6 | | | | | | 8 |
| Services scientifiques | 5 | 4 | 1 | | 7 | 4 | | | 3 | 24 |

Effectif du GRGS actif par thématique et par organisme (recensé d'après les contributions au rapport)

La première partie du présent rapport fournit les données administratives sur la composition des instances du GRGS en 2016, des informations sur le personnel dans chaque organisme, le budget délivré annuellement par le CNES en soutien aux activités des laboratoires. La liste complète du personnel est donnée en annexe.

Les activités des différentes équipes du GRGS, déclinées par grands thèmes de recherche, apparaissent dans la deuxième partie du rapport. Elles concernent l'acquisition d'observations, les traitements des données spatiales, la modélisation des phénomènes naturels, réalisés les cinq

dernières années (2012 - 2016). Les publications couvrant cette période sont listées par année à la fin de cette partie.

Les enseignements et les formations animés par des membres du GRGS sont détaillés dans la troisième partie du document.

Le rapport quinquennal comprend également une partie « Projets » qui présente les propositions de développement d'infrastructure de géodésie spatiale et de projets de missions satellitaires qui inspireront les activités du GRGS dans les prochaines années.

Le site web du GRGS <http://www.grgs.obs-mip.fr> fournit des informations complémentaires ; y sont archivés les rapports d'activité annuels précédents et les comptes-rendus des réunions passées.

Guillaume Ramillien, Président du Conseil Scientifique,

Richard Biancale, Directeur Exécutif.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|---|
| AVANT-PROPOS..... | 3 |
| LISTE DES REDACTEURS/COORDINATEURS..... | 9 |

A - DONNEES ADMINISTRATIVES 11

1 - ORGANISMES MEMBRES ET STRUCTURE (EN 2016)

| | |
|--|----|
| 1.1.COMITE DIRECTEUR | 13 |
| 1.2. BUREAU EXECUTIF | 14 |
| 1.3. CONSEIL..... | 15 |
| 1.4. COMITE WEB..... | 16 |
| 1.5. SECRETARIAT ET GESTION | 16 |
| 1.6. GROUPE D'EVALUATION SCIENTIFIQUE..... | 16 |

2 - BUDGET ET PERSONNEL (EN 2016)

| | |
|--------------------------------|----|
| 2.1. BUDGET | 17 |
| 2.2. PERSONNEL (EN 2016) | 18 |

B - EXPERIENCES ET TRAVAUX 19

1 - OBSERVATOIRES GÉODÉSIQUES

| | |
|---|----|
| 1.1. OBSERVATOIRE DE LA COTE D'AZUR..... | 23 |
| 1.2. OBSERVATOIRE DE TAHITI..... | 31 |
| 1.3. SYSTEMES D'OBSERVATIONS MAREGRAPHIQUES | 39 |

2 - MECANIQUE ORBITALE ET CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE

| | |
|---|----|
| 2.1. MECANIQUE ORBITALE | 47 |
| 2.2. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE | 51 |
| 2.2.1. Missions spatiales | 51 |
| 2.2.2. Gravimétrie/Méthodologie ou technologie..... | 61 |

3 - SYSTEMES DE REFERENCE ET ROTATION DE LA TERRE

| | |
|--|----|
| 3.1. SYSTEME CELESTE (ICRS)..... | 71 |
| 3.2. ROTATION DE LA TERRE..... | 75 |
| 3.3. REPERE INTERNATIONAL DE REFERENCE TERRESTRE (ITRF)..... | 79 |
| 3.4. CENTRE DE COMBINAISON..... | 87 |

4 - TRAITEMENT DES DONNES GEODESIQUES

| | |
|--|-----|
| 4.1. DORIS..... | 95 |
| 4.2. TELEMETRIE LASER-SATELLITES | 99 |
| 4.3. TELEMETRIE LASER-LUNE | 103 |
| 4.4. GNSS | 107 |
| 4.5. INSAR..... | 111 |
| 4.6. VLBI..... | 119 |
| 4.7. SURCHARGES | 123 |

| | |
|--|-----|
| 4.8. PROPAGATION | 127 |
| 4.9. EVOLUTION LOGICIELS GINS..... | 129 |
| 5 - OCEANS, HYDROLOGIE GLOBALE | |
| 5.1. ALTIMETRIE SPATIALE..... | 133 |
| 5.1.1. Variations du niveau des océans | 133 |
| 5.1.2. Etalonnages | 141 |
| 5.2. PHENOMENES COTIERS..... | 149 |
| 5.3. REFLECTOMETRIE..... | 157 |
| 6 - GEODESIE PLANETAIRE | |
| 6.1. CHAMP DE GRAVITE PLANETAIRE | 167 |
| 6.2. THERMOSPHERE PLANETAIRE | 169 |
| 6.3. MISSION ROSETTA..... | 171 |
| 7 - PHYSIQUE FONDAMENTALE | |
| 7.1. TEST DU PRINCIPE D'EQUIVALENCE..... | 175 |
| 7.2. TRANSFERT DE TEMPS PAR LIEN LASER..... | 183 |
| 8 - SERVICES SCIENTIFIQUES ET DIFFUSION DE L'INFORMATION | |
| 8.1. SERVICES SCIENTIFIQUES NATIONAUX | 191 |
| 8.2. SERVICES SCIENTIFIQUES INTERNATIONAUX+BGI | 199 |
| 8.3. OUTILS EN LIGNE | 209 |
| 9 - PROJETS - p. 213 | |
| 10 - BIBLIOGRAPHIE - p. 219 | |
| 11. EVENEMENTS ET FORMATIONS GRGS | |
| 11.1. ENSEIGNEMENTS..... | 275 |
| 11.2. ATELIERS | 277 |
| 11.3. ECOLES D'ETE | 279 |
| 12 - ANNEXE - | |
| 12.1. PERSONNEL GRGS 2016 : LISTE ET COORDONNEES PAR EQUIPE..... | 283 |
| 12.2. PERSONNEL GRGS 2016 : LISTE ET STATUT PAR ORGANISME | 289 |

LISTE DES REDACTEURS/COORDINATEURS

Chapitres

Rédacteurs

Avant Propos

G. Ramillien

A - DONNÉES ADMINISTRATIVES

A.Patu

B - EXPÉRIENCES ET TRAVAUX

1. OBSERVATOIRES GÉODÉSIQUES

1.1. Observatoire de la Côte d'Azur

A. Fienga, C. Courde

1.2. Observatoire de Tahiti

J.-P. Barriot

1.3. Systèmes d'observations marégraphiques

N. Pouvreau

2. MÉCANIQUE ORBITALE ET CHAMP DE GRAVITÉ DE LA TERRE

2.1. Mécanique orbitale

F. Deleflie, J.C. Marty

2.2. Champ de gravité de la Terre

2.2.1. Missions spatiales

J.M. Lemoine, G. Ramillien

2.2.2. Gravimétrie/méthodologie ou technologie

S. Bonvalot, M.F.Lalancette

3. SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE ET ROTATION DE LA TERRE

3.1. Système céleste (ICRS)

S. Lambert, J. Souchay

3.2. Rotation de la Terre

Ch. Bizouard

3.3. Repère international de référence terrestre (ITRF)

Z. Altamimi

3.4. Centre de Combinaison

J.-Y. Richard, Ch. Bizouard

4. TRAITEMENT DES DONNÉES GÉODÉSIQUES

4.1. DORIS

J.-M. Lemoine

4.2. Télémétrie laser-satellites

F. Reinquin, F. Deleflie

4.3. Télémétrie laser-lune

S. Bouquillon, A. Fienga

4.4. GNSS

F. Perosanz

4.5. InSAR

L. Morel, J. Nicolas

4.6. VLBI

S. Lambert, R. Biancale

4.7. Surcharges

J.-P. Boy

4.8. Propagation

P. Gegout

4.9. Evolution logiciel GINS

J.-C. Marty, J. Laurent-Varin

5. OCÉANS, HYDROLOGIE GLOBALE

5.1. Altimétrie spatiale

5.1.1. Variations du niveau des océans

5.1.2. Etalonnages

5.2. Phénomènes côtiers

5.3. Réflectométrie

B. Meyssignac

P. Bonnefond

G. Jan

F. Frappart, L.Lestarquit

6. GÉODÉSIE PLANÉTAIRE

6.1. Champ de gravité planétaire

6.2. Thermosphère planétaire

6.3. Mission ROSETTA

J.-C. Marty

S. Bruinsma

J. Laurent-Varin, V. Lainey

7. PHYSIQUE FONDAMENTALE, ÉTUDE DE L'UNIVERS

7.1. Test du principe d'équivalence

7.2. Transfert de temps par lien laser

G. Métris

E. Samain, P. Exertier

8. SERVICES SCIENTIFIQUES ET DIFFUSION DE L'INFORMATION

8.1. Services scientifiques nationaux

8.2. Services scientifiques internationaux

8.3. Outils en ligne

V. Donato

C. Bizouard, S.Bonvalot

F. Deleflie, A. Patu

9. PROJETS

R. Biancale, I. Panet

A - DONNEES ADMINISTRATIVES

1. Organismes membres et structure (en 2016)

| | |
|---|------|
| Bureau des longitudes : | Bdl |
| Centre National d'Etudes Spatiales : | CNES |
| Observatoire de Paris : | OP |
| Institut National de l'Information Géographique et Forestière : | IGN |
| Institut National des Sciences de l'Univers : | INSU |
| Observatoire de la Côte d'Azur : | OCA |
| Service Hydrographique et Océanographique de la Marine : | SHOM |
| Observatoire Midi-Pyrénées : | OMP |
| Université de Polynésie Française : | UPF |
| Conservatoire National des Arts et Métiers : | CNAM |
| Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre | EOST |

1.1. Comité Directeur

Membres des organismes

| | |
|----------------------|-------------------------------------|
| M.C. BOUCHER | : Président, Bdl |
| M. J.-Y. LE GALL | : Président Directeur Général, CNES |
| M. C. CATALA | : Président, OP |
| M. D. BURSEAUX | : Directeur Général, IGN |
| Mme P. ROY-DELECLUSE | : Directeur, INSU |
| M.T. LANZ | : Directeur, OCA |
| M. B. FRACHON | : Directeur, SHOM |
| M. P. SOLER | : Directeur, OMP |
| M. E. CONTE | : Président de l'UPF |
| M. O. FARON | : Administrateur Général, CNAM |
| M. F. MASSON | : Directeur de l'EOST |

Membres de droit

| | |
|--------------|------------------------------|
| R. BIANCALE | : Directeur Exécutif, GRGS |
| G. RAMILLIEN | : Président du Conseil, GRGS |

1.2. Bureau Exécutif

Directeur Exécutif

R. BIANCALE

Président du Conseil

M. G. RAMILLIEN

GRGS/CNES

M. Ph. MAISONGRANDE

GRGS/OP

M. S. LAMBERT

GRGS/IGN

M. D. COULOT

GRGS/OCA

M. P. EXERTIER

GRGS/SHOM

Mme G. JAN

GRGS/OMP

M. M. GREGOIRE

GRGS/UPF

M. J.P. BARRIOT

GRGS/CNAM

Mme J. NICOLAS-DUROY

GRGS/EOST

M. Y. REGISTER

1.3. Conseil

Président G. RAMILLIEN

Membres des organismes

| | |
|------|----------------------|
| Bdl | M. C. BOUCHER |
| CNES | Mme M. MANDEA |
| | M. S. BRUINSMA |
| | M. B. MEYSSIGNAC |
| OP | M. Ch. BIZOUARD |
| | M. F. DELEFLIE |
| IGN | M. Z. ALTAMIMI |
| INSU | M. E. HUMLER |
| OCA | C. COURDE |
| SHOM | Mme M.F. LALANCETTE |
| | Mme G. JAN |
| OMP | M. G. RAMILLIEN |
| | M. S. BONVALOT |
| UPF | M. J.P. BARRIOT |
| CNAM | Mme J. NICOLAS-DUROY |
| EOST | M. J.P. BOY |

Membre de droit

Directeur Exécutif M. R. BIANCALE

Membres extérieurs

| | |
|--------------------|--------------------------|
| M. P. BRIOLE | ENS |
| M. P. CHARLOT | Observatoire de Bordeaux |
| Mme A. WALPERSDORF | ISTerre |

1.4. Comité WEB

| | |
|--------|-------------------|
| OP : | M. C. BIZOUARD |
| | Mme A. PATU |
| IGN : | M. A. POLLET |
| OCA : | M. P. EXERTIER |
| OMP : | Mme A. BRIAIS |
| SHOM : | M. D. ROUXEL |
| UPF : | M. J.P. BARRIOT |
| CNAM : | M. F. DURAND |
| Bdl : | Mme P. CARPENTIER |

1.5. Secrétariat et Gestion

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| Secrétariat : | Mme A. PATU (OP) (depuis juin 2016) |
| | Mme N. LESTIEU (OMP) |
| Gestion : | Mme E. SOULIE (OMP) |

1.6. Groupe d'Évaluation Scientifique

Le Groupe d'Evaluation Scientifique (GES) de la mandature 2012-2016 est constitué par

| | |
|------------------|---------------------|
| M. DIAMENT | (IPGP) |
| M. J. BENVENISTE | (ESA) |
| M.F. LEMOINE | (NASA) |
| M. G. TOBIE | (UNIV. NANTES) |
| M. O. DE VIRON | (UNIV. LA ROCHELLE) |

2. Budget et personnel (en 2016)

2.1. Budget

Chaque organisme subvient au fonctionnement de ses équipes fédérées dans le GRGS. En outre, le CNES met annuellement en place des crédits « laboratoire » dans le cadre d'une convention passée avec l'INSU-CNRS à destination d'équipes GRGS à travers les appels d'offre thématiques des groupes TOSCA ou CERES. Ces crédits relatifs aux années 2012-2016 se décomposent selon le tableau ci-dessous (en kilo Euros et crédits HT).

| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Matériel | 75,0 k€ | 56,5 k€ | 6,5 k€ | 7,0 k€ | 9,7 k€ |
| Etudes | 54,6 k€ | 20,6 k€ | 18,8 k€ | 9,8 k€ | 4,0 k€ |
| Vacations | 45,5 k€ | 32,6 k€ | 30,7 k€ | 33,1 k€ | 31,2 k€ |
| Missions | 147,5 k€ | 179,6 k€ | 146,6 k€ | 126,2 k€ | 115,7 k€ |
| Total : | 322,6 k€ | 289,3 k€ | 202,6 k€ | 176,1 k€ | 160,6 k€ |

2.2. Personnel (en 2016)

La liste est mise à jour annuellement par le Bureau Exécutif en étroite coordination avec les représentants des équipes au sein de ce bureau.

Le personnel participant au GRGS, à temps complet ou partiel, comprend plus d'une centaine de personnes. Le tableau ci-après détaille la répartition par organisme et qualification (voir en Annexe la liste et les coordonnées du personnel GRGS par équipe au 31/12/2016).

| Organisme | CNES | IGN | OP | OCA | SHOM | OMP ¹ | UPF | ESGT | Total |
|--------------------------|------|-----|----|-----|------|------------------|-----|------|-------|
| Qualification | | | | | | | | | |
| Chercheurs | 14 | 12 | 19 | 5 | 4 | 12 | 2 | 6 | 74 |
| Ingénieurs, Tech. | 3 | 4 | 11 | 11 | 11 | 0 | 3 | 1 | 44 |
| Administratifs | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| Thésards/Post doc | 1 | 3 | 5 | 3 | 0 | 3 | 0 | 2 | 17 |
| Total | 20 | 20 | 37 | 19 | 15 | 15 | 5 | 9 | 140 |

Répartition du personnel GRGS par organisme et qualification en 2016

B - EXPERIENCES ET TRAVAUX

1 - OBSERVATOIRES GÉODÉSIQUES

- 1.1. Observatoire de la Côte d'Azur
- 1.2. Observatoire de Tahiti
- 1.3. Systèmes d'observations marégraphiques

1.1. Observatoire de la Côte d'Azur

Introduction

L'observatoire géodésique multi-techniques du plateau de Calern (OCA) est aujourd'hui prépondérant pour l'Observation de la Terre (et de son environnement) sur le long terme. Il contribue de façon très importante à la collecte de mesures spatiales et de mesures in situ. A titre d'exemple, 54% des données mondiales de la télémétrie laser sur la Lune proviennent de la station laser du site du plateau de Calern (OCA).

Le développement de ce site se justifie par deux facteurs principaux :

- le fait que l'observation géodésique-géophysique est le fondement sur lequel s'édifie la connaissance de la Terre et du système Terre-Lune, et revêt une importance nouvelle et capitale en raison des menaces qui pèsent sur l'environnement planétaire,
- l'intervention de deux évolutions majeures : le progrès extrêmement rapide des technologies de l'information et de la communication et la disponibilité d'outils spatiaux.

L'observatoire géodésique fondamental relève de la même exigence de pérennité que les observatoires astronomiques ou géophysiques pour assurer les observations. L'effort entrepris à l'Observatoire de la Côte d'Azur au plateau de Calern, avec son extension en Corse pour l'étalonnage des données altimétriques en est un bon exemple. Le programme de recherche associé est le suivant :

- Physique Fondamentale avec les tirs vers la LUNE, Lageos,
- Géophysique planétaire et étude de la structure interne de la LUNE,
- Systèmes de Référence et Géodynamique (suivi des variations temporelles du positionnement),
- Métrologie Temps fréquence (T2L2/Jason-2),
- Etalonnages instrumentaux en altimétrie radar,
- Recherches & Développements sur les liens optiques,
- Optique adaptative en émission et réception pour la télémétrie dans le système solaire et sur la Lune.

La télémétrie laser est une technologie d'avenir en constante évolution et nécessite donc des investissements à long terme ainsi qu'une garantie de pérennité dans les financements récurrents.

Le site géodésique et métrologique du plateau de Calern

Le site géodésique et métrologique du plateau de Calern constitue un lieu unique en France permettant d'allier observations géodésiques et développement instrumental en métrologie des liens laser et optique. L'ensemble de ces activités est centré autour de la station de télémétrie laser fixe MéO. Le site regroupe un ensemble d'instruments et de moyens décrits ci-dessous :

- Le télescope MeO de 154cm, station fixe de télémétrie laser, d'astrométrie et de transfert de temps,
- Un laboratoire Temps/Fréquence constitué d'horloges (Césium, et Maser-hydrogène (modèle TS-4) et de moyens de comparaisons d'échelles de temps (antenne Two-Way TWSTFT, récepteur GPS DICOMM GTR50, 3 dateurs ultra-stables STX, un micro-phase stepper),
- Deux récepteurs GNSS permanents opérés par l'IGN et le CNES (station GRAS, GRAC),
- Une antenne DORIS re-installée par le CNES en 2008 (et reliée, pour le projet T2L2, au Maser-H qui alimente les stations laser depuis mai 2010),
- Des équipements géophysiques disséminés sur le site de Calern : pour la sismicité, l'inclinométrie (hydro-géologie du sous-sol), des campagnes de gravimétrie absolue et de rattachement topographiques (collaboration avec l'IGN) via un réseau de piliers géodésiques construits autour du bâtiment laser,
- La station CATS en collaboration avec le laboratoire Lagrange, constituée de deux instruments (GDIMM & PBL) pour la caractérisation de la turbulence atmosphérique du site,
- Un ensemble de laboratoires pour le développement instrumental (pièce de la station mobile avec une table élévatrice permettant diverses expérimentations en extérieur, laboratoire focal de la station MéO pour l'installation par exemple d'un banc d'optique adaptative en coappartenance avec l'ONERA).

Développements effectués sur la période 2012-2017

Evolutions des moyens instrumentaux

- La station laser FTLRS

La station laser mobile FTLRS a permis la réalisation de plusieurs campagnes de transfert de temps dans le cadre du projet T2L2. Néanmoins, face aux coûts de maintenance et à l'obsolescence de certains sous-systèmes, il a été décidé en 2014 d'arrêter l'exploitation de cet instrument.

- La station CATS

Les effets de l'atmosphère sont au centre des préoccupations actuelles concernant les liens laser et optique. En collaboration avec le laboratoire Lagrange, une station de caractérisation de la turbulence atmosphérique nommée CATS et constituée des deux instruments a été installée à proximité de la station de télémétrie laser MéO. Cette station vient répondre à des besoins réels en soutien à d'autres projets qui donneront une dynamique supplémentaire à l'Observatoire de Calern. Il s'agit principalement de l'amélioration du bilan des liaisons de la Télémétrie Laser et en général des liens optiques en espace libre (Télécom. Optique). Il s'agit

également de soutenir des projets pour équiper les télescopes MéO et C2PU de systèmes d'Optique Adaptative.

La station CATS est dotée d'un ensemble d'instruments complémentaires pour la mesure continue des paramètres caractéristiques de la turbulence atmosphérique. Ces instruments de nouvelle génération sont autonomes et relèvent de techniques originales permettant de mesurer la turbulence optique depuis les premiers mètres au-dessus du sol jusqu'aux confins de l'atmosphère. Il s'agit du profileur PBL qui permet de mesurer les distributions verticales de la turbulence nocturne et diurne au moyen des bords lunaire et solaire. Un moniteur des paramètres de cohérence du front d'onde au sol baptisé G-DIMM pour « Generalized DIMM », permet en mode automatique de fournir des estimations du seeing, de l'échelle externe, du temps de cohérence et de l'angle isoplanétique. Afin de s'affranchir de la couche de surface, l'instrument G-DIMM est installé sur une plateforme à 4m du sol.

- La station laser MéO

Téléométrie laser opérationnelle & téléométrie laser Lune en infrarouge

Pour améliorer le caractère opérationnel de la station de téléométrie laser MéO, un important travail a été réalisé sur la fiabilisation du laser. Cela a conduit à changer le système de blocage de modes et à travailler sur l'ensemble des points résultant de lentilles thermiques. L'ensemble de ces travaux a fait l'objet d'une publication.

Suite à ces travaux, nous avons acquis une photodiode simple-photon infra-rouge. Au cours de l'année 2015, nous avons exploité la station MéO en IR pour les observations LLR et nous nous sommes concentrés sur les bilans de liaison en vert et en IR. Comme nous l'avions envisagé, l'infrarouge permet d'améliorer sensiblement le bilan de liaison sur l'ensemble des réflecteurs lunaires. Les observations à la nouvelle et à la pleine Lune sont maintenant possibles comme les observations en pleine journée. Si la diminution du nombre de points normaux à la nouvelle Lune et à la pleine Lune est encore visible, nous avons malgré tout maintenant des observations à toutes les phases en IR. En vert, la distribution des points normaux sur les différents réflecteurs est très inhomogène : 60 % des points normaux sont obtenus sur A15. Cette situation n'est pas particulière à MéO mais partagée par les autres stations. Cette prédominance de données sur A15 n'est pas idéale pour la mesure de la libration. L'IR permet au contraire d'obtenir une meilleure homogénéité des cibles suivies (voir Figure 1.). Cette nouvelle répartition spatiale plus homogène des données a déjà donné des informations supplémentaires sur l'état physique du noyau fluide de la Lune, en particulier son aplatissement (Viswanathan et al. 2016) et d'autres caractéristiques de la structure plus profonde de la Lune sont en cours de publication.

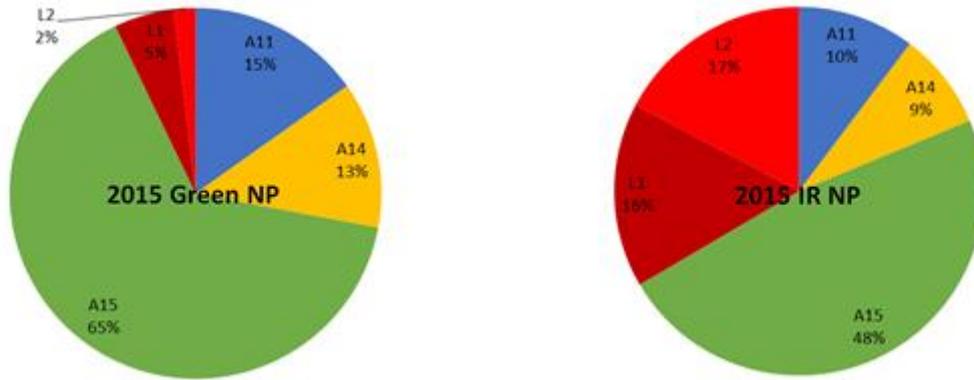


Fig 1. Répartition des points normaux par réflecteurs pour l'année 2015 en vert à gauche et en IR à droite

L'IR a permis d'augmenter le nombre de réflecteurs suivis au cours de la même nuit d'observation. Un résultat surprenant a été obtenu sur le réflecteur Lunokhod2 en IR. En effet, d'après les résultats publiés par la station APOLLO avec un lien laser vert, les réflecteurs lunaires ont des performances qui se dégradent au cours du temps. Et Lunokhod2 souffre d'une dégradation de performances encore plus anormale que son homologue Lunokhod1. Ces dégradations ne sont pas expliquées pour le moment mais des suppositions sont faites sur l'impact de l'environnement lunaire (poussière, radiations, etc). Or en IR, les performances obtenues correspondent bien à la théorie (Courde et al. 2017). La question du désaccord avec un lien laser vert reste donc entière. Tous ces résultats font l'objet de publications et d'un travail de thèse.

Instrumentation sol pour le transfert et le suivi des signaux d'horloge

Dans le cadre du projet T2L2, de nombreux développements instrumentaux ont été réalisés pour la caractérisation et le suivi des signaux d'horloge exploités par les stations laser. L'Observatoire de la Côte d'Azur a ainsi développé des instruments de suivi (STS), des dateurs ultra-stables (STX) et des moyens d'étalonnage de station laser.

Les télécoms optiques

L'Observatoire de la Côte d'Azur a mené avec succès une collaboration entre le CNES, l'ONERA, Airbus et Thales pour la réalisation d'expériences de télécommunications optiques. Dans le cadre de ce projet, la station MéO s'est vue dotée d'une lunette en parallèle du télescope pour la réalisation de liens optiques montant mais aussi de laser de puissances de plusieurs dizaines de watts.

L'optique adaptative

L'ONERA s'est associé à l'équipe pour implanter une optique adaptative dénommée « ODISSEE » au foyer coudé du télescope Méo. Le projet a plusieurs objectifs :

- réaliser de l'imagerie satellitaire pour analyse de panne, détermination d'attitude, et analyse des étapes de déploiement et réaliser de l'imagerie de débris spatiaux,

notamment pour permettre l'identification des objets, la détermination de leur forme et mesurer leur trajectoire.

- améliorer les conditions d'observation en télémétrie laser par amélioration du lien retour et donc amélioration du rapport signal sur bruit ; cette capacité est particulièrement importante pour les observations bruitées comme par exemple sur la Lune.

Campagnes de mesure

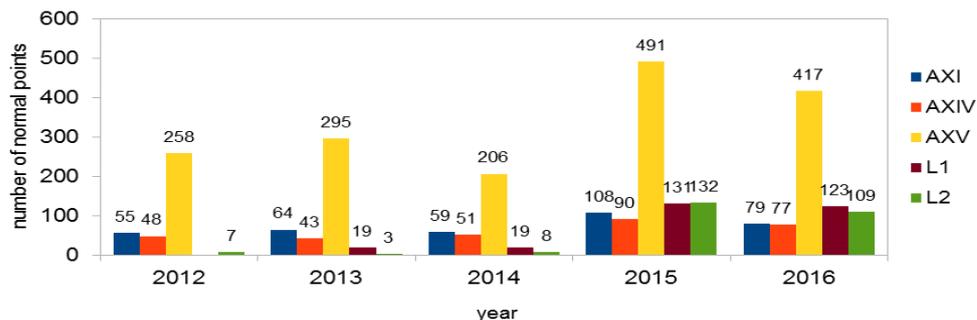
Le service d'observations laser

Les observations laser réalisées avec la station MéO sont après filtrage directement envoyées à la communauté internationale via le réseau ILRS. A titre d'exemple, au cours de l'année 2016, la station MéO a contribué aux observations sur satellites de la manière suivante :

| Cible | Nombre de passages | Nombre de points normaux |
|-------------|--------------------|--------------------------|
| Jason 2 | 538 | 21947 |
| Galileo 201 | 223 | 1067 |
| Lageos 1 | 72 | 685 |
| Lageos 2 | 53 | 560 |
| Radioastron | 27 | 955 |

En télémétrie laser Lune, la station MéO contribue à plus de la moitié des données mondiales produites. Sur la période 2012-2016, la contribution de l'OCA est la suivante :

Normal points per reflector



Le projet T2L2

Trois campagnes de mesure ont été réalisées sur la période 2012-2017. Une première campagne en 2012-2013 a permis de travailler sur le transfert de temps en vue commune avec les stations laser MéO et FTLRS. Cette campagne a permis de valider les développements instrumentaux sur les étalonnages et la métrologie temps/fréquence des stations laser. Une deuxième campagne en 2013 a consisté à comparer les techniques de transfert de temps GPS et laser en vue commune à l'échelle européenne en collaboration avec les stations anglaises et allemandes et nos collègues de l'Observatoire de Paris. Enfin, une troisième campagne en 2016 avait pour objectif d'effectuer les mêmes comparaisons mais cette fois-ci en vue non-commune. Cette dernière campagne a impliqué deux stations laser chinoises et la station anglaise.

Les télécoms optiques

Plusieurs campagnes de mesures ont eu lieu sur deux instruments spatiaux :

- Le satellite SOTA, en collaboration avec le NICT
- L'instrument OPAL embarqué sur l'ISS, en collaboration avec la NASA

Prospective à moyen terme

Station NG

Un projet de station de télémétrie Laser Ultra mobile de nouvelle génération couplée au développement d'un système pour équiper l'observatoire géodésique de Tahiti est en cours d'élaboration. Une phase 0 CNES démarre en 2017 sur ce sujet et l'Observatoire de la Côte d'Azur est impliqué dans la réalisation d'un instrument de la classe des 500 mm sur le site de Calern (projet UniversCity).

L'atmosphère

L'impact de l'atmosphère sur les liens optique et radiofréquence est majeur. Sa méconnaissance limite l'exactitude des techniques spatiales. La turbulence atmosphérique a aussi pour effet de réduire la portée des signaux, de dégrader la précision et de limiter les cadences de mesures. Les travaux menés dans ce cadre auront pour objectif de caractériser l'impact et les limitations générés par l'atmosphère (CATS) mais aussi de mettre en œuvre les techniques appropriées à leurs compensations (technique à deux longueurs d'onde, optique adaptative).

L'Observatoire géodésique multi-techniques

L'avenir de la géodésie spatiale réside dans la combinaison de données issues de différents instruments regroupés sur un même site (Observatoire Géodésique Fondamental OGF) ou sur un même satellite (projets spatiaux GRASP, eGRASP). Notre ambition est de structurer des données issues des instruments de l'Observatoire multi-techniques de Calern, de travailler à leurs rattachements et d'offrir à la communauté une visibilité de l'ensemble des observations menées. En outre, nous développons aussi l'Observatoire de Senetosa en Corse,

qui est relié aux missions spatiales d'océanographie depuis 1998, avec marégraphes, GNSS, campagnes de rattachement, et d'établissement du géoïde marin local.

Participants au projet

| | |
|----------------------------------|----------------|
| Mourad Aimar | OCA |
| Dominique Albanese | OCA |
| Pierre Exertier | OCA |
| Ha Phung-Dyu | OCA –CDD/CNRS |
| Myrtille Laas-Bourez | OCA |
| Olivier Laurain | OCA |
| Nicolas Maurice | OCA |
| Hervé Mariey | OCA |
| Grégoire Martinot-Lagarde | OCA |
| Anthony Mémin | OCA |
| Etienne Samain | OCA |
| Jean-Marie Torre | OCA |
| Hervé Viot | OCA |
| Vishnu Viswanathan | OCA, Doctorant |

1.2. Observatoire de Tahiti

L'OBSERVATOIRE GEODESIQUE DE TAHITI



Figure 1 : L'observatoire Géodésique de Tahiti, à Punaauia, avec sa station laser SLR (au fond, télescope ouvert) et les antennes GNSS, DORIS (en forme de cierge) et Beidou (conique) sur le toit du bâtiment à droite).

Tahiti est devenu en 1997 un site de référence géodésique fondamentale pour la poursuite des satellites d'étude de la Terre à des fins océanographiques, géodynamiques et géophysiques grâce à l'installation d'une station de poursuite de satellites par laser MOBLAS-8 de la NASA du réseau ILRS (Figures 1, 2 et 3) sur le campus de l'Université de la Polynésie française (UPF) à Outumaoro (commune de Punaauia, près de la capitale Papeete). Il a actuellement une structure de FED (Fédération de Recherche) pour le MENRT et est site instrumenté de l'INSU depuis 2015. Il a été audité par l'HCERES en 2016, qui a reconnu la qualité technique de l'équipe en place et recommandé la poursuite des opérations dans un cadre élargi au CNRS (structure éventuelle d'UMS).

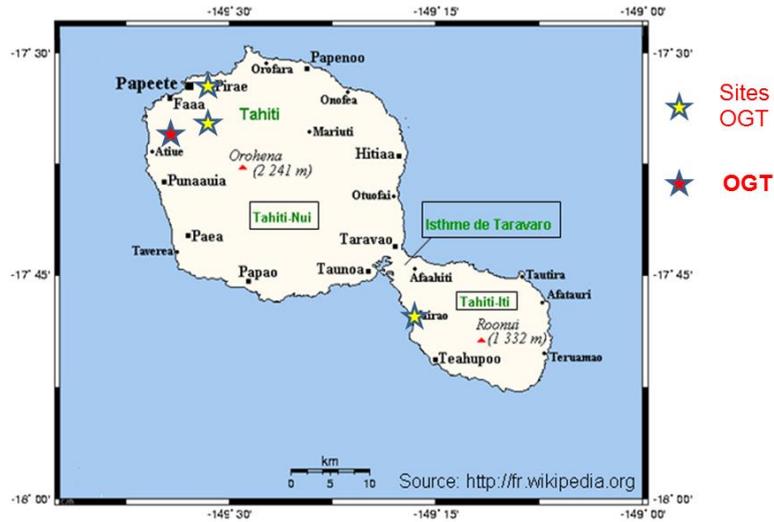


Figure 2 : Localisation de la station laser et du site principal de l'Observatoire Géodésique de Tahiti (étoile rouge, latitude $17^{\circ} 34' 36.84''$ S, longitude $210^{\circ} 23' 37.32''$ W, altitude 92 m) sur le campus de l'Université à Outumaoro. Les étoiles jaunes correspondent à des sites occupés par l'OGT (GPS permanent sur Pirae, marégraphe/GPS de Vairao, gravimètre GPhone sur Pamatai-Faaa).



Figure 3 : La station laser SLR de l'Observatoire Géodésique de Tahiti, opérant de nuit sur un satellite altimétrique.

Cette station, fondée en 1997 avec l'aide du CNES et de l'INSU et le support du GRGS, s'insère dans le réseau des stations géodésiques fondamentales, et a contribué à toutes les réalisations de l'ITRF. Son directeur actuel depuis 2006 est le professeur Jean-Pierre Barriot, ingénieur au CNES de 1989 à 2006. Elle est située sur le campus d'Outumaoro de l'Université de la Polynésie française (UPF), en banlieue de Papeete (Fig. 2). Son cœur est la station laser SLR MOBLAS-8 de la NASA. La station laser a pu bénéficier de diverses cures de jouvence récentes (2011-2015), grâce à l'intérêt renouvelé de la NASA pour les observations laser, par la mise à niveau d'une grande partie de l'électronique d'acquisition, du support du télescope, des visites techniques plus fréquentes et au soutien à ce jour sans faille du CNES pour la logistique annexe (changement total du système de climatisation, dalle pour la

station laser mobile française, mise aux normes des armoires électriques). Elle est actuellement, malgré son âge (une trentaine d'années), en parfait état de fonctionnement. Elle s'est enrichie au fil des ans de divers équipements annexes, dont une station permanente DORIS, diverses stations GPS permanentes dont une de la NGA américaine, et depuis 2006 d'un réseau de stations marégraphiques (cinq stations de qualité géodésique) et un gravimètre gPhone en 2007 sur financement UPF et CNES. A noter que nous hébergeons depuis 2011 une station GPS permanente du DLR et depuis 2009 deux stations GPS permanentes fournies gracieusement par la société TRIMBLE. Une station Beidou chinoise (Observatoire de Shanghai) est venue enrichir le parc en 2015, et nous avons mis en service cette année aussi une station GNSS spécialisée pour le suivi du satellite américano-taiwanais COSMIC-2 de sondage radiofréquence de l'atmosphère, en collaboration avec l'UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) (voir Figure 2 pour les sites OGT sur Tahiti Nui et Tahiti Iti).

En tout l'OGT fournit des données à cinq services internationaux relevant de l'IAG :

- ILRS (International Laser Ranging Service),
- IGS (International GNSS Service),
- IDS (International DORIS Service),
- PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level),
- IGETS (International Geodynamics and Earth Tides Service).

L'OGT a organisé en 2013, en collaboration avec le Service de l'Urbanisme de la Polynésie française, un levé couplé gravimétrie de surface / GPS, avec un gravimètre du parc INSU, et un levé gravimétrique aérien conjoint avec l'Université de Hsinchu (Taiwan). L'ensemble de ces mesures nous a permis de dériver un modèle de géoïde de Tahiti / Moorea (Figure 4). Il a aussi épaulé la mise en place, au sein du laboratoire GEPASUD, d'un observatoire hydrologique (bassin versant de la Titaaviri près de la presqu'île Tahiti Iti) à travers l'expertise acquise en marégraphie. La Table 1 résume l'ensemble des équipements qui ont opéré et opèrent actuellement sous la houlette de l'OGT (19 instruments actifs au jour de la rédaction de ces lignes).

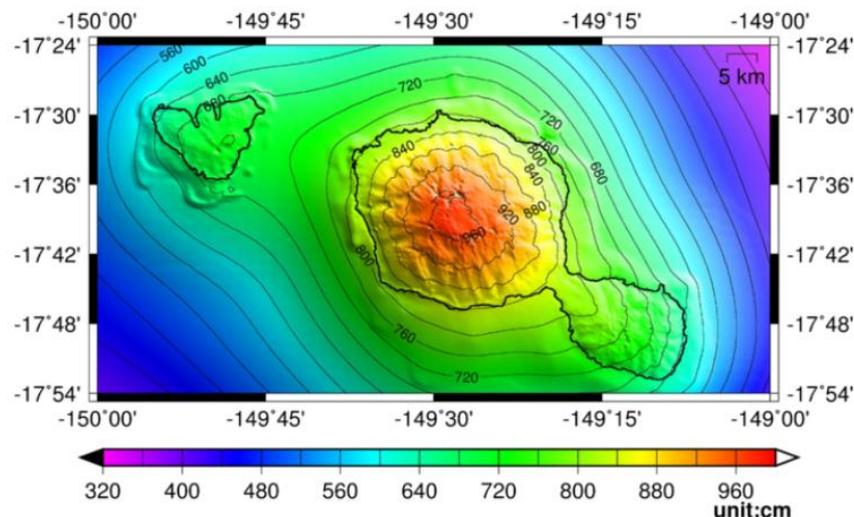


Figure 4 : Modèle de géoïde de Tahiti, publié dans EPSL, 2015.

| Instrument | Localisation | Ile/archipel | Observations | Institution | Contribution au Fonctionnement |
|-----------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Station laser | Outumaoro | Tahiti Nui | 1997- | NASA | Oui-CNES |
| GPS permanent | Outumaoro | Tahiti Nui | 2000- | NGA | Oui-NGA |
| GPS permanent | Outumaoro | Tahiti Nui | 2000- | CNES | A partir de 2014 |
| ARGOS | Outumaoro | Tahiti Nui | 1998- | CNES | Non |
| PRARE | Outumaoro | Tahiti Nui | 1998-2004 | DLR | |
| DORIS | Outumaoro | Tahiti Nui | 2000- | CNES | A partir de 2014 |
| GPS (CONGO) | Outumaoro | Tahiti Nui | 2011- | DLR | Non |
| CIMEL | Outumaoro | Tahiti Nui | 2002-2011 | AERONET | |
| GPS permanent | Outumaoro | Tahiti Nui | 2009- | TRIMBLE | Non/Appareil offert TRIMBLE |
| GPS permanent | IRD Arue | Tahiti Nui | 2009- | TRIMBLE | Non/Appareil offert TRIMBLE |
| Beidou | Outumaoro | Tahiti Nui | 2015- | SHAO | Oui / missions |
| Cosmic-2 | Outumaoro | Tahiti Nui | 2016- | UCAR | En cours de négociation |
| gPhone (gravimetre) | Pamatai (CEA) | Tahiti Nui | 2007- | UPF-CNES | Oui-UPF |
| Marégraphe/GPS | Tubuai | Australes | 2007- | UPF | Partiel-DégéOM-PF |
| Marégraphe/GPS | Rangiroa | Tuamotu | 2008- | UPF | Partiel-DégéOM-PF |
| Marégraphe/GPS | Vairao | Tahiti Iti | 2010- | UPF | Partiel- DégéOM-PF |
| Marégraphe/GPS | Papeete | Tahiti Nui | 1990- | Marégraphe USA, GPS CNES | Partiel- DégéOM-PF |
| Marégraphe/GPS | Nuku-Hiva | Marquises | 1990- | Marégraphe USA, GPS UPF | Partiel- DégéOM-PF |
| Marégraphe/GPS | Rikitea | Gambier | 2011- | UPF | Partiel- DégéOM-PF |
| Marégraphe/GPS | Makemo | Tuamotu | 2013- | UPF | Partiel- DégéOM-PF |
| Marégraphe | Huahine | Iles-sous-le-vent | 2011- | UPF | Partiel- DégéOM-PF |
| Marégraphe | Moorea | Iles-du-vent | 2012- | UPF | Oui- UPF |

Table 1 : Ensemble des instruments scientifiques (19 actifs) déployés par l'OGT. En noir gras les instruments relevant de l'observatoire géodésique fondamental, en bleu gras les marégraphes géodésiques). En grisé les instruments retirés. DégéOM : Délégation Générale à l'Outre-Mer, PF : Gouvernement de la Polynésie française. En colonne 6, les contributions financières reçues pour les instruments.

L'OGT, outre son caractère d'observatoire géodésique fondamental, pilote un réseau de marégraphes, dont cinq marégraphes à caractère géodésique qu'il a déployés récemment en Polynésie française, sur les îles de Tubuai (2007), Rangiroa (2008), Tahiti Iti (2010), Mangareva (2011) et Makemo (2013), et qui répondent aux objectifs de densification et de « vérité terrain » pour l'altimétrie océanique et la surveillance locale du niveau des mers dans une zone équivalente en surface à l'Europe et non couverte avant 2006 pour cet objectif (Fig. 5). Ils viennent aussi épauler dans cette zone les marégraphes dédiés uniquement à l'observation des tsunamis (i.e. qui n'ont pas de positionnement vertical ultra-précis par GPS).

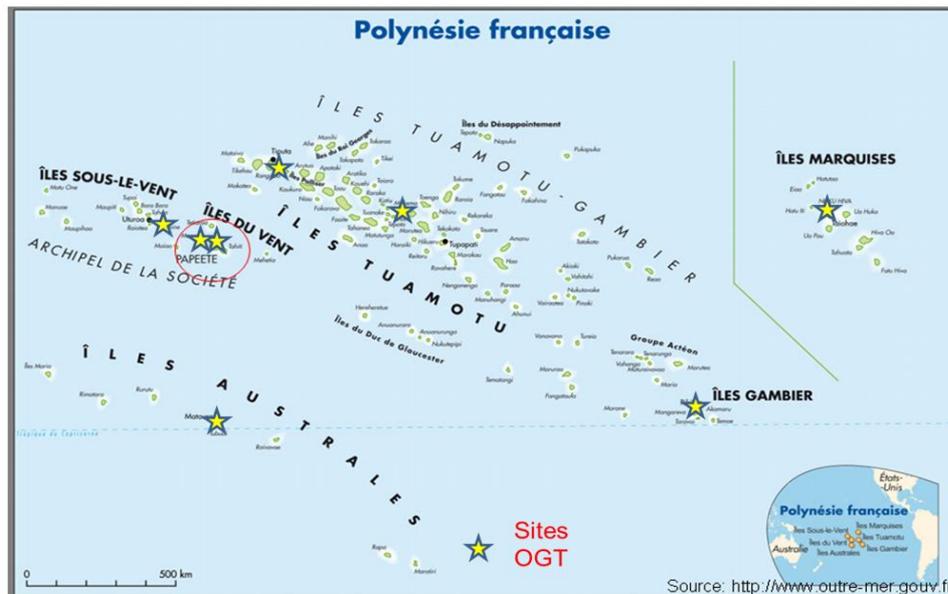


Figure 5 : Répartition (étoiles jaunes) en Polynésie française des sites marégraphiques gérés par l'OGT. Rappel : il faut environ 5 heures de vol pour aller de Papeete aux îles Gambier en ATR-72.

De 2007 à 2015 le Centre International des Marées Terrestres (ICET) a eu son siège à l'Université de Polynésie Française, en réponse à un appel d'offre de l'IAIG. L'OGT est maintenant « Data Center » de l'IGETS, qui a succédé à l'ICET lors de l'UGGI 2015, avec essentiellement les mêmes attributions qu'au cours de la période précédente. Les marées terrestres étudient les variations de la pesanteur, les inclinaisons de la verticale et les déformations du globe terrestre liées aux forces de marée luni-solaires. Ces effets sont de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-7}g$, 250 nrad ou 80 cm de déplacement radial.

On peut résumer le cahier des charges du DataCenter OGT de l'IGETS comme suit :

- Le Centre est chargé d'archiver, évaluer et analyser un maximum de données de marées terrestres. Le but est de calculer un nombre limité de paramètres synthétisant toute l'information géophysique.
- Le Centre est chargé de comparer les résultats des différents types d'instrument et des différentes stations à travers le monde et d'évaluer leur précision au niveau des erreurs internes et externes.
- Le Centre est chargé de diffuser l'information concernant les activités dans le domaine des marées terrestres ainsi que la formation aux différentes techniques.

Activités en planétologie Observatoire Géodésique de Tahiti

Au delà de ses activités en observation de la Terre, l'Observatoire Géodésique de Tahiti a maintenu sur les années 2011 à 2016 une activité substantielle en planétologie, à savoir :

- Participation à l'équipe radiosciences de Bepi-Colombo (avec l'université La Sapienza), sur la modélisation des retards troposphériques liés à la présence de la vapeur d'eau par le développement d'une extension 4D des "mapping functions" de type VMF (thèses de Jonathan Serafini avec un article préliminaire dans ICEO Proceedings 2013 et maintenant de Fangzhao Zhang en continuité).
- Participation au dépouillement des données de tomographie radar CONSERT sur la sonde Rosetta (avec le laboratoire de Planétologie de Grenoble) : mise en évidence de la structure homogène de la comète CG67, en application des travaux effectués avant le lancement en 1998-2002. Un papier dans la revue Science a été publié en 2015.
- Participation au dépouillement des données radiosciences RSI de la sonde Rosetta (avec les universités de Cologne et Munich) : mise en évidence de la structure homogène de la comète CG67, en plein accord avec les données CONSERT. Un papier dans la revue Nature a été publié en 2016.
- Mise en place d'une collaboration en radiosciences avec l'université de Wuhan dans le cadre des missions lunaires Chang'E. JP Barriot assure une fonction de Prof. Invité à l'université de Wuhan dans ce cadre depuis 2015. Un papier a été publié dans Adv. Space Research en 2015.
- Développement par l'OGT d'un logiciel d'orbitographie de test pour les routines informatiques en radiosciences : Mini-Pod. L'ensemble des routines de modélisation du champ de gravité en harmoniques sphériques non singulières, en harmoniques ellipsoïdales, et en harmoniques bisphériques non singulières sont en cours de test pour des petits corps et planètes jusqu'au degré 200. Un modèle de champ gravitationnel de CG67 en harmoniques bi-sphériques est en cours de finalisation et un modèle préliminaire a été présenté à l'AGU 2016.

Prospective

L'OGT devrait connaître une évolution majeure d'ici 2020, avec l'arrivée d'une antenne VLBI cofinancée CNES-INSU-NASA sur le site de la Papenoo (côte Est de Tahiti), suivie de la mise en place d'une nouvelle station laser colocalisée avec le VLBI à l'horizon 2022. Le but ultime est le déplacement complet de l'OGT du site actuel du campus d'Outumaoro vers le site de la Papenoo en 2025 (site qui héberge déjà les antennes ESA du système Galileo et qui est géré par le groupe de télécommunications OPT).

L'OGT proposerait alors la palette complète des instruments au sens de GGOS (Global Geodetic Observing System).

Comme il a été dit précédemment, l'OGT a été reconnu comme "site instrumenté" de l'INSU en 2015 et expertisé favorablement par l'HCERES en 2016. Compte-tenu de l'importance qu'a prise le site, ces habits sont devenus trop étroits. Nous allons donc oeuvrer pour que l'OGT soit reconnu comme une Unité Mixte de Service CNRS à part entière, avec à la clef un

financement récurrent CNES-NASA-INSU-UPF, mais aussi avec une ouverture vers des postes CNAP /CNRS. Compte-tenu de la charge de travail, il serait d'ailleurs souhaitable que la fonction de Directeur de l'OGT soit assurée par un physicien, et non par un professeur des universités dont ce n'est pas la vocation primaire (retraite prévue en 2027).

Participants au projet

| | |
|----------------------------|-----|
| Jean-Pierre Barriot | UPF |
| Lydie Sichoix | UPF |
| Yannick Vota | UPF |
| Youri Verschelle | UPF |

1.3. Systèmes d'observations marégraphiques

Introduction

Sur la période 2012-2016, les activités d'observations marégraphiques ont porté principalement sur la montée en puissance du rôle de référent national de l'observation du niveau de la mer mieux connue sous l'acronyme REFMAR en appuyant et conseillant le déploiement et la modernisation de stations mesurant le niveau marin. Grâce à cette synergie entre les producteurs de données et la coordination REFMAR, de nombreux événements extrêmes ont été mesurés et les observations mises à disposition. Un travail sur la valorisation des archives marégraphiques a également été entrepris.

Observations du niveau de la mer

Entre 2012 et 2016, le déploiement et la modernisation d'observatoires du niveau de la mer sur l'ensemble des zones sous juridiction nationale (France, Outre-Mer) se sont poursuivis.

Cette action multi organismes, sur un parc d'instruments dédiés à l'observation in situ de la hauteur d'eau, s'inscrit dans un contexte opérationnel et crée un réseau d'observations et d'informations notamment exploité par les systèmes d'alertes aux tsunamis et de prévention des ondes de tempêtes.

Ce domaine d'application au profit des politiques publiques de la mer et du littoral, qui vient en complément des applications historiques d'hydrographie, est un moteur pour le développement de l'ensemble des réseaux marégraphiques.

Au cours de cette période des sites nouveaux ont été instrumentés :

Aux Antilles : Deshaies (IPGP), Le Robert (CG Martinique), Saint-Martin (Collectivité de Saint-Martin, SHOM).

En Atlantique Nord : Saint-Pierre et Miquelon (Shom).

En Nouvelle-Calédonie : Maré et Thio (DéGéOM, GNC, SHOM).

A Wallis et Futuna : respectivement à Mata Utu et à Leava (DéGéOM, SPP, SHOM).

En Polynésie française : Rikitea et Makemo (UPF, SHOM, CEA).

En métropole : Port-Ferréol et Port-la-Nouvelle (Méditerranée), l'Herbaudière et Mimizan (façade Atlantique), Diélette et Ouistreham (Manche) pour les marégraphes du réseau RONIM géré par le Shom ; instrumentation du fond de baie de l'Aiguillon à l'Aiguillon-sur-Mer et au Pont du Brault par le SHPC VCA.

Initialement dédiés à l'alerte aux tsunamis les marégraphes installés dans l'Océan Pacifique permettent également de mesurer les effets du changement climatique. Leur maintien à long terme est aujourd'hui un vrai enjeu politique et financier.

Dans le cadre du plan interministériel – Plan Submersions Rapides (projet HOMONIM pour Historique Observation Modélisation des Niveaux Marins. Voir paragraphe 4.2 phénomènes côtiers) et pour répondre aux besoins opérationnels des systèmes d'alertes aux tsunamis

(Cenalt, TWC, SATOI, ...) et de prévention des ondes de tempêtes (VVS), le doublement des moyens de transmission en temps réel a été réalisé par le Shom pour les marégraphes composant le réseau RONIM.



Présentation du réseau de marégraphes RONIM géré par le SHOM (manque le marégraphe de Ouistreham)

Activités REFMAR

Le Shom est le référent national pour l'observation du niveau de la mer. A ce titre, il coordonne l'observation, la collecte et la diffusion des mesures de hauteur d'eau. Depuis 2014, les observations du niveau de la mer d'une dizaine de partenaires sont proposées à la visualisation et au téléchargement sur le portail de l'information géographique maritime et littorale de référence data.shom.fr.

Afin de mettre en relation les producteurs de données et les usagers, deux colloques, les Journées REFMAR, ont été organisées à Paris les 17-21 juin 2013 (134 participants et 10 pays

représentés) et 2-4 février 2016 (160 participants et 15 pays représentés). Ces moments privilégiés ont démontré, si besoin était, l'attente importante des différentes communautés de pouvoir travailler sur des observations de qualité afin de répondre aux problématiques actuelles : évolution du niveau moyen des mers, événements extrêmes (ondes de tempêtes, submersion marine, tsunamis), ...

Valorisation des archives scientifiques et reconstruction de séries marégraphiques

L'étude des tendances globales et régionales du niveau de la mer à partir de données altimétriques et marégraphiques montre plus que jamais la nécessité de pouvoir disposer de longues séries marégraphiques. L'importance de la numérisation et de la valorisation des marégrammes papier historiques est portée depuis plusieurs années par le Shom, qui, s'appuyant sur des compétences très spécifiques a soutenu le travail de thèse réalisé au LIENSs par Thomas Gouriou avec l'étude de l'évolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18ème siècle en Charente-Maritime et en 2015 avec la publication d'un rapport d'étude relatif à la reconstruction et au contrôle de la série analogique des hauteurs d'eau observées à Saint-Nazaire depuis 1821. Cette dernière étude synthétise l'ensemble des travaux effectués et des résultats obtenus depuis 3 ans par Yann Ferret.

Cette activité s'inscrit dans le cadre du programme international GLOSS (Global Sea Level Observing System) de la COI de l'UNESCO et du SONEL.

Le Shom dispose dans ses archives de plus de 200 000 documents papiers remontant pour les plus anciens au début du XIXe siècle. Ces documents, d'une grande qualité technique, comportent ainsi plus de 40 000 documents marégraphiques (registres de hauteurs d'eau, marégrammes, informations relatives aux mesures et mesures météorologiques intimement liées). Afin de pérenniser ce patrimoine scientifique irremplaçable, le Shom poursuit comme tâche de fond la poursuite de la dématérialisation de son fond patrimonial afin de le rendre accessible à tous à moyen terme. A ce jour, sur 40 000 documents marégraphiques estimés au Shom, 20 000 ont été inventoriés et 18 000 scannés.

Prospective

Dans les années à venir, la densification des réseaux de marégraphes va se poursuivre comme pour RONIM avec de nouveaux sites comme Audierne et Saint-Quay-Portrieux qui seront équipés via des financements du MEEM/DGPR dans le cadre du projet HOMONIM ou grâce aux collectivités locales comme à Saint-Barthelemy dans les Antilles.

SOERE poursuivra son travail de suivi de l'évolution du niveau moyen des mers mesurées à partir des mesures marégraphiques et améliorera les produits mis à disposition sur www.sonel.org avec les niveaux relatifs et absolus obtenus à l'aide des antennes GNSS colocalisées aux marégraphes. Ce travail s'accompagnera du déploiement de nouvelles antennes afin d'avoir un maximum d'observatoires marégraphiques équipés de stations GNSS.

Cette dynamique sera accompagnée par la coordination REFMAR avec la recherche de nouveaux partenaires afin d’offrir encore plus d’observations du niveau de la mer aux usagers.

Les outils de visualisation et de téléchargement des observations sur data.shom.fr seront étoffés et élargis avec par exemple la possibilité de comparer les mesures de hauteurs, les prédictions de marée officielles et les prévisions océanographiques sur le même graphique.

L’activité de datarescue va également s’amplifier avec l’arrivée au Shom d’un expert en datarescue marégraphique qui va donner l’impulsion nécessaire pour la valorisation de nos archives scientifiques afin de mieux comprendre l’évolution du changement climatique.

Participants au projet

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| Gaël André | Shom Brest |
| Jean-Pierre Barriot | UPF |
| Valérie Clouart | OVSM / IPGP, Martinique |
| Régis Coindet | Shom Papeete |
| Alain Coulomb | IGN |
| Vincent Donato | Shom Brest |
| Severine Enet | Shom Brest |
| Yann Ferret | Shom Brest |
| Bruno Garayt | IGN |
| Médéric Gravelle | Univ. La Rochelle, LIENSs |
| Mikaël Guichard | Univ. La Rochelle, LIENSs |
| Virginie Goirand | Shom Brest |
| Thomas Gouriou | Univ. La Rochelle, LIENSs |
| Gwenaële Jan | Shom Brest |
| Christian Kervella | Shom Brest |
| Vincent Lamarre | Shom Nouméa |
| Alexandre le Duvehat | Shom Nouméa |
| Raphaël Legouge | Shom Brest |
| Romain Lhullier | Shom Brest |
| Philippe Lurton | Shom Brest |
| Hervé Poilane | Shom Nouméa |
| Etienne Poirier | Univ. La Rochelle, LIENSs |
| Nicolas Pouvreau | Shom Brest |
| Elizabeth Prouteau | Univ La Rochelle, LIENSs |

| | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Julien Simon | Shom Papeete |
| Philippe Téchiné | OMP, LEGOS |
| Charlotte Terrac | Collectivité Saint-Martin |
| Laurent Testut | OMP, LEGOS, Univ La Rochelle, LIENSs |
| Pascal Tiphaneau | Univ. La Rochelle, LIENSs |
| Nicolas Weber | Shom Brest |
| Guy Wöppelmann | Univ. La Rochelle, LIENSs |

2 - MECANIQUE ORBITALE ET CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE

2.1. Mécanique orbitale

2.2. Champ de gravité de la Terre

2.2.1. Missions spatiales

2.2.2. Gravimétrie/méthodologie ou technologie

2.1. Mécanique orbitale

Logiciels

FAST : Intégration Analytique

FAST est un logiciel d'intégration analytique du mouvement d'un satellite artificiel, valable dans toute configuration dynamique (toutes altitudes, excentricités, inclinaisons (à l'exception de l'inclinaison 180°), qui peut également s'appliquer à un ensemble d'objets. Il fait l'objet d'une propriété intellectuelle conjointe entre le CNES et l'IMCCE.

STELA : Intégration Semi-Analytique

STELA est l'outil officiel français pour la vérification de l'adéquation long terme du choix d'une trajectoire à la Loi sur les Opérations Spatiales. Son prototype fortran SATlight a été mis au point au sein de l'IMCCE sur 2010-2016, et s'appuie sur des développements méthodologiques qui ont démarré dans les années 1960, et sont montés en puissance à l'OCA dans les années 1990 dans le logiciel CODIOR. Au fil des années, la modélisation et la programmation ont gagné en maturité, pour s'appuyer sur une formulation des équations moyennes du mouvement valable dans toutes les configurations orbitales.

Thèses et Etudes

Analyse d'erreurs de constellations de satellites pour le positionnement

L'objectif des travaux de thèse de N.D. Luong (doct. UNS/Geoazur) a été l'étude et le développement de méthodes analytiques de transfert d'erreurs d'orbites. Une théorie analytique de satellite, d'ordre un, en coordonnées sphériques a été développée. Ces erreurs sont ensuite projetées soit en terme d'erreurs géographiquement corrélées soit en terme d'erreurs sur le positionnement géocentrique, type laser ou DORIS.

Origines et interprétation des structures dynamiques en région MEO

La thèse de Jérôme Daquin, soutenue en décembre 2015 a porté sur la présentation et la confrontation des résultats de stabilité, de nature analytique, et s'est appuyée sur la construction d'un modèle hamiltonien séculaire à 2.5 degrés de liberté et semi-analytique (via le propagateur Stela). La thèse a décrit les manifestations architecturales des résonances lunisulaires sur cette région, ainsi que leurs conséquences profondes en terme de transport dans l'espace des phases (Daquin 2015, 2016).

D'autres études au sein du GRGS ont permis d'étudier les effets à très long terme du potentiel de 3^{ème} corps sur une orbite de type MEO. Il a été montré que cela peut conduire, dans certaines conditions, à une très forte augmentation de l'excentricité. De manière complémentaire, une étude entamée en 2013 a été poursuivie en 2014 pour étudier l'influence des résonances gravitationnelles et des résonances de troisième corps sur la stabilité des orbites parking des trajectoires de type GNSS ou GTO. Ces simulations réalisées avec les logiciels STELA/SATlight ont permis de localiser des zones conduisant à une valeur finale importante de l'excentricité.

Dynamique des orbites fortement elliptiques

La thèse de Guillaume Lion a permis de développer une théorie complètement analytique, utilisant la technique de normalisation au moyen de transformations canoniques de type Lie-Deprit, incluant les 3 principales perturbations J_2 terrestre, Lune, Soleil. Les difficultés étaient (i) d'utiliser des développements en excentricités, (ii) la prise en compte de la dépendance temporelle explicite due aux mouvements de la Lune et du Soleil. Pour chacun de ces problèmes pris séparément, des solutions connues existaient mais n'étaient jusqu'à présent pas compatibles. Une solution itérative a permis de résoudre ces difficultés.

Auto-ombrage d'un satellite dans les calculs des forces de surface

Les différents éléments d'un satellite peuvent se faire ombre mutuellement par rapport à une direction donnée, celle correspondant à l'une quelconque des forces de surface prises habituellement en compte. Ce problème avait été peu traité : l'étude complète du problème a été reprise, en incluant tous les cas de parties mobiles, et en s'attachant à la séparation des aspects géométriques et topologiques. Après vérifications par simulation, les algorithmes ont été implantés dans le logiciel GINS, et utilisés dans le traitement des données des orbiters martiens Mars Odyssey et Mars Reconnaissance Orbiter pour lesquels les situations d'auto-ombrage sont fréquentes et complexes (en particulier pour MRO).

Vols en formation

Dans ses travaux de thèse, Jordi Fontdecaba a élaboré une représentation alternative aux descriptions en coordonnées cartésiennes habituellement utilisées pour les vols en formation. Ces coordonnées présentent en effet des limitations en termes de linéarisation des équations du mouvement perturbé. Ces limitations peuvent être dépassées en utilisant des différences d'éléments orbitaux, ou ce qu'il appelle des « éléments orbitaux locaux ». Jordi Fontdecaba a ainsi ré-écrit les équations de la dynamique avec ces formalismes.

Ces formalismes ont permis d'étudier l'influence sur les vols en formation des perturbations les plus importantes, et le champ de gravité en particulier (pour les orbites basses), et la pression de radiation solaire (très importante pour les orbites hautes, surtout quand les satellites d'un même vol en formation n'ont pas le même rapport surface sur masse).

Prospective

Les projets concernent comme les années précédentes les actions en cours :

- La poursuite de l'analyse des résonances dans le mouvement long terme des trajectoires de type MEO et HEO.
- La poursuite de la quantification du chaos dans le mouvement des satellites artificiels
- La poursuite de la recherche de solutions analytiques et semi-analytiques valables quelles que soient les configurations dynamiques.
- La mise en œuvre de méthodes statistiques couplées à des intégrations analytiques ou semi-analytiques permettant de caractériser les répartitions d'objets au sein de familles d'objets (thèse CNES-Lille1 en cours de Delphine Thomasson).

Participants au projet

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Georges Balmino | CNES |
| Jean-Charles Marty | CNES |
| Félix Perosanz | CNES |
| Pierre Exertier | OCA |
| Guillaume Lion | OCA |
| Ngoc-Dung Luong | OCA |
| Gilles Métris | OCA |
| Letizia Stefanelli | OCA |
| David Coulot | Observatoire de Paris/IMCCE |
| Jérôme Daquin | Observatoire de Paris/IMCCE |
| Florent Deleflie | Observatoire de Paris/IMCCE |
| Delphine Thomasson | Observatoire de Paris/IMCCE |

2.2. Champ de gravité de la Terre

2.2.1 Missions spatiales

L'activité « champ de gravité » consiste à modéliser le potentiel gravitationnel global de la Terre par la technique des perturbations orbitales des satellites géodésiques (SLR, GRACE...), par l'utilisation de données de surface altimétriques et gravimétriques ainsi que par la mesure en orbite de gradients de gravité (GOCE). Elle concerne les modélisations EIGEN du champ de gravité à haute résolution réalisées en coopération avec le GFZ ainsi que les études des variations temporelles du géoïde issues en particulier de la mission GRACE. Elle concerne aussi les développements et optimisations des modèles ou algorithmes utilisés en calcul d'orbite ou en calcul matriciel, la maintenance, l'évolution et la validation des logiciels dédiés, la gestion des données utilisées, la participation aux services internationaux des techniques de suivi d'intérêt pour les missions satellitaires de gravité (notamment IGS/LEO).

GRACE

Les variations infimes de la gravité sont liées aux redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre, elles sont mesurées de manière systématique et à l'échelle globale depuis mars 2002 par la mission GRACE constituée de deux véhicules en poursuite. Ces satellites sont distants d'environ 220 km, placés à 400-500 km d'altitude sur une orbite quasi-polaire (inclinaison $\sim 89^\circ$) pour assurer une couverture homogène de la sphère terrestre. La précision micrométrique de la mesure inter-satellite GRACE permet d'accéder aux transferts de masses superficielles à la périodicité mensuelle, voire sub-mensuelle. Les modèles décennaires de géoïde calculés par le GRGS et disponibles à travers les sites Web GET, GRGS et BGI fournissent ainsi des données synoptiques à grande échelle (> 250 km) pour les études hydrologiques, océanographiques, glaciologiques, géophysiques.

Méthode globale

La méthode globale utilisée consiste à restituer les coefficients harmoniques sphériques du développement du potentiel de gravité à partir de l'observation des perturbations orbitales. Les données corrigées (des effets d'ionosphère, d'alignement, d'aberration) de variation de distance inter-satellite en bande K (KBRR) sont utilisées avec les données GPS pour calculer les trajectoires des 2 satellites GRACE. Les perturbations sur plusieurs satellites laser (LAGEOS-1/2, Starlette, Stella) sont également considérées de façon à stabiliser les bas degrés du développement harmonique sphérique et principalement le terme C20. Le calcul est fait dynamiquement, par intégration des accélérations ainsi que des équations aux dérivées partielles des coefficients du potentiel de gravité (jusqu'au degré 175), des marées océaniques (pour 12 ondes principales jusqu'au degré 30) et des biais (par 12h et par axe) et facteurs d'échelle (par jour et par axe) des accéléromètres. Les paramètres de mesures ajustés sur GRACE concernent les biais d'horloge des satellites GRACE et les ambiguïtés réelles GPS, des termes empiriques sur la mesure KBRR (biais, dérives et termes à la période de la révolution, ainsi que demi, tiers et quart de période toutes les 96 mn). Ceux sur LAGEOS concernent des biais dans la direction tangentielle à l'orbite (par 5 jours) ainsi que dans les directions du nœud ascendant et perpendiculaire (par 10 jours).

Des modèles à priori, seules manquent les variations hydrologiques et de rebond postglaciaire. Il est donc naturel de retrouver ces effets dans les cartes décadaires du géoïde, ou transformées en hauteur d'eau équivalente (par transformation du potentiel de volume en potentiel de surface). Restent cependant les erreurs des autres modèles ou variations à haute fréquence qui produisent les classiques artéfacts méridiens. Ces artéfacts sont cependant atténués par la mise en œuvre d'une régularisation (aujourd'hui par SVD tronquée) au cours du processus d'inversion, régularisation qui a tendance à contraindre les hauts degrés vers le modèle a priori. Les modèles décadaires ou mensuels, tout comme les modèles moyens, sont disponibles à travers le site web du GRGS (<http://grgs.obs-mip.fr/grace/variable-models-grace-lageos/grace-solutions-release-03>) sous les formes de coefficient, de géoïde ou de hauteur d'eau équivalente.

Les événements marquants sur les 5 dernières années ont porté sur le passage d'un traitement de type « Release 2 » à un traitement de type « Release 3 » qui a entraîné sur l'année 2013 le (re-)traitement complet des données GRACE de niveau 1B (version « v2 ») de 2002 à 2013. Les années suivantes, le traitement des nouvelles données s'est poursuivi dans la même configuration.

Les standards de la Release 3 se distinguent des précédents par les points principaux suivants :

- extension des dérivées partielles des solutions décadaires au degré et ordre 80
- extension des dérivées partielles de la solution moyenne au degré et ordre 175
- diminution du nombre de paramètres empiriques sur la mesure KBR et augmentation parallèle du nombre de paramètres empiriques sur les mesures accélérométriques, pour une meilleure prise en compte de la dynamique orbitale
- dealiasing : passage à ERA-Interim et TUGO (3h), produits calculés tous deux par Pascal Gégout à partir d'une part des grilles multicouches de l'ECMWF, d'autre part du logiciel TUGO développé par Florent Lyard au LEGOS
- marées : adoption de FES2012, puis de FES2014 (Lyard)
- ANTEX : adoption des derniers standards et utilisation des orbites et horloges GPS compatibles
- critère d'élimination des résidus KBRR : passage à 7 sigmas
- biais accélérométriques : desserrage de la contrainte de stabilisation
- facteurs d'échelle accélérométriques : resserrage de la contrainte de stabilisation vers 1
- inversion : passage à une résolution par SVD avec troncature des valeurs propres à un seuil correspondant au pourcentage de variance expliquée (99 à 99.9 %).

Outre les séries temporelles de solutions GRACE, le GRGS calcule aussi des modèles moyens qui incluent des termes variables sous forme de variations linéaires par morceaux (par an) + termes annuels et semi-annuels. Ces modèles sont soit basés uniquement sur des données SLR et GRACE (modèles « EIGEN-GRGS »), soit ils incluent également des données GOCE

(avec ou sans données géodésiques terrestres) et sont alors faits en coopération avec nos collègues allemands du GFZ (modèles « EIGEN »).

Ainsi les modèles EIGEN-6C2 et -6S2, EIGEN-6C3 et récemment EIGEN-6C4 et -6S4 ont été produits en coopération avec le GFZ (EIGEN-6S2 ayant été sélectionné pour être le modèle de référence lors du calcul de l'IRTF2013/2014), tandis que le modèle GRGS EIGEN-GRGS.RL03-v2.MEAN-FIELD était choisi pour les standards altimétriques « GDR-E ».

Le développement d'une méthode « régionale » en gravimétrie spatiale

En parallèle des organismes officiels (CSR, Austin, Texas ; JPL, Pasadena, Californie ; GFZ, Potsdam, Allemagne) qui traitent les observations GRACE de niveau 1B et fournissent des solutions globales Level-2 qui sont des listes mensuelles ou à 10 jours des coefficients de Stokes (i.e., harmoniques sphériques du géopotential) jusqu'au degré 90, soit une résolution spatiale de 333 km, il existe aussi des centres non officiels de traitement des données GRACE (e.g. Université de Bonn, Allemagne ; GRGS, Toulouse, France) qui proposent un ajustement dynamique des orbites de GRACE et donc des solutions globales.

Les solutions globales sont des résidus des variations du champ de gravité, les observations étant corrigées - grâce à des modèles a priori - des contributions du champ statique (99%), des variations des masses atmosphériques et océaniques, y compris les signaux périodiques des marées, et des changements du mouvement du pôle terrestre.

Ces solutions globales résiduelles ont été largement utilisées dans un grand nombre d'études sur la détermination de bilans de masse de grands systèmes hydrologiques et leurs évolutions au cours de la période récente. Les estimations des variations de masse sont d'autant plus précises que les solutions globales sont moyennées sur de grandes surfaces (e.g. > 1 million de kilomètres carrés).

Par analogie avec la transformée de Fourier, la représentation en harmoniques sphériques est basée sur des ondes « stationnaires » sur la sphère terrestre. Elle a donc de sérieuses limitations liées à la troncature spectrale : pour représenter des anomalies de masse à la surface de la Terre, il faudrait un nombre de plus en plus important de coefficients harmoniques, qui ne sont malheureusement pas présents dans les solutions GRACE. D'autre part, l'omission des coefficients de Stokes de degrés important provoque de mauvaises descriptions et localisations des petites structures.

Les efforts se sont portés sur la mise en place d'une méthode alternative dite « régionale » pour résoudre les limitations de l'approche classique en harmoniques sphériques (Ramillien et al., 2011 ; 2012). Cette méthode régionale comprend de deux étapes :

(a) Le calcul des variations des différences de potentiel le long des traces satellites à partir des résidus des variations de vitesse entre les deux satellites en supposant la conservation de l'énergie mécanique au cours du temps ;

(b) La détermination des variations des densités surfaciques de masse par résolution de l'équation de Newton (attraction gravitationnelle des masses), sur un réseau de surfaces élémentaires juxtaposées de $2^\circ \times 2^\circ$. Ces densités surfaciques sont exprimées en hauteurs équivalentes d'eau. L'opérateur linéaire est construit à partir sur les positions successives des satellites GRACE et des centres géographiques des éléments de surface.

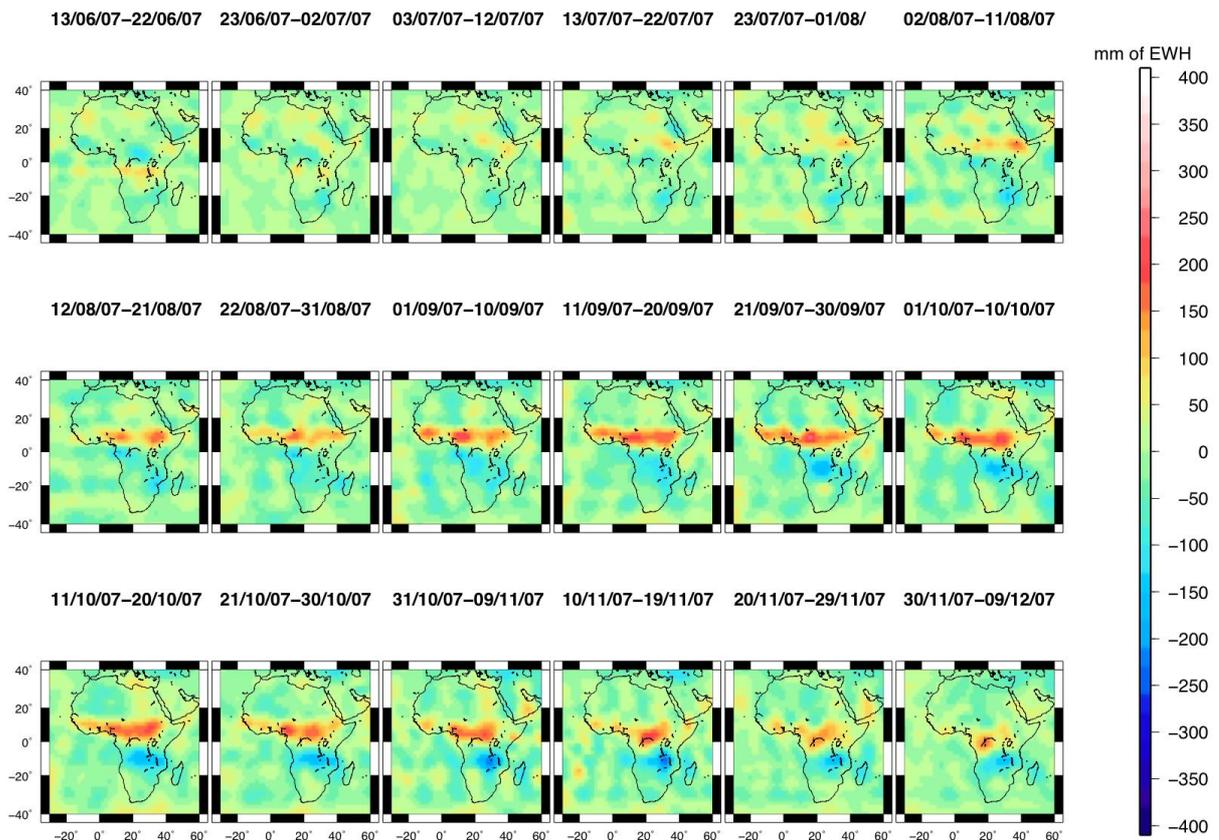


Figure 1 : Série de cartes régionales $2^\circ \times 2^\circ$ à 10 jours décrivant les variations des masses d'eau sur l'Afrique des six premiers mois de 2009.

Plusieurs stratégies numériques de résolution ont été proposées pour ajuster ces hauteurs d'eau équivalentes (décomposition en valeurs singulières, régularisation de type Tikhonov, prise en compte de contraintes spatiales entre les éléments de surface) pour produire des solutions régionales sur des périodes de 10 jours.

La compensation de la charge des masses hydriques à la surface de la Terre a été prise en compte dans le calcul par introduction des nombres de Love élastiques « par degré harmonique » dans l'opérateur de Newton.

La méthode régionale a été appliquée à de grandes zones continentales, des séries de cartes régionales des variations des masses d'eau à 10 jours ont été obtenues par inversion des vraies observations de la mission GRACE (2002 – 2012) et ont fait l'objet de trois publications :

- Amérique du Sud [$90^\circ\text{W}-30^\circ\text{W}$; $60^\circ\text{S}-20^\circ\text{N}$] (Frappart et al., RSE, 2013) et validation par comparaison avec les solutions globales CSR, JPL, GFZ et GRGS,
- Australie [$112^\circ\text{E}-156^\circ\text{E}$; $44^\circ\text{S}-10^\circ\text{S}$] (Seoane et al., 2013) et validation par comparaison de stations dans le bassin de la Murray-Darling,
- Afrique [$30^\circ\text{W}-60^\circ\text{E}$; $40^\circ\text{S}-40^\circ\text{N}$] (Ramillien et al., 2014) (cf. Figure 1) et validation par comparaison avec les solutions globales.

Il existe un cycle saisonnier dominant décrit par ces séries de cartes régionales. De plus, leur analyse en composantes principales a permis de mettre en évidence des tendances sur plusieurs années (e.g., zone d'assèchement au niveau de l'aquifère du Sahara), et des événements beaucoup plus rapides comme la signature gravitationnelle du séisme de Conception au Chili (Figure 2, 27/02/2010, Mw=8.8) et du cyclone Charlotte en Australie en Janvier 2009.

Afin d'améliorer la résolution temporelle des solutions régionales, (et accéder à la détection de phénomènes hydrologiques plus rapides), une nouvelle approche a été abordée dès 2014. Au lieu de considérer une grande quantité d'observations GRACE (e.g., ~17280 points par jour dans le cas d'une orbite GRACE échantillonnée à 5 secondes) pour calculer une solution, le nouveau concept est d'injecter seulement une partie de ces données à chaque fois - mais régulièrement pour diminuer la taille du problème - et en itérant pour converger progressivement vers une solution régionale finale. J'ai donc mis en œuvre une nouvelle approche de type « filtre de Kalman » pour pouvoir cumuler l'information de GRACE de plusieurs jours successifs pour restituer des cartes des variations des masses d'eau (Ramillien et al., 2015). Cette approche comprend deux étapes à chaque itération j :

(a) La projection de la solution régionale courante grâce à un opérateur linéaire de projection qui permet d'explorer l'espace des solutions possibles ;

(b) Le calcul du gain de Kalman K_j à l'itération j à partir de : (i) l'opérateur de Newton pour le jour numéro j et (ii) des matrices de covariance des erreurs a priori sur les observations des différences de potentiels et sur les hauteurs équivalentes d'eau disposées sur le réseau de surfaces élémentaires. Ce gain pondère ensuite les nouvelles observations à l'itération numéro j pour déterminer une amélioration de la solution qui est projetée lors de la première étape.

Des tests de restitution à partir de différences de potentiel synthétiques le long d'orbites de GRACE ont montré que l'algorithme d'estimation de type Kalman était capable de produire des cartes réalistes des variations des masses d'eau, en particulier de décrire les grandes amplitudes saisonnières au niveau du grand bassin de l'Amazone (~6 millions de kilomètres carrés) en Amérique du Sud. Contrairement aux solutions régionales calculées sur des périodes fixes de 10 jours qui sont obtenues par régularisation de l'opérateur de Newton, les solutions régionales Kalman dépendent de la pondération des incertitudes a priori. Les premières restitutions ont montré que la convergence vers une solution régionale est d'autant plus rapide (i.e., ~une dizaine d'itérations) que les observations satellites sont précises ($< 0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$), mais la solution est plus sujette au développement de bruit numérique à haute fréquence. Le cumul d'observations de différences de potentiel moins précises aboutit à une série de solutions régionales stables mais extrêmement lisses (synonyme d'une perte de résolution spatiale). Pour détecter des événements hydrologiques de quelques jours, l'efficacité de la méthode de type « Kalman » dépend de la couverture des traces satellites dans la région considérée. Dans le cas de l'orbite de GRACE, la distribution quotidienne des données assure une résolution temporelle juste inférieure à la dizaine de jours (Ramillien et al., 2015) : la mise à jour faite par injection de données journalières n'est pas assez efficace d'un jour sur l'autre, créant une information partielle ou trop persistante de structures hydrologiques.

GOCE

GOCE (Gravity field and Ocean Circulation Explorer), première mission cadre sélectionnée à l'ESA dans le programme Earth Explorer, a été lancée le 17 mars 2009. Le consortium EGGc (European GOCE Gravity consortium), dont l'équipe géodésie spatiale du CNES/GRGS fait partie, a fait les premières analyses des données GPS, des senseurs d'étoiles et du gradiomètre en coopération étroite avec l'ESRIN. Au cours de la vie de GOCE ce consortium a produit plusieurs modèles de champ de gravité basés sur les données GOCE.

L'altitude de GOCE, sur recommandation d'EGGc et d'un comité d'experts, a été baissée 4 fois en 2012 et 2013 :

- -8.6 km en août 2012
- -6.4 en novembre 2012
- -5 km en février 2013
- -10 km en mai 2013

Le but était d'augmenter la sensibilité du gradiomètre et par conséquent la résolution des modèles.

L'effet de la réduction de l'altitude sur la précision et la résolution a été analysé et présenté au « Living Planet Symposium » de l'ESA à Edimbourg en septembre 2013. Des solutions d'un cycle avant (solution de référence) et après chaque manœuvre ont été calculées et la comparaison des spectres ainsi que des cartes de différences avec EGM2008 sur les océans ont montré le grand intérêt de ces opérations : le modèle construit avec les données 20 km plus basses est 35% plus précis à degré 200 que le modèle de référence.

GOCE est rentré dans l'atmosphère en novembre 2013.

Le consortium EGGc a traité toutes les données de la mission scientifique et fourni le dernier modèle à l'ESA en juillet 2014. Ce modèle, EGM_DIR_R5 développé jusqu'au degré 300, a été publié dans GRL. Le BGI a contribué en 2014-2015, en collaboration avec S. Bruinsma (CNES, GET Toulouse), à l'évaluation de cet ultime modèle.

Le modèle combiné a également été mis à jour avec toutes les données GOCE, la contribution de GRACE étant assurée via l'équation normale GRGS Release 3. La partie haute résolution du modèle, basée sur DTU10 sur les océans et EGM2008 sur les continents, a été recalculée à Toulouse grâce au nouveau module Dynamo_13 jusqu'au degré 2190. Ce modèle, EIGEN-6C4, est disponible (comme EGM_DIR_R5) sur le site ICGEM (icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM). CLS, en collaboration avec l'équipe géodésie spatiale du CNES, a évalué des modèles de champ de gravité GOCE jusqu'au cinquième modèle réalisé pour l'ESA ainsi que EIGEN-6C (avec 6.7 mois de données).

Modélisations en ondelettes du champ de pesanteur (I. Panet)

Nous avons appliqué l'approche de modélisation en ondelettes du champ à la combinaison locale entre données GOCE et de gravimétrie de surface, dans un but de qualification croisée des mesures sol/satellite et d'amélioration de la détermination du géoïde sur la France. Le modèle actuellement obtenu a une résolution intermédiaire sur l'Europe de l'Ouest, avec une augmentation de la résolution à environ 30 km sur la France. Il intègre environ 1 600 000

gradients GOCE dans le repère local nord et 1 400 000 données gravimétriques de surface (gravimétrie dense et campagnes marines de la base de données BGI, gravimétrie récente à terre, altimétrie en domaine océanique). On montre une bonne cohérence entre les gradients GOCE et la gravimétrie RBF. La comparaison du quasi-géoïde déduit du modèle en ondelettes et de celui issu des différences entre hauteur ellipsoïdale GPS et altitude nivelée montre un accord à 7.3 cm rms après soustraction d'un biais et d'une tendance et réduction partielle de l'erreur d'omission aux très hautes résolutions spatiales. L'accord se dégrade en zone de hauts reliefs et sur l'Ouest de la France ; les causes de ces écarts sont à l'étude et pourraient mettre en jeu des problèmes d'échantillonnage en zone de relief et de biais sur certaines campagnes à la mer et sur l'altimétrie proche des côtes. Ces résultats ont remporté le prix de la meilleure présentation au symposium EUREF (juin 2012).

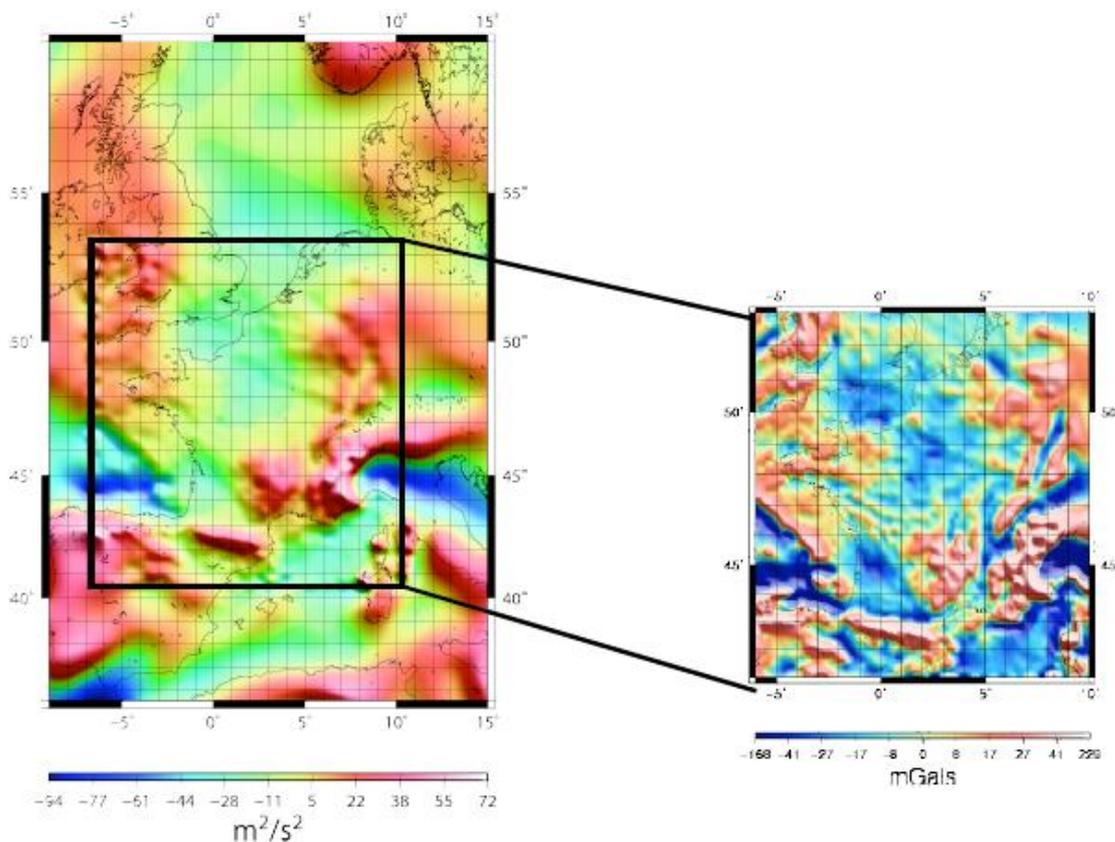


Figure 1 : Le modèle combiné en ondelettes, à une résolution de 80 km sur l'Europe de l'Ouest (à gauche, exprimé en potentiel) et environ 30 km sur la France (à droite, exprimé en anomalies à l'air libre).

Modélisation multi-échelles spatio-temporelle du champ de gravité terrestre

Dans le cadre de la thèse de Shuo Wang, co-encadrée en partenariat entre l'IGN/LAREG (I.Panet), Guillaume Ramillien du GET à l'Observatoire Midi-Pyrénées (Toulouse) et Frédéric Guilloux au Laboratoire de Statistique Théorique et Appliquée à l'UPMC, nous avons développé une méthode de modélisation multi-échelles temps-espace du champ de gravité terrestre, qui permet d'adapter la résolution temporelle du modèle à sa résolution spatiale. La représentation 4D est obtenue par produit tensoriel entre une modélisation en ondelettes spatiales, et une modélisation en ondelettes temporelles ; ainsi la résolution temporelle est augmentée à grande échelle spatiale. Cette approche multi-échelle est également adaptée

pour représenter un champ dont un grand nombre de sources présentent un caractère intrinsèquement local et non-stationnaire.

Dans un premier temps, nous avons construit une famille de fonctions 4D, qui combine des ondelettes de Poisson dans le domaine spatial et des ondelettes de Haar dans le domaine temporel. Ensuite, nous avons mis en place une inversion régularisée d'observables de type « différences de potentiel inter-satellite » pour estimer les paramètres du modèle, dans un cadre bayésien. Pour construire l'a priori sur le modèle, nous avons développé une analyse spectrale localisée en temps et en espace de variations de masse associées à un modèle physique, et du signal gravimétrique associé. Nous avons testé notre approche pour la reconstruction des variations spatio-temporelles du champ associées au signal hydrologique sur l'Afrique sur l'année 2005, à partir d'une distribution régionale d'observations. Nous obtenons une précision d'environ 2.5 cm sur les hauteurs d'eau reconstruite à 450 km de résolution spatiale et 21 jours en résolution temporelle. Nous avons étudié les sources d'erreurs possibles expliquant cette limite de précision, et concluons que l'approximation bloc diagonale du système normal, combinée à une régularisation imparfaite, constituent les limites principales dans le cadre d'inversion mis en œuvre.

La thèse de Shuo Wang a été soutenue à l'automne 2016 ; ses travaux ont donné lieu à une publication acceptée au « Journal of Geodynamics ».

Prospective

- Résolution d'une anomalie de détermination dans la composante Z du géocentre par les données SLR : une sensibilité au paramètre Ω de l'orbite a été mise en évidence sur Lageos-1, Lageos-2, Starlette et Stella.
- Recherche d'une explication sur l'incertitude accrue dans la détermination des coefficients sectoriels du champ de gravité par rapport aux autres groupes européens, mise en évidence grâce à la participation à EGSIM.
- Retraitement complet des données GRACE.
- Traitement des données de quelques satellites DORIS en complément des satellites SLR.
- Poursuivre les travaux communs au GRGS sur la méthode de l'intégrale de l'énergie.
- Poursuite de la coopération avec le GFZ (nouveau modèle EIGEN-7 et calcul de modèles HR grâce à DYNAMO-L2).
- Passage en mode opérationnel pour déaliasing / surcharge / propagation.
- Maintenance et développement de GINS/DYNAMO.
- Maintenance et développement du GRACE plotter.
- Si la mission GRACE devait se terminer avant le lancement de GRACE-FO, étude des solutions grandes longueurs d'onde alternatives.

Participants au projet

| | |
|----------------------------|---------------------|
| Georges Balmino | CNES Emérite |
| Richard Biancale | CNES/GS |
| Sean Bruinsma | CNES/GS |
| Jean-Michel Lemoine | CNES/GS |
| Jean-Charles Marty | CNES/GS |
| Franck Reinquin | CNES/GS |
| Isabelle Panet | IGN/LAREG |
| Frédéric Frappart | OMP/GET |
| Lucia Seoane | OMP/GET |
| Pascal Gegout | OMP/GET |
| Guillaume Ramillien | OMP/GET |
| Florent Deleflie | Obs. de Paris/IMCCE |
| Shuo Wang | Postdoc |

2.2.2. Gravimétrie/méthodologie ou technologie

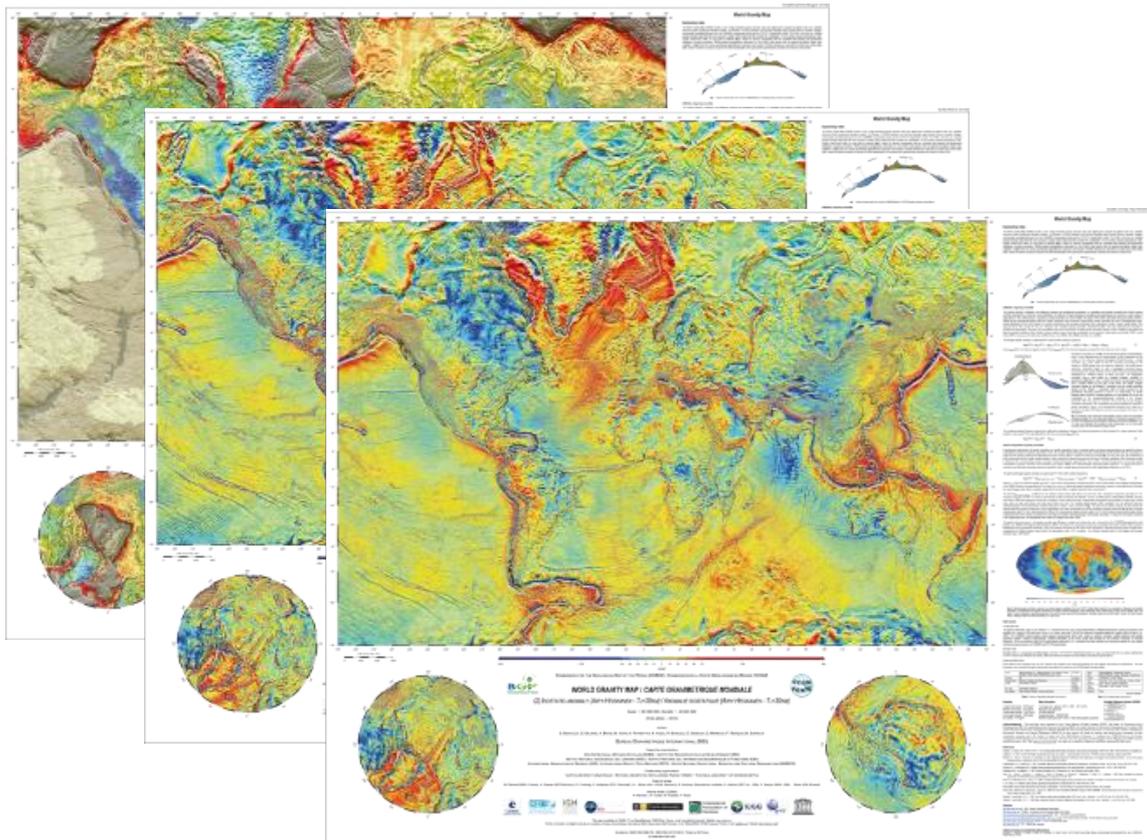
Activités de recherche et de valorisation

Parallèlement à l'activité de service conduite autour de l'archivage, de la validation et de la mise à disposition de données, le BGI mène aussi avec ses différents partenaires une activité de recherche visant à valoriser ses bases de données gravimétriques globales ou à développer de nouveaux produits et outils potentiellement utiles aux utilisateurs de données gravimétriques. Plusieurs grands projets, conduits dans un cadre international, ont ainsi été réalisés sur la période 2012-2016.

- Réalisation de la carte gravimétrique mondiale (Projet World Gravity Map)

En 2012, le BGI a finalisé le projet de cartographie globale des anomalies de pesanteur « World Gravity Map » réalisé pour la Commission de la Carte Géologique du Monde (CCGM) et l'UNESCO. Ce projet, soutenu par plusieurs organisations internationales de géodésie (IAG, IGFS), de géophysique (IUGG) et de géologie (IUGS), visait à compléter les séries de cartes produites par la CCGM (<http://ccgm.free.fr>) pour des applications de recherche et d'éducation. Il a conduit à la réalisation d'un ensemble de 3 cartes numériques d'anomalies gravimétriques, publiées en co-édition CCGM-BGI-CNES-IRD et diffusées par la CCGM (Bonvalot et al, 2012).

Ce projet a donné lieu à la mise au point de nouveaux développements pour la modélisation à très haute résolution du champ de gravité en harmoniques sphériques (Balmino et al, 2012). Les grilles numériques globales d'anomalies (Bouguer et Isostatique) intégrant des corrections de terrain à 1'x1' de résolution ainsi que les grilles d'anomalies à l'air libre et de corrections de terrain, ont été mises à disposition sur le site du BGI ainsi qu'un module d'extraction pour des études régionales. <http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012>.



Carte d'anomalies gravimétriques issues du projet WGM (Bonvalot et al., 2012, Balmino et al., 2012)

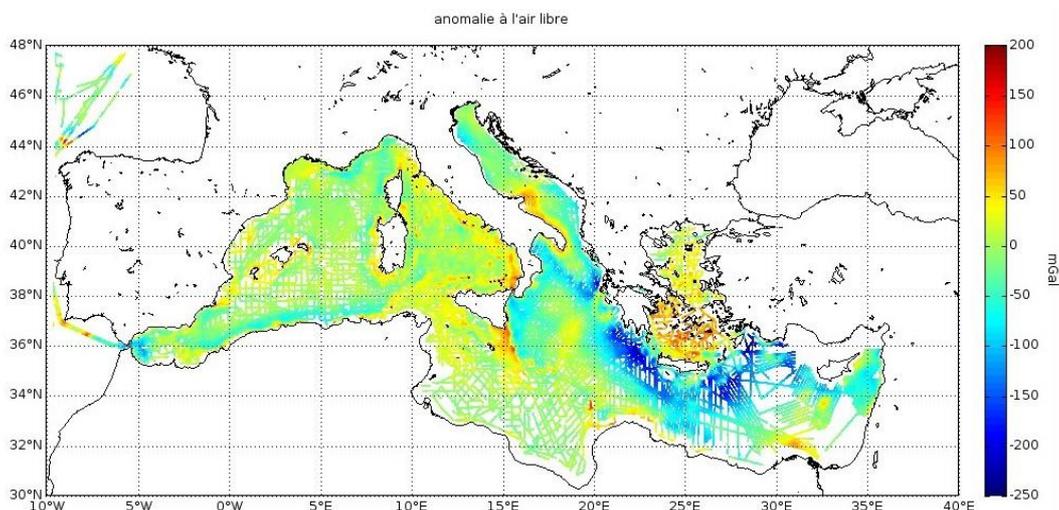
- Contribution à l'évaluation de la mission GOCE

En 2013-2014, le BGI a contribué à l'évaluation par des données de surface des derniers modèles GOCE (DIR4 et DIR5) satellite-only générés pour l'ESA. Cette étude a fait l'objet de 2 publications (Bruinsma et al., GRL, 2013 ; Bruinsma et al., GRL, 2014). Un numéro spécial du Newton's Bulletin dédié à l'évaluation de la mission GOCE (co-édition IGS/BGI) a également été publié et mis en ligne en 2015 (http://bgi.obs-mip.fr/publications/newton_bulletin).

- Contribution à la réalisation du géoïde en Méditerranée (Projet GEOMED-II)

A l'initiative du BGI et de l'ISG (International Service for the Geoid), un projet international a été lancé en 2014 pour la réalisation d'un géoïde à haute résolution sur la Méditerranée incluant toutes les mesures de surface et les données GOCE (le dernier modèle de géoïde réalisé datant de 1994 avant les missions gravimétriques spatiales). Ce projet soutenu dès 2014 par le GRGS et l'ESA rassemble déjà des institutions de plusieurs pays européens (FR, IT, GR, ES, DK, TK,...). Dans ce cadre, le SHOM et l'UMR6538 (MF. Lequentrec-Lalancette, C. Salaün) ont effectué le traitement et la validation de l'ensemble des données marines disponibles au BGI ainsi que la carte d'anomalie à l'air libre. Une compilation des données terrestres entourant le bassin méditerranéen est également en cours au BGI en vue d'une combinaison avec les données marines et les données GOCE (S Bruinsma, F. Reinquin, L.

Seoane, S Bonvalot). Des travaux sont en cours pour réaliser et comparer les différentes solutions de géoïde calculées. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs communications dans des congrès internationaux (EGU, AGU, IGFS). Le projet doit se poursuivre en 2017/2018 et sera finalisé avec la mise à disposition des grilles et cartes numériques (à l'instar de la carte gravimétrique mondiale).



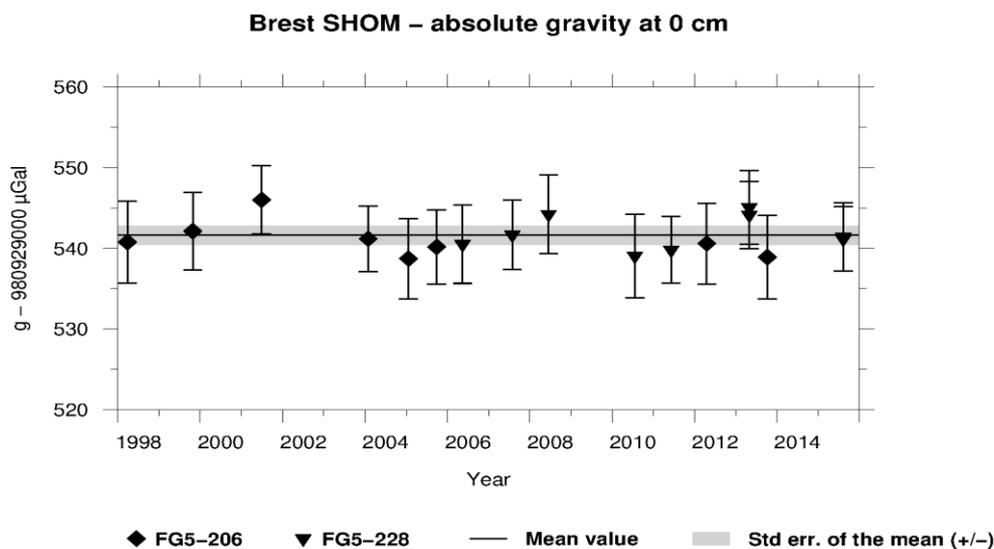
Anomalie à l'air libre sur la Méditerranée issue de l'analyse des campagnes marines. L'erreur sur le jeu de données (272191 mesures), évaluée à partir des écarts aux points de croisements est de 3.8 mGal (Lequentrec-Lalancette et al., 2016)

- **Contribution à la définition d'un système de référence gravimétrique global absolu**

Le BGI est impliqué au sein de l'IAG en tant que co-chair d'un working Group (Wziontek et Bonvalot, 2016) dans la définition et l'établissement d'un système global de référence gravimétrique. Il s'agit de remplacer le système IGSN71 (International Gravity Standardization Network, 1971) utilisé jusqu'alors par un nouveau réseau global de stations de mesures absolues. Il s'agit de définir une référence globale gravimétrique basée sur les mesures absolues de la pesanteur effectuée avec des gravimètres modernes. Cette action a été validée lors du dernier meeting de l'IUGG à Prague en 2015 et a fait l'objet d'une publication (Wilmes et al., 2016).

- **Stabilité des références gravimétriques (STAGRAV)**

Contrôle gravimétrique des références : Le projet initié en 1998 (Llubes et al., 2001, 2008) au marégraphe de Brest se poursuit avec des mesures de gravimétrie absolue réalisées désormais aux marégraphes de Brest, de La Rochelle, de l'île d'Aix et de Marseille. Ces mesures sont faites par les équipes de l'EOST ou de l'université de Montpellier détentrices des deux gravimètres absolus FG5 français. Ce projet sur le long terme est soutenu par le SHOM et l'université de la Rochelle (LIENS). Le gravimètre A10, acquis par le SHOM a été utilisé pour des mesures dans les ports de Toulon et de Cadix ainsi qu'aux sites marégraphiques en complément des mesures plus précises des FG5.



Compilation de mesures FG5 sur le site de Brest (en cours de publication)

Développements logiciels

- **Chaîne de validation des campagnes gravimétriques terrestres** (V. Carrassus, F. Reinquin, S. Bonvalot, A. Briais, G. Gabalda, L. Seoane) : La mise à jour des outils utilisés pour l'analyse et la validation des données gravimétriques au BGI est assurée par V. Carrassus (CDD CNES) en lien avec les personnels du BGI. La chaîne logicielle reprend les principales fonctionnalités du logiciel DIVA (développé et utilisé au BGI depuis les années 90) et intègre une interface graphique développée sous environnement Java et NASA WorldWind et de nombreuses autres fonctionnalités (comparaisons avec modèles topographiques SRTM et gravimétriques WGM2012, GOCE...).
- **Réduction / Analyse de mesures gravimétriques relatives ou absolues** (G. Gabalda, S. Bonvalot) : Deux outils ont été finalisés en 2016 et seront prochainement mis en ligne sur le site du BGI. L'un pour la réduction et l'analyse des mesures gravimétriques relatives Scintrex CG5 (CG5TOOL), l'autre pour l'analyse des mesures gravimétriques absolues FG5 et A10.
- **Inversion gravimétrique** : Le BGI a contribué au développement et à l'évaluation d'algorithmes d'inversion gravimétrique 2D qui ont fait l'objet de plusieurs publications (Perrouy et al., 2015 ; Pallero et al., 2015 ; Pallero et al., 2016 ; Martin et al., 2013 ; Martin et al., 2016).
- **Correction de terrain par maillage adaptatif** : Un logiciel de traitement de calcul de correction de terrain utilisant une discrétisation de la topographie par maillage adaptatif a été développé au cours des dernières années à l'IGN LAREG / IPG Paris

(J. Penguen, M. Diament). Ce logiciel a été remis au BGI pour évaluation / finalisation.

- **Contribution à l'évaluation du premier gravimètre absolu transportable à atomes froids**

Plusieurs équipes participant au BGI sont également impliquées dans la coordination et la gestion du parc instrumental gravimétrique national (parc intégré à l'Infrastructure de Recherche RESIF - <http://www.resif.fr> -. Dans ce cadre, nous exerçons une activité de conseil auprès du constructeur MUQUANS - <https://www.muquans.com/> -, qui développe les premiers gravimètres absolus transportables commercialisés au monde, et une activité d'évaluation des instruments destinés aux équipes de recherche. Ces évaluations, débutées en 2015, ont fait l'objet de deux communications en 2016.

Implications dans des groupes de travail internationaux

Au cours des quatre dernières années, le BGI a participé au titre de Service scientifique de l'IAG à l'organisation de plusieurs colloques internationaux et groupes de travail.

- Groupes de travail IAG / GGOS

- Advisory Board of IGFS (International Gravity Field Service) - <http://igfs.topo.auth.gr/structure.html>
- Consortium member of GGOS (Global Geodetic Observing System) - <http://www.ggos.org/>
- Joint Work. Group "Establishment of a global absolute gravity reference system" (depuis 2016)

- Participation aux comités scientifiques de Congrès Internationaux

- GGHS/IGFS Meeting (Thessaloniki, Greece September 19-23, 2016)
- IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry Static & Mobile Measurements (St. Petersburg, Russia, 2016)
- 3rd International IGFS (International Gravity Field Service) meeting (Shanghai, China, Juil. 2014)
- IAG Scientific Assembly (Potsdam, Germany, Sept 2013)
- IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry Static & Mobile Measurements (St. Petersburg, Russia, 2013).

Géodésie chronométrique

Depuis 2 ans, une collaboration entre le SYRTE et le LAREG, financée par le labex First-TF et l'ERC AdOC, a été initiée pour estimer l'apport des mesures de comparaisons d'horloges optiques à distance pour la détermination du géopotential à très haute résolution spatiale. Cette problématique est intéressante car elle permettrait de voir s'il est possible de combler l'écart entre les couvertures spatiales et spectrales du satellite et de la gravité proche surface

dans le but d'améliorer notre connaissance du géopotential et du champ de gravité à toutes les longueurs d'onde.

Jusqu'à récemment, la technologie des horloges atomiques n'était pas suffisamment avancée pour permettre d'utiliser les horloges en pratique comme instruments de mesure directe du potentiel pour des applications en géodésie ou en géosciences. Cependant, les rapides progrès technologiques permettent maintenant d'y songer. Actuellement, les nouvelles générations d'horloges atomiques atteignent une exactitude et une stabilité en décalage de fréquences relative proche de 10^{-18} . Cela signifie que ce type d'instrument permet de mesurer des variations de hauteurs de géoïde d'environ 1 cm, ou de manière équivalente des variations de géopotential d'environ $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$, rejoignant les performances des meilleures techniques utilisées en géodésie.

Ce travail exploratoire a été abordé à travers différents cas de reconstruction du potentiel à haute résolution spatiale (10 km) sur des régions françaises : la région Massif Central, marquée par son relief de moyenne montagne et ses plateaux volcaniques, et la zone alpine-méditerranéenne pour ses hautes chaînes montagneuses et sa transition terre-mer. Du fait que leur topographie est plus ou moins complexe, ces régions sont intéressantes car l'intensité du champ de gravité varie beaucoup d'un endroit à un autre lorsqu'on travaille à haute résolution spatiale, et la couverture des données gravimétriques est très hétérogène.

Pour estimer l'apport des mesures horloges dans ces régions, des simulations numériques avec données synthétiques bruitées ont été réalisées. Elles consistent à comparer la qualité de reconstruction du potentiel à partir de mesures de gravité combinées et non combinées à des mesures horloge. Les solutions sont calculées avec une méthode de collocation par moindres carrés par rapport et comparées à une solution de référence.

Les premiers résultats de cette étude ont été publiés dans Lion et al. (2017). Il a été montré que compléter un réseau de données gravimétriques avec des données de potentiel pouvait permettre d'améliorer significativement la détermination du géopotential à très haute résolution spatiale, au-delà de ce qui est possible de faire avec les satellites. A titre d'illustration, on montre en Figure 1 que quelques dizaines de mesures horloge suffisent (chiffre à comparer aux milliers de données de gravité utilisées) pour améliorer d'un facteur 3 la précision sur la reconstruction du potentiel et réduire le biais de plusieurs ordres de grandeur.

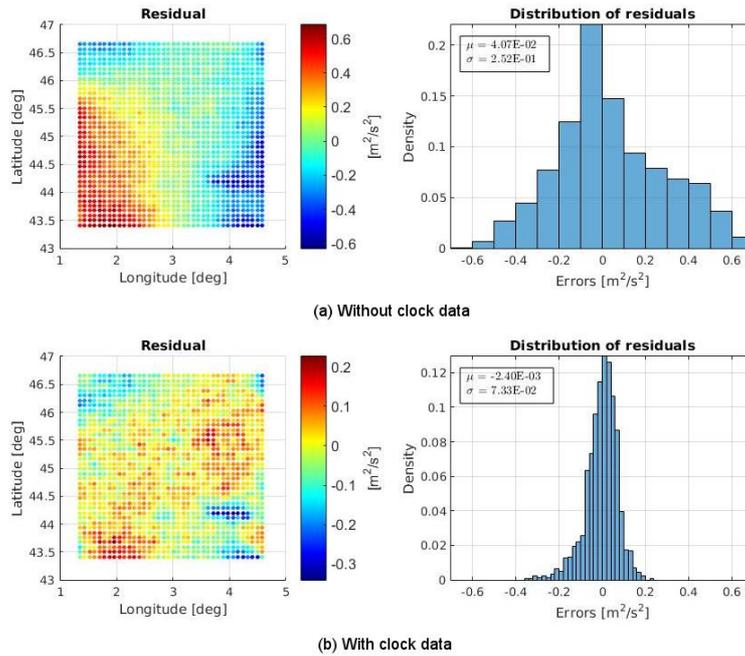


Figure 1: Performance de reconstruction du potentiel perturbateur T sur une grille régulière de maille 10 km de résolution sur le Massif Central, obtenu en comparant un modèle de référence et celui reconstruit. La figure (a) donne une estimation statistique des résidus à partir de 4374 données gravimétriques, et la figure (b) en ajoutant 33 données de type potentiel aux données gravimétriques. La précision des données gravimétriques a été fixée à 1 mGal et celle des données potentiel à $0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (soit 1 cm de hauteur de géoïde). μ et σ correspondent respectivement au biais et la déviation standard des résidus.

Participants au projet

| | |
|---------------------------|----------------|
| Georges Balmino | GET (Toulouse) |
| Sylvain Bonvalot | GET (Toulouse) |
| Anne Briais | GET (Toulouse) |
| Sean Bruinsma | GET (Toulouse) |
| Vincent Carrassus | GET (Toulouse) |
| Germinal Gabalda | GET (Toulouse) |
| Nicole Lestieu | GET (Toulouse) |
| Franck Reinquin | GET (Toulouse) |
| Lucia Seoane | GET (Toulouse) |
| Gilles Martelet | BRGM Orléans |
| Renaud Degoy | IGN/SGN |
| Alain Coulomb | IGN/SGN |
| Thierry Gattacceca | IGN/SGN |
| Thierry Person | IGN/SGN |

| | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Michel Diamant | IGN/LAREG |
| Olivier Jamet | IGN/LAREG |
| Guillaume Lion | IGN/LAREG |
| Emilie Ostanciaux | IGN/LAREG |
| Gwendoline Pajot-Metivier | IGN/LAREG |
| Marie-Françoise Lalancette | SHOM (Brest) |
| Didier Rouxel | SHOM (Brest) |
| Corinne Salaün | SHOM (Brest) |
| Nicolas Le Moigne | Univ. Montpellier (GM) |
| Jean-Daniel Bernard | EOST/Univ. Strasbourg |
| Jean-Paul Boy | EOST/Univ. Strasbourg |
| Reinhard Falk | BKG Frankfurt/Leipzig |
| Jacques Hinderer | EOST/Univ. Strasbourg |
| Herbert Wilmes | BKG Frankfurt/Leipzig |
| Harmut Wziontek | BKG Frankfurt/Leipzig |

3 - SYSTEMES DE REFERENCE et ROTATION DE LA TERRE

3.1. Système céleste (ICRS)

3.2. Rotation de la Terre

3.3. Repère international de référence terrestre (ITRF)

3.4. Centre de Combinaison

3.1. Système céleste (ICRS)

Introduction

Définir au mieux les systèmes de référence célestes à partir desquels s'effectuent les positionnements aussi bien des objets célestes que des satellites artificiels est un des objectifs majeurs de l'équipe « Systèmes de Référence Célestes » du SYRTE (dir. Jean Souchay). Celle-ci poursuit le développement de plusieurs thématiques de recherche associées à la géodésie spatiale : il s'agit du suivi au sol du satellite Gaia par le biais de GBOT (Ground Based Optical Tracking), de la construction d'un nouveau catalogue compilé de quasars par le biais du LQAC, enfin de la construction de la prochaine et troisième version de l'ICRF (International Celestial Reference Frame), à savoir l'ICRF3.

GBOT et le suivi de la sonde Gaia depuis 2012

Depuis le lancement de la sonde GAIA le 19 décembre 2012, une partie de l'équipe « Systèmes de Référence Célestes » du SYRTE s'implique à fond dans le suivi au sol de la sonde à l'aide de télescopes de taille moyenne (T2m) au sein du groupe GBOT (Ground Based Optical Tracking). Le GBOT est dirigé par S. Bouquillon (Astronome adjoint) et inclut au SYRTE F. Taxis (Assistant Ingénieur, titulaire d'un doctorat), T. Carlucci (Assistant Ingénieur Informatique) et C. Barache (Ingénieur de Recherche Informatique). Le but poursuivi est d'acquérir le savoir faire nécessaire à une observation optimisée de Gaia. Il est en effet impératif d'obtenir pour ce dernier une précision en positionnement de l'ordre de 100 m (à une distance de l'ordre de 10^6 km) et en vitesse de l'ordre de 2,5 mm/s. Très rapidement après le lancement de Gaia, il est apparu clairement que l'estimation d'une magnitude 18 en rouge pour la sonde Gaia en L2 était trop optimiste. La magnitude réelle observée depuis est en effet de 20.5 ± 0.5 . Les stratégies d'observation et leurs réductions ont dû être entièrement repensées. Ainsi trois télescopes ont été ajoutés : le VLT Chili de 2.61 mètres (qui fournit maintenant environ 80% des observations de Gaia) et les deux télescopes de 2.00 mètres Faulkes (Nord et Sud) du réseau LCOGT. Ces trois télescopes avec le Liverpool Telescope (de 2.00 mètres à La Palma) constituent l'essentiel du nouveau réseau qui permet d'obtenir, comme initialement prévu, des observations quasi quotidiennes de la sonde. La stratégie d'observation a dû être également repensée pour obtenir des images avec une qualité astrométrique suffisante. La récupération journalière des observations Gaia est maintenant en place ainsi que leur archivage (sur un serveur principal dédié au SYRTE ainsi que sur plusieurs serveurs de sauvegarde de l'Observatoire de Paris et sur un second serveur dédié à Heidelberg). La réduction des observations (une vingtaines d'images par jour) est à la charge de quatre personnes du SYRTE pré-citées. La méthode de réduction a également dû être modifiée du fait de la faible intensité de Gaia : en particulier les erreurs d'identification entre Gaia et les étoiles faibles augmentent et doivent être éliminées pour ne pas fausser les mesures. L'ensemble de ces observations ainsi que les paramètres et résultats de leurs réductions sont mis en base sur une base de données dédiée consultable par tous les membres du DPAC par web-access. Un aspect non-programmé et positif de la faible intensité de Gaia est la détection de beaucoup d'astéroïdes de magnitude faible dans les images GBOT. Du coup, un programme systématique de réduction astrométrique de ces astéroïdes tourne à plein régime avec plusieurs centaines d'objets détectés. Les observations sont ensuite réduites et envoyées au MPC (Minor Planet Center) pour validation. Ainsi parmi les astéroïdes observés, plusieurs centaines sont des découvertes et sont catalogués

comme de nouveaux objets quand leur suivi le permet (pour bien définir leurs caractéristiques orbitales).

Construction du LQAC (Large Quasar Astrometric Catalogue) avec Gaia

Les quasars sont les références par excellence dans l'espace : ils représentent des positions quasi-inertielles, autrement dit, ils ne sont pas sujets à des déplacements transversaux détectables, au contraire des étoiles. Leur étude est donc fondamentale pour l'astrométrie en particulier. Dans ce but nous avons décidé depuis 2009 de construire, avec des versions régulièrement réactualisées, un catalogue compilé de tous les quasars répertoriés avec une optimisation astrométrique, c'est-à-dire en donnant les valeurs les plus exactes et précises de leurs coordonnées équatoriales. De plus de nombreuses informations supplémentaires sont données dans ce catalogue : la cross-identification entre différents sous-catalogues, le redshift, les magnitudes optiques multi longueurs d'onde, les flux radio, les magnitudes absolues, des indices de morphologie etc... Nous avons appelé ce catalogue compilé LQAC (Large Quasar Astrometric Catalogue). En 2012 et 2015 nous avons ainsi construit successivement une seconde version du LQAC, le LQAC2 (Souchay et al., 2015), et une troisième version, le LQAC3 (Souchay et al., 2015). Ce dernier contient 321 957 objets. Une quatrième version, le LQAC4 est en cours de préparation, qui contiendra 443 725 quasars. Cette dernière version contient une information extrêmement intéressante : les coordonnées ultra-précises données par la sonde Gaia, à partir de la DR1 (Data Release 1) produite en septembre 2016. La construction du LQAC a aussi permis d'effectuer des études spécifiques d'ordre statistique sur la population de quasars connue (Gattano et al., 2014).

Etudes spécifiques sur les quasars

Les quasars sont pratiquement tous sujets à des variations de luminosité parfois importantes, sur des périodes de temps qui peuvent être de l'ordre du mois, de la semaine ou du jour. Caractériser ces périodes de variation de la manière la plus précise est important d'un point de vue cosmologique, car cela permet de contraindre les modèles astrophysiques sous-jacents. Dans cette perspective nous avons entrepris, sous le leadership de François Taris, d'observer de manière continue en optique des quasars de l'ICRF, donc sujets à la plus grande attention, pour établir leur fréquence de variabilité et l'amplitude de leur variation photométrique. Cette étude s'est effectuée à partir d'un réseau de télescopes dont certains sont robotiques. Des courbes de lumière ont ainsi pu être tracées et des résultats probants obtenus (Taris et al., 2013; Taris et al., 2016).

Une autre étude a fait l'objet partiellement de la thèse de César Gattano, soutenue à la fin de l'année 2016 : l'étude des différents échantillons de quasars choisis lors des observations VLBI sur les déterminations des EOP (Earth Orientation Parameters) donnant l'orientation de l'axe de rotation de la Terre dans l'espace et sur la Terre.

Construction de l'ICRF3

Le SYRTE est pleinement impliqué dans la construction de l'ICRF3 qui sera la prochaine version du Repère de référence céleste international. Deux de ses membres (S. Lambert & J.Souchay) font partie du nouveau Working Group UAI créée lors de l'Assemblée Générale de l'UAI (Honolulu, août 2015) à cet effet.

Participants au projet

| | |
|-----------------------------|----------------------|
| Jean Souchay | Obs. de Paris, SYRTE |
| François Taris | Obs. de Paris, SYRTE |
| Sébastien Bouquillon | Obs. de Paris, SYRTE |
| Sébastien Lambert | Obs. de Paris, SYRTE |
| Christophe Barache | Obs. de Paris, SYRTE |
| César Gattano | Obs. de Paris, SYRTE |

Prospective

La prospective de l'équipe va être centrée très prochainement sur des axes prioritaires :

- D'une part, la construction de l'ICRF3, troisième version du repère de référence céleste international, ainsi que des études s'y rattachant, comme celles de la variabilité astrométrique et photométrique des radios sources extragalactiques concernées.
- D'autre part, la continuation du LQAC (Large Quasar Astrometric Catalogue) en tenant compte des données Gaia déjà disponibles (DR1) ou à venir (DR2).
- De plus, dans le cadre de la CU9, trois membres de l'équipe auront pour tâche de vérifier les données de la DR2 concernant les quasars.
- Enfin, quatre membres de l'équipe sont hautement impliqués dans GBOT (Ground Base Optical Tracking) à savoir le suivi continu de la sonde Gaia jusqu'à l'horizon 2020.

3.2. Rotation de la Terre

Introduction

Au fil des années, la connaissance des variations de la rotation terrestre a revêtu un enjeu sociétal incontournable. Jusqu'à dans les années 1980, l'intérêt pratique de la rotation de la Terre était confiné aux irrégularités du temps universel – et donc de la vitesse de rotation - qui permettait de définir le temps légal et déterminer les longitudes à quelques dizaines de seconde de degré près.

Avec le développement des techniques de géodésie spatiale, notamment les systèmes de positionnement par satellite (DORIS et GNSS), précession-nutation et mouvement du pôle, présentant à la surface de la Terre des déplacements supérieurs au mètre, sont devenus tout aussi importants, car de nombreuses applications requièrent un positionnement précis au centimètre près.

A cette fin on doit suivre les oscillations du pôle géographique dans l'espace à 0.3 millisecondes de degré près (1 cm à la surface de la Terre) et celle du temps de la rotation de la Terre à 0.02 milliseconde près. Cette précision est couramment atteinte, en combinant essentiellement observations GNSS et VLBI. Le suivi est continu dans la mesure où ces variations sont en grande partie imprédictibles. Par ailleurs, les variations de la rotation terrestre, en manifestant les propriétés rhéologiques et structurelles de la Terre et les processus qui s'y déroulent, ont aussi un aspect fondamental. D'année en année, elles jettent un éclairage de plus en plus précis sur les couplages existant entre la Terre solide et ses parties fluides, qu'elles soient internes ou externes.

Nos activités associent à la modélisation des causes des fluctuations observées, l'impératif de l'observation et de ses applications pratiques. Depuis 2012, nous nous efforçons de renforcer nos compétences en matière de géodésie spatiale, tout en développant la modélisation géophysique. Les effets des marées luni-solaires sur une Terre rigide sont bien modélisés, et ne constituent plus notre intérêt immédiat, même si cette compétence demeure. Dans ce cadre, nous présentons nos travaux selon deux rubriques : 1) la mesure des variations de la rotation de la Terre ; 2) l'apport de celle-ci aux géosciences.

Mesure des variations de la Terre

Cette activité est développée dans le cadre de l'Earth Orientation Parameter Product Center (EOP PC) de l'IERS, chargé notamment de fabriquer les Paramètres de Rotation de la Terre (PRT) de référence internationale par combinaison a-posteriori des séries VLBI, GPS et SLR, et DORIS.

A l'occasion du passage à l'ITRF 2014, effectif à compter de février 2017, nous avons totalement révisé la procédure de combinaison : combinaison directe des écarts de nutation rapportées au modèle de nutation IAU 2000, pondération rigoureuse des séries, recalage des séries dans l'ITRF par élimination des biais estimés en fonction linéaire par morceau (Bizouard et al, 2017).

Si les corrections de la nutation ne sont pas cruciales pour les besoins pratiques compte tenu de l'excellence du modèle de précession-nutation, elles n'en demeurent pas moins précieuses pour comprendre les processus se déroulant à l'intérieur de la Terre, notamment dans le noyau fluide. César Gattano, dans sa thèse (2013-2016) dirigée par C. Bizouard et encadrée par S. Lambert, a complètement ré-estimé les termes de nutation luni-solaires, en particulier le terme en 18,6 ans, sur la base de 30 ans d'observations VLBI (1984-2016), en caractérisant leurs erreurs et l'effet de l'instabilité des sources du système céleste (Gattano et al 2016).

Dans le cadre de la combinaison multi-technique opérée par Jean-Yves Richard (Biancale et al 2013), sur la base du logiciel DYNAMO, J.Y. Richard, O. Becker, S. Lambert et C. Bizouard réalisent depuis 2015 une chaîne de traitement permettant de combiner les équations normales multi-techniques, non plus limitées à celle fournies par le logiciel GINS. Les premiers résultats, restreints à la combinaison GNSS-VLBI, sont cohérents et sont aussi précis que ceux des analyses intra-techniques. Ils ont été communiqués à l'AGU en 2016 (Richard, Lambert, Bizouard, Gambis, and Becker, Earth orientation parameters from VLBI and GNSS combined at the observation level).

Rotation de la Terre et géosciences

Depuis 2011, un grand effort théorique a été entrepris en reconsidérant les équations différentielles qui régissent les variations de la rotation terrestre en fonction des propriétés de la Terre et des excitations de nature géophysique ou astronomique. Notamment la théorie a été affinée en envisageant des effets asymétriques, comme ceux de la triaxialité terrestre et de la marée du pôle océanique (Bizouard et Zotov 2013). Puis, la comparaison usuelle de l'excitation géophysique aux variations de la rotation terrestre nous a amené à mettre en évidence trois phénomènes :

- l'excitation du terme de Chandler est modulée en une période de 20 ans environ (Zotov et Bizouard 2012),
- la marée lunaire influence la circulation atmosphérique diurne sur une bande s'échelonnant entre 25h et 30 h, en provoquant notamment des variations hydrostatiques de la pression atmosphérique (Bizouard et al 2014),
- la variation de moment cinétique équatoriale au-delà de deux jours dans la Terre, et procédant des effets hydro-atmosphériques, est polarisée elliptiquement vers 80°Est (Bizouard 2015).

Dans cette recherche, on s'intéresse de plus en plus aux processus à plus long terme qui affectent la Terre, en premier lieu les tendances climatiques aux échelles décennales et séculaires. Des études antérieures avaient rapporté l'existence d'oscillations en 70 ans dans la longueur du jour mesurée depuis 150 ans ainsi que dans des indicateurs climatiques tels la température de surface ou la température globale de la surface des mers. Zotov et al (2016) et Lambert et al (2016) ont, outre confirmé les corrélations, montré la possible existence d'une oscillation similaire affectant l'amplitude du terme de Chandler et ont pointé les régions océaniques où le signal s'avère fort.

Signalons aussi la réunion d'un « Atelier moment cinétique atmosphérique » en 2012, destiné à réaliser une synergie entre astronomes et météorologues français.

Evolution du personnel (promotion, distinction, recrutement, prise de responsabilité) dans la période 2012-2016 dans l'équipe « rotation de la Terre et géodésie spatiale » :

Permanent :

- Christian Bizouard, astronome adjoint, directeur de l'IERS EOP-PC (2015-), chef de l'équipe « Rotation de la Terre et géodésie spatiale » (2015-), scientifique principal des IERS conventions (2016-), membre du Comité Scientifique du GRGS depuis 2012
- Pascal Bonnefond, astronome, a intégré l'équipe en 2015
Sébastien Lambert, astronome-adjoint, membre du Comité exécutif du GRGS depuis 2015, adjoint au scientifique principal des IERS conventions, médaille de bronze du CNRS en 2014
- J.Y. Richard, promu IR1 CNRS en 2016
- Teddy Carlucci, promu ingénieur d'étude en 2015, ingénieur système
- Olivier Becker, Technicien MEN, service opérationnel, programmation
- Pascale Baudoin, Adjointe-administrative, Rectorat, secrétaire
- Daniel Gambis, Astronome, retraité en 2015
- Nicole Capitaine, Astronome, émérite depuis 2013

Non-permanent :

- César Gattano (2013-2016), doctorant (direction : Bizouard/Lambert),
- Ibnu Nurul Huda (2016-), doctorant (direction : Bizouard/Lambert)
- Yann Ziegler (2016-), Post-doc (direction : Lambert)

Prospective

- Nous venons de débiter la détermination des propriétés géophysiques internes par analyse VLBI, ou tout au moins l'amélioration des contraintes sur les paramètres y afférant. A cette fin un post-doc (Yan Ziegler) et un doctorant (Ibnu Nurul Huda) ont été engagés en octobre 2016 pour travailler sur deux méthodes originales : l'une intégrant l'analyse simultanée des nutations des mesures de gravité de surface, l'autre ayant pour but l'estimation directe des paramètres géophysiques sur les retards VLBI, sans passer par l'estimation intermédiaire des angles et des amplitudes de nutation.
- Nous poursuivons l'étude des interactions entre le climat et la rotation terrestre aux échelles interannuelles (interactions entre les diverses oscillations climatiques et la rotation terrestre via les approches moment cinétique et moment de force) et multi-décennales (tentative de construction d'un scénario expliquant le lien entre les oscillations multi-décennales constatées dans le climat, la rotation de la Terre, le noyau et le champ magnétique).
- Nous approfondissons l'étude des effets océaniques. L'intégration de P. Bonnefond dans notre équipe en 2015 renforce notre compétence « couche fluide ». La prédiction du mouvement du pôle à partir des prévisions des transports océaniques sur une dizaine de jours est envisagée. Un atelier « Moment cinétique océanique », rassemblant astronomes et communauté océanographique, planifié à l'Observatoire

de Paris en 2017, permettra d'affiner cette prospective et de renforcer les coopérations existantes, notamment avec MERCATOR OCEAN.

- Nous poursuivons le développement de la combinaison multi-technique au niveau des équations normales. L'intégration des observations SLR et DORIS est planifiée dans un avenir proche. Disposant ainsi d'un traitement équivalent à celui de CATREF, nous envisageons de réaliser des solutions opérationnelles des paramètres de rotation de la Terre, afin maintenir la série C04 de référence dans le système terrestre.

Participants au projet

| | |
|---------------------------|------------------------------|
| Daniel Gambis | Observatoire de Paris, SYRTE |
| Christian Bizouard | Observatoire de Paris, SYRTE |
| Jean-Yves Richard | Observatoire de Paris, SYRTE |
| Teddy Carlucci | Observatoire de Paris, SYRTE |
| Olivier Becker | Observatoire de Paris, SYRTE |
| Pascale Baudoin | Observatoire de Paris, SYRTE |

3.3. Repère international de référence terrestre (ITRF)

Introduction

Comment la Terre se déforme-t-elle sous l'effet de la dérive des continents, des phénomènes sismiques, de la fonte des calottes glaciaires, des phénomènes de surcharge des enveloppes fluides de la Terre ? Quelle est la vitesse de la montée du niveau de la mer ? Comment déterminer la position d'un point à la surface d'une Terre en constante déformation ? Les réponses à ces questions fondamentales pour la compréhension de la dynamique de notre planète rendent nécessaire la mise à jour du repère international de référence terrestre (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) dont la réalisation est confiée à l'équipe de recherche sur les systèmes de référence au sein du Laboratoire de recherche en géodésie de (LAREG), l'IGN. Les publications citées en annexe, et en particulier la plus récente publiée en 2016 sur l'ITRF2014, mettent en évidence notre savoir-faire dans la détermination de l'ITRF, mais aussi et surtout les éléments de réponse qu'apporte notre activité de recherche aux questions scientifiques en science de la Terre. Nos publications décrivent également notre approche mathématique et physique, et son amélioration au cours du temps, de la combinaison de repères de référence terrestres individuels issus de traitement des quatre techniques principales de géodésie spatiale, à savoir l'interférométrie à très longue ligne de base (VLBI: Very Long Baseline Interferometry), la télémétrie laser sur satellite (SLR : Satellite Laser Ranging), les techniques GNSS (Global Navigation Satellite Systems) et la technique Française DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite).

Les recherches menées par l'équipe sur la théorie et réalisation des systèmes de référence en général, et sur le référentiel international ITRF en particulier, s'inscrivent dans la mission de l'IGN d'entretien des références géodésiques au niveau national, européen et international.

Par l'intermédiaire de deux résolutions, un système de référence unifié à vocation scientifique, en l'occurrence le système international de référence terrestre (ITRS : International Terrestrial Reference System), a été adopté formellement par l'Union Géodésique et Géophysique Internationale comme référence pour les applications en sciences de la Terre et en navigation satellitaire. Il en découle que ses réalisations numériques, appelées ITRF (International Terrestrial Reference Frame) sont elles aussi recommandées. Un logiciel de combinaison appelé CATREF (Combination and Analysis of Terrestrial REference Frames), basé sur un modèle physique faisant intervenir une similitude euclidienne à 14 paramètres, a été développé à cet effet depuis une quinzaine d'années et entretenu régulièrement pour tenir compte de l'évolution des connaissances dans le domaine des systèmes de référence. Douze versions de l'ITRF ont été publiées depuis le début des activités de l'IERS en 1988. La version ITRF2014 publiée en 2016 met en évidence les innovations que nous avons apportées dans la modélisation des phénomènes non-linéaires affectant le réseau des stations géodésiques de l'ITRF, à savoir les mouvements périodiques induits par les effets de surcharge et les déformations co- et post-sismiques.

L'adoption de l'ITRF comme référence en science de la Terre et pour la détermination d'orbites précises (à la fois pour les systèmes de navigation GNSS et les satellites altimétriques) se traduit par un nombre de citations considérable pour ce domaine dans les articles scientifiques. Selon Google Scholar (Février 2017), l'article présentant l'ITRF2000 a été

cité 1010 fois, et ceux de l'ITRF2005 et l'ITRF2008 respectivement 971 et 803 fois. L'article JGR sur l'ITRF2014 publié en juillet 2016 a été quant à lui cité 11 fois.

Le thème central des activités de recherche et de service scientifique liées à l'ITRF est l'amélioration de son exactitude en termes de définition du repère : origine, échelle, orientation et évolution temporelle. En parallèle à la détermination de l'ITRF, d'autres travaux de recherche sont également entrepris sur des thèmes scientifiques, tels que le mouvement du géocentre, les effets de surcharge, ou encore le rebond postglaciaire. Ce chapitre résume les principales activités de recherche et de développement pour l'élaboration de l'ITRF et l'exploitation de ses résultats, durant la période 2012-2016. Nous rappelons brièvement les points marquants de chaque année, et mettons l'accent sur les résultats les plus récents obtenus en 2015-2016.

2012

Les points marquants de l'année 2012 sont les publications de 4 ACL sur : l'estimation d'un modèle de mouvement de plaques tectoniques issu du champ de vitesses ITRF2008 et cohérent avec celui-ci (Altamimi et al., 2012) ; l'estimation et l'observation des variations de forme de la Terre de grande échelle à partir des vitesses verticales GNSS du repère ITRF2008 : contribution au rebond postglaciaire et à la fonte des glaces actuelle (Métivier et al., 2012) ; les stratégies pour atténuer l'aliasing des effets de surcharge lors de l'estimation des paramètres du repère GPS (Collilieux et al., 2012) ; et l'évaluation des vitesses verticale GNSS de l'ITRF2008 via les corrections des centres de masse des antennes des satellites GNSS (Collilieux et Schmid, 2012).

2013

L'année 2013 a été consacrée aux activités R&D suivantes :

- **L'écriture de spécifications d'une nouvelle solution ITRF, ITRF2013** qui n'a pas vu le jour et qui a été remplacé par l'ITRF2014 deux ans plus tard ;
- **Analyse des effets de surcharge atmosphérique sur l'ITRF**, via un appel à participation de contribution des quatre techniques pour solliciter la fourniture de solutions avec et sans correction des effets de surcharge atmosphérique au niveau des observations. Cette activité a été poursuivie en 2014 ;
- **Travaux de thèse de Thèse Paul Reibischung :**
L'année 2013 a été consacrée à l'étude de la détermination des mouvements du géocentre par GNSS. Un « état de l'art » a tout d'abord été réalisé en comparant les séries temporelles de mouvements du géocentre tirées des solutions de différents centres d'analyse de l'IGS entre elles, à des résultats SLR ainsi qu'à des modèles géophysiques. Les limites actuelles de la restitution des mouvements du géocentre via la dynamique des orbites GNSS ont ainsi été mises en évidence.
- **Travaux de thèse de Daphné Lercier :**
Etudier la façon la plus appropriée de paramétrer ou modéliser les grands séismes dans le calcul de l'ITRF.

2014

L'année 2014 a été consacrée aux activités R&D suivantes :

- **Préparation d'une nouvelle solution de l'ITRF (ITRF2014) :**

Nous avons conduit un certain nombre de développements et d'analyses en préparation de l'ITRF2014, visant à améliorer la précision et l'exactitude du repère international, via l'estimation de termes périodiques (par exemple annuels, semi-annuels et les sous-multiples des périodes draconitiques pour GPS ou DORIS). A cette fin, le logiciel CATREF a été modifié pour inclure des termes périodiques de nombre et de périodes à définir par l'utilisateur. Dans une première application, nous avons analysé la série opérationnelle de coordonnées hebdomadaires des stations IGS, couvrant la période de 1994 à 2013. La figure 1 montre les périodogrammes cumulés des résidus de coordonnées des stations issus de 6 solutions GPS : solution standard sans estimation de termes saisonniers ; suivie des solutions avec fréquences annuelle et semi-annuelle ; puis avec les harmoniques de la fréquence draconitique GPS : 1ère et 2ème ; 4ème, 3ème et 6ème et enfin les 7 premières harmoniques. Cette figure montre d'une part l'amplitude des signaux périodiques en question et d'autre part la capacité du nouveau modèle de cumul des séries temporelles à s'affranchir de ces signaux périodiques pour mieux estimer les vitesses.

- **Soutenance de thèse Paul Rebischung :**

La première moitié de l'année 2014 a été consacrée à finalisation de la thèse. La thèse met en évidence les limites actuelles de la restitution des mouvements du géocentre via la dynamique des orbites GNSS. Le travail de thèse qui a été entrepris consistait à chercher de comprendre l'origine de ces limites. Des outils couramment utilisés en économétrie pour diagnostiquer les relations de « multicollinéarité » entre les paramètres d'un modèle ont pour cela été adaptés aux particularités de l'analyse GNSS. L'application de ces outils a révélé une colinéarité extrême des trois coordonnées du géocentre avec les autres paramètres GNSS, principalement les décalages d'horloges des satellites et les paramètres troposphériques. Le mécanisme qui rend les mouvements du géocentre quasi-invisibles dans les solutions GNSS a ainsi pu être expliqué. Paul Rebischung a soutenu sa thèse avec succès le 13 juin 2014.

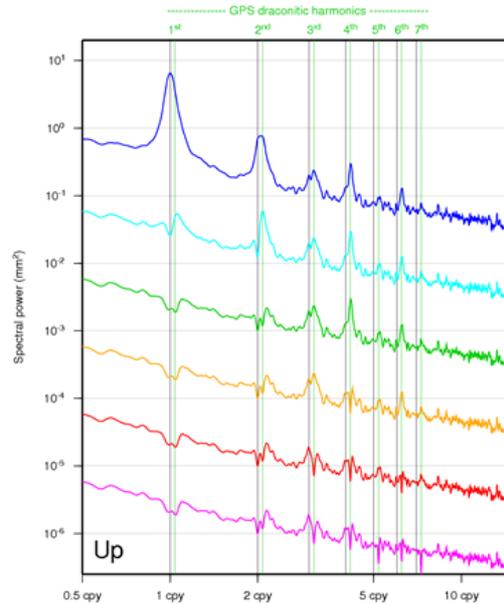


Figure 1. Périodogrammes cumulés des résidus de coordonnées des stations IGS. De haut en bas : solution standard sans estimation de termes saisonniers, suivie des solutions en estimant les fréquences annuelle + semi-annuelle et en y ajoutant les harmoniques de la fréquence draconitique GPS : 1ère et 2ème ; 4ème, 3ème et 6ème et enfin les 7 premières harmoniques.

- **Soutenance de thèse de Daphné Lercier :** L'objectif du travail était de fournir aux utilisateurs des coordonnées plus exactes à un horizon de 5 ans après la publication des coordonnées de l'ITRF. Différentes alternatives ont été étudiées, basées sur la construction de modèles géophysiques partiellement contraints par géodésie spatiale ou bien sur des modèles statistiques basés principalement sur les données GPS (fonctions paramétriques combinant logarithmes et exponentielles pour décrire le déplacement des stations). Différentes combinaisons de fonctions ont été proposées et évaluées à l'aide de critères statistiques. Les modèles estimés par GPS ont été également confrontés aux données VLBI et SLR. Daphné Lercier a soutenu sa thèse le 1er décembre 2014.
- **Déplacements co-sismiques et séries temporelles de positions de stations GPS :** Une étude approfondie sur l'impact des déformations co-sismiques accumulées depuis deux décennies sur les séries temporelles de positions de stations GPS a été conduite. Elle a mis en évidence que la déformation accumulée peut atteindre 10 cm localement, et qui est due non seulement aux grands séismes, mais aussi à l'accumulation de plusieurs déplacements provoqués par des séismes de faibles magnitudes. Cette investigation a fait l'objet d'une publication JGR (Métivier et al., 2014) et servira pour la détection de discontinuités des séries temporelles des solutions soumises à l'ITRF2014.

2015-2016

La période 2015-2016 a été entièrement consacrée aux analyses des données soumises à l'ITRF2014, au calcul final et publication de l'ITRF2014 en janvier 2016. Nous rappelons ici que les deux grandes nouveautés qu'a apportées la nouvelle version de l'ITRF par rapport aux précédentes versions sont d'une part l'estimation de termes périodiques (par exemple annuels, semi-annuels), et d'autre part, la modélisation des déformations post-sismiques des sites subissant des grands tremblements de Terre.

- **Effets de surcharges et mouvements périodiques :**

L'estimation des termes périodiques vise à déterminer des vitesses de stations plus fiables, et par conséquent améliorer la précision de l'ITRF. De plus, le signal saisonnier estimé pour l'ensemble des sites ITRF reflétera, au moins pour partie, le mouvement de la croûte terrestre sous l'effet de diverses charges et constituera ainsi un produit scientifique précieux. Dans une première application, nous avons estimé les termes annuels et semi-annuels des stations incluses dans les solutions soumises à l'ITRF2014 des quatre techniques. Les résultats de ces analyses montrent la capacité du nouveau modèle de cumul des séries temporelles à s'affranchir de ces signaux périodiques pour mieux estimer les vitesses. A titre d'illustration, la figure 2 montre la série temporelle des résidus de la station GPS de Porto Velho (Brésil), avant (gauche) et après (droite) estimation des termes annuels et semi-annuels.

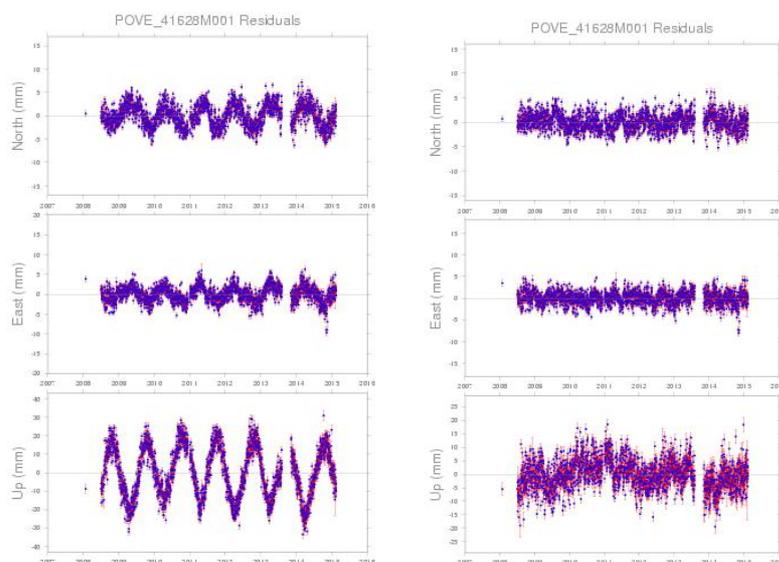


Figure 2. Série temporelle des résidus de la station de Porto Velho (Brésil) avant (gauche) et après (droite) estimation des termes annuels et semi-annuels.

- **Déformations co- et post-sismiques :**

Les travaux que nous avons réalisés sur les déformations co-sismiques (Métivier et al, 2014) ont été mis à profit pour la détection des discontinuités dans les séries temporelles des différentes solutions soumises pour la construction de l'ITRF2014.

Par ailleurs, la modélisation des déformations post-sismiques des sites ITRF sujets à des tremblements de Terre majeurs devient indispensable si l'on vise à améliorer la précision du repère à travers les positions et vitesses des stations. Bien qu'il existe des modèles

géophysiques de modélisation des déformations post-sismiques, nous optons pour une modélisation du phénomène par des fonctions paramétriques qui ont la propriété de s'adapter aux observations collectées par les stations elles-mêmes, et dont on souhaite caractériser précisément le mouvement. Une modélisation phénoménologique nous paraît donc plus appropriée, permettant ainsi de s'affranchir de l'impact des données géophysiques sur l'ITRF.

Parallèlement aux mises à jours du logiciel CATREF et son modèle de combinaison, nous avons validé et finalisé le développement d'outils de modélisation des déformations post-sismiques et les avons appliqués aux stations de l'ITRF2014 impactées par des tremblements de Terre majeurs. Ces outils sont basés sur cinq modèles différents : fonction linéaire par morceaux, et quatre modèles paramétriques (logarithme, exponentielle, logarithme + exponentielle, et deux exponentielles). A titre d'illustration, la figure 3 montre la série temporelle de coordonnées de la station d'Arequipa (Pérou) où la déformation post-sismique a été modélisée par des modèles paramétriques. Cette figure montre bien la supériorité des modèles paramétriques à modéliser et capturer la déformation post-sismique, par rapport aux fonctions linéaires par morceaux utilisés dans le passé. Il nous faut cependant raffiner ces modèles à l'avenir et les mettre à jour en continu, au fur et à mesure que les observations s'accumulent au cours du temps.

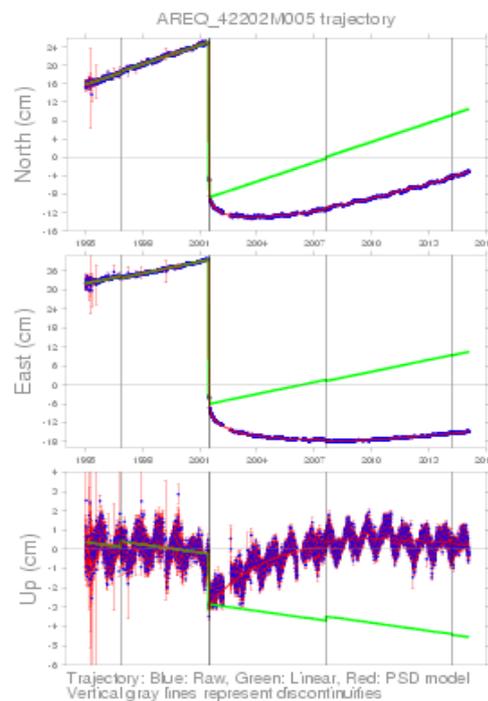


Figure 3. Trajectoire de la station GNSS d'Arequipa (Pérou) sur les trois composantes (nord-sud, est-ouest et verticale). En bleu : série brute, vert : vitesse linéaire, rouge : modèle paramétrique

- **Publication de l'ITRF2014 dans Journal of Geophysical Research (JGR) :**

Un article en « open access » a été publié dans JGR en juillet 2016 sur les résultats géodésiques et géophysiques de l'ITRF2014 et est accessible ici :

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JB013098/full>

Editors' Highlight—

This manuscript describes the data and analysis process for generating the next release of the International Terrestrial Reference Frame 2014. Many multi-disciplinary studies rely on the ITRF for providing information that underpins studies of sea level, crustal deformation, earthquakes, polar mass balance changes, satellite orbits etc. This release of ITRF2014 incorporates, for the first time, the non-linear motion of the surface of the Earth caused through post-seismic relaxation after earthquakes. ITRF is one of the most important products of modern geodesy and the release of ITRF2014 to the community will be a significant step forward.

- **Promotion de l'ITRF :**

Dans le cadre de l'initiative des Nations Unies, appelée GGIM (Global Geospatial Information Management), le groupe de travail sur le Repère de Référence Géodésique Global, et dans lequel Z. Altamimi représente la France, a présenté un projet de texte de résolution à soumettre à l'Assemblée Générale des Nations Unies à la 4ème session du groupe d'experts UN-GGIM qui s'est tenue à New York en Août 2014. Le projet de résolution a été approuvé par le conseil économique et social de l'ONU qui l'a ensuite soumis à l'assemblée générale des nations unies pour adoption finale. La résolution adoptée en février 2015 prend acte de la résolution de la dix-neuvième conférence cartographique des Nations Unies pour l'Asie et le Pacifique qui a appelé à promouvoir et à appuyer l'adoption du Repère international de référence terrestre (ITRF) comme référentiel de base. Elle souligne les résultats extraordinaires accomplis par les communautés géodésiques internationales, en se fondant sur les initiatives de l'Association internationale de géodésie qui représente la communauté géodésique mondiale, pour évaluer et suivre les changements de notre planète sur la base des meilleurs efforts, notamment en concevant l'ITRF aujourd'hui adopté.

Prospective

En préparation d'une solution ITRF future, il serait nécessaire d'approfondir notre compréhension des signaux périodiques dans les séries de coordonnées des stations des quatre techniques. En effet, les analyses des données en entrée de la construction de l'ITRF2014 ont montré une grande disparité et incohérence entre les termes périodiques des différentes techniques. Une analyse plus fine des séries disponibles sera donc conduite, comprenant la séparation des effets géophysiques et erreurs systématiques, telles que les termes draconitiques des techniques satellitaires GNSS et DORIS, et la confrontation aux modèles de surcharge atmosphérique, océanique et hydrologique, ou encore des données GRACE.

Participants au projet

| | |
|--------------------------|-----------|
| Zuheir Altamimi | IGN/LAREG |
| Paul Rebischung | IGN/LAREG |
| Laurent Metivier | IGN/LAREG |
| Xavier Collilieux | IGN/LAREG |

3.4. Centre de combinaison

Introduction

Les paramètres de la rotation de la Terre (EOP: Earth orientation Parameters) sont à l'heure actuelle déterminés indépendamment des systèmes de référence céleste (Celestial Reference Frame ou CRF) et terrestre (Terrestrial Reference Frame ou TRF). Cette méthode présente d'une part l'inconvénient de combiner des séries temporelles dont la cohérence au sens géodésique n'est pas assurée avec exactitude et d'autre part, les solutions EOP et du TRF divergent avec le temps.

La nouvelle méthode consiste à déterminer simultanément au niveau des observations les systèmes de référence terrestre et rotation de la Terre (dans un premier temps le système céleste CRF n'est pas concerné). Les techniques astro-géodésiques utilisées en dynamique terrestre sont le VLBI (interférométrie à longue base sur quasars), SLR, LLR (télémétrie laser sur satellites et sur la Lune), GNSS (systèmes de navigation GPS, GLONASS, GALILEO) et DORIS. Les données des diverses techniques de géodésie spatiale sont traitées par un logiciel unique GINS (Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées), développé et maintenu au GRGS depuis 1965. L'intérêt est d'appliquer les mêmes constantes et modèles pour éliminer les possibles causes de systématisme dans les résultats.

Les équations normales issues de ces traitements sont alors manipulées, réduites, pondérées et inversées à l'aide du package DYNAMO (DYNAMique des Orbites) qui est utilisé au GRGS par ailleurs pour le calcul des champs de gravité. Cette méthode donnant la combinaison globale EOP+TRF devrait dans l'avenir remplacer la méthode courante fournissant les séries temporelles EOP. Pour la rotation de la Terre, la complémentarité des techniques permet de densifier les séries du pôle, du temps universel et de la nutation, ce qui est fondamental pour les utilisateurs des produits de l'IERS. Une autre application de cette méthode est d'acquérir une meilleure connaissance dans le domaine de l'étude de la variabilité de la rotation de la terre et en particulier pour les variations diurnes et sub-diurnes d'origine océanique.

La détermination des paramètres de rotation de la Terre à intervalle de quelques heures permettra une meilleure connaissance des variations de la rotation de la terre sur des échelles de temps sub-diurne. Les modèles océaniques actuels s'appuyant sur les marées océaniques sub-diurnes, sont relativement inexacts et pourraient être améliorés. On peut penser que des variations brusques et épisodiques dues à des phénomènes géophysiques (impulsions dues aux séismes) pourraient également être mises en évidence.

Ce programme se développe dans le cadre d'une coopération avec diverses équipes françaises dont plusieurs sont au GRGS (CNES/Toulouse, Observatoire de Paris, OCA/GEMINI, LAREG/IGN) ainsi qu'aux CLS/Toulouse et à l'Observatoire de Bordeaux. Sur le plan international ce projet s'est déroulé dans le cadre d'un groupe de travail COL (Combination at the Observation Level) de l'IERS débuté en octobre 2009 et clôturé en février 2016 et regroupant les laboratoires AIUB (Astronomical Institute of the University of Bern), ASI (Italian Space Agency), DGFI (German Geodetic Research Institute), ESOC (European Space Operations Centre), GFZ (German Research Centre for Geosciences), GRGS, GSFC (Goddard Space Flight Center), JPL (Jet Propulsion Laboratory, NASA), OPA (VLBI Center of the Paris Observatory), TUW (Vienna University of Technology (TU Vienna)).

Nous présentons l'avancement de ce projet dans le groupe de travail COL de l'IERS et de son prolongement dans le cadre du laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris.

Faits marquants

Dans le cadre du groupe de travail COL de l'IERS, une série de tests des combinaisons multi technique au niveau des équations normales a été engagée sur les périodes étendues à 3 semaines des campagnes de mesures VLBI CONT08 et CONT11. Ces tests se sont déroulés en 2012 et 2013. Dans la perspective d'échanges entre partenaires du groupe de travail COL, nous avons mis en place et animé un FORUM de discussion sur les combinaisons <http://grgs.obspm.fr/forum/index.php>, ainsi que créé un site web sur les combinaisons des observations géodésiques : <http://hpiers.obspm.fr/combinaison/>.

En réponse à l'appel d'offre de l'IGN concernant la réalisation du nouveau référentiel terrestre ITRF2014, l'équipe du GRGS a engagé une campagne de comparaison des solutions obtenues par combinaison des observations aux solutions de ce futur référentiel terrestre, sur une période s'étalant de janvier 2002 à décembre 2013.

Ces développements ont été réalisés de 2014 à février 2016. Nous avons fourni une combinaison des équations normales hebdomadaires des techniques DORIS, SLR des satellites Laser et des satellites DORIS comportant des réflecteurs Laser, GNSS et VLBI couvrant la période 2002-2013. L'ensemble des fichiers SINEX équations normales hebdomadaires combinées non contraintes ont été déposées sur site ftp, destinées à la comparaison avec les solutions de l'ITRF2014. Une présentation des solutions globales (CRF, TRF, EOP) lors de la réunion de clôture du projet COL (19 février 2016, Francfort) a permis de valider l'ensemble des traitements développés dans ce cadre.

Différents traitements réalisés sur des équations normales des techniques de géodésie spatiale (GNSS, DORIS, SLR, VLBI) ont été implémentés dans le logiciel DYNAMO du CNES, lors de ces campagnes. Voici les principaux, lesquels sont réutilisables pour de futurs travaux:

Contraintes d'affranchissement des systématismes sur l'ensemble des stations de chaque technique avant combinaison

Chaque technique pris en compte dans la combinaison présente des défauts de rang, l'orientation pour les techniques satellitaires (3 rotations) et l'orientation et l'origine pour le VLBI (3 rotations et 3 translations). Tandis que les techniques satellitaires sont sensibles à la translation et au facteur d'échelle, la technique VLBI est seulement sensible au facteur d'échelle. En conséquence, ce sont les paramètres de translations et facteur d'échelle qui absorbent les systématismes des techniques satellitaires, et le paramètre facteur d'échelle qui absorbe le systématisme de la technique VLBI.

L'application de ces paramètres supplémentaires a été testée sur les stations utilisées dans les campagnes CONT08 et CONT11. Ces paramètres de systématismes estimés lors de ces campagnes sont millimétriques pour les translations et de 1ppb pour le facteur d'échelle, ce qui montre que les positions de stations estimées sont dans le référentiel terrestre a priori utilisé (ITRF2008).

Contraintes de rattachement des stations de différentes techniques Co-localisées

Afin de lier les techniques lors de la combinaison, on introduit des contraintes de rattachements entre stations terrestres de différentes techniques localisées sur un même site géographique (quelques km). Cette technique de rattachement consiste à introduire les contraintes entre stations co-localisées et former les équations de contrainte à chaque date t considérée. Ainsi entre les stations co-localisées 1 and 2:

$$X_2(t) - X_1(t) = \Delta_{21}(t)$$

Avec les écarts Δ_{21} sur les trois coordonnées (x,y,z) fournis et maintenus par l'IGN.

Contraintes de non rotation globale du système de référence céleste

L'algorithme pour assurer la non rotation globale du système de référence céleste (NNR) a été développé et appliqué aux coordonnées des radio-sources extragalactiques (quasars) dont les paramètres (α, δ) ascension droite et déclinaison, sont présents dans les équations normales de la technique VLBI.

Affranchissement du terme rétrograde diurne lors de la détermination sub-diurne des paramètres d'orientation de la Terre

Dans les campagnes de test des périodes CONT08 et CONT11 le mouvement du pôle de rotation (x,y) et du temps universel (UT1) sont estimés toutes les 3 heures. Cet échantillonnage induit une oscillation rétrograde diurne sur le mouvement du pôle dont il faut s'affranchir pour ne conserver que les mouvements effectifs du pôle de rotation par rapport à la croûte terrestre. Pour retirer cet artefact nous avons introduit dans le logiciel DYNAMO, une contrainte d'annulation de cette oscillation. (voir détails dans le rapport 2013).

Pondération optimale des équations normales

Cette partie a fait l'objet d'une étude par un stagiaire M1 laquelle a permis de valider le choix de la technique d'analyse de la variance d'Helmert, déjà implémentée dans le logiciel DYNAMO.

Forçage des EOP à leurs valeurs initiales

Pour annuler l'influence des mesures des paramètres d'orientation de la Terre (ERP) faites en dehors des intervalles d'une semaine traitée et présents dans les équations normales, une contrainte a été introduite visant à forcer les paramètres extérieurs à leurs valeurs a priori.

Contrainte de linéarité journalière des EOP

Afin de restituer une mesure journalière des EOP donnés toutes les 6h pour les techniques DORIS, SLR, VLBI ou GNSS, nous avons introduit une contrainte de linéarité sur l'intervalle [0h-24h], pour fournir un point par jour à 12h. Cette contrainte permet d'effectuer une combinaison des techniques avec l'ensemble des EOP échantillonnés à midi.

Conversion de fichiers SINEX au format GINS et inversement

Plusieurs compléments ont été développés sur les conversions: fichiers Sinex solutions journalières GNSS du GRGS en fichiers SINEX équations normales pour les traitements sous logiciel DYNAMO. Introduction de nouveaux paramètres GINS dans le format SINEX.

Traitement de la technique DORIS

Cumul hebdomadaires des équations normales de l'ensemble des satellites DORIS.

Depuis mars 2016 : Travaux dans le cadre du laboratoire SYRTE de l'observatoire de Paris

- Analyse des solutions EOP des équations normales VLBI du GRGS sur la période 2002-2013 pour valider l'utilisation de ces équations normales issues du logiciel GINS-DYNAMO.
- Extraction des équations normales de la technique VLBI de l'IVS-OPA par traitement des fichiers SINEX solutions, sessions R1 /R4, de 2002 à 2016.

Développements dans DYNAMO de traitements spécifiques :

- Mise à jour des valeurs initiales des paramètres de rotation de la Terre dans les équations normales.
- Fonction moyenne hebdomadaire de stations observées sur une base journalière.
- Application de la contrainte d'affranchissement des systématismes des techniques sur un réseau de stations de référence sélectionnées
- Traitement des équations normales VLBI seules, GNSS seules et Combinaison des équations normales GNSS du GRGS et VLBI OPA de l'IVS pondérée par algorithme d'Helmert sur une base hebdomadaire, étendue à la période janvier 2002 à décembre 2013, analyse des solutions EOP, des coordonnées de stations en coordonnées cartésiennes (x,y,z) et coordonnées topographiques (E,N,U) , estimations des systématismes et des paramètres de transformations du référentiel de chaque technique par rapport au référentiel ITRF2008 et présentation des résultats au congrès international AGU2016.

Conclusion

La combinaison au niveau des équations normales des techniques DORIS, GNSS, SLR/LLR, VLBI développée par le GRGS dans le cadre du groupe de travail COL de l'IERS a atteint un degré de maturité permettant d'envisager une utilisation opérationnelle et des analyses scientifiques des paramètres géodésiques estimés. En particulier, l'estimation des paramètres de rotation de la Terre simultanément au référentiel terrestre montre une bonne cohérence avec les référentiels actuellement en vigueur (EOP, ITRF2008, ICRF2). Depuis la clôture du groupe COL survenu le 19 février 2016 au BKG de Francfort, le service rotation de la Terre du SYRTE a repris l'acquis de cette activité au profit d'une utilisation spécifique aux paramètres dont il a la charge.

Prospective

- Développer une chaîne de traitements opérationnels qui combinent, sur une base hebdomadaire, les techniques de géodésie spatiale GNSS, SLR, DORIS et de la technique d'interférométrie à large base VLBI à partir des fichiers SINEX solutions intra-technique

issues des centres de combinaison respectivement IGS, ILRS, IDS et IVS, pour estimer les paramètres de rotation de la Terre (coordonnées de pôle dans le référentiel terrestre (x,y), dans le référentiel céleste (dX,dY), UT1, LOD) et les coordonnées de stations.

- La poursuite de ces combinaisons au niveau des observations est également en cours dans le cadre du projet GEODESIE de l'IGN/LAREG qui s'étend sur 2017-2020.

Participants au projet

Pour le traitement et analyses des données des techniques de géodésie spatiale :

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Sylvain Loyer | CLS/Toulouse (GPS) |
| Laurent Soudarin | CLS/Toulouse (DORIS) |
| Géraldine Bourda | Obs. de Bordeaux (VLBI) |
| Patrick Charlot | Obs. de Bordeaux (VLBI) |
| Florent Deleflie | Obs. de Paris/IMCCE (SLR) |
| Olivier Laurain | OCA/Géoazur (SLR) |
| Jean-Charles Marty | CNES/GS (LLR) |
| Gérard Francou | Obs. de Paris/SYRTE |

Combinaisons finales et analyses :

| | |
|----------------------------|---------------------|
| Daniel Gambis | Obs. de Paris/SYRTE |
| Jean-Yves Richard | Obs. de Paris/SYRTE |
| Christian Bizouard | Obs. de Paris/SYRTE |
| Teddy Carlucci | Obs. de Paris/SYRTE |
| Richard Biancale | CNES/GS/Toulouse |
| Jean-Michel Lemoine | CNES/GS/Toulouse |
| Arnaud Pollet | IGN/LAREG |
| David Coulot | IGN/LAREG |
| Samuel Nahmani | IGN/LAREG |

4. TRAITEMENT DES DONNÉES GÉODÉSIQUES

4.1. DORIS

4.2. Télémétrie laser-satellites

4.3. Télémétrie laser-lune

4.4. GNSS

4.5. InSAR

4.6. VLBI

4.7. Surcharges

4.8. Propagation

4.9. Evolution logiciel GINS

4.1. DORIS

Le service de Géodésie Spatiale du CNES (ex-« équipe » de Géodésie Spatiale) et le groupe Géodésie Spatiale de CLS constituent le Centre d'Analyse DORIS CNES/GRGS (CA CNES/GRGS). Dans ce cadre, leurs activités consistent :

- à assurer le traitement routinier des données DORIS en vue d'une fourniture à l'IDS ;
- à participer à l'élaboration des réalisations successives de l'ITRF ;
- à maintenir et améliorer les capacités du logiciel GINS pour le traitement des mesures DORIS ;
- à maintenir et à améliorer les modèles de correction de la fréquence de l'oscillateur DORIS au passage de la SAA (South Atlantic Anomaly) à bord des satellites sensibles (Jason-1, SPOT-5, Jason-3) ;
- à réaliser des actions de support et de promotion du système DORIS du CNES. Le Centre d'Analyse CNES/GRGS a également participé aux travaux sur la combinaison des techniques dans le cadre de l'IERS Working Group "COL" à l'Observatoire de Paris.

Tâches récurrentes

L'une des tâches récurrentes du centre d'analyse DORIS CNES/GRGS est le traitement en mode opérationnel des données DORIS sur l'ensemble des satellites porteurs actifs, aboutissant à une série hebdomadaire de positions des balises du réseau. Les équations normales hebdomadaires correspondantes, contenant comme paramètres les coordonnées du réseau des stations et les paramètres d'orientation de la Terre, sont par ailleurs délivrées au format SINEX à l'IDS ainsi que les orbites des satellites.

Les résultats obtenus sont mis à disposition de la communauté, via le site web de l'IDS et par le biais de la distribution des différents produits dans le cadre de notre participation en tant que centre d'analyse de l'IDS (séries temporelles hebdomadaires, coordonnées du pôle, orbites).

Événements marquants de la période 2012-2016

La période 2012-2016 a été marquée principalement par la préparation puis le calcul de la contribution du centre d'analyse DORIS au calcul de l'ITRF2014 (voir tableau 1).

Les améliorations apportées par le CA CNES/GRGS, aussi bien que par les autres CA, ont permis d'atteindre aujourd'hui une bonne cohérence entre les centres d'analyse sur tous les paramètres géophysiques importants de la solution DORIS, en particulier le facteur d'échelle qui jusqu'à présent était scindé en deux familles distinctes.

Parmi les améliorations, citons :

- amélioration de la paramétrisation dynamique,
- amélioration des lois d'attitude Topex, Jason1&2, Envisat,
- ajout de Cryosat2 et HY2A et SARAL,

- élaboration d'une version améliorée « stab5 » du macro-modèle de Jason-2
- prise en compte des biais de datation Envisat et Jason1 non inclus dans les données,
- introduction de la correction de « Phase Wind Up » DORIS,
- introduction de la loi de phase DORIS (voir ci-dessous),
- adoption de standards de calcul mis à jour :
 - champ de gravité EIGEN-6 avec nouvelle valeur de C20 et de sa dérive,
 - modèle de correction troposphérique GMF/GPT avec gradients horizontaux,
 - pôle moyen convention IERS 2010.

| Satellites included in weekly SINEX | start - end |
|-------------------------------------|-------------------------|
| SPOT2 | 03/01/1993 - 18/07/2009 |
| SPOT3 | 30/01/1994 - 16/11/1996 |
| SPOT4 | 03/05/1998 - 22/06/2012 |
| SPOT5 | 16/06/2002 - 27/12/2014 |
| TOPEX | 03/01/1993 - 30/10/2004 |
| ENVISAT | 21/07/2002 - 07/04/2012 |
| JASON1 | 31/10/2004 - 12/07/2008 |
| JASON2 | 13/07/2008 - 27/12/2014 |
| CRYOSAT2 | 20/06/2010 - 27/12/2014 |
| HY2A | 02/10/2011 - 27/12/2014 |
| SARAL | 17/03/2013 - 27/12/2014 |

Tableau 1 : Données DORIS traitées au CA CNES/GRGS pour inclusion dans la solution ITRF2014.

Parmi les autres événements marquants de cette période, citons :

- L'application des nouvelles lois de phase des antennes DORIS remesurées sur un échantillon caractéristique d'antennes sol.

- La mise à jour du modèle de correction de la fréquence de l'oscillateur ultra-stable (OUS) de Jason-1 au cours des passages au-dessus de la SAA ; le calcul d'un modèle du même type pour SPOT-5 et la diffusion de ces modèles à la communauté d'utilisateurs.
- La participation au groupe de travail « COL » de l'IERS. Ce groupe de travail visait à combiner au niveau des observations les quatre techniques fondamentales de détermination du référentiel terrestre et des paramètres de rotation de la Terre (SLR, VLBI, DORIS, GNSS). Dans la cadre de sa thèse Myriam Zoulida a par ailleurs travaillé sur la combinaison des techniques à bord des satellites multi-techniques, avec l'objectif d'obtenir en orbite un rattachement d'au moins trois des quatre techniques de géodésie spatiale. Ce travail a constitué une préparation intéressante pour le projet de mission GRASP (puis E-GRASP) qui vise à réaliser en orbite la co-localisation quadri-techniques.
- L'évaluation, par le CA CNES/GRGS, des diverses réalisations de l'ITRF2014.
- L'analyse approfondie de la mesure RINEX et la diffusion de recommandations pour les traitements de cette mesure vers la communauté des utilisateurs, sous forme de documents disponibles sur le site de l'IDS et sous forme d'un article (Lemoine et al., 2016).

Prospective

- Poursuite des traitements du Centre d'Analyse GRG en mode opérationnel pour l'IDS.
- Améliorations des performances :
 - Raccourcissement des délais de traitement (10 j contre 3 mois)
 - Meilleure prise en compte de la troposphère
 - Test de libération des fréquences sous forme parabolique / passage
- Etude de la prise en compte des effets de charge sur les stations.
- Modèles SAA de nouvelle génération suivant les travaux de A. Belli et de João Domingos.
- Utilisation des mesures DORIS pour le champ de gravité.
- Participation au groupe de travail 3.2 de l'IAG sur la vitesse verticale des marégraphes.
- Etude du choix du pôle moyen sur le traitement de la marée polaire.

Participants au projet

| | |
|----------------------------|---------|
| Richard Biancale | CNES/GS |
| Jean-Michel Lemoine | CNES/GS |
| Hugues Capdeville | CLS |
| Laurent Soudarin | CLS |

4.2. Télémétrie laser-satellites

Analyse de données géodésiques : Données de télémétrie laser sur satellites.

La France, via le GRGS, participe de manière active et efficace à l'ASC (Analysis Steering Committee) de l'ILRS, ce qui représente une bonne partie de l'investissement du GRGS sur l'analyse des données de télémétrie laser sur satellites, à côté de celui nécessaire pour les séries temporelles de degré 2 du champ de gravité de la Terre.

Comme cela s'est encore confirmé avec les évaluations de l'ITRF2014, le Centre d'Analyse SLR du GRGS, l'un des huit CA officiels de l'ILRS, continue de fournir à l'ILRS l'une des meilleures solutions de tous les CA. Il est dans le trio de tête (position ex æquo entre ces trois CA) des CA ayant fourni les meilleures solutions laser pour l'ITRF 2014. Disposer d'un tel CA opérationnel représente un avantage considérable dans un laboratoire comme le GRGS pour évaluer l'ensemble des produits obtenus par cette technique, dans un cadre international. De plus, ils permettent d'avoir facilement accès à l'ensemble des modélisations optimales pour le calcul d'orbite, en garantissant leurs mises à jour.

Les participants GRGS au projet forment une équipe de collaboration resserrée :

- GRGS-OP : P. Bonnefond, S. Bouquillon (LLR), A. Bourgoïn, F. Deleflie, Christophe Leponcin-Lafitte, H. Manche (LLR), P. Delva
- GRGS-IGN/LAREG : D. Coulot (associé IMCCE GRGS-OP), A. Pollet
- GRGS-CNES : J.-M. Lemoine, F. Reinquin
- GRGS-OCA : P. Exertier, O. Laurain, J.M. Torre (LLR), C. Courde
- GRGS-CNAM : Joëlle Nicolas

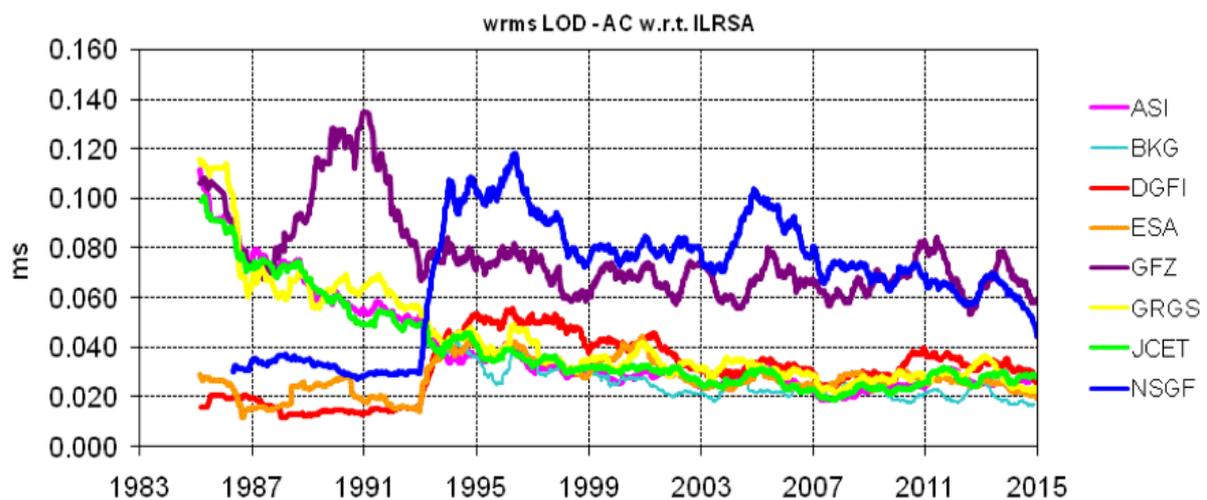
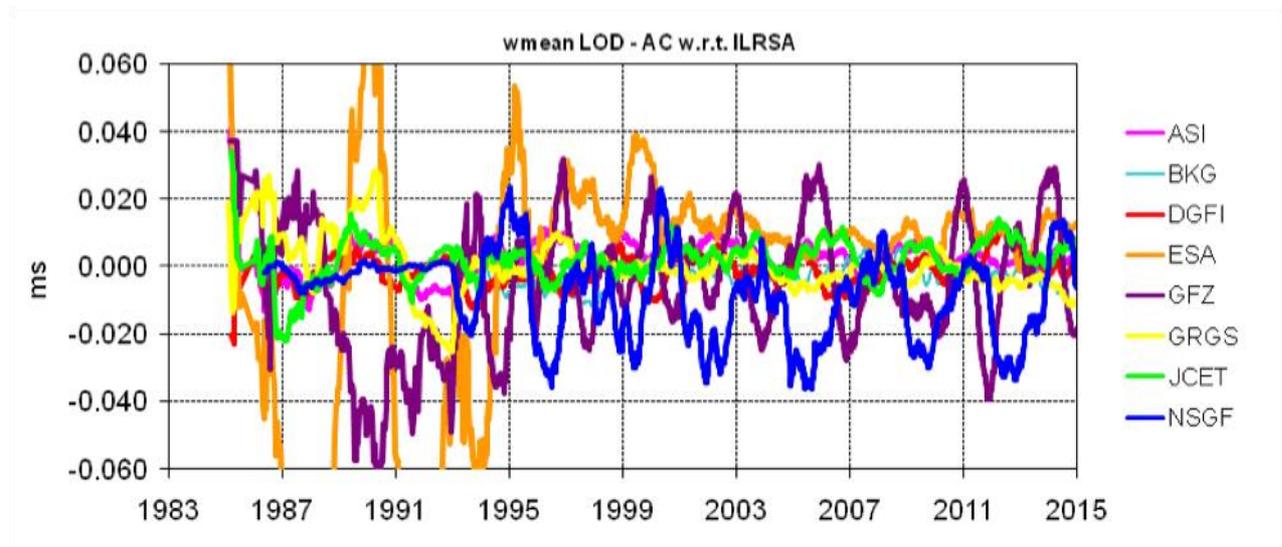


Figure : Exemple de comparaison (ici sur la série temporelle LOD), de la qualité des solutions fournies par chacun des centres d'analyse de l'ILRS. La solution GRGS apparaît, ici en jaune, comme l'une des meilleures de tout l'ILRS, dans le cadre des activités de service labellisé ANO1 par l'INSU.

Caractère opérationnel des analyses laser, et projets-pilotes

Les activités opérationnelles sont les suivantes :

- Actions pérennes : Analyses hebdomadaires et journalières : détermination d'orbites pour les satellites géodésiques, séries temporelles de paramètres de rotation de la Terre (mouvement du pôle x_p et y_p , durée du jour LOD), positions de stations d'observation, degré 2 du champ de gravité, et désormais depuis début 2016 production de séries temporelles de trajectoires (format SP3c).
- « Project Pilot » : Etude des biais observationnels des stations : ce problème est sans doute celui qui est le plus ardu à résoudre par la communauté laser. Ce projet est monté en puissance en 2015, et est au cœur des actions de 2016 et de celles encore à venir.

Un certain nombre d'autres projets sont en phase de mise au point, et font l'objet d'études préliminaires, pour préparer les interventions au sein de l'ASC : utilisation de LARES, nouveaux tests des corrections atmosphériques ; estimation en mode opérationnel, avec outils de prédiction associés, des premiers coefficients du champ de gravité (champ 4x4).

Les pilot projects se sont pour la plupart concentrés sur l'évaluation de l'exactitude des produits délivrés dans le cadre de la réalisation de l'ITRF : préparation de l'ITRF2013-2014, sous différents aspects : Test des effets de charge atmosphériques. La mise en place d'une modélisation est légèrement différente de celle recommandée par les services internationaux et, en particulier, par l'ILRS, pour la prise en compte des effets générés par l'atmosphère sur le champ de gravité et les positions des stations (charges).

Par rapport aux autres CA de l'AWG, le CA du GRGS a pris soin d'analyser de manière séparée les effets de l'atmosphère sur les variations du champ de gravité de la Terre (effets conjoints de l'océan et de l'atmosphère), et sur les déplacements des stations d'observation.

Ce projet encore en cours est de la plus haute importance, car (i) il est essentiel de garantir une compatibilité entre tous les effets modélisés au sein d'un même logiciel (il s'agit là d'ailleurs d'une des recommandations de l'atelier de travail de septembre 2016 du GRGS à Soreze sur la géodésie millimétrique), ainsi que le pratique d'ailleurs le CA GRGS de l'ILRS, alors que (ii) la solution officiellement soumise par le GRGS à l'ASC doit correspondre aux recommandations de ce groupe de travail, qui a choisi de ne pas prendre en compte l'ensemble des effets : deux solutions doivent ainsi être maintenues en parallèle...

Actions de recherche s'appuyant sur les activités de service

Orbitographie de précision à des fins de calibration : complémentarité GNSS/SLR, et utilisation des résultats de la mission T2L2.

Un projet a débuté en 2016 pour calibrer certaines orbites GNSS à l'aide de données SLR à des fins de tests de physique fondamentale. En ce qui concerne T2L2, il s'agit de prendre en compte les biais en temps déterminés sur les stations observant T2L2, pour modifier les dates des points normaux des observations utilisées pour construire les produits issus des analyses. Il s'agit aussi de libérer certaines dates de ces points normaux, pour évaluer l'impact (ou non) sur les produits ILRS.

Séries temporelles de bas degrés du champ de gravité de la Terre.

La contribution des données laser à la construction des modèles de champ de gravité variable dans le temps est essentielle : les équipes toulousaines et parisiennes du GRGS construisent des séries temporelles pour les degrés 1 et 2 à partir essentiellement des données des satellites Lageos.

Améliorations de la complémentarité entre les centres LLR et SLR du GRGS.

Les données LLR ont été analysées à la fois au sein des logiciels POLAC et GINS. Les différences entre les séries temporelles ont été analysées.

Prospective

- Solution opérationnelle multi-satellites, incluant notamment les données des satellites LARES, STARLETTE STELLA et incluant l'étude de leur influence sur les produits scientifiques délivrés à l'ILRS (paramètres du système de référence terrestre, coefficients du champ de gravité de bas degrés),
- Développements méthodologiques vers une orbitographie de niveau millimétrique (en lien avec les recommandations de l'atelier de Sorèze),
- Tentative de restitution simultanée de paramètres géométriques (positions de stations) et de paramètres dynamiques (coefficients du champ de gravité) : analyse des corrélations et des bilans d'erreur, mise en place d'une stratégie de décorrélation ?,
- Les biais en distance dans la technique SLR : exploitation de la base de donnée GRGS (IGN/LAREG-OP/IMCCE) des évolutions technologiques des stations, permettant de définir des périodes de temps au cours desquelles on peut considérer constant le biais pour un satellite donné,
- Test de l'impact des biais en temps,
- Poursuite des comparaisons entre laser-satellite et laser-Lune pour la station française Méo de télémétrie laser (GRGS/OCA),
- Montée en puissance de la validation par SLR des orbites GNSS.

Participants au projet

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Pierre Exertier | OCA |
| Etienne Samain, OCA | OCA |
| Clément Courde | OCA |
| Julien Chabé | OCA |
| Hervé Mariey | OCA |
| Grégoire Martinot-Lagarde | OCA |
| Dominique Albanèse | OCA |
| Mourad Aimar | OCA |
| Hervé Viot, OCA | OCA |
| Florent deleflie | IMCCE/Observatoire de Paris |
| Franck Reinquin | CNES |

4.3. Télémétrie laser-lune

Télémétrie Laser-Lune – POLAC

Le service d'observation SO1 de l'INSU, en charge de l'analyse des données de télémétrie laser-lune (LLR) à l'Observatoire de Paris (SYRTE), porte le nom de « Paris Observatory Lunar Analysis Center » (POLAC). Il est un des quatre centres d'analyse LLR reconnus par l'« International Laser Ranging Service » (ILRS). En plus de son travail de collecte, de tri et de distribution des données LLR, il travaille depuis sa création (1997) en étroite collaboration avec la station de télémétrie laser de l'OCA (MéO) en fournissant les prédictions journalières nécessaires aux observations et une validation régulière des points normaux obtenus. Plus récemment (depuis 2013), il travaille avec la composante de télémétrie laser-satellite (SLR) du GRGS. Il coopère également avec les deux centres de produits de l'IERS implantés aussi à l'Observatoire de Paris : EOP-PC (Resp. C. Bizouard) et ICRS-PC (Resp. J. Souchay) et avec l'équipe « théorie et métrologie » du SyRTE (Resp. P. Wolf).

Les travaux effectués par POLAC depuis 2012 ont déjà été présentés dans les rapports d'activité annuels successifs depuis le rapport 2013.

- Réalisation et maintenance du service web POLAC <http://polac.obspm.fr/PaV> qui permet aux observateurs LLR de préparer leurs tirs laser sur les réflecteurs lunaires et de vérifier la validité de leurs observations,
- Recensement et mises à jour annuelles des observations LLR effectuées par les stations de McDonaldd, Grasse, Haleakala, Apache Point et Matera depuis 1969 et provenant de 5 bases de données distinctes et disponibles sous 4 formats différents,
- Tables de la Lune et de sa libration ajustées aux observations LLR pour insérer la composante LLR dans le logiciel multi-technique GINS en collaboration avec les travaux du GRGS sur les combinaisons des techniques afin de déterminer les paramètres de l'orientation de la Terre et les systèmes de référence céleste et terrestre,
- Evolution des Ephémérides Lunaires Parisiennes (ELP) en analysant leurs différences avec les intégrations numériques DExxx et INPOPx et en mettant en évidence les limites des séries de ces solutions semi-analytique (lente convergence de certaines séries, troncature des développements des séries, présence de paramètres physiques sous une forme implicite dans les coefficients numériques des séries interdisant toute dérivation partielle par rapport à ces paramètres et donc leurs ajustements),

Depuis 2015 nous avons entrepris de réduire ces inconvénients en suivant deux axes d'investigation principaux :

- D'une part, en déterminant rigoureusement et effet par effet les limites en termes de précision des séries ELPs. Pour cela, nous comparons chacune des séries ELPs avec les résultats de l'intégration numérique des équations différentielles dont elle est la solution,
- D'autre part, en remplaçant certaines des séries ELPs par leurs contreparties numériques (quand les séries semi-analytiques sont trop lentement convergentes) ou par de nouvelles séries semi-analytiques plus précises (en choisissant des seuils de troncature plus bas et

en conservant explicitement certain des paramètres actuellement implicites dans ELPs).

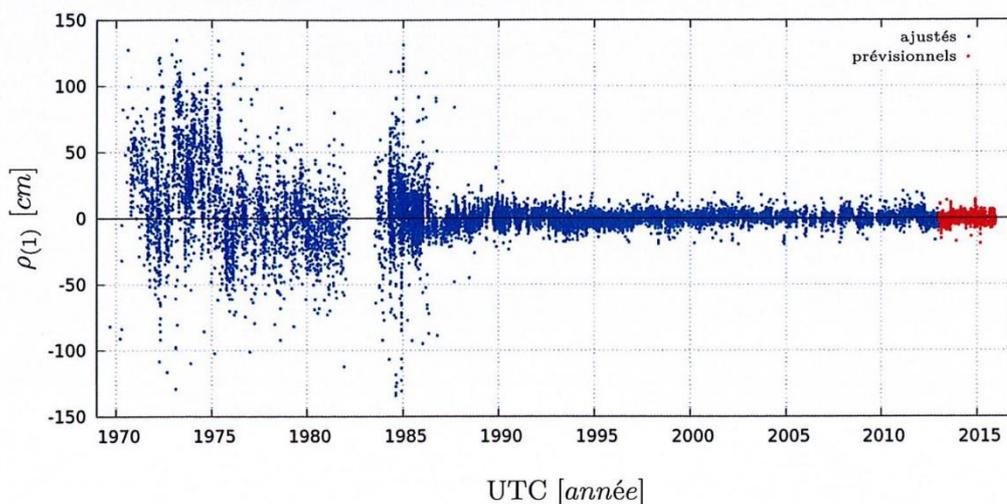
Ce travail s'est effectué dans le cadre de la thèse d'Adrien Bourgoïn (dirigée par M.-C. Angonin et C. Le Poncin-Lafitte) dont la finalité principale est de tester des théories alternatives à la Relativité Générale (RG) dans le système dynamique Soleil-Terre-Lune.

Cette étude nécessitait, dans un premier temps, une intégration numérique du mouvement de révolution et de rotation de la Lune. Cette intégration numérique, ainsi que sa comparaison à INPOP13c, a été présentée en juin 2015 à la SF2A (« A new 4-D dynamical modelling of the Moon orbital and rotational motion developed at POLAC »). Son ajustement aux données LLR a été présenté dans la thèse d'Adrien Bourgoïn en décembre 2016. ELPN est le nom de l'éphéméride lunaire liée à cette intégration numérique.

La théorie alternative à la relativité générale testée dans cette étude est le formalisme SME (Standard-Model Extension) paramétrant toutes les violations possibles à la symétrie de Lorentz. La nouvelle éphéméride lunaire ELPN a été implémentée dans le cadre de ce formalisme. L'étude des dérivées partielles a permis de déterminer les combinaisons linéaires de coefficients SME auxquels le LLR est sensible. Elle a également permis de quantifier des niveaux d'erreurs réalistes en prenant en compte les biais systématiques liés aux stations LLR et aux réflecteurs lunaires.

La robustesse de la méthode utilisée pose désormais les limites expérimentales sur les coefficients SME sélectionnés de 10^{-9} à 10^{-12} , ce qui représente des améliorations jusqu'à 1600 fois plus contraignantes que les travaux effectués précédemment. Ainsi aucune violation à la relativité générale n'a été observée sur l'orbite lunaire à partir des données de télémétrie laser-Lune.

La figure ci-dessous représente l'amplitude des résidus calculés à l'aide du logiciel de réduction LLR CAROLL en utilisant ELPN. Les résidus représentés en bleu correspondent aux observations utilisées pour réaliser l'ajustement. Les résidus représentés en rouge correspondent à des observations non utilisées pour effectuer l'ajustement.



Le tableau ci-dessous donne les valeurs des moyennes \bar{y} et écarts-types σ (en mètre) des résidus obtenus avec ELPN par station LLR. Les nombres N et N_e représentent respectivement le nombre d'observations totales et le nombre d'observations éliminées par station.

| Stations LLR $\{l\}$ | Période | $N_{\{l\}}$ | $N_{e\{l\}}$ | $\mu_{\{l\}}$ [m] | $\sigma_{\{l\}}$ [m] |
|----------------------|-----------|-------------|--------------|-------------------|----------------------|
| McDonald 2.7m | 1969-1985 | 3516 | 88 | 0.094 | 0.350 |
| McDonald MLRS1 | 1983-1988 | 573 | 58 | 0.003 | 0.351 |
| McDonald MLRS2 | 1988-2013 | 3284 | 386 | 0.006 | 0.097 |
| Grasse Rubis | 1984-1986 | 1182 | 6 | 0.056 | 0.176 |
| Grasse Yag | 1987-2005 | 8313 | 11 | -0.004 | 0.045 |
| Grasse MeO | 2009-2013 | 993 | 6 | -0.002 | 0.036 |
| Haleakala | 1984-1990 | 757 | 13 | -0.004 | 0.101 |
| Matera | 2003-2013 | 79 | 11 | -0.017 | 0.130 |
| Apache-point | 2006-2013 | 1806 | 8 | 0.001 | 0.038 |
| Totalité | 1969-2013 | 20503 | 587 | - | - |

Prospective

POLAC va maintenir et améliorer les services développés ces dernières années et utiles à l'ensemble de la communauté LLR. Un recensement annuel des nouvelles observations LLR sera effectué pour garder à jour l'archive POLAC de données de télémétrie laser-Lune. La nouvelle éphéméride ELPN sera intégrée comme solution opérationnelle supplémentaire dans le service web fournissant les prédictions nécessaires à la réalisation et à la validation des observations LLR.

POLAC va continuer ses recherches en confrontant les éphémérides semi-analytiques (ELP) et numériques (ELPN) du système Terre-Lune aux données LLR. En particulier, d'autres tests de la théorie SME peuvent être envisagés en introduisant par exemple la possibilité d'une violation à la symétrie de Lorentz dans le système Terre-Lune provoquée par le Soleil ou en étendant l'étude au secteur matière du SME. On peut également envisager l'analyse conjointe de données LLR avec les données GRACE ou (plus généralement SLR) afin de décorréliser certains des paramètres estimés lors des ajustements.

A noter également que depuis ce début d'année 2017 et pour une période de 3 ans POLAC participe au projet GEODESIE dirigé par David Coulot de l'IGN et financé par l'ANR. Ce projet vise à améliorer les références géodésiques nécessaires à l'étude du changement climatique.

Participants au projet

Membres POLAC :

| | |
|-----------------------------|---|
| Sébastien Bouquillon | Observatoire de Paris/SYRTE Astronome adjoint |
| Gérard Francou | Observatoire de Paris/SYRTE Astronome adjoint |

| | |
|------------------------------------|--|
| Christophe Leponcin-Lafitte | Observatoire de Paris/SYRTE Astronome adjoint |
| Adrien Bourgoïn | Observatoire de Paris/SYRTE doctorant |
| Jean-Yves Richard | Observatoire de Paris/SYRTE Ingénieur de Recherche |

Participants extérieurs :

| | |
|-------------------------|---|
| David Coulot | IGN/LAREG Chargé de Recherche |
| Florent Deleflie | Observatoire de Paris/IMCCE Astronome adjoint |
| Jean-Marie Torre | OCA Ingénieur de Recherche |

4.4. GNSS

Les activités autour du traitement géodésique des données GNSS ont poursuivi leur montée en puissance au cours de la période 2012-2016. Deux axes de recherche sont menés de front :

- La contribution aux services IGS au travers des produits GPS-GLONASS-Galileo dans un contexte à la fois de densification de la constellation Galileo et de recherche d'amélioration des traitements,
- La valorisation de ces produits et du logiciel GINS dans le cadre de projets scientifiques à base de données de campagnes GNSS.

Les résultats les plus marquants sont rappelés ci-après et nous invitons le lecteur à se rapporter aux éditions annuelles de ce rapport pour un descriptif plus détaillé des ces travaux.

Activités du Centre d'Analyse IGS

- Participation au projet pilote et WG MGEX de l'IGS :

La production de solutions hybrides GPS-GLONASS-Galileo a été notre priorité au point d'en faire la solution unique constituant la contribution du CA GRGS à l'IGS depuis le printemps 2016 en remplacement de la solution purement GPS. Les échanges fournis au sein du WG MGEX ont notamment montré la bonne qualité des solutions orbite/horloge Galileo et ont donné lieu à deux publications de Steigenberger et al. 2014 et Montenbruck et al. 2017.

- Contribution à la campagne REPRO2 de l'IGS :

Les données d'un réseau global de stations GNSS (entre 110 et 230 sites) ont été traitées sur la période 1998-2013. Cette première expérience de retraitement massif (1,2 millions de fichiers RINEX) s'est avérée lourde mais riche d'enseignements. En particulier certains défauts de traitement qui ne pouvaient s'observer que sur de longues périodes ont été corrigés.

- Etude des biais de mesures GNSS :

Les travaux de Gilles Wautelet (ENF CNES) ont débouché sur une méthode originale d'estimation des biais DCB des signaux GNSS en utilisant un récepteur embarqué sur un LEO. Les résultats montrent une bonne cohérence avec les solutions des réseaux terrestres en ayant l'avantage de se passer de modèle d'ionosphère. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication de Wautelet et al. 2016.

Exploitation des produits GNSS du centre d'analyse

- Transfert de fréquence par la technique IPPP

Suite au post-doc CNES d'Amale Kanj les travaux ont été poursuivis au BIPM par Gérard Petit. Cette approche novatrice permet grâce à la propriété « entière » de nos produits d'horloge de comparer des horloges atomiques distantes car les traitements GPS sont réalisés de façon indépendante pour chaque site. Pour la première fois, sur une période continue de plus de 40 jours, la stabilité des horloges a été déterminée à 10^{-16} par comparaison à une solution par fibre optique. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication de Petit et al. 2015

- Etude des déformations crustales liées aux effets de surcharge non maréales
- Les produits d'horloge et d'orbite REPRO2 du Centre d'Analyse du GRGS (CNES-CLS) ont été exploités avec GINS-PC en mode IPPP au laboratoire GeF du CNAM pour l'étude des déformations crustales liées aux effets de surcharge non maréales pour d'une part des signaux sub-diurnes et d'autre part saisonniers. Concernant les signaux sub-diurnes, suite à la thèse de Marcell Ferenc (financement CNES-Région Pays de la Loire, soutenue le 9 décembre 2014), les travaux sur le suivi spatio-temporel de la tempête Xynthia (2010) ont été poursuivis. Il a été démontré que le traitement IPPP a un apport important pour étudier les signaux courtes périodes et peut contribuer à la validation des modèles de surcharge. Concernant les signaux saisonniers, des séries longues ont été calculées pour quelques stations des réseaux IGS et SIRGAS en Amérique du sud et pour des stations du réseau VOLOBSIS à La Réunion. Ces travaux se font en collaboration avec J.-P. Boy (EOST), T. van Dam (Univ. Luxembourg), Z. Li (Univ. Luxembourg) et X. Bertin (Univ. La Rochelle). Un article sera soumis en 2017.
- Hydrologie du bassin Amazonien :

Daniel Moreira (CPRM, Rio) a présenté ses travaux de thèse en septembre 2016. Un volume considérable de données GNSS a été traité en mode statique et cinématique pour :

- Définir une méthodologie de prise en compte des déformations crustales de charge hydrologiques des mesures géodésiques
- réaliser le profil des principaux affluents de l'Amazone sur plusieurs milliers de kilomètres en mettant en évidence une variabilité des pentes inattendue à l'échelle ce bassin hydrologique
- proposer une méthode novatrice de nivellement « dynamique » des règles qui exploite la trajectoire du bateau comme référence.

Un premier article a été publié (Moreira et al. 2016).

Prospective

La priorité porte sur la préparation à la future campagne de retraitement pour la réalisation du prochain ITRF. Nous bénéficierons de l'expertise d'Alvaro Santamaria Gomez qui occupe un poste de Physicien Adjoint au GET à Toulouse depuis janvier 2017.

Les années prochaines verront la finalisation du déploiement de la constellation Galileo et la densification de la constellation GPS tri-fréquences. Un effort important portera sur l'hybridation GPS-Galileo et l'exploitation de ces nouveaux signaux. En particulier une méthodologie de blocage des ambiguïtés de phase Galileo sera implémentée dans GINS dans le cadre de la thèse Georgia Katsigianni cofinancée par le CNES et CLS. De plus, des travaux complémentaires sur les charges hydrologiques seront réalisés par les laboratoires CPRM (Rio), L2G (Le mans) et GET (Toulouse) pour tenter d'expliquer les anomalies observées dans le bassin Amazonien, comparer/valider les modèles implémentés dans différents logiciels et réduire les corrélations en traitant conjointement des effets de « surcharge » et de « propagation ».

D'autre part, les nouvelles capacités de traitement massif des données GNSS en mode PPP (chaque station est traitée indépendamment) seront testées sur le réseau dense de stations européennes pour la détermination d'un champ de vitesse tectonique européen (projet RESIF/EPOS).

Enfin, dans le cadre d'une coopération CNES-ISRO, l'installation en Inde de 3 récepteurs de mesure de scintillations ionosphériques permettra par comparaison aux données GNSS de mieux quantifier l'impact des scintillations sur le traitement des données : « loss of lock », « cycle slip », « outliers », etc.

Participants au projet

| | |
|-----------------------------|----------|
| Sean Bruinsma | CNES/GET |
| Julien Laurent-Varin | CNES/GET |
| Jean-Charles Marty | CNES/GET |
| Félix Perrosanz | CNES/GET |
| Flavien Mercier | CNES/GET |
| Gilles Wautelet | CNES/GET |
| Myriam Zoulida | CNRS/GET |
| Daniel Moreira | CPRM |
| Frédéric Durant | ESGT/L2G |
| Joëlle Nicolas | ESGT/L2G |

4.5. InSAR

Les mesures de déformation répondent à des besoins opérationnels aussi bien que scientifiques liés à l'étude de phénomènes géotechniques et géophysiques. Plusieurs techniques de mesure des déformations de la surface terrestre ont fait leurs preuves, notamment le GNSS, l'INSAR (interférométrie d'images radar, dans ce cas en mode différentiel) et la topométrie terrestre. Les techniques spatiales GNSS et INSAR sont complémentaires et leur combinaison doit permettre d'améliorer la précision de la mesure et d'étendre leur champ d'application en considérant notamment une plus grande variété d'échelles spatiales et temporelles dans la gamme de phénomènes étudiés.

Depuis 2014 ce projet est co-financé par les crédits TOSCA et le laboratoire GeF (CNAM, ESGT) lui-même. Le projet propose de travailler à réaliser la combinaison des mesures INSAR et des mesures GNSS à deux niveaux :

- combiner les mesures GNSS et PSI (Permanent Scatterer Interferometry) par méthode statistique, et dans un premier temps par cumul d'équations normales ;
- injecter des corrections atmosphériques issues de calcul d'un réseau de stations GNSS dans le traitement INSAR.

Afin d'être plus efficaces, les travaux ont été recentrés en 2016 sur seulement deux sites à savoir le Piton de la Fournaise (île de la Réunion) et la ville de Lisbonne (Portugal). Ces deux sites naturels ou anthropiques présentent des déformations d'origines très différentes. Pour ces études des collaborations sont menées avec le Laboratoire Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand par l'intermédiaire de Jean-Luc Froger) et avec le Portugal par l'intermédiaire de Ana Paula Falcao (Dept. of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa) ainsi que Dora Roque et Ana Maria Fonseca (LNEC, Lisboa). Le premier projet concerne le Piton de la Fournaise, pour lequel la base de données est importante et bien appropriée. Laurent Polidori (au CESBIO depuis le 01/01/2016) est également associé au projet pour son expertise sur le sujet.

Combinaison par méthode statistique

La première approche vise à extraire les mesures de déplacement en combinant les observations GNSS et INSAR avant ou après déroulement de phase, considérant que l'introduction des mesures GNSS apporte des contraintes au problème d'inversion des signaux interférométriques, que ce soit pour guider le déroulement de phase ou pour séparer le signal troposphérique de celui du déplacement.

Un premier travail a été mené sur la combinaison des observations GNSS – INSAR par cumul des équations normales après déroulement de phase. Cette méthode innovante de combinaison repose sur l'inversion d'un système d'équations normales commun. Les équations normales se réfèrent à la modélisation des phases observées en GNSS et INSAR. Pour le GNSS, on utilise classiquement un modèle de double différence. En INSAR, il semble pertinent d'utiliser un modèle de phase qui s'intègre dans un processus de moindres carrés comme dans le traitement STUN. Nos premières recherches montrent qu'il est possible d'exprimer ces modèles avec des paramètres communs à estimer (erreur altimétrique, déplacement, phase atmosphérique, erreur orbitale, ambiguïté de phase éventuellement).

Plusieurs niveaux de combinaison sont alors possibles : estimer des paramètres en absolu ou en relatif, injecter ou non des paramètres estimés a priori (ambiguïtés, atmosphère), etc.

La faisabilité de cette combinaison a été démontrée sur des données simulées. Actuellement on s'oriente vers l'étude de faisabilité en utilisant d'autres méthodes statistiques qui utilisent les données plus ou moins pré-traitées (combinaison hybride entre combinaison des données initiales et des données traitées jusqu'à un certain niveau).

L'exploration de l'approche proposée permet de montrer l'intérêt ou non d'une telle combinaison selon le type de déplacement (amplitude, étendue, variabilité temporelle), les caractéristiques des images radar (bande, nombre, résolution spatiale), la nature du réseau GNSS (densité, nombre de récepteurs) et certaines options de traitement.

Il s'agira également d'approfondir la piste de recherche sur la combinaison GNSS/PSINSAR en termes notamment de faisabilité sur des données réelles et de son intérêt.

Injection dans le traitement INSAR des corrections atmosphériques obtenues par GNSS

La seconde approche concerne l'amélioration des mesures interférométriques grâce aux paramètres troposphériques estimés par le traitement des mesures d'un réseau dense de stations GNSS. En effet, les ondes radar subissent des modifications de temps de trajet lors de leur propagation dans l'atmosphère, notamment la troposphère et l'ionosphère.

Il convient idéalement de corriger la phase radar de chaque pixel de cet artefact en connaissant le TEC (Total Electronic Content) et le délai troposphérique total le long du trajet (STD, Slant Total Delay). Le principal artefact en INSAR est le retard de propagation causé par la troposphère.

Plusieurs méthodologies ont été étudiées par le passé en utilisant soit une ou plusieurs approches combinées : des modèles météorologiques standards, des mesures de spectromètres comme les données MERIS, des données météorologiques au sol, du filtrage et de l'INSAR directement ou du GNSS. Les mesures GNSS permettent d'obtenir le STD à partir de l'obtention du ZTD (Zenithal Total Delay), qui se décompose en une partie sèche facilement modélisable (ZHD, Zenith Hydrostatic Delay) et en une partie humide (ZWD, Zenith Wet Delay) qui représente environ 10% du délai total mais qui varie rapidement dans l'espace et dans le temps, ce qui la rend difficilement modélisable. La partie humide est estimée au zénith ce qui permet d'obtenir le ZTD en lui ajoutant la partie sèche modélisée. Plusieurs facteurs influencent alors ce STD. A titre d'exemple, le réseau de récepteurs GNSS ayant une densité spatiale limitée il est nécessaire d'interpoler les cartes de ZTD en tout pixel de l'image radar.

Des premiers outils ont été développés. Une première chaîne de correction GNSS - INSAR a été mise en place sur des données simulées. Début 2015 la chaîne de traitement (ZTD en chaque station, interpolation, correction pour INSAR, traitement INSAR) a été mise en œuvre sur des données réelles (site du Piton de la Fournaise) et plusieurs configurations ont été testées (nombre de stations, répartition des stations, méthode d'interpolation) pour évaluer la sensibilité des interférogrammes à la prise en compte de cette correction. Ces outils permettent d'extraire les délais troposphériques zénithaux de stations GNSS à une

date donnée et de créer des cartes interpolées de délais troposphériques. Ces cartes sont ensuite utilisées pour calculer la phase de l'interférogramme, selon le type de capteur considéré et ses paramètres d'acquisition (tenant compte des incidences en chaque point). Néanmoins les stations GNSS étant souvent limitées en nombre ou mal réparties sur la zone d'étude, la carte interpolée présente des défauts.

Un travail d'investigation sur les méthodes d'interpolation est également mené afin d'obtenir la carte la meilleure possible. Ces outils sont en cours d'amélioration, que ce soit pour faciliter leur utilisation ou pour intégrer des développements nouveaux (sur la gestion des images radar, l'intégration des délais le long des trajets et l'interpolation des cartes). Ces travaux permettent de tirer des conclusions claires sur la capacité d'un réseau GNSS à corriger les interférogrammes.

L'influence de la méthode d'interpolation sur les cartes ZTD est étudiée par comparaison notamment entre les méthodes de spline cubique et d'interpolation géostatistique (krigeage). Des comparaisons entre des corrections atmosphériques issues du GNSS et celles issues d'un modèle d'atmosphère globale (ERA-I) ont été réalisées. Des travaux sur l'interpolation des cartes de délais troposphériques sont encore en cours.

A plus moyen terme, une étude de la possibilité des travaux en cours de tomographie atmosphérique par GPS sera également menée.

Ces travaux ont été mis en œuvre principalement sur deux sites d'intérêt géophysique ou géotechnique, à savoir le Piton de la Fournaise sur l'île de la Réunion et la ville de Lisbonne au Portugal.

- *Piton de la Fournaise (île de la Réunion)*

Ce site volcanique très actif fait l'objet d'une surveillance régulière depuis plus de 30 ans. Il est très instrumenté (mesures magnétiques, sismiques et topographiques). Il dispose notamment d'un réseau de stations GPS VOLOBSIS dont les données sont fournies par l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OVVPF) de l'IPGP. Un MNT (Modèle Numérique de Terrain) issu d'un levé lidar aéroporté est disponible pour les corrections des effets du relief. Enfin des images radar ont été régulièrement acquises depuis plus de 10 ans (ENVISAT/ASAR, RADARSAT, ALOS/PALSAR, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X/TanDEM-X), permettant l'obtention de plusieurs milliers d'interférogrammes dans différentes longueurs d'onde (bandes X, C, L). L'objectif est d'évaluer l'apport de la combinaison GPS-INSAR à la surveillance du volcan et de valider la méthode à la lumière d'une interprétation géophysique. Le traitement des séries temporelles GPS contribuera à la validation de la méthode. Des premiers traitements ont été réalisés sur des images COSMO-SkyMed, TerraSAR-X et TanDEM-X acquises entre février et octobre 2014 autour de l'éruption du 21 juin 2014. La correction troposphérique a été calculée à partir de 24 stations GNSS du réseau VOLOBSIS complété par les 3 stations du RGP. La figure 1 illustre les résultats obtenus avant et après correction troposphérique de l'interférogramme COSMO-SkyMed entre le 28 avril et le 9 juillet 2014. Des tests mettent en évidence une correction de l'ordre de 8 cm sur toute la zone.

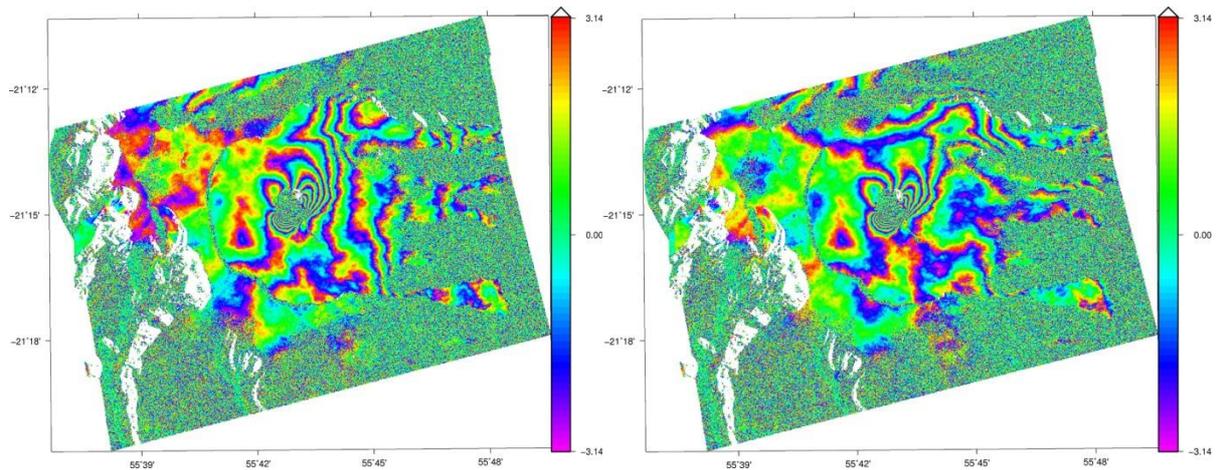


Fig. 1 : a) Differential phase before unwrapping ; b) Corrected Interferogram using all available GNSS receivers

Des comparaisons entre différentes méthodes d'interpolation des ZTD issus des mesures GNSS (spline et krigeage) ainsi que l'automatisation de la production de cartes interpolées avec validation croisée ont été menées. De plus elles ont été complétées par des comparaisons des corrections entre celles calculées par GNSS ou par modèle global (ERA-Interim). Les résultats sont illustrés par les figures 2 et 3. Des cartes de retard troposphérique et de déplacement corrigés ont été produites. Le krigeage semble être plus intéressant quand le réseau GNSS est plus dense, donc dans notre cas l'interpolation par spline serait meilleure. Une différence d'environ 20 mm a été trouvée entre les ZTD calculés à partir du modèle global d'atmosphère et ceux par GNSS. La déformation LOS (dans la direction du satellite) après correction par modèle global atmosphérique semble plus proche de la valeur des séries temporelles GPS pour 2 stations.

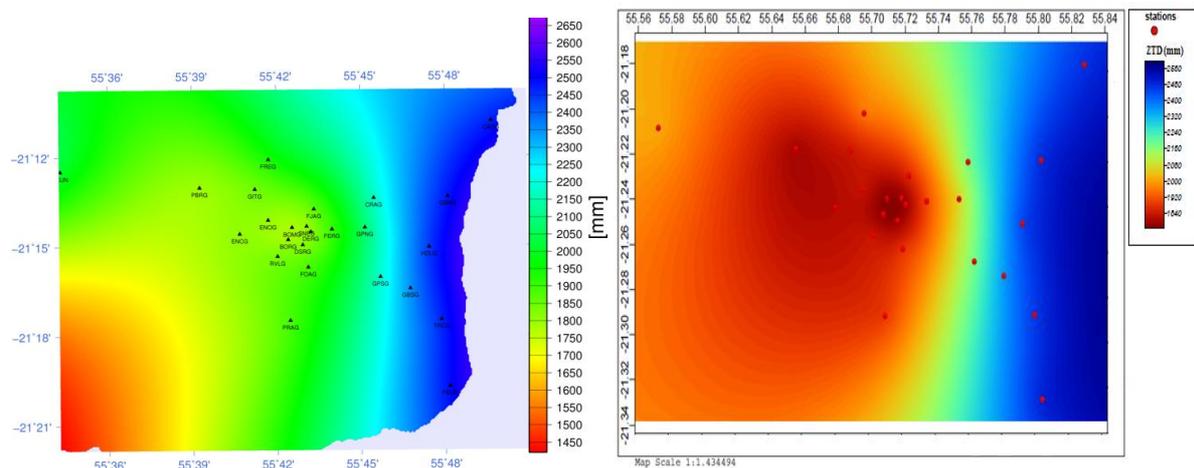


Fig. 2 : ZTD GNSS interpolé par splines (à gauche) et par krigeage (à droite)

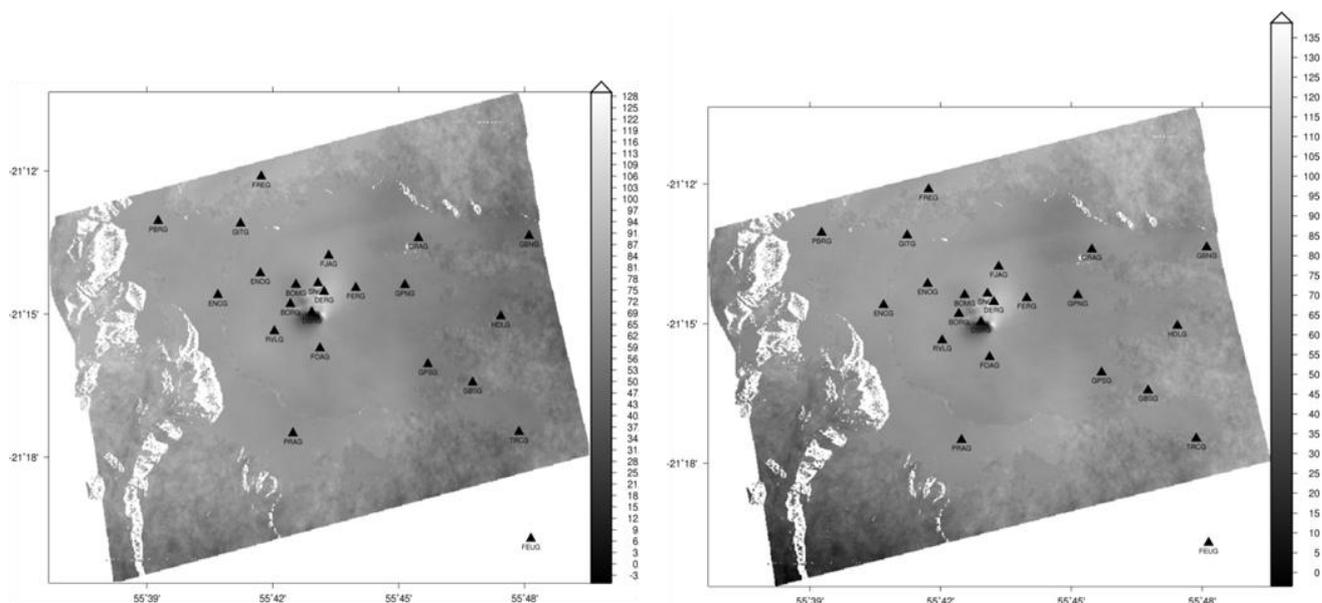


Fig. 3 : Phase différentielle déroulée corrigée de la troposphère à gauche par modèle global d'atmosphère et à droite par GNSS

Un article est en cours de préparation pour publier les résultats de ces travaux. Ils ont fait et feront également l'objet de communications lors de congrès scientifiques internationaux.

- *Lisbonne (Portugal)*

Nous étudions un site de l'agglomération de Lisbonne où cohabitent des déformations d'origine géotechnique liées à la construction du métro, liées au niveau d'eau souterraine et à des effets de surcharge liés à la proximité de l'estuaire du Tage. Des données ENVISAT/ASAR acquises autour de Lisbonne à 8 dates sur une période d'environ 1 an entre décembre 2008 et octobre 2009 ont été traitées avec 10 stations GNSS. Les premiers résultats mettent bien en évidence l'intérêt de la correction atmosphérique qui permet de rendre visible la déformation géotechnique attendue alors qu'elle ne l'était pas avant correction (voir figure 4). Par contre, du fait du faible nombre de stations, cette correction n'est fiable que proche des stations.

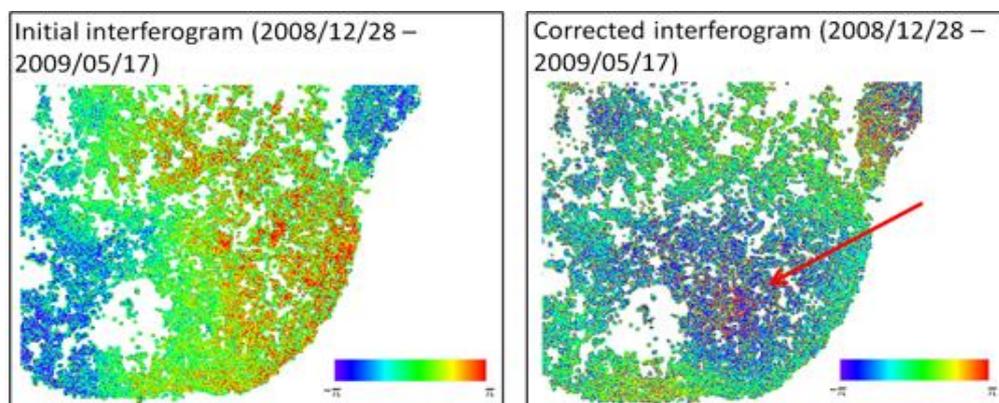


Fig. 4 : Interférogrammes initial et corrigé de la troposphère calculée par GPS

Là encore les résultats issus de l'interpolation des ZTD avec les méthodes spline cubique et krigeage ont été comparés (Figure 5). Le krigeage semble conduire à une correction plus petite. Les résultats sont très dépendants du nombre et de la répartition des stations GNSS ainsi que de la méthode d'interpolation utilisée pour calculer le ZTD à chaque PS (permanent scatterer). Néanmoins l'étude ne porte pas sur assez de stations GNSS et d'images pour pouvoir conclure. Les résultats de ces travaux ont été présentés lors de colloques internationaux.

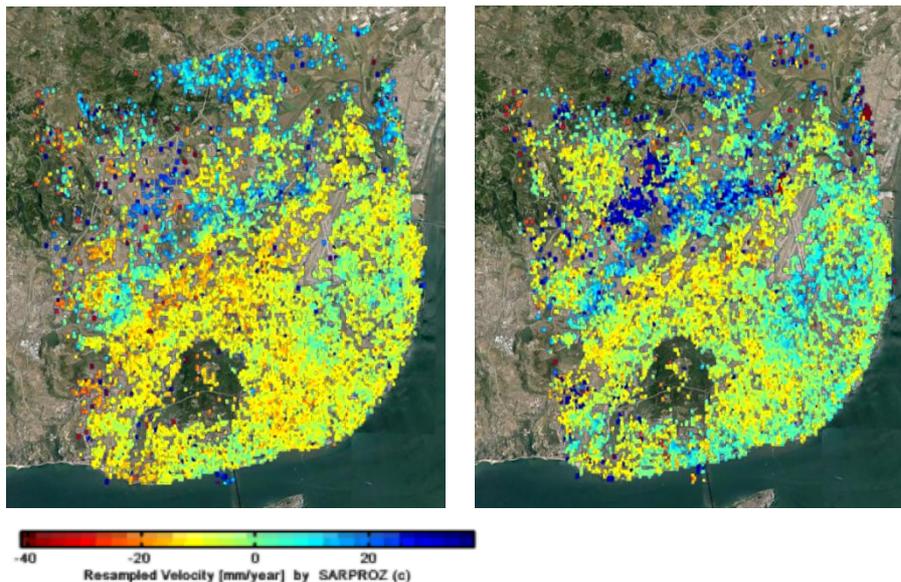


Fig. 5 : carte des déformations de Lisbonne après interpolation des ZTD GNSS par spline cubique (à gauche) et par krigeage (à droite)

Prospective

Les travaux sur la combinaison des mesures GNSS et INSAR se poursuivront sur les deux niveaux à savoir (1) la combinaison statistique et (2) les corrections atmosphériques.

Pour le premier aspect il s'agira essentiellement de traiter le déroulement de phase radar, d'adapter l'outil à des données réelles.

Pour le deuxième aspect, les travaux se poursuivront sur les deux sites d'étude. Concernant le Piton de la Fournaise, les comparaisons des déformations GPS et INSAR corrigées de l'ensemble des stations seront poursuivies sur des périodes plus longues. Les aspects interpolation des corrections troposphériques GNSS seront affinés. Pour la ville de Lisbonne, un plus grand nombre de stations GNSS et d'images seront considérés et d'autres techniques d'interpolation seront explorées. La comparaison des déplacements en LOS par rapport à ceux obtenus avec l'approche PSI sera également menée.

Dans le cadre de ce projet, une collaboration avec la société Cémentys vient de débuter, avec notamment deux stages M2 co-encadrés en 2017.

Participants au projet

| | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Joëlle Nicolas | GeF, CNAM |
| Laurent Morel | GeF, CNAM |
| Elisabeth Simonetto | GeF, CNAM |
| Stéphane Durand | GeF, CNAM |
| Frédéric Durand | GeF, CNAM |
| Véronique Merrien-Soukatchoff | GeF, CNAM |
| Jean-Luc Froger | Université Blaise Pascal, CNRS |
| Laurent Polidori | CESBIO |

4.6. VLBI

Introduction

Sur la période 2012-2016, des équipes du GRGS ont contribué à la fois à l'analyse des données VLBI dans un but opérationnel et à l'exploitation scientifique de ces données. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs avancées dans des domaines divers, depuis la construction des repères de référence (ITRF2014 et ICRF3) jusqu'à l'inférence des propriétés de la Terre profonde et les tests d'invariance de Lorentz. Le VLBI étant une science à l'interface de la géodésie, de la géodynamique et de l'astronomie, le lecteur se reportera également aux sections de ce document relatives à l'établissement des repères de référence et aux combinaisons multi techniques qui emploient les données VLBI conjointement à celles d'autres techniques.

Analyse opérationnelle

L'analyse opérationnelle des données de VLBI astrogéodésique s'effectue au centre d'analyse du SYRTE à l'Observatoire de Paris (OPAR). Ce centre est également affilié au service international VLBI (IVS). Il contribue régulièrement depuis 2007 aux tâches suivantes :

- Réanalyse annuelle ou trimestrielle de l'ensemble des observations VLBI disponibles depuis 1979 (une solution complète par an entre 2012 et 2016) ;
- Analyse opérationnelle des nouvelles observations (sessions de 24h et sessions intensives) ;
- Diffusion des résultats (CRF, TRF, EOP, séries temporelles de coordonnées des radiosources, séries temporelles de coordonnées des stations) sur les centre de données de l'IVS et/ou sur le site Internet (<http://ivsopar.obspm.fr>) ;
- Diffusion des équations normales non contraintes au format SINEX à destination du centre de combinaison de l'IVS.

Dans le cadre de la participation du SYRTE aux groupes de travail « 3rd Realization of the International Celestial Reference Frame » (ICRF3 ; 2012-2015 et 2015-2018 sous les présidences respectives de C. Jacobs, JPL, and P. Charlot, Université de Bordeaux), OPAR a proposé plusieurs catalogues prototypes qui sont analysés en interne au groupe de travail. Les conclusions de ces comparaisons ainsi que le catalogue ICRF3 final seront rapportées dans le document final du groupe de travail prévu pour 2018. OPAR a également contribué au segment VLBI de la construction de l'ITRF2014 en soumettant une réanalyse complète de la base de données observationnelles selon les directives de l'IVS.

En parallèle, une recherche a été menée concernant les procédures de validation de la stabilité du repère céleste (Lambert 2013) et les déformations associées aux catalogues VLBI (Lambert 2014). Ces dernières ont été appliquées en 2016 dans le cadre du consortium d'analyse de la mission Gaia (Gaia DPAC CU9) pour la validation de la première version du catalogue astrométrique (Arenou et al. 2016).

Faits marquants de la période 2012-2016

Nutation par VLBI et mesure des résonances associées au noyau et à la graine

Le VLBI est la seule technique permettant la mesure précise des nutations de la Terre. Ces nutations sont la réponse rotationnelle de la Terre au forçage gravitationnel de la lune et du soleil et l'amplitude de la réponse dépend en partie de la structure interne : elle est amplifiée lorsque la fréquence d'excitation astronomique se situe au voisinage de la fréquence de résonance associée à l'une des couches interne de la Terre (manteau, noyau externe, graine).

Les observations VLBI révèlent des écarts significatifs de quelques 0.1 mas au modèle de nutation IAU 2000A, ce qui reflète des imperfections dans l'ajustement des paramètres géophysiques qui entrent dans la fonction de transfert de Mathews et al. (2002, JGR 107, doi:10.1029/2001JB000390).

Plusieurs travaux ont été entrepris au SYRTE pour améliorer la détermination des fréquences de résonance et donc améliorer le modèle de nutation tout en contraignant mieux la structure et la composition de la Terre profonde. Ces travaux devraient constituer le point de départ d'un projet de plus longue haleine s'articulant à la fois dans l'optique de contribuer à la construction d'un nouveau modèle de nutation et dans une utilisation novatrice des données de géodésie spatiale et de mesures de surface d'origine diverse (VLBI, GNSS, gravité...). L'originalité de ces travaux réside dans une analyse critique des séries de nutation (Gattano et al. 2017), dans l'utilisation de séries d'observations plus longues et de qualité meilleure que dans les études précédentes, dans l'utilisation d'une méthode d'inversion bayésienne plus apte à évaluer l'intervalle de confiance des estimations et dans l'analyse conjointe de données VLBI (nutation) et de gravimètres à supraconducteurs (gravité de surface, dont l'amplitude répond en partie aux mêmes résonances que la nutation ; Rosat et al. 2017).

Les centres d'analyse de l'IVS mettent à disposition de la communauté une dizaine de séries de nutation auxquelles s'ajoutent les combinaisons de l'IVS et de l'IERS (Observatoire de Paris et USNO). La question se pose quant à la précision interne de ces séries, à leur cohérence entre elles et à la possibilité de leur exploitation géophysique. Une étude menée par C. Gattano au SYRTE (Gattano et al. 2017) a particulièrement exploré la cohérence des séries en terme de détermination des trois résonances principales associées à un modèle de Terre à trois couches (mode de Chandler, FCN et FICN). Il apparaît des incohérences significatives sur les amplitudes des nutations principales. En revanche, si les estimations de la fréquence de résonance de la FCN sont raisonnablement cohérentes entre les différentes séries, celles de la FICN varient de 100%, rendant non pertinente toute conclusion géophysique.

Ces incohérences sont imputables à la configuration d'analyse choisie par le centre d'analyse ou de combinaison et au logiciel d'analyse (incluant la méthode d'inversion). Toutefois, à l'heure actuelle, ces origines ne sont pas séparables. Cette étude met en relief le besoin urgent de comprendre les sources d'erreurs en analyse VLBI, notamment celles liées à la stratégie d'analyse et à l'algorithme d'inversion qui fait la différence entre les logiciels comme Calc/Solve, VieVS ou DYNAMO (moindres carrés) et OCCAM (filtrage de Kalman). Notons que plusieurs campagnes de comparaison de logiciels VLBI ont été entreprises par divers instituts ces dix dernières années mais sans jamais aboutir à une conclusion

pertinente, notamment parce qu'elles se cantonnaient bien souvent à la comparaison du retard théorique ou des O-C, ce qui constitue déjà une entreprise délicate, et n'abordaient jamais le problème de l'inversion.

Lors d'une collaboration entre le SYRTE et l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS, Université de Strasbourg, EOST, CNRS), les mêmes résonances précitées ont été déterminées à partir des nutations VLBI données par la série combinée de l'IVS et des mesures de gravité de surface par gravimètres à supraconducteurs (Rosat et al. 2017). Les paramètres estimés par méthode bayésienne (algorithme de Metropolis-Hastings avec chaîne de Markov) sont ici les fréquences (complexes) de résonance et les amplitudes associées.

L'étude révèle le niveau de précision comparable des deux techniques pour l'estimation des paramètres relatifs à la FCN. Pour la FICN, il apparaît qu'aucune des deux techniques n'est encore assez précise pour poser des contraintes objectives sur ces paramètres. Il semble notamment que l'estimation converge vers une valeur de la période proche l'annuel, ce qui pourrait être causé par la contribution mal déterminée de l'atmosphère à cette période. Outre une modélisation précise des effets atmosphériques sur les nutations, une amélioration des résultats demande des séries plus longues.

On note que ces travaux trouvent une continuation logique en 2017 et plus généralement dans la prospective VLBI du SYRTE dans les projets (entamés en 2016) de combinaison VLBI-gravimétrie (postdoctorat CNES de Y. Ziegler) et d'inversion directe des retards VLBI pour obtenir les paramètres géophysiques (thèse de I. Nurul Huda) dirigés par S. Lambert et C. Bizouard.

Tests de l'invariance de Lorentz par VLBI

Les violations de la symétrie de Lorentz peuvent être décrites dans le cadre de la théorie des champs par l'extension du modèle standard (SME), contenant à la fois la relativité générale et le modèle standard utilisé en physique des particules.

Dans le secteur de la gravité, il existe un paramètre contraignant l'amplitude d'une violation. Ce paramètre avait été estimé récemment à au plus 10^{-4} en utilisant les données de Gravity Probe B et de pulsars binaires (Bailey and Kostelecky 2013, PRD 74, 045001).

Les observations de déflexion de la lumière par le Soleil, dont le VLBI actuel est la version moderne et bien plus précise que l'œil d'Eddington, constituent l'expérience idéale pour tester la relativité générale, contraignant le paramètre post-newtonien à 10^{-4} , ce qui constitue la meilleure mesure depuis le sol (Lambert et Le Poncin-Lafitte 2009, 2011), bien que des contraintes plus fortes d'un ordre de grandeur aient été obtenues avec l'analyse des données radio de la sonde Cassini (Bertotti et al. 2005, Nature 425, 374).

Une hypothétique violation de la symétrie de Lorentz modifierait le retard VLBI. Ce changement peut être paramétré et estimé directement lors de l'analyse des retards. Le SYRTE a ainsi introduit la dérivée partielle du retard VLBI par rapport au paramètre s^{TT} dans le logiciel Calc/Solve (voir Le Poncin-Lafitte et al. 2016) et a obtenu une estimation directe au niveau de 10^{-5} .

Ce travail a deux qualités : d'une part il améliore d'un ordre de grandeur la contrainte sur s^{TT} , d'autre part il est basé sur une estimation directe par opposition aux estimations

« postfit » qui sont effectuées sur les résidus. Il positionne également le SYRTE et le GRGS dans l'utilisation des techniques de géodésie au sol ou spatiale pour les tests de physique fondamentale.

PROSPECTIVE

Les analyses VLBI continueront en mode opérationnel, incluant le traitement des observations routinières à des fins de mesures de rotation terrestre et d'établissement de repères de référence spatiaux. Le déploiement de VGOS demandera très certainement une intensification de l'activité (par exemple le traitement de sessions diurnes tous les jours au lieu de deux fois par semaine en moyenne aujourd'hui). Cela impliquera nécessairement un renforcement de l'automatisation des analyses et de la capacité de stockage (autant sur les serveurs du centre d'analyse que sur ceux du centre de données primaire de l'IVS).

Les récents progrès de la combinaison multitechnique des équations normales issues des quatre techniques (VLBI, GNSS, télémétrie Laser, DORIS) laissent supposer une génération de paramètres d'orientation terrestre en mode opérationnel avec le logiciel DYNAMO d'ici, environ, 2019. Cette solution, implémentée au SYRTE, bénéficie de l'expertise du centre d'analyse VLBI pour le segment relevant de cette technique.

Nous comptons également renforcer la recherche sur le thème de la Terre interne, dont l'analyse des nutations constitue l'une des pierres angulaires. Comme mentionné plus haut, un postdoctorat (2016-2017) et un doctorat (2016-2019) sont en cours sur ce thème. Le premier renforce le lien avec les autres techniques géophysiques en intégrant les mesures de gravité de surface et l'expertise sur les gravimètres à supraconducteurs. Le second va donner au logiciel d'analyse VLBI (Calc/Solve) les capacités d'estimer directement des paramètres géophysiques internes. La prolongation naturelle de ces travaux est d'une part l'extension à d'autres techniques ou d'autres observables (par exemple l'intégration des variations verticales des positions des stations mesurées par l'ensemble des techniques qui le permettent ou encore les variations de la longueur du jour), et d'autre part le développement adéquat du logiciel de combinaison multitechnique du GRGS (GINS/DYNAMO). Ces projets ambitieux donneront lieu à des propositions de thèses et de postdoctorats dans un futur proche au SYRTE.

Participants au projet

| | |
|---------------------------|--|
| Christophe Barache | Obs. de Paris, SYRTE, maintenance du centre de données primaire de l'IVS |
| César Gattano | OP/SYRTE (Doctorant) |
| Sébastien Lambert | OP/ SYRTE, coordination des analyses VLBI |
| Jean Souchay | OP/SYRTE (contrepartie optique de l'ICRF) |

4.7. Surcharges

Nous avons poursuivi la modélisation des effets de charge sur les différents observables géodésiques, distribués par le service des charges développé à l'EOST à Strasbourg (<http://loading.u-strasbg.fr>). Nous avons mis à disposition un outil graphique permettant de représenter les différentes séries temporelles des déplacements horizontaux et verticaux pour l'ensemble des modèles disponibles, pour environ 2000 stations comprenant entre autres les sites de la dernière version de l'ITRF. Ces produits sont régulièrement mis à jour (délai de quelques mois environ).

En parallèle, différentes études ont été conduites afin de comparer ces modèles de charge aux observables GNSS. Premièrement, une étude des effets de surcharge induits par la tempête Xynthia (2010) a été menée notamment dans le cadre de la thèse de Marcell Ferenc (2014). Il s'agissait entre autres de mieux comprendre quelle est la réponse de l'océan dans le cas d'une forte tempête se déplaçant rapidement en exploitant la densité du réseau français de stations permanentes GPS (RGP). Cette étude a montré que la technique de positionnement IPPP avec un échantillonnage sub-diurne permet d'observer les déformations crustales induites par les effets des surcharges non maréales et de suivre leur évolution au cours du passage de la tempête. Au cours de cette étude nous avons aussi montré que l'effet océanique non maréal est très important jusqu'à 50 km des côtes et que l'effet atmosphérique est mieux modélisé en prenant en compte la dynamique des océans plutôt qu'une hypothèse de baromètre inversé. Ainsi ce type d'étude contribue à la validation de la modélisation des effets de charges.

Une deuxième étude porte sur la comparaison systématique entre les déplacements verticaux observés à l'échelle globale (solution de l'Univ. de la Rochelle ULR6) et les charges atmosphériques, océaniques et hydrologiques sur l'ensemble du spectre fréquentiel, c'est-à-dire de 1 jour aux variations interannuelles. La méthodologie choisie a été de corriger a posteriori les observations GPS des différentes contributions et d'étudier la réduction de variance, par bandes de fréquences et en moyennant par bandes de latitude de 10 degrés. Ce choix a été guidé par la dépendance en latitude du bruit observé, celui-ci étant maximal au niveau de l'équateur. Un des résultats principaux a été de montrer que la combinaison des charges atmosphériques (en utilisant le modèle opérationnel de l'ECMWF), océanique (en utilisant le modèle barotrope TUGO-m forcé par les vents et la pression) et hydrologique (peu importe le modèle) permettait d'expliquer au mieux les observations GPS sur l'ensemble du domaine fréquentiel considéré. Notamment, nous avons montré que la combinaison ECMWF+TUGO-m était en meilleur accord avec le GPS que la modélisation des charges atmosphériques en supposant une réponse en baromètre inversé des océans. Toutefois, ces modélisations de charges ne permettent au mieux d'expliquer que 50% de la variabilité des séries GPS aux hautes et moyennes latitudes, mais au maximum que 10% aux basses latitudes. Il semble évident que la modélisation trop imprécise des délais troposphériques explique une part importante du désaccord entre les modèles de charges et les solutions GPS. Un article (Mémin et al., 2017) a été soumis dans Journal of Geodesy.

Une troisième étude, commencée par le stage d'Adélie Corbeau (ESGT, 2015), a porté plus spécifiquement sur les signaux hydrologiques principalement annuels sur l'Amérique du Sud. Le traitement GPS effectué au laboratoire GeF du CNAM utilise le logiciel GINS-PC en mode iPPP, avec les produits d'horloge et d'orbite REPRO2 du Centre d'Analyse IGS du

GRGS (CNES-CLS). Comme attendu, un fort signal annuel de quelques centimètres est observé, principalement induit par l'hydrologie continentale. Toutefois, les séries GPS montrent un défaut de modélisation d'environ 50% des modèles hydrologiques globaux, principalement dû aux composantes manquantes, à savoir les nappes phréatiques et plus particulièrement les eaux de surface.

Nous avons développé un modèle de stockage par les fleuves en re-routant les écoulements des modèles hydrologiques globaux, en ajustant le débit à l'aide des mesures altimétriques et l'imagerie spatiale (Chauveau & Boy, 2014 ; Boy, 2015). En ajoutant cette contribution à l'humidité du sol (et éventuellement la neige) des modèles hydrologiques, on observe un meilleur accord entre les déplacements verticaux observés et la somme des effets de charge (atmosphère, océan et hydrologie), comme le montre la figure 1.

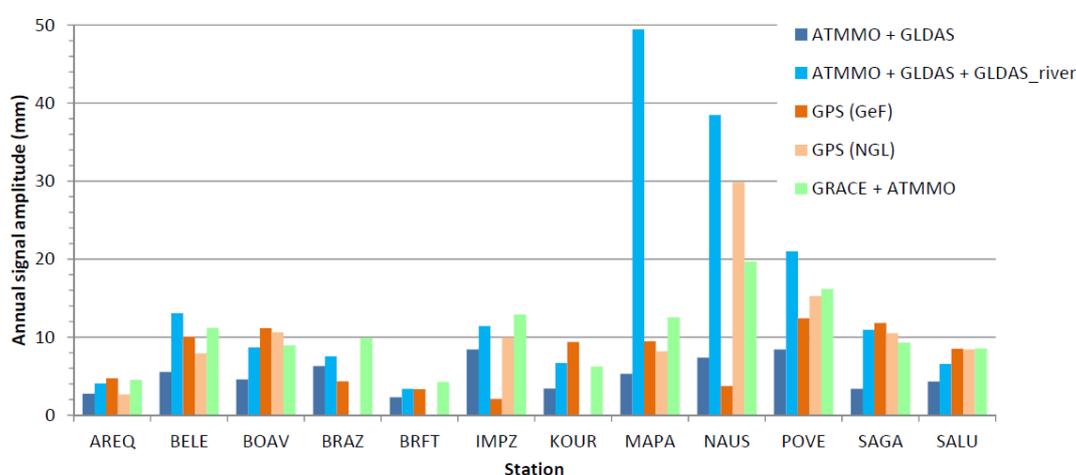


Figure 1 : Amplitude annuelle du signal GPS vertical observé (solutions du laboratoire GeF du CNAM et du National Geodetic Laboratory de l'Univ. du Nevada à Reno, USA) et des différentes modélisations des effets de charges ; ATMMO+GLDAS correspond aux charges atmosphériques, océaniques et hydrologiques avec les modèles ECMWF+TUGO-m + GLDAS/Noah ; ATMMO+GLDAS+GLDAS_river correspond au modèle précédent ajouté à une modélisation des eaux de surface. La combinaison GRACE+ATMMO est la somme ECMWF+TUGO-m et la solution mascon globale issue de la mission GRACE.

La dernière étude, commencée par le stage de Pierre Baudet (EOST, 2016), a permis d'introduire la modélisation des charges atmosphériques, océaniques et hydrologiques au niveau des observations dans le traitement des données GPS avec le logiciel GAMIT/GLOBK. Plusieurs solutions globales d'un réseau global de 117 stations sur la période 2003-2015 ont été calculées : une première sans prise en compte des effets de charge environnementale (solution standard), et trois autres avec différents modèles de charge en a priori : ECMWF/IB + GLDAS/Noah, ECMWF+TUGO-m + GLDAS/Noah et ECMWF+TUGO-m + solution mascon globale issue de la mission GRACE. Les différentes solutions avec prise en compte des charges ont été alors comparées avec la solution classique.

Nous avons pu montrer que le modèle barotrope TUGO-m, forcé par la pression et les vents de l'ECMWF, permet une meilleure réduction des observations GPS que le modèle classique du baromètre inversé, tout particulièrement pour la composante verticale. La prise en

compte des charges hydrologiques ne permet qu'une réduction imparfaite de la variabilité saisonnière et à plus haute fréquence du GPS, notamment en raison des limites des modèles hydrologiques (composantes manquantes comme les eaux de surface et les nappes phréatiques, mais également la cryosphère). Par contre, l'hydrologie continentale déduite de la mission GRACE permet une réduction plus importante que le modèle GLDAS/Noah, malgré ses résolutions moindres (de l'ordre de la centaine de kilomètres et un mois au lieu de 25 kilomètres et 3 heures) (voir la figure 2). Toutefois, une large part de la variabilité GPS ne peut être expliquée par les phénomènes de charge ; la source principale de ce bruit est probablement induite par la troposphère. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Mémin et al. (2017).

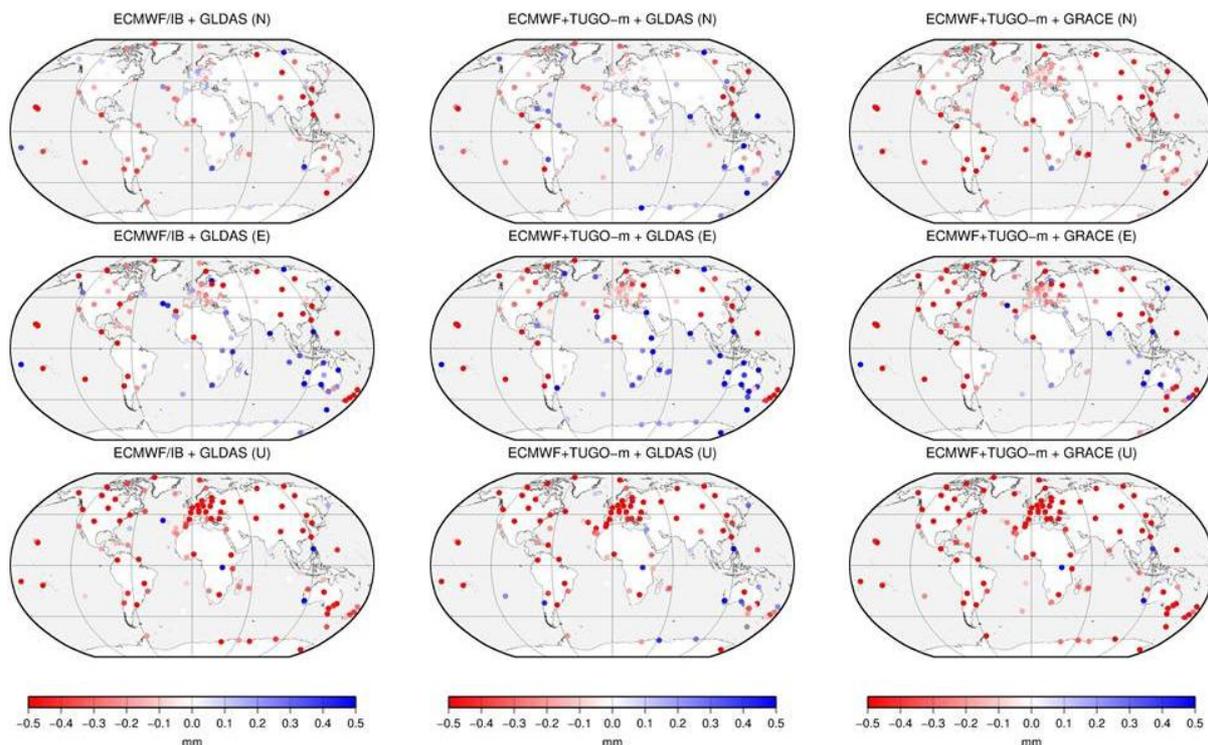


Figure 2 : Réduction (rouge) ou augmentation (bleu) de la variabilité des déplacements GPS observés pour 3 solutions comprenant les effets de charge (ECMWF/IB + GLDAS/Noah, ECMWF+TUGO-m + GLDAS/Noah et ECMWF+TUGO-m + solution mascon globale GRACE) par rapport à la solution GPS standard, c'est-à-dire sans correction de charges).

PROSPECTIVE

Nous allons poursuivre la modélisation des effets de charge et leur mise à disposition, notamment en incluant les nouvelles versions des modèles GLDAS/Noah et MERRA2 ; les versions précédentes ont été stoppées en 2016. Courant 2017, l'ECMWF va également délivrer sa nouvelle réanalyse ERA5, avec des améliorations significatives en terme de résolution (1 heure notamment, au lieu de 3 ou 6 heures actuellement pour son modèle opérationnel ou la réanalyse ERA interim). En collaboration avec F. Lyard, D. Allain (LEGOS) et P. Gégout (GET), une version améliorée de TUGO-m, avec notamment une prise en compte des effets d'auto-attraction et de charges, est en cours de développement et sera forcée par ERA5.

Les couches fluides superficielles (atmosphère, océan, hydrologie continentale) constituent une source importante de variabilité de positionnement, due d'une part à des effets en déformation (surcharge) et d'autre part à des variations du trajet des ondes électromagnétiques dans la troposphère (délai).

Elles agissent sur l'ensemble du spectre fréquentiel, en ajoutant un bruit entre des périodes de quelques heures au cycle saisonnier, mais également en introduisant des tendances à long terme dues aux grands cycles climatiques.

Nous allons donc poursuivre l'étude de l'impact de la prise en compte des effets de charge au niveau des observations dans le traitement des données de géodésie spatiale, e.g. GNSS, DORIS, SLR et VLBI, et l'estimation des effets induits sur les systèmes de référence. A cet effet, nous allons re-soumettre la proposition IGeMoPP (Improved Geophysical Models for Precise Positioning) pour financement à l'ANR.

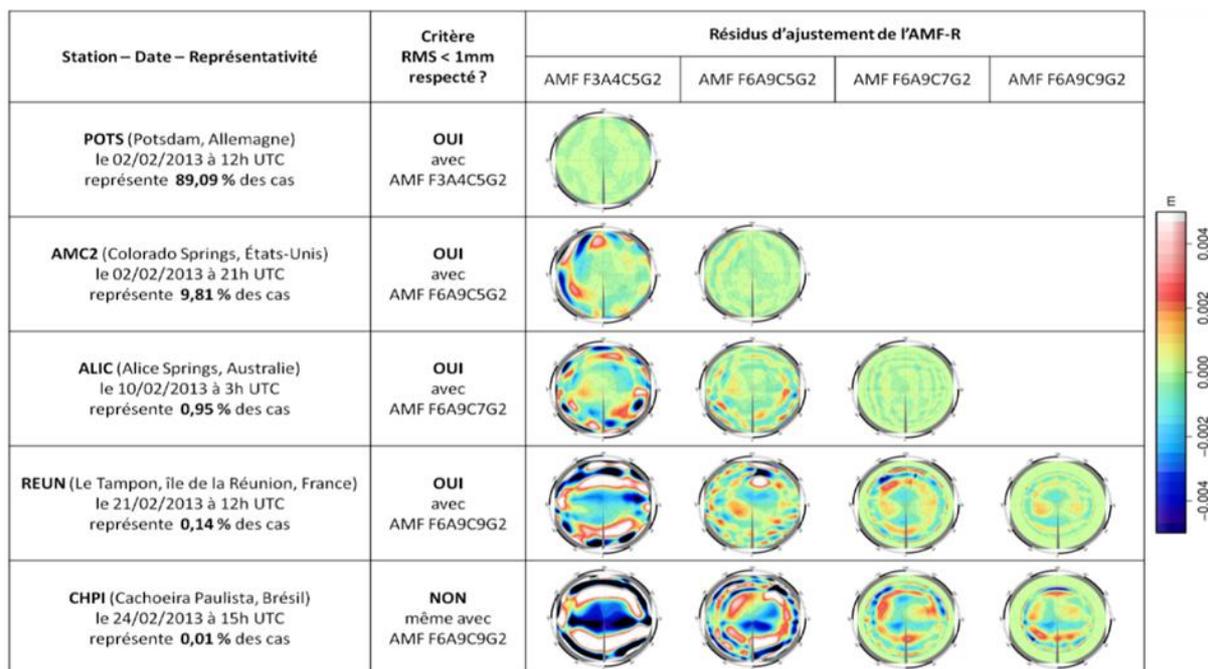
Participants au projet

| | |
|----------------------------|--------------------------------|
| Jean-Paul Boy | EOST/IPGS |
| Joëlle Nicolas | ESGT/GeF |
| Antony Mémin | OCA/Geoazur |
| Pascal Gegout | OMP/GET |
| A. Santamaria-Gomez | OMP/GET |
| M. Gravelle | Univ. La Rochelle |
| X. Bertin | Univ. La Rochelle |
| C. Watson | Univ. of Tasmania, Australie |
| P. Tregoning | Australian National University |
| T. Van Dam | Univ. Luxembourg |
| Z. Li | Univ. Luxembourg |

4.8. Propagation

La modélisation des retards atmosphériques a été revisitée au GRGS. Une nouvelle modélisation dite AMF (Adaptive Mapping Function) qui repose sur les modèles 3D ECMWF des paramètres d'état de l'atmosphère et sur l'intégration de l'équation eikonale a été mise en œuvre dans le logiciel Horizon (P. Gégout, C. Desjardins).

Ce travail de modélisation des délais troposphériques utilise l'information tridimensionnelle contenue dans les analyses du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). La variation spatiale des délais est paramétrée dans la fonctionnelle AMF par quelques dizaines de coefficients en cohérence avec les lois physiques régissant chacun des paramètres. (Gégout et al, 2011). Une analyse de la sensibilité des délais selon différentes hypothèses simplificatrices de modélisation a été effectuée de façon à optimiser les traitements en fonction du nombre de paramètres. L'influence de l'eau liquide et des cristaux de glace contenus dans l'atmosphère sur le délai troposphérique a également été étudiée. La contribution de ces phases de l'eau, fortement variablement temporellement et spatialement, peut représenter jusqu'à 1% du délai troposphérique. Dans 99,9% des cas, la précision du millimètre a été atteinte.



Exemples de résidus AMF à différents sites en fonction du nombre de paramètres ajustés. Dans 99,9% des cas, la modélisation représente le « ray-tracing » du modèle ECMWF à mieux que 1 mm.

Des tests de restitution d'orbites des satellites GPS ont montré une bonne cohérence des délais AMF sans ajustement de délai troposphérique vertical. Lorsqu'en complément certains coefficients des AMF sont ajustés, la précision des restitutions d'orbites reste celle des solutions actuelles, avec une moyenne quadratique de l'ordre de 7 à 8 millimètres. Cependant l'étude a montré que l'utilisation des AMF améliore significativement la répétitivité horizontale des positions de stations par rapport à l'approche communément utilisée et recommandée par l'International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS).

De plus, la prise en compte de l'ellipticité de la Terre et la reconstruction précise de la structure tridimensionnelle du champ de réfractivité par rapport à un ellipsoïde dans la modélisation des délais troposphériques implémentée dans le logiciel Horizon permettent d'améliorer significativement les répétitivités des positions horizontales journalières des stations par rapport à l'approche standard actuellement utilisée au centre d'analyse IGS CNES/CLS.

En comparant deux à deux les expériences ayant le même nombre de paramètres troposphériques ajustés i.e. AMFXF (sans ajustement de paramètres), AMFXZ/GPTGZ (avec ajustement d'un facteur d'échelle par 3h) et AMFXG/GPTGG (avec en plus des gradients journaliers ajustés), les AMF s'avèrent générer des résidus de mesures de phase en moyenne inférieurs à ceux du modèle GPT2/VMF1, ce qui semble indiquer que les AMF sont plus cohérentes avec les mesures GPS que ne l'est GPT2/VMF1.

| Modèle AMF | latitude | longitude | hauteur |
|--------------------|-----------------|------------------|----------------|
| AMFXF- | 2.62 | 2.32 | 12.07 |
| AMFXZ- | 2.02 | 1.87 | 6.20 |
| AMFXG | 1.30 | 1.18 | 5.70 |
| Modèle GPT2 | | | |
| GPTGZ | 2.58 | 2.19 | 6.38 |
| GPTGG | 1.98 | 1.74 | 5.81 |

Moyenne des répétitivités en millimètres de chacune des composantes des coordonnées géodésiques sur l'ensemble des stations du réseau pour les différentes expériences sur février 2013.

Prospective

Il reste dorénavant à valider plus systématiquement cette approche sur des traitements orbitaux avant une utilisation opérationnelle qui demande de mettre en place une organisation de génération des délais par le logiciel Horizon et des moyens informatiques adaptés. Il serait par ailleurs utile d'actualiser la formulation des indices de réfractivité utilisée (notamment les termes de polarisabilité et magnétisabilité issus de mesures de laboratoire anciennes) et d'obtenir des champs météorologiques horaires (plutôt que tri-horaires) pour affiner les interpolations temporelles

Participants au projet

| | |
|---------------------------|----------------|
| Pascal Gegout | GET/CNRS |
| Camille Desjardins | Doctorante GET |
| Richard Biancale | CNES |
| Laurent Soudarin | CLS |

4.9. Evolution logiciel GINS

Développement des outils logiciels du GRGS

GINS : Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées

Les logiciels GINS/DYNAMO du CNES/GRGS et la base de données inhérente sont principalement développés et maintenus par l'Equipe CNES/GS sur les machines de calcul intensif du CNES. Ils sont mis à disposition des utilisateurs GRGS et extérieurs sur la machine "Bérénice" située sur le réseau sécurisé de l'OMP (Midi-Pyrénées). Pour des applications scientifiques, les utilisateurs extérieurs au CNES peuvent donc se connecter à « Bérénice » pour utiliser les logiciels. Ce travail se fait par le biais d'une Interface Homme Machine (IHM) qui permet un accès plus didactique aux procédures Observatoire d'utilisation de GINS. Une formation au GINS-PC est organisée chaque année ainsi que les journées GINS avec une rencontre entre les utilisateurs et les développeurs de GINS (30 personnes).

Parmi les modifications de GINS on peut noter :

- La mise en conformité par rapport aux standards IERS2010.
- Coordonnées stations ITRF2014 avec modélisation post-sismique.
- Les modélisations multi-constellation (GPS, GLONASS, Galileo ...).
- L'ajout des satellites HY2A, JASON3, SENTINEL3A, MAVEN.
- Les modèles de correction troposphérique GTP2/VMF1 et AMFX et la correction ionosphérique de 2^{ème} ordre.
- Fonctions de mesure VLBI satellite (position dans le plan du ciel) et DirectToEarth (mesure directe lander sur une planète-station sur Terre).
- Modélisation de la déformation thermique des antennes VLBI.
- Modèles de dégazage cométaire (pour Rosetta).
- Prise en compte de l'attitude d'un récepteur GNSS mobile (type bouée).
- Refonte du fichier d'entrée de GINS (directeur) pour améliorer la lisibilité et minimiser les erreurs de saisie.
- Introduction d'un filtrage de Kalman pour les traitements GNSS PPP.
- Modélisation de la gravité par masses surfaciques.

Prospective

Les travaux de maintenance et d'évolution des logiciels sont une tâche constante de l'équipe CNES/GS. Mis à part les opérations de standardisation et d'optimisation du logiciel GINS, certains travaux sont d'ores et déjà envisagés, tels :

- Hybridation GPS-Galileo et exploitation des nouveaux signaux.
- Blocage des ambiguïtés de phase Galileo.
- Evolution des algorithmes de blocage des ambiguïtés entières dans le cas des LEO.
- Préparation aux traitements de GRACE-FO.
- Reformatage des labels des paramètres dans GINS/DYNAMO.

Participants au projet

| | |
|-----------------------------|---------|
| Jean-Charles Marty | CNES/GS |
| Julien Laurent-Varin | CNES/GS |
| Franck Reinquin | CNES/GS |
| Jean-Michel Lemoine | CNES/GS |
| Sylvain Loyer | CLS |

5 - OCEANS, HYDROLOGIE GLOBALE

5.1. Altimétrie spatiale

5.1.1. Variations du niveau des océans

5.1.2. Etalonnages

5.2. Phénomènes côtiers

5.3. Réflectométrie

5.1. Altimétrie spatiale

5.1.1. Variations du niveau des océans

Résumé des activités TOSCA 2016 sur le niveau de la mer

Niveau moyen global de la mer « altimétrique »

Bilan du niveau moyen global de la mer sur la période altimétrique : nouveaux résultats

Plusieurs études de bilan du niveau de la mer sur la période altimétrique ont été publiées ces dernières années en utilisant des jeux de données sélectionnés pour les composantes (Dieng et al. 2015a,b, Henry et al. 2013). Récemment, nous avons revisité cette question, avec le parti pris d'utiliser un grand nombre de produits pour chacune des composantes, puis de calculer les moyennes des produits et enfin d'estimer l'incertitude à partir de la dispersion des produits individuels autour de la moyenne (Dieng et al. 2015c, Chambers et al. 2016):

- Niveau moyen global de la mer : données AVISO, Université du Colorado (CU), NASA/GSFC, NOAA, CSIRO, Climate Change Initiative (CCI)
- Composante stérique : (a) avant Argo : données NOAA, Ishii & Kimoto, EN4 (b) données Argo de IPRC, SCRIPPS, Jamstec, Coriolis
- Glaciers : données de Marzeion (combinaison modèle + différents produits in situ)
- Calottes polaires : données IMBIE jusqu'en 2002 (les produits IMBIE sont des combinaisons d'estimations de bilan de masse basés sur l'altimétrie radar et laser, GRACE et l'InSAR), puis les produits CCI depuis 2002.
- Eaux continentales : (a) les estimations de Wada et al. (2016) pour l'effet net des barrages et du pompage de l'eau dans les aquifères, et (b), différents modèles hydrologiques globaux pour la variabilité interannuelle.

La figure 1 (gauche) compare le niveau de la mer altimétrique à la somme des composantes (chaque composante est aussi présentée). On note une excellente corrélation entre ces deux courbes, excepté au début de la série. Le niveau de la mer sur cette période (1993-1999) est basé sur Topex A, affecté par une importante dérive instrumentale. Des études récentes (Watson et al., 2015, Zadwasky et al., 2016) ont estimé la dérive de Topex A (impact de l'ordre de 1 mm/an sur le niveau de la mer) par comparaison avec des marégraphes et avec l'altimètre Poseidon. Si on prend en compte cette dérive sur la période 1993-1999, on obtient un accord remarquable entre niveau de la mer observé et somme des contributions (Figure 1, droite). Un résultat important est que la hausse du niveau de la mer sur la période altimétrique est un peu plus faible que considéré jusqu'ici, et égale à 2.9 +/- 0.4 mm/yr (au lieu de 3.3 +/- 0.4 mm/yr). Cette valeur est validée par la fermeture du bilan.

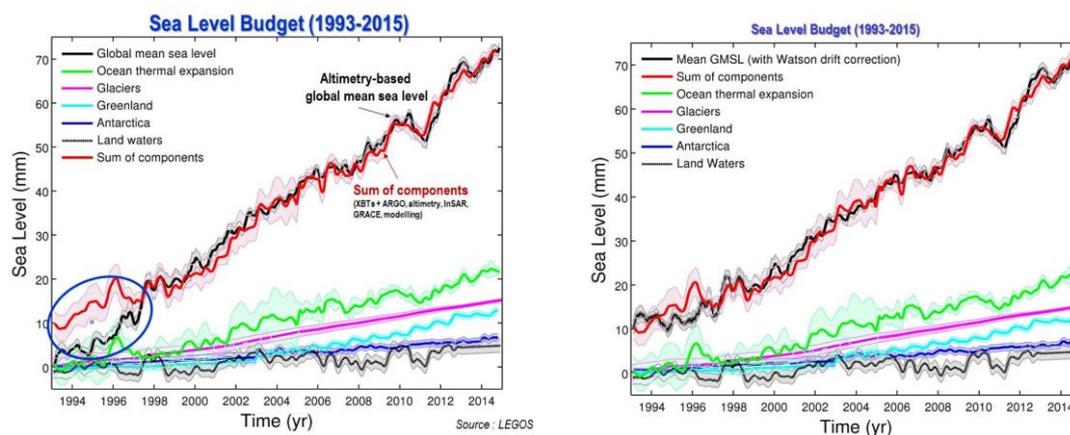


Figure 1 : Comparaison entre niveau de la mer observé et somme des composantes. Gauche : sans correction Topex A ; droite : avec correction Topex A entre janvier 1993 et décembre 1999.

Estimation de la contribution des eaux continentales à la hausse récente du niveau de la mer

Les échanges d'eau entre les continents et l'océan contribuent de façon importante sur le niveau de la mer : (1) à l'échelle de temps interannuelle lors des événements El Nino et la Nina (Cazenave et al. 2012, Meyssignac et al. 2013), et (2) en termes de tendance ; Les activités humaines (pompage de l'eau dans les nappes et construction de barrages sur les cours d'eau donnent lieu à des tendances 'séculaires' de signe opposé sur le niveau de la mer.

Cette composante 'anthropique' est très mal connue (données globales insuffisantes) et non – ou mal- modélisée dans les modèles hydrologiques. Cependant il est possible d'estimer la composante anthropique par une étude de bilan de la composante de masse au niveau de la mer en utilisant la mesure 'masse de l'océan' d'après GRACE corrigée des contributions de masse liées aux calottes polaires et aux glaciers. Le résidu représente la contribution des eaux continentales.

Cette approche développée par Dieng et al. (2015) conduit à une contribution >0 au niveau de la mer, de l'ordre de 0.3 mm/an. Mais comme le montre la figure ci-dessous, d'autres estimations récentes conduisent à des valeurs de signe opposé. Une étude a été entreprise pour comparer la contribution interannuelle des eaux continentales aux variations du niveau de la mer, en utilisant différents modèles hydrologiques globaux (ISBA, WGHM, MERRA, GLDAS). Il apparaît que c'est le modèle ISBA de MétéoFrance qui donne le meilleur accord avec le niveau de la mer interannuel (Carret et al., 2016b).

Utilisation de la variable 'niveau moyen global de la mer' pour contraindre le déséquilibre énergétique global du système climatique

La température moyenne globale de la Terre présente depuis 10-15 ans une hausse plus faible que durant les décennies précédentes. Cette situation appelée 'pause' ou 'hiatus' dans la littérature a fait l'objet de nombreux articles récemment.

Il a été montré en particulier que le 'hiatus' coïncide avec un refroidissement important de l'océan Pacifique tropical est, lui-même associé à une fréquence accrue des épisodes froid La

Nina durant les années 2000. Nous avons mené une nouvelle étude motivée par les questions suivantes : le refroidissement du Pacifique tropical est-il suffisant pour expliquer la hausse moins rapide de la température moyenne globale de la Terre T_{global} ? Si l'on exclut cette région, T_{global} augmente-elle comme au cours des dernières décennies ? Nous avons analysé à la fois la température de surface de la mer (SST) et la température de l'air en surface des continents (LST –pour land surface temperature-) depuis 1950. Après confirmation du refroidissement du pacifique tropical est, nous avons trouvé que quel que soit l'océan ou la zone de latitude, SST et LST ont augmenté beaucoup moins vite pendant 2003-2013 qu'auparavant, indiquant que le hiatus ne s'explique pas par le seul refroidissement du pacifique tropical est mais est bien un phénomène global.

Un résultat important de cette étude est que les tendances décennales de la température moyenne de la Terre depuis 1950 sont pilotées par la variabilité naturelle interne du climat, en particulier par l'AMO (Atlantique Multidecadal Oscillation) (corrélation de 0.9). Cette étude a aussi montré que le niveau moyen global de la mer altimétrique corrigé de la masse de l'océan par GRACE est une très bonne mesure du déséquilibre énergétique (au sommet de l'atmosphère), avec un accord remarquable avec les mesures CERES des variations bilan radiatif net au sommet de l'atmosphère (Figure 2). Cette étude a fait l'objet d'un article à International Journal of Climatology (Dieng et al., 2016). Un autre article sur le bilan énergétique global du système climatique et le contenu thermique de l'océan a aussi été publié dans *Nature Climate Change* (von Schuckmann et al., 2016).

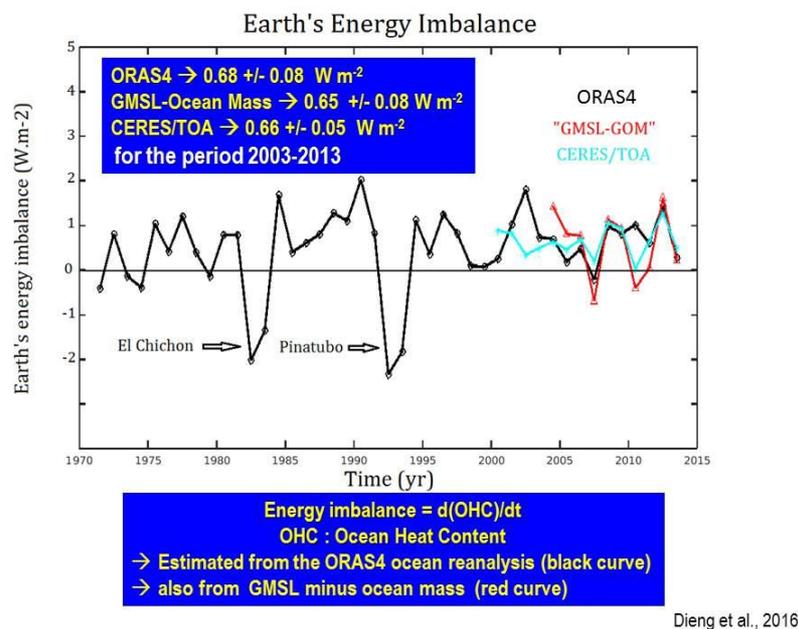


Figure 2 : Déséquilibre énergétique estimé à partir du contenu thermique de l'océan depuis 1970, et depuis 2003 à partir des données CERES et du niveau de la mer altimétrique corrigé de la composante de masse. D'après Dieng et al. (2016).

Etudes régionales et locales

Les causes des variations régionales du niveau de la mer

Dans une étude qui reprend l'ensemble de l'archive des mesures satellites, nous avons analysé la variabilité régionale du niveau de la mer (SSH) de la température de surface de l'océan (SST) et de la couleur de l'océan (OC). Sur la période commune de ces mesures (i.e. 1993-2011), nous avons déterminé les causes de la variabilité régionale en SSH, SST et OC et les sources de covariabilité.

L'utilisation d'un modèle d'océan assimilant les données de SSH et SST nous a permis d'identifier le rôle joué par les vents et les flux de chaleur à la surface dans la variabilité régionale de la SSH et la SST. Nous avons mis en évidence que la variabilité régionale de la SSH est dominée par le transport de chaleur dans l'océan en réponse au forçage du vent mais qu'à moyenne et haute latitude les flux de chaleur à la surface de l'océan jouent un rôle non négligeable.

La SST en revanche est déterminée par le bilan de chaleur de la couche de mélange et sa variabilité régionale dépend autant du transport de chaleur par l'océan dans la couche de mélange que des flux à la surface. Le fait que SSH et SST dépendent chacune en partie des flux de chaleur à la surface explique pourquoi ces 2 variables présentent de la covariabilité en particulier à moyenne et haute latitude. Le cas de la couleur de l'océan est différent de celui de la SSH et SST. La OC dépend de la production primaire qui dépend elle-même de la présence de nutriments et de la disponibilité de la lumière dans la colonne d'eau.

Ces 2 paramètres montrent une covariabilité avec la SST qui est complexe et il est difficile d'en expliquer les patterns. Les résultats de cette étude sont disponibles dans un article publié : Meyssignac et al. 2016a.

Etude du niveau de la mer en Arctique

Dans 2 études dédiées à l'océan arctique, utilisant des produits 'niveau de la mer' issus du retracking des données altimétriques, nous avons étudié le bilan du niveau de la mer sur la période altimétrique, aux échelles globale et régionale.

Au plan régional, un très fort signal de tendance positive du niveau de la mer est observé dans la région du Gyre de Beaufort.

Nous avons montré que ce signal s'explique par une diminution de la salinité. En moyenne sur l'ensemble de l'Arctique, la variation du niveau de la mer est dominée par la composante de masse (Henry et al. 2012), la composante stérique étant négligeable. Ce résultat est confirmé sur la décennie 2002-2012 par le très bon accord observé entre le niveau de la mer corrigé des effets stériques et la composante 'masse de l'océan' estimée par GRACE (Carret et al., 2016).

Niveau de la mer dans les zones côtières

Dans une étude locale autour du marégraphe de la ville de Cotonou nous avons estimé pour la première fois les variations du niveau de la mer totales à la côte incluant l'effet du

réchauffement de l'océan, de la fonte des glaces continentales, des variations du contenu en eau liquide des continents, du vent, des marées et des vagues .

Sur la période 1993-2014 nous avons estimé les variations liées au réchauffement de l'océan et aux échanges d'eau entre océan et continents à l'aide de l'altimétrie. Nous avons utilisé les réanalyses océaniques (FES 2014) et atmosphériques (ERA) pour évaluer l'effet des marées, du vent et des vagues à la côte. De ces estimations nous avons évalué la variance du niveau de la mer à la côte expliquée par chacun des différents processus. Il apparaît que l'effet des vagues joue un rôle majeur dans les variations à la côte même aux échelles interannuelles (Melet et al. 2016).

Cette étude ouvre la voie à une application globale qui visera à estimer le rôle joué par chacun des processus sur les variations du niveau de la mer sur toutes les côtes du monde.

Nous avons organisé un Forum sur les zones côtières à l'International Space Science Institute à Berne en octobre 2016. L'objectif de cette réunion qui a regroupé une vingtaine de participants européens était d'identifier les 'gaps' en termes d'observations et de modélisation pour mieux comprendre l'évolution des zones côtières et l'impact de la hausse du niveau de la mer sur l'érosion des côtes. Un 'White Paper' a été rédigé à l'issue de ce forum et un article plus synthétique est en préparation pour un journal à fort facteur d'impact.

Parmi les recommandations, un accent particulier a été mis sur la nécessité de développer davantage les activités de 'coastal altimetry' et l'élaboration de produits côtiers multi satellites homogènes et validés.

Validation des modèles de climat

Caractérisation des sources d'incertitude dans le niveau de la mer des modèles de climat

Nous avons évalué l'incertitude dans la représentation des variations du niveau de la mer par les modèles de climat due à la sous-estimation par ceux-ci de la variabilité intrinsèque de l'océan. La variabilité intrinsèque de l'océan est la variabilité qui est générée par l'océan lorsque celui-ci est forcé par une climatologie atmosphérique. Les non linéarités de la dynamique océanique génèrent de la variabilité océanique à petite échelle spatiale (mésoéchelle) et courte échelle de temps (durée de vie des tourbillons mésoéchelle) sous un forçage climatologique.

Cette variabilité cascade à grande échelle spatiale et temporelle (échelle spatiale de plusieurs milliers de kms et échelles temporelles de l'inter-annuelle au multidécennal). Cette variabilité intrinsèque est particulièrement intense proche des régions à forte activité tourbillonnaire comme dans les courants de bord ouest.

Les modèles de climats ont une résolution océanique qui ne permet pas de résoudre les tourbillons à moyenne et haute latitude. Pour cette raison ils ne contiennent pas la variabilité intrinsèque de l'océan. Dans notre étude nous avons évalué à l'aide d'un ensemble de run océaniques forcés par une atmosphère climatologique la sous-estimation de la variance du niveau de la mer par les modèles de climat aux échelles interannuelles à multidécennales.

Il apparaît qu'autour des courants de bord ouest la variance du niveau de la mer est significativement sous estimée (cf figure 3). Les résultats de cette étude sont publiés dans un article : Sérazin et al. 2016

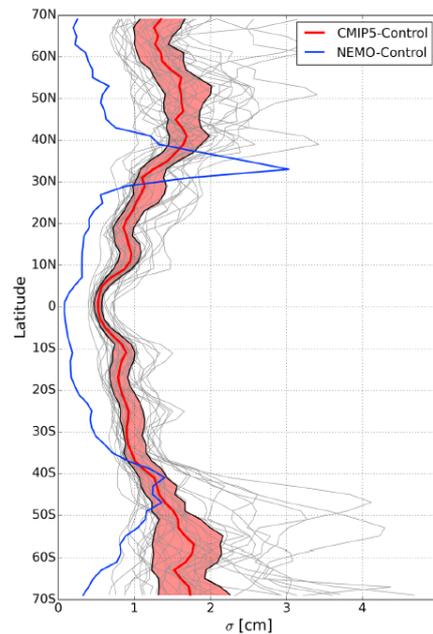


Figure 3 : Variance du niveau de la mer en moyenne zonal dans les modèles de climat (courbes grises, moyenne d'ensemble en rouge et écart type en rose) et dans un modèle d'océan incluant la variabilité intrinsèque (en bleu)

Contribution à la validation des modèles climatiques couplés CMIP5

De nouvelles études ont été mises en œuvre dans le but de comparer les simulations des modèles de climat CMIP5 sur le 20^{ème} siècle avec les observations du niveau de la mer et de ses composantes. L'objectif de ces études est de 1) valider les simulations de la hausse du niveau de la mer dans les modèles de climat 2) d'expliquer la hausse du niveau de la mer observée sur le 20^{ème} siècle (bilan du niveau de la mer sur 1900-2000) 3) de séparer les causes qui font varier le niveau de la mer dans les observations entre la variabilité interne du système climatique, les forçages naturels (activité volcanique et solaire, etc.) et les activités anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, aérosols, etc.). Ces études sont développées en parallèle à l'échelle globale et à l'échelle régionale.

Pour commencer ces études nous avons développé une méthode pour calculer les variations du niveau de la mer sur le 20^{ème} siècle à partir des sorties des modèles de climat sur le 20^{ème} siècle. Depuis 1900 le niveau de la mer augmente essentiellement du fait de l'expansion thermique de l'océan, de la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires – principalement Groenland-, et des variations des eaux continentales. A partir des sorties des modèles de climat nous avons calculé chacune de ces composantes sur le 20^{ème} siècle et nous les avons sommées pour obtenir une estimation de la hausse du niveau de la mer. Nous avons ensuite comparé le niveau de la mer ainsi obtenu par les modèles de climat et chacune de ses composantes avec les observations disponibles sur le 20^{ème} siècle.

A l'échelle globale les résultats montrent que la plupart des modèles de climat reproduit bien le réchauffement global de l'océan sur les 6 dernières décennies (Melet and Meyssignac

2015). En revanche peu de modèles reproduisent la hausse du niveau de la mer. Ceci est dû au fait que les modèles de climats donnent des estimations très différentes de la fonte de glaciers de montagne sur le 20^{ème} siècle. Les données disponibles sur la fonte des glaciers au cours du 20^{ème} siècle sont trop imprécises et ne permettent pas de valider cette contribution au niveau de la mer dans les modèles de climat. En revanche grâce aux données de niveau de la mer nous avons validé la contribution des glaciers de montagne dans les modèles de climat et déterminé les modèles qui donnaient une évaluation raisonnable de la fonte des glaciers de montagne depuis 1900. De plus nous avons pu établir que sur le 20^{ème} siècle la hausse totale du niveau de la mer de 1,8mm/an est due pour 0.8 mm/an à l'expansion thermique de l'océan et pour 0.7 mm/an à la fonte des glaciers de montagne. Les 0.3 m/an restants étant dus aux eaux continentales et à la fonte de surface du Groenland. Ces travaux ont fait l'objet du rapport de stage d'Elsa Bourgeois et d'une publication en préparation d'Angélique Melet (Melet et al. en préparation).

A l'échelle régionale nous avons développé une stratégie similaire. Cependant le calcul du niveau de la mer régional à partir des modèles de climat est plus complexe que celui du niveau de la mer global. Il suppose le calcul de la réponse de la Terre solide aux déplacements de masse à la surface de la Terre. Pour cela il faut calculer l'historique de la fonte des glaciers de montagne et de la fonte de surface du Groenland. Dans un premier temps nous avons calculé l'historique de la fonte de surface du Groenland bassin versant par bassin versant en s'appuyant sur une technique de régionalisation en collaboration avec Xavier Fettweis (Université de Liège). Cette méthode donne pour la première fois une estimation de la fonte de surface du Groenland région par région depuis 1900. Cette étude fait l'objet d'un article (Meyssignac et al. 2016). Par ailleurs en collaboration avec B. Marzeion (Université de Innsbruck) nous avons obtenu une estimation de l'historique de fonte des glaciers de montagne. Il reste à calculer la réponse de la Terre solide à ces déplacements de masse pour produire la première estimation des variations du niveau de la mer régional depuis 1900. C'est un travail en cours avec G.Spada (Université d'Urbino).

PROSPECTIVE

Dans les 5 années qui viennent nous projetons de :

1) Poursuivre la validation des données altimétriques (focus sur les nouvelles missions Jason-3, Sentinel-3) et continuer à participer à la construction d'un enregistrement du niveau de la mer de qualité climatique.

Ce travail nécessite de :

- déterminer si l'on peut réconcilier les différentes estimations de la hausse du niveau de la mer global faite par les différents groupes mondiaux
- établir les incertitudes associées aux mesures du niveau de la mer
- améliorer la calibration/validation en Arctique

2) Continuer l'analyse des variations du niveau de la mer sur la période altimétrique pour en comprendre les causes à l'échelle climatique. A l'échelle globale cela suppose de :

- déterminer les contributions mal connues ou manquantes telles que le réchauffement de l'océan profond (>2000 m) ou la contribution hydrologique

- améliorer les corrections de GIA dans les mesures de gravimétrie spatiales
- évaluer les contraintes que donne la fermeture du bilan du niveau de la mer sur le bilan d'eau et d'énergie à l'échelle globale.

A l'échelle régionale cela demande d'améliorer la résolution des observations de gravimétrie spatiale et de déterminer le rôle des forçages climatiques (tels que les émissions de Gaz à effet de serre) sur la variabilité régionale.

3) Continuer l'analyse des variations du niveau de la mer dans le passé (20ème siècle) pour connaître le contexte climatique dans lequel se situe la période altimétrique.

Cette activité consistera en :

- l'amélioration des reconstructions 2D du niveau de la mer
- la validation des simulations des modèles de climats en comparaison avec les observations satellites et in situ et l'analyse de ces modèles pour comprendre les variations du niveau de la mer sur le 20ème siècle.

Participants au projet

| | |
|-----------------------------|--|
| Alexandre Blazquez | CNES/LG |
| Habib Boubacar-Dieng | Stagiaire Master 2 Univ. Paul Sabatier, Toulouse |
| A. Carret | |
| E. Charles | |
| Anny Cazenave | CNES Emérite |
| H. B. Dieng | Thèse ESA CCI |
| Olivier Henry | CNRS (CDD) |
| A Melet | CNES/LG (Post doc) |
| Benoît Meyssignac | CNES/LG |
| H. Palanisamy | OMP/ LEGOS |

+ collaborations externes (CLS, MERCATOR, ...)

5.1.2 Etalonnages

Introduction

Le projet FOAM a terminé sa 4ème et dernière année dans le cadre de l'OSTST 2012-2016 et la nouvelle proposition a été acceptée pour la période 2017-2020. Ses résultats ont été valorisés dans 21 publications ainsi qu'un grand nombre de communications dans les colloques internationaux (environ 10 par an) dont l'OSTST (au moins 2 à 3 communications chaque année). Ces quatre années ont été marquées par des avancées importantes tant dans les aspects méthodologiques (e.g. la calibration régionale, voir § 2.1) que dans les développements instrumentaux (e.g. CalNaGeo, voir § 4) qui ont été rendus possibles grâce à des interactions fortes et continues des différents membres du projet. De plus, que ce soit en domaine océanique ou continental, les sites ont été optimisés pour permettre une calibration/validation multi-missions et préparer de futures missions (SWOT notamment). Leurs infrastructures ont aussi été optimisées et pérennisées pour permettre des mesures continues mais aussi des campagnes dédiées. L'année 2016 a été particulièrement consacrée à la calibration/validation des missions Jason-3 et Sentinel-3A lancées respectivement en janvier et février, avec un accent tout particulier sur le mode SAR de Sentinel-3A.

Étalonnage en océan

Site de Corse

La configuration initiale du site permet la calibration des missions T/P-Jason sur le site de Sénétosa et celles des missions ERS-Envisat-SARAL sur le site d' Ajaccio (Table 1). La trace de Sentinel-3A survolant les 2 sites de calibration, il a été possible d'effectuer les analyses à partir de ces 2 sites (voir Figure 1).

L'année 2016 a été focalisée sur l'analyse des mesures des 2 nouvelles missions, Jason-3 et Sentinel-3A, et les résultats ont été présentés respectivement pendant la réunion de l'OSTST et le SAR Workshop de la Rochelle. Ils ont aussi servi de bases à la validation des produits pendant la phase de recette en vol de Jason-3 et Sentinel-3.

En résumé les résultats montrent que l'altimètre de Jason-3 est conforme aux attentes même si un biais de l'ordre de 3 cm a été mis en évidence et semble relié à la mesure de distance elle-même. Quant à Sentinel-3A, l'amélioration en zone côtière grâce au mode SAR est claire (voir Figure 1) et le biais déterminé est statistiquement proche de zéro.

SARAL/AltiKa empruntant les mêmes traces au sol qu'Envisat, le site d' Ajaccio était parfaitement adapté pour la détermination de son biais absolu (Table 1). Depuis juillet 2016, le satellite a été placé sur une orbite dérivante ne permettant plus son suivi de façon permanente sur le site d' Ajaccio. L'utilisation d'un zodiac équipé d'une antenne GPS et tiré par un bateau a considérablement amélioré la précision de la détermination cinématique du

Table 1. Biais absolus déterminés sur le site de Sénétosa pour les missions TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 et Jason-3 ainsi que sur le site d' Ajaccio pour ERS-2, Envisat et SARAL/AltiKa. Les résultats de la mission Sentinel-3A ont été obtenus avec les 2 sites (Ajaccio et Sénétosa)

| Altimètre | Biais | Produits |
|---------------|------------|--------------------|
| Jason-3: | -36 ±7 mm | GDR-T |
| Jason-2: | -8 ±2 mm | GDR-D |
| Jason-1: | +19 ±3 mm | GDR-E |
| T/P ALT-A: | 0 ±8 mm | MGDR ⁺⁺ |
| T/P ALT-B: | 0 ±4 mm | MGDR ⁺⁺ |
| T/P POS-1: | -12 ±10 mm | MGDR ⁺⁺ |
| Envisat: | +447 ±7 mm | GDR-C |
| ERS-2: | -60 ±18 mm | OPR-2 |
| SARAL/AltiKa: | -63 ±7 mm | GDR-T |
| Sentinel-3A: | -5 ±14 mm | PDGS |

niveau de la mer. Les résultats sont en très bon accord avec les analyses globales de CLS faites par rapport à Jason-2 et les résultats d'autres sites de calibration. D'autre part, la qualité des mesures d'AltiKa montre une très grande stabilité du biais : ~ 20 mm d'écart type à comparer à ~ 30 - 35 mm pour l'ensemble des missions Jason-1&2. De plus, la plus faible emprise du radar permet de s'approcher plus près de la côte : ~ 3 km à comparer à 7 km pour Envisat.

En ce qui concerne Jason-1 (site de Sénétosa), l'analyse du reprocessing en GDR-E a montré que le biais serait de $+19 \pm 3$ mm : ce biais résiduel est encore important par rapport à ce qui était attendu (~ 8 mm) et est probablement dû en partie au SSB.

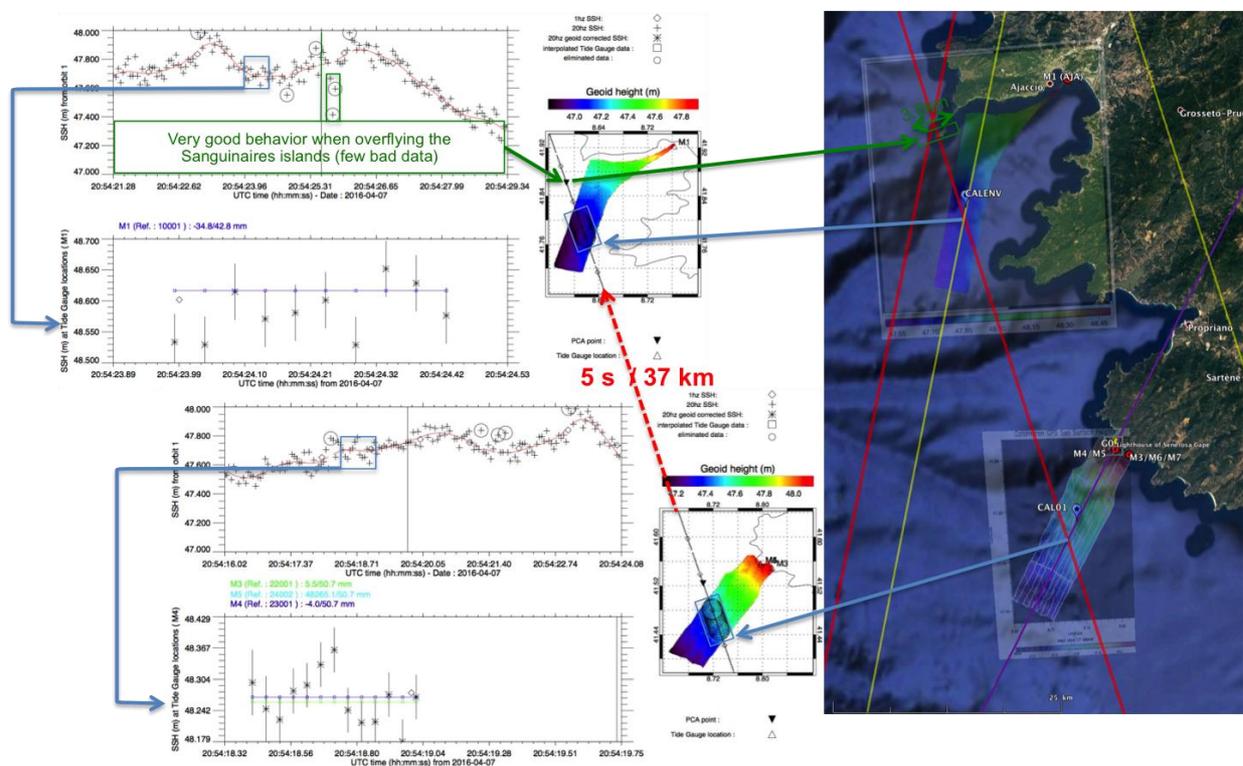


Fig. 1. Configuration de la calibration de Sentinel-3A sur Ajaccio et Sénétosa

Autres sites (Kerguelen, Vanuatu, île d'Aix)

Site de Kerguelen

En janvier 2016, une campagne de mesure utilisant la nappe CalNaGeo a été réalisée pour mesurer le « géoïde » sous les traces de Jason, SARAL/AltiKa et Sentinel-3A pour permettre de relier les mesures altimétriques au large aux mesures marégraphiques de Port aux Français. Cette campagne de grande envergure représentant plus de 500 km de mesure est en cours de traitement et permettra d'utiliser le site de Kerguelen de façon opérationnelle. Il faut rappeler que c'est le seul site de calibration dans l'océan austral (à part celui des Australiens à Bass Strait).

Site de l'île d'Aix

Durant l'année 2015 et 2016 de nouveaux prototypes ont été testés sur le site instrumental de l'île d'Aix. Un système de caméra vidéo a été installé sur le sémaphore de l'île d'Aix ainsi qu'une antenne GNSS pour tester la possibilité d'utiliser la réflectométrie GNSS sur le site de l'île d'Aix. Une réunion de travail a aussi eu lieu sur le site avec le CNES (L. Lestarquit et F. Perosanz) et Chris Watson de l'Université de Tasmanie pour discuter de la réflectométrie GNSS et de la possibilité d'intégrer sur le site de l'île d'Aix un réflectomètre développé par le CNES. De plus un stage d'ingénieur a eu lieu en 2015 et 2016 pour mettre au point le hardware et le software d'un marégraphe vidéo. Ces travaux préliminaires ont été présentés aux 6^{ème} rencontres des technologies marines de Concarneau et lors du colloque international « sea level technologies ». Dans le cadre du développement du site observatoire de l'île d'Aix, nous avons initié un projet de plateforme autonome de mesures en mer équipée d'un système GNSS. Cette plateforme, PAMELI (Plateforme Autonome Multicapteurs pour l'Exploration Littorale Interdisciplinaire), financée sur un projet CPER, est basée sur un robot marin existant et sera équipée dans l'optique de pouvoir l'utiliser pour les opérations de calibration altimétrique.

Site de Vanuatu

Les autorisations de campagne en mer dans les eaux du Vanuatu par un navire de la flotte française n'ayant pas été obtenues, une relève des 3 marégraphes en place a été organisée avec le Service Topographique du Vanuatu et une entreprise locale de travaux sous-marins. Les 3 marégraphes ont pu être récupérés, mais malheureusement ils n'ont pas pu être redéployés en raison de problèmes techniques ayant empêché la reprogrammation des capteurs. De retour à terre à Port-Vila, les données ont pu être déchargées et les trois marégraphes sont actuellement toujours à Port-Vila, en attente d'expédition vers Nouméa. Un cadre de collaboration, mis en place lors de la mission de V. Ballu en février 2016, a été signé avec le Service Topographique du Vanuatu portant sur les mesures géodésiques à terre et les mesures marégraphiques en mer. Ce cadre facilitera les opérations futures, dès que les relations diplomatiques permettront à nouveau la venue de navires océanographiques français.

Etalonnage Régional

Au cours de ces dernières années, NOVELTIS a réalisé les activités de CALVAL décrites dans FOAM dans le cadre du projet CALVAL SARAL/AltiKa pour le compte du CNES. L'activité principale a consisté à appliquer à la mission SARAL/AltiKa la méthode de calibration régionale développée par NOVELTIS, sur trois sites : Corse, Harvest (Californie) et Bass Strait (Tasmanie). Cette étude montre très nettement le lien que permet de créer la méthode de calibration régionale de NOVELTIS entre les différentes méthodes locales, y compris pour des missions ne survolant pas directement le site de calibration (exemple de SARAL/AltiKa à Harvest).

Elle montre également l'importance de disposer de corrections de marée (et plus généralement de dynamique océanique) de très bonne qualité sur les sites de calibration et plaide pour le développement de modèles régionaux de marée et de DAC sur ces zones afin d'assurer de manière optimale le suivi long terme des missions altimétriques. En 2016,

l'activité principale a consisté à appliquer la méthode à la mission Sentinel-3A et Jason-3 principalement autour du site de Corse.

Étalonnage en eaux continentales

Cette surveillance de la qualité des mesures altimétriques ne se limite plus à l'étude des masses d'eaux océaniques et la compréhension des processus d'évolution climatique nécessite de mettre en œuvre un contrôle tout aussi précis des eaux continentales. Ces études menées dans le cadre du projet FOAM ont permis d'effectuer de nombreuses campagnes de mesures (dont une en avril et une en octobre 2016 sur le lac Issyk-Kul pour la calibration respectivement de Jason-3 et Sentinel-3A) mais aussi d'installer une instrumentation spécifique permettant un suivi continu de l'altimétrie sur lacs et rivières (installation d'une règle sous la trace de Sentinel-3 et SARAL/AltiKa sur l'Amazonie en octobre 2013, installation de règles sous des traces Sentinel-3A en

Amazonie, à Madagascar et –prévu pour fin 2016–, sur le Congo). Les premiers résultats obtenus permettent de mettre clairement en évidence le comportement différent, en milieu continental, de la mesure altimétrique que ce soit au niveau de la mesure de distance elle-même (tracking et retracking) ou des corrections (troposphère, Sea State Bias, ...). Pour autant, les résultats présentés à l'OSTST 2014 (Constance) ont montré une très bonne cohérence de SARAL/AltiKa en terme de biais que ce soit en milieu océanique ou sur le lac Issykkul (Figure 2). L'analyse des points de croisements SARAL sur les bassins Amazoniens et du Congo a permis de quantifier l'erreur rms moyenne de cette mission sur les rivières et de montrer l'amélioration par rapport à Envisat (Figure 3) : Le pourcentage cumulé d'écarts aux points de croisements < 25 cm est de 90% pour SARAL/AltiKa alors qu'il n'est que de 80% pour ENVISAT. Le cumul de 90% n'est atteint qu'à 60 cm pour ENVISAT. Le biais absolu des missions Envisat, SARAL/AltiKa et Jason-1 (ICE1) et de Jason-2 (ICE3) a été déterminé. Les analyses des missions Jason-3 et Sentinel-3A sont en cours.

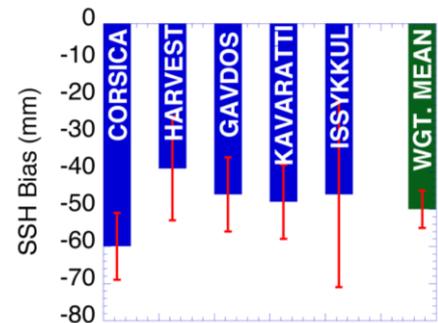


Fig. 2. Biais altimétrique de SARAL/AltiKa sur les différents sites de calibration (océan et

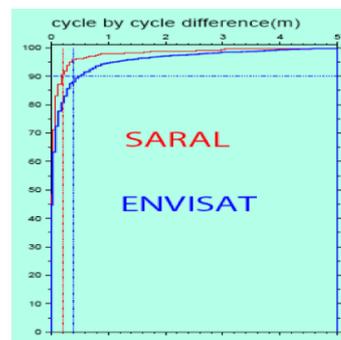


Fig. 3. Histogramme des rms aux points de croisements

Développements instrumentaux

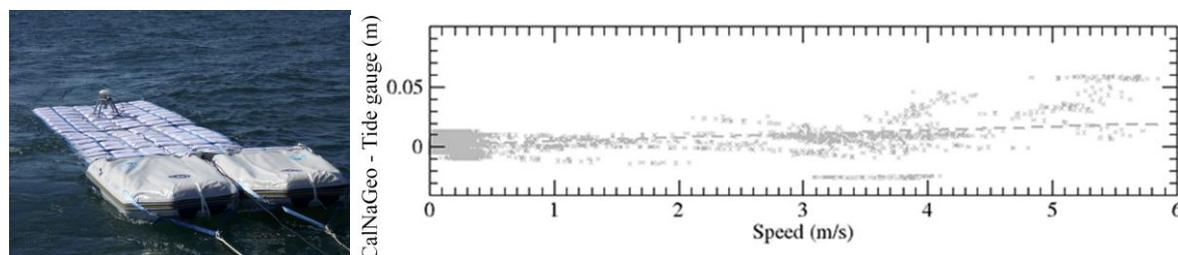


Fig. 4. Gauche : photo de CalNaGeo ; Droite : différences de hauteurs de mer entre la nappe CalNaGeo et le marégraphe en fonction de la vitesse.

La « nappe » (CalNaGeo) développée par la DT-INSU permettant de mesurer le niveau de la mer de façon cinématique en minimisant les effets de déjaugage a été testée en 2015 sur le site de Corse et les résultats montrent une très bonne stabilité de la ligne de flottaison quelque soit la vitesse (<3 mm/(m/s), voir Figure 4). Une campagne a aussi été menée le long d'une trace SARAL dans le Golfe du Bengale en novembre 2014 ; les données sont en cours de traitement et interprétation.

Conclusion

Les activités de Calibration/Validation menées dans le cadre du projet FOAM ont permis de mieux caractériser les données issues des missions d'altimétrie satellitaire passées et présentes avec un accent particulier à celles servant de bases à la constitution d'une série homogène pour l'étude de l'évolution du niveau moyen des mers (T/P & Jason).

L'utilisation du système GPS (ou GNSS) pour la mesure du niveau de l'eau (océan, fleuves, lacs) est aussi l'un des points importants du projet FOAM et des avancées ont été faites que ce soit dans le design des instruments (CalNaGeo, voir Figure 4) ou dans les méthodes de traitement de la mesure. L'utilisation du Precise Point Positioning développé dans le logiciel GINS (GRGS Toulouse) est en cours d'utilisation que ce soit pour les expériences en milieu océanique ou pour les eaux continentales. La réflectométrie est un autre aspect de l'utilisation du GNSS qui a aussi été exploré et qui est détaillé dans le chapitre « 5.3 Réflectométrie » de ce rapport.

Les études menées dans le cadre du projet FOAM ont permis d'effectuer de nombreuses campagnes de mesures mais aussi d'installer une instrumentation spécifique permettant un suivi continu de l'altimétrie sur océan, lacs et rivières.

Participants au projet FOAM et collaborations :

Le projet FOAM a été financé par le TOSCA dans le cadre de l'OSTST pour les périodes 2008-2011 et 2012-2016.

Investigateur Principal : Pascal Bonnefond^{1,2}

Co-Investigateurs

- Site de Corse : Pierre Exertier¹, Olivier Laurain¹
- French Transportable Laser Ranging Station, télémétrie laser : Clément Courde¹
- Calibration/Validation sur sites non dédiés : Valérie Ballu^{3,4}, Mathilde Cancet⁵, Florent Lyard⁶, Laurent Testut^{6,4}
- Eaux continentales : Muriel Bergé-Nguyen⁶, Marie-Paule Bonnet⁷, Stéphane Calmant⁶, Jean-François Crétaux⁶, Frédérique Seyler⁸
- Positionnement GPS (PPP) : Félix Perosanz⁷
- Réflectométrie GNNS : Frédéric Frappart⁷, Guillaume Ramillien⁷
- Retracking pour amélioration de l'altimétrie côtière : Pierre Thibaut⁹
- Validation MSS locales : Philippe Schaeffer⁹
- Développements instrumentaux : Cédric Brachet¹⁰, Michel Calzas¹⁰, Christine Drezen¹⁰, Antoine Guillot¹⁰

Organismes concernés par le projet FOAM

¹OCA/ Géoazur, Sophia-Antipolis ; ²Observatoire de Paris / SYRTE, Paris ; ³IPGP, Paris ; ⁴Université de la Rochelle / LIENSs, la Rochelle ; ⁵NOVELTIS, Ramonville ; ⁶LEGOS, Toulouse ; ⁷GET, Toulouse ; ⁸UMR – ESPACE DEV, Montpellier ; ⁹CLS, Toulouse ; ¹⁰DT-INSU, Brest

Coopérations internationales

Sites de Calibrations : JPL pour le site d'Harvest, University of Tasmania pour le site de Burnie, University of Barcelona pour le site d'Ibiza, Technical University of Crete pour le site de Gavdos,

Agencia Nacional de Agua, Serviço Geologico de Brasil, Univ. de Sao Paulo and Univ. Federal de Manaus (Brésil) pour les travaux sur le bassin Amazonien,

Ohio State University pour les travaux sur les eaux continentales,

Institute of Water Problem of Kyrgyzstan pour le lac Issik-Kul.

University of Concepcion (Chili)

Vanuatu Meteorology and Geohazards Department, Vanuatu Land Survey

Prospective

Les travaux d'étalonnages seront conduits dans le cadre du projet FOAM dont la proposition a été acceptée pour l'OSTST 2017-2020 et sera financée par le TOSCA. Durant cette période nous mettrons à profit l'expérience acquise tant au niveau instrumental que méthodologique pour réaliser l'étalonnage de l'ensemble des missions altimétriques des missions actuelles et futures. Un accent particulier sera mis pour la préparation de la mission SWOT qui par son innovation technologique et sa haute résolution représente un défi en terme de Calibration et Validation.

Participants au projet

| | |
|------------------------------|----------------------------------|
| Pascal Bonnefond | OCA/Géoazur (site de corse) |
| Pierre Exertier | OCA/Géoazur |
| Olivier Laurain | OCA/Géoazur |
| Clément Courde | OCA/Géoazur |
| Florent Lyard | OMP/LEGOS |
| Stéphane Calmant | OMP/LEGOS (Bassin amazonien) |
| Jean-François Crétaux | CNES/LG (Lac Issyk-kul) |
| Laurent Testut | OMP/LEGOS (Kerguelen) |
| Mathilde Cancet | NOVELTIS (calibration régionale) |
| Eric Jeanssou | NOVELTIS |
| Valérie Ballu | Univ. La Rochelle, (Vanuatu) |

Organismes concernés par le projet FOAM : 1OCA/GeoSciences Azur, Sophia Antipolis; 2LEGOS, Toulouse ; 3NOVELTIS, Labège; Université de La Rochelle, La Rochelle.

5.2. Phénomènes côtiers

Introduction

Les cinq récentes années ont vu une activité accrue en matière de modélisation et de mise en œuvre de l'observation des phénomènes côtiers. Les principaux axes dynamiques se sont appuyés sur la modélisation hydrodynamique, le déploiement d'observations in situ, la mise à disposition de ces données, l'assimilation de données d'altimétrie spatiales dans la mesure de la hauteur d'eau pour des applications de niveaux de référence en hydrographie et pour les études en géophysique, la numérisation des archives qui ont trait à l'observation côtière ancienne. L'intérêt pour les phénomènes côtiers s'est manifesté dans le domaine de la marégraphie, de la modélisation hydrodynamique, de l'harmonisation des références verticales pour l'hydrographie et les altitudes terrestres. Les travaux relatifs à la marégraphie sont traités séparément en paragraphes Systèmes d'observations marégraphique et Services scientifiques nationaux, dans ce rapport.

Les activités menées sur les espaces côtiers font ressortir l'effort engagé sur l'expertise autour des modèles numériques de dynamique océanique, des transports sédimentaires et des écosystèmes marins, en coopération avec les acteurs du domaine d'étude. Programmes et études sont mis en œuvre sur la modélisation de la surcote, la marée, l'interaction vagues/courant, la dynamique des ondes internes et sur les méthodes de production de bathymétrie fine, côtières et qualifiées. Intrinsèquement, l'effort est entretenu sur la capacité de la modélisation à représenter les processus au niveau de la plaine abyssale (dynamique moyenne échelle, mélange vertical) et les processus côtiers (marée, surcote, panaches fluviaux). La prise en compte des couplages « inter thématiques » est un axe important qui couvre les états de mer, la dynamique sédimentaire, la turbidité et le bon état écologique du milieu marin. Le développement de méthodes avancées d'assimilation de données est également un axe de progrès qui précise le paysage de ces récentes années. Toutes ces études contribuent à alimenter les travaux de recherches en océanographie et dynamique côtière en particulier. L'amélioration et le maintien de l'expertise de recherche s'est poursuivi pour développer les études et des partenariats au bénéfice de l'ensemble des acteurs publics. En complément, l'activité Recherche regroupe la communication scientifique et la participation dans différents conseils scientifiques de la thématique Océan et Géodésie.

Activités de Recherche et de valorisation

Bathymétrie et topographie

Bathymétrie, Modèles numériques de terrain (MNT)

Une bathymétrie qualifiée est indispensable aux modèles de dynamique de l'océan. Avec les progressions de la modélisation et de la mesure vers les petites échelles de l'ordre de quelques dizaines de mètres, les développements sur la bathymétrie a su mettre en face des modèles numériques de terrains régionalisés (Biscara L., et al. 2014). L'époque actuelle voit la réalisation de plusieurs modèles qualifiés (L. Biscara et al. 2015 ; 2016; A. Maspataud et al. 2015, 2016). Les récents MNT ont été produits dans le cadre des projets HOMONIM (Shom - Météo-France sous maîtrise d'ouvrage de la DGPR) et TANDEM (ANR).

Les résultats sont disponibles librement au téléchargement <http://data.shom.fr/> et <http://diffusion.shom.fr/produits/bathymetrie.html>

Participants au projet :

| | | |
|---------------|---|------|
| ANR TANDEM | BRGM, CEA, EDF, Ifremer, Inria, IRSM, LHSV, Ecole des Ponts Paris Tech, Principia, Shom, UPPA | |
| MNT | L. Biscara, R. Créach', T. Schmitt, A. Mastapaud, L. Avisse | Shom |

Levés Lidar du trait de côte et topographie voisine

Un partenariat IGN-SHOM permet d'accéder à une représentation continue terre-mer du littoral. Le programme national Litto3D® vise à la production d'un modèle numérique altimétrique de référence continu terre-mer sur la frange littorale. Il s'agit de réaliser des relevés de relief et des mesures de profondeurs marines pour une connaissance précise de cette zone côtière en métropole et outre-mer. La bande littorale concernée se situe en mer, jusqu'à la courbe bathymétrique continue de profondeur 10 m et au plus jusqu'à 6 milles des côtes. Sur terre, la mesure s'étend jusqu'à l'altitude +10 m, et à au moins 2 km à l'intérieur des terres. Au total, l'emprise du programme représente environ 45 000 km². Les données Litto3D® disponibles sont accessibles sur les liens ci-dessous.

<http://diffusion.shom.fr/produits/altimetrie-littorale.html>

<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/litto3d>

Participants au projet :

Litto3D® partie maritime fusionnée est cofinancé par l'Union européenne (FEDER).

Cette opération, pilotée par le Shom et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), a été réalisée en partenariat avec le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (représenté par les Préfets), les Régions, Conseil Général, l'Office de l'eau pour certaines régions, l'Agence des aires marines protégées et partenariats locaux selon les régions levées.

Référence verticale

Calcul de changement de références verticales

Le développement d'un logiciel permettant de changer de références verticales marines, lancé en 2012 a abouti, en 2014, à un service qui donne accès, en métropole, aux informations utiles au passage de l'ellipsoïde (GRS80 du RGF93) vers une référence maritime ou terrestre (ex : niveau des plus basses mers, zéro hydrographique, IGN69). Ce service a pour but de coter les références marines sur l'ensemble des côtes métropolitaines dans un repère stable et précis: l'ellipsoïde GRS80.

Participants au projet :

| | |
|-----------------------------------|------|
| N. Leidinger, V. Donato, F. Lecuy | Shom |
|-----------------------------------|------|

Surfaces marines de référence

La base de l'étude repose sur des développements tri-techniques nécessaires à l'amélioration des surfaces de référence (altimétrie, GPS et marégraphie). La recherche développée dans ce projet a trait (i) à la mesure du géoïde absolu en bande côtière, qui est un sujet riche en études nouvelles, (ii) à l'interpolation optimale de mesures et a pour objectif de répondre à la recommandation de l'Organisation Hydrographique Internationale qui vise à la fois à tendre vers un zéro hydrographique qui se rapproche du niveau des plus basses mers et vers l'harmonisation des différentes surfaces de référence en hydrographie marine. Les premiers résultats donnent la mesure de l'impact de la nature du géoïde utilisé pour le calcul de la surface moyenne marine fusionnée à partir de l'altimétrie, des mesures GPS et des marégraphes. En 2016, un écart de l'ordre de 0.15 m a été constaté entre 2 surfaces moyennes (SMH), l'une exploitant le géoïde EGG97 et l'autre exploitant le géoïde le plus récent (EGG2015). Ces travaux sont financés par le CNES et le Shom et suivis au sein du GRGS. Une perspective à court terme (1 an) est l'extension de la méthode à d'autres régions marines et la comparaison de plusieurs réalisations de surfaces de références.

Le projet BathyElli concerne, lui, les régions marines de la France métropolitaine et a pour but de coter le zéro hydrographique dans un repère stable, précis et accessible L. Pineau Guillou et al. 2009 (ASCL : L. Pineau-Guillou, 2009, « Projet BATHYELLI : détermination du zéro hydrographique à partir de l'altimétrie spatiale et du GPS », Navigation, Vol.57, n°226), G. Jan et al. ; 2009 AP : G. Jan, G. Moreaux, J. Helbert, F. Crespon, « Détermination des surfaces de référence pour l'hydrographie », Rapport final pour le SHOM.). Ce projet met à disposition du public les surfaces de référence. Avant tout calcul, la réalisation et le traitement des levés GPS représentent un point clef du projet. Au fil des années, des campagnes en mer pour mesurer le niveau marin par antennes GPS (GNSS) sont déployées. L'intégration des nouveaux profils GPS mène à la production des surfaces de référence et à leur mise à disposition publique (Y-M Tanguy et al.; 2014).

Participants au projet :

| | | |
|--|--|-------------------------------------|
| Projet TOSCA. Financement CNES, Shom | G. Jan, E. Renault, M-F Lalancette, | Shom |
| | G. Wöppelman, L. Testut | LIENs, Université de La Rochelle |
| Projet BathyElli | R. Legouge, Y-M Tanguy, V.Donato | Shom |

Bouées GNSS

Après l'étude, lancée en 2010, sur l'utilisation d'une bouée GPS pour le calcul précis de la hauteur d'antenne GPS du bateau (L. Pineau Guillou et al. 2009), les premiers résultats ont

été produits en 2011. Cette étude, grâce à la participation du GRGS, a permis de développer un prototype de bouée. Ce point est développé dans la partie marégraphie de ce rapport. Les 2 années suivantes ont été marquées par une phase de validation avec la comparaison des mesures de hauteur de mer multi instruments. Des tests ont été menés en zone hauturière pour améliorer le traitement des données en dynamique, lorsqu'on s'éloigne de la station de référence (G. André ; Journées REFMAR 2016).

Participants au projet :

| | |
|--|------|
| Pôle Géodésie (R. Legouge, G. André, Y-M Tanguy) | Shom |
|--|------|

Activités CNFG2

Ce colloque, organisé conjointement par le Comité National Français de Géodésie et de Géophysique et la communauté nationale de Géodésie-Géophysique a pour but de rassembler les scientifiques et jeunes chercheurs des sciences de la terre, de l'océan et de l'atmosphère. Cette année le colloque se tiendra donc à Brest avec un accent porté sur la thématique marine. Le colloque est organisé avec le soutien du Shom, de l'ENSTA Bretagne, du CNFGG, du groupe G2, d'Océanopolis, de Brest Métropole Océane et du conseil départemental du Finistère. Les présentations 2016 sont disponibles sur <http://cnfg2.ensta-bretagne.fr/wp-content/uploads/2016/05/resume.pdf>

Participants au projet :

| |
|---|
| ENSTA-Bretagne, du groupe G2, Océanopolis, Brest Métropole Océane et le conseil départemental du Finistère. |
|---|

Modélisation de la marée et onde interne

Un effort de recherche porte sur la capacité de prédiction de marée en milieu côtier et estuarien. Pour ce dernier environnement, l'objectif est de mieux connaître la dynamique haute fréquence et les interactions non linéaires entre ondes de marée dans un milieu confiné et complexe comme peut l'être un estuaire, faisant intervenir les flux d'eau douce notamment. Appliquée aux programmes d'observations spatiales, une meilleure connaissance de la dynamique côtière peut permettre d'améliorer les corrections à appliquer à la mesure spatiale afin de filtrer la dynamique. Elle peut aussi renseigner la hauteur d'eau et le courant sur la frange littorale, utiles aux missions spatiales dont l'objectif est l'observation de ces régions. Contrat de recherche ModeliMaree. Financement et partenaires : DGA PROTEVS, Shom.

Un autre pan d'étude adresse la question de la dynamique des ondes internes dont la signature impacte la circulation océanique et revêt un enjeu considérable pour modéliser les échanges d'énergies dans la colonne d'eau et peut représenter une contrainte physique forte sur les ouvrages en mer. Une thèse sur les ondes internes a débuté en novembre 2014 (E. Baquet ; Cartographie des ondes internes dans le Golfe du Guinée). Le cadre est un partenariat LOPS, Actimar, Shom, Total.

Participants au projet de thèse:

| | |
|---|--|
| E. Baquet (Doctorant), A. Pichon (co-encadrante de thèse) | Shom |
| X. Carton (Directeur de thèse) | LOPS, CNRS, IUEM, Université de Bretagne Occidentale |
| S. Raynaud (co-encadrant de thèse) | Actimar |

Participants au projet de marée en estuaire:

| | |
|---|---|
| G. Jan, S. Louazel, T. Garlan, C. Lathuillère | Shom |
| F. Lyard | CNRS, Observatoire Midi Pyrénées, LEGOS |

Élaboration de produits d'altimétrie pour la gravimétrie et l'océanographie

En 2016, une étude Shom a été initiée et porte sur l'estimation de l'apport des nouveaux produits de l'altimétrie des satellites SARAL et Cryosat (en mode SAR) pour le calcul de grandeurs gravimétriques et océanographiques. L'étude devra exploiter les mesures de ces deux missions altimétriques dans les régions océaniques.

Financement : Shom.

Participants au projet :

| | |
|---|-----------------------------------|
| M-Lalancette, D. Rouxel, C. Salün, G. Jan | Shom |
| E. Jeansou, M. Cancet, C. Hortala | Noveltis |
| F. Birol | LEGOS, Observatoire Midi Pyrénées |
| O. Andersen | DTU (Danemark) |

Historique, Observations Modélisation des Niveaux Marins

Lancé en 2012, le projet HOMONIM (Historique, Observations Modélisation des Niveaux Marins) a pour objectif principal d'améliorer la prévision des niveaux d'eau et surcotes à la côte au profit du dispositif vigilance-vagues submersions opéré par Météo-France, en faisant progresser l'ensemble des composantes du dispositif (observations, modélisation des surcotes, modélisation des états de mer, systèmes d'exploitation) (D. Jourdan et al. 2014, 2016). Ce projet est l'objet de recherche en océanographie. En restant sur la ligne des thématiques traitées au GRGS, plusieurs résultats de ce projet pourraient servir à l'amélioration de la connaissance de la dynamique côtière, des états de mer et ainsi favoriser la comparaison avec les observations spatiales de la hauteur d'eau. En 2014, les premiers résultats ont été obtenus avec : (i) la réalisation d'une gamme homogène, multi-échelle de

MNT bathymétriques, de l'emprise régionale moyenne résolution (500m) à l'emprise locale très haute résolution (20 m) (A. Pasquet et al. 2014); (ii) la mise en service de deux nouveaux observatoires marégraphiques (paragraphe 1.3 systèmes d'observations marégraphiques). La descente d'échelles permet d'approcher des phénomènes côtiers sur des régions d'intérêts. Le couplage du modèle Hycom avec le modèle de vagues WaveWatch3 (WW3) a été réalisé dans un premier temps sur des configurations académiques Hong Son Hoang et al. 2015 ; R. Monjarret et al. , 2015; H. Son Hoang and R. Baraille, 2015, puis sur une configuration réaliste (H. Michaud et al., 2016). Financement : DGPR ; Partenaires : Météo-France, Shom.

Participants au projet :

| | |
|---|----------------------------|
| D. Paradis, P. Ohl | Météo France (DPREVI/mar): |
| D. Jourdan, A. Pasquet, R. Baraille, S. Correard, H. Michaud, L. Biscara et al. | Shom |

Transport sédimentaire en milieu côtier

Dans le cadre d'une coopération entre le SHOM et l'IUEM (Laboratoire LDO), deux campagnes CACAO1 et CACAO2 (Calibration et Combinaison Acoust-Optique) ont été réalisées dans l'estuaire de l'Aulne (rade de Brest) en 2014 et 2015 pour mesurer le transport sédimentaire en suspension à l'aide de divers capteurs optiques (turbidimètre OBS, granulomètre LISST) et acoustiques (multi-fréquences Aquascat, sondeur SMF, profileurs ADCP). Les données traitées dans le cadre de la thèse de G. Fromant (2015 [0, 0]) ont montré le potentiel de ces diverses mesures (notamment SMF et Aquascat) à quantifier la turbidité dans un milieu floclé.

Participants au projet :

| | |
|------------|-----------|
| F. Jourdin | Shom |
| Floc'h | LDO -IUEM |

Groupement de recherche (GdR) CROCO

Un regard tourné vers la recherche adressée par la proposition de GdR CROCO permet de pointer la richesse des activités en océanographie dont certaines peuvent apporter une information utile aux observations spatiales de la surface océanique par le biais de la modélisation de la hauteur d'eau, des courants, des couplages avec des modules biogéochimiques et sédimentaires qui peuvent parfois être de bons traceurs des structures dynamiques observables. Dans ce cadre, il est intéressant de mentionner l'initiative de proposition du groupement de recherche CROCO (Coastal and Regional Ocean Model) qui « vise à rassembler la communauté de modélisateurs de l'océan à petites échelles et à proposition un modèle communautaire de nouvelle génération pour l'océan régional, côtier et littoral. » Cette proposition « se donne comme priorité l'étude des très fines échelles et leurs interactions avec les processus grandes échelles. Il est conçu comme la composante océanique d'un système couplé comportant par ailleurs des modèles atmosphérique, de

vagues, de transport sédimentaire COMODO (Communauté de Modélisation Océanique) et morpho-dynamique, de biogéochimie, jusqu'au concept de modèle « end to end » établi dans la communauté des halieutes.» (Source : Documentation CROCO, Février 2015).

Partenaires de la proposition du GdR en cours d'évaluation : Ifremer, IRD, Shom, CNRS, Inria, Université Paul Sabatier.

Prospective

Les activités de modélisation numérique et de mise en œuvre de l'observation des phénomènes côtiers vont se poursuivre avec comme principaux axes, la modélisation hydrodynamique, le déploiement d'observations in situ et leur mise à disposition. L'assimilation de données, en règle générale et d'altimétrie spatiales en particulier, continueront d'enrichir les études géophysiques. Une attention particulière aux récents types de données est à prévoir avec l'exploitation des bandes Ka des satellites en orbite, les futures missions comme SWOT ou les expertises Radar-HF. Les connexions entre thématiques océaniques côtières devraient être multipliées notamment par les efforts portés sur le couplage de systèmes océaniques (écosystèmes marins, transports sédimentaires, interactions entre vagues, courant, marée). Les projets visant à améliorer la connaissance des hautes-fréquences et des petites échelles spatiales permettront de fournir une information fine comme des bathymétries qualifiées et mieux résolues, en fonction du besoin. Elles donneront accès à des modèles numériques de terrain adaptés à la discrétisation nécessaire de la dynamique côtière. Une conséquence directe sera l'accès à la connaissance et au suivi du trait de côte, qui peut être actuellement lacunaire selon les régions, les données mesurées, simulées disponibles.

En complément, le soutien aux coopérations et le développement de partenariats continue d'être un axe central des activités de Recherche et reste une perspective fondamentale des années à venir.

5.3. Réflectométrie

Objectifs

L'objectif principal était de démontrer la possibilité d'utiliser la réflectométrie GNSS pour le suivi de paramètres environnementaux au moyen de techniques et d'instruments i) à simple antenne via l'analyse du rapport signal sur bruit (RSB) ou 2) double antennes via analyse des différences de trajet entre signaux directs et réfléchis et des cartes de délais Doppler (DDM pour Delay-Doppler Maps). Les principaux paramètres environnementaux déduits de la réflectométrie GNSS sont les suivants : niveaux d'eau de surface des océans, des fleuves et des lacs, états de mer, humidité superficielle des sols de la végétation et biomasse.

Principe de la réflectométrie GNSS

La réflectométrie GNSS (GNSS-R) consiste à récupérer en continu les signaux électromagnétiques émis par les ~70 satellites GPS/GLONASS/Galileo et bientôt BeiDou anciennement COMPASS, à la fois directement et après réflexion à la surface de la Terre (généralement au niveau de l'interface air/eau). Les mesures de ces multi-trajets au sol sont effectuées de deux manières différentes.

La première, que l'on nommera forme d'onde (FO) utilise un récepteur spécifique intégrant au moins deux canaux de réception qui réalise un traitement du signal conjoint entre l'onde de l'antenne orientée vers le haut et de polarisation circulaire droite (RHCP) pour mesurer le signal direct et l'onde ou les ondes de une ou plusieurs antennes orientées vers le bas dont au moins une est à polarisation circulaire gauche (LHCP). Cette technique permet d'obtenir une mesure directe du retard de phase entre signaux directs et réfléchis, ce qui donne accès à l'altitude du point de réflexion au cours du temps (information géométrique). Il est ainsi possible de déterminer la hauteur de la surface libre de la mer d'un fleuve ou d'un lac (Martin-Neira, 1993; Treuhaft et al., 2001; Helm, 2008; Semmling et al., 2013). Elle permet aussi de réaliser des DDMs qui sont reliées à la rugosité de surface, ce qui permet ainsi d'estimer d'autres paramètres comme l'humidité du sol (Egido et al., 2014), ou l'état de la mer (Germain et al., 2004) voire la vitesse des vents. Le principe de la mesure est présenté sur la Fig.1a.

La seconde, utilisant un récepteur GNSS conventionnel à simple antenne, est basée sur l'analyse des perturbations causées par les multi-trajets sur le rapport signal sur bruit (RSB) mesuré par un récepteur GNSS géodésique multi-constellations à une seule antenne (de polarisation RHCP mais aussi avec un gain bien plus faible la polarisation gauche). Le RSB, qui matérialise les interférences entre signaux direct et réfléchi, est représenté/formalisé de la manière suivante (Larson et al., 2008) :

$$\text{RSB} = A_d^2 + 2 A_d A_m \cos(\psi) + A_m^2 \quad (1)$$

avec A_m et A_d les amplitudes respectives des oscillations dues au signal direct et aux multi-trajets, ψ le déphasage entre signal direct et multi-trajets.

L'analyse de la fréquence des variations de la composante du SNR due aux multi-trajets en fonction de l'élévation des satellites GNSS (f_0), estimée par résolution de l'équation (2) permet d'estimer à la fois la distance entre le récepteur et la surface (h), l'amplitude des

oscillations due aux multi-trajets (A_m) et leur phase (ψ) (Bishop et al., 1985; Georgiadou et Kleusberg, 1988).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} \text{ avec } \psi \approx \frac{2\pi d}{\lambda} \approx \frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) \quad (2)$$

avec ψ le déphasage entre signaux direct et réfléchi, d la distance supplémentaire due aux multi-trajets, λ la longueur d'onde du signal GNSS, θ l'élevation du satellite.

Le premier paramètre permet logiquement d'étudier les variations temporelles de niveau d'eau (Larson et al., 2013 ; Löfgren et al., 2014) tandis que les suivants, liés aux états de surface et à leur évolution au cours du temps, donnent accès à des paramètres comme l'humidité des sols (Larson et al., 2008 ; 2010) ou l'épaisseur de neige (Larson et al., 2009). Le principe de la mesure est présenté sur la Fig.1b.

Ces deux méthodes ont leurs avantages (mesures à haute fréquence, nombre de paramètres directement accessibles pour la première, facilité de déploiement, coût, faible volume de données pour la seconde) et inconvénients (plus grande complexité de traitement, volume de données, coût pour la première, mesures à plus basse fréquence, inversion des paramètres recherchés)

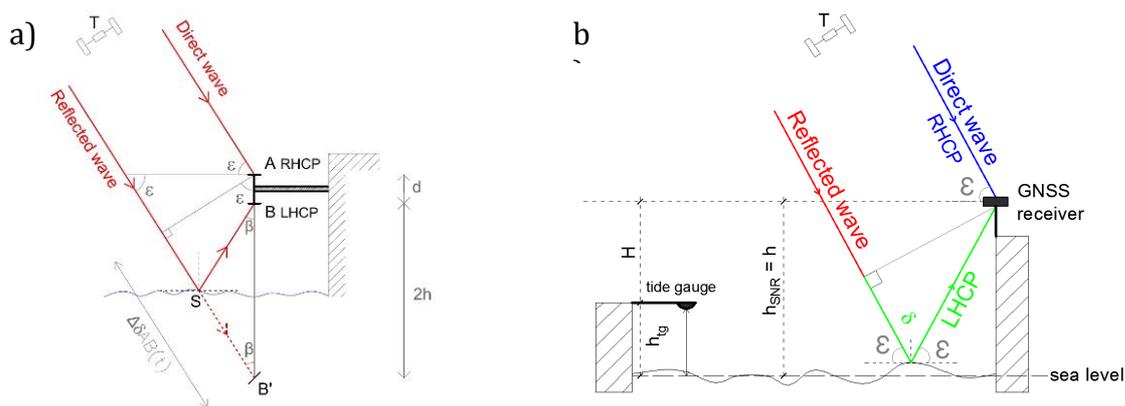


Fig.1 Principe de la mesure réflectométrique avec des instruments GNSS : a) réflectomètre double antenne (Roussel et al., 2014), b) récepteur GNSS géodésique classique détectant des multi-trajets (Roussel et al., 2015).

Principaux résultats obtenus :

Nous avons développé :

- un simulateur des positions des points de réflexion des ondes émises par les satellites GNSS sur la surface en fonction de la configuration orbitale des constellations GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) fournies par l'IGS, et de la configuration du site de mesure (position du récepteur, prise en compte réaliste de la topographie à partir d'un modèle numérique de terrain, intégration des retards troposphériques) (Roussel et al., 2014).
- une méthode originale d'inversion du RSB GNSS pour l'estimation des paramètres de l'équation (2). La prise en compte de la dérivée temporelle de h par rapport au temps et l'inversion par moindres carrés de l'ensemble des mesures des satellites vus par le récepteur

améliore grandement les résultats obtenus par la méthode proposée par Larson et al. (2007). Cette technique, appliquée avec succès au phare de Cordouan (Roussel et al., 2015) a permis le suivi de la marée et la détection de la houle (Fig. 2).

- un suivi de l'humidité des sols sur la parcelle agricole de Lamasquère (Roussel et al., 2016) a aussi été entrepris et a permis de montrer les variations journalières (du point de rosé à l'ensoleillement maximum), celles associées aux événements de pluies et celles associées aux saisons. Une deuxième méthode d'analyse du RSB GNSS, basée sur celle développée par Larson et al. (2008) et améliorée par Chew et al. (2015) et intégrant une analyse du spectre par ondelette a également été utilisée pour estimer l'humidité des sols
- une modélisation 1D du SNR reçu par le récepteur GNSS en fonction des propriétés diélectriques de la surface (conductivité, perméabilité relative), de la configuration orbitale des constellations GNSS et de la hauteur du récepteur (Gay, 2014). Des simulations ont été effectuées sur différents types de surface, et hauteurs de récepteur (Frappart et al., 2015). Ces travaux nous ont permis de définir des critères sur le temps d'observation minimum pour obtenir des estimations réalistes de la hauteur.

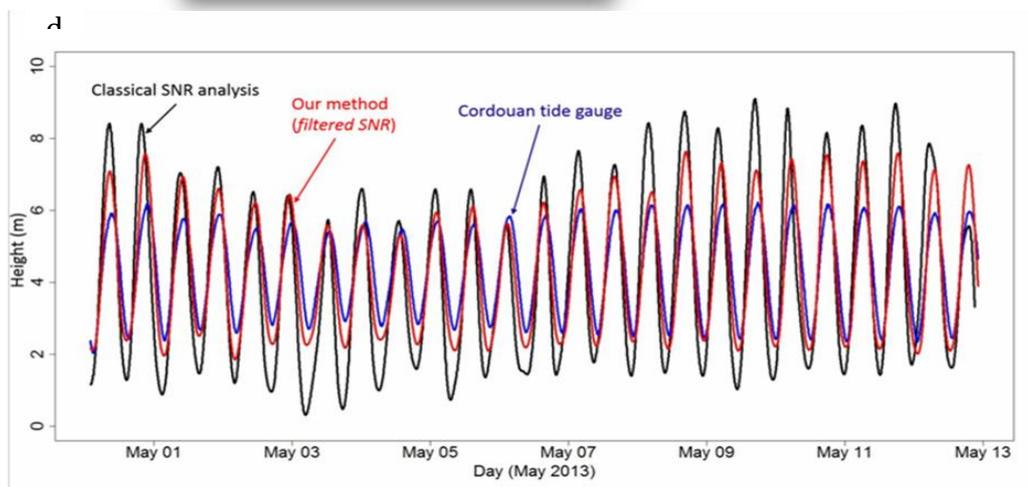
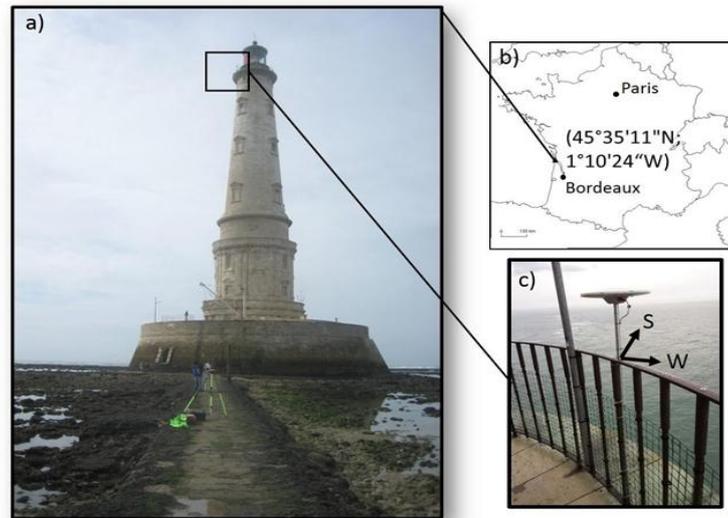


Fig. 2 : Le phare de Cordouan (a), dans l'estuaire de la Gironde (b) a servi de site expérimental pour réaliser des acquisitions au moyen de types d'instrument à simple (c) et double antennes. L'inversion du RSB a permis d'estimer la marée et l'état de surface (différence entre le marégraphe et la mesure GNSS-R donne état de mer) pendant plusieurs semaines (d). Source : Roussel et al. (2015).

- deux instruments bi-antennes permettant l'acquisition des FO pour les trajets directs et réfléchis et une chaîne de traitement de ces données basée sur GNSS-SDR (récepteur GNSS open-source du CTTC (Centre de Technologie de Télécommunication de Catalogne, Barcelone) qui a été modifiée pour permettre le traitement du signal réfléchi par le GET en collaboration avec le CNES par Lestarquit et al. (2016). La méthode paraît robuste et la précision atteinte est excellente : précision centimétrique, voire millimétrique dans certains cas (Fig. 3)
- Des collaborations au sein de l'observatoire Midi-Pyrénées ont aussi permis d'améliorer l'instrument GLORI du CESBIO, (Motte et al., 2016).
- Des mesures d'antennes (gain et loi de phase) ont été initiées grâce à une collaboration avec le CNES.
- Une technique d'analyse des FO acquises par la mission TECHDemosat-1 pour la représentation spatiale des signaux et la détection des transitions océan-continent (Schiavulli et al., 2016) et océan-glace (Schiavulli et al., sous presse).

- Enfin, dans le cadre d'une collaboration entre l'ESA, l'université de Beihang (Pékin, Chine) et le GET nous avons aussi développé une nouvelle approche pour estimer les vitesses des vents pour les zones côtières à partir des FO et d'une nouvelle métrique définie comme le rapport des moyennes cohérente et incohérente (CIR) ceci pour un faible nombre d'échantillons (<150; Wang et al., 2016). Les résultats optimums ont été obtenus en utilisant les satellites géostationnaires du système BeiDou (données continues sur 24h) dont les élévations sont comprises entre 20° et 45°.

Le GET a aussi organisé, dans le cadre de cette collaboration ESA-Chine, le 5^{ème} workshop de réflectométrie qui a regroupé les meilleurs centres européens (l'Estec de l'ESA, le GFZ de Postdam, les groupes de Barcelone : IEEC et de l'université de Valence) et chinois (Beihang university, Shanghai Ocean University, National Space Science Center, Wuhan university) du domaine.

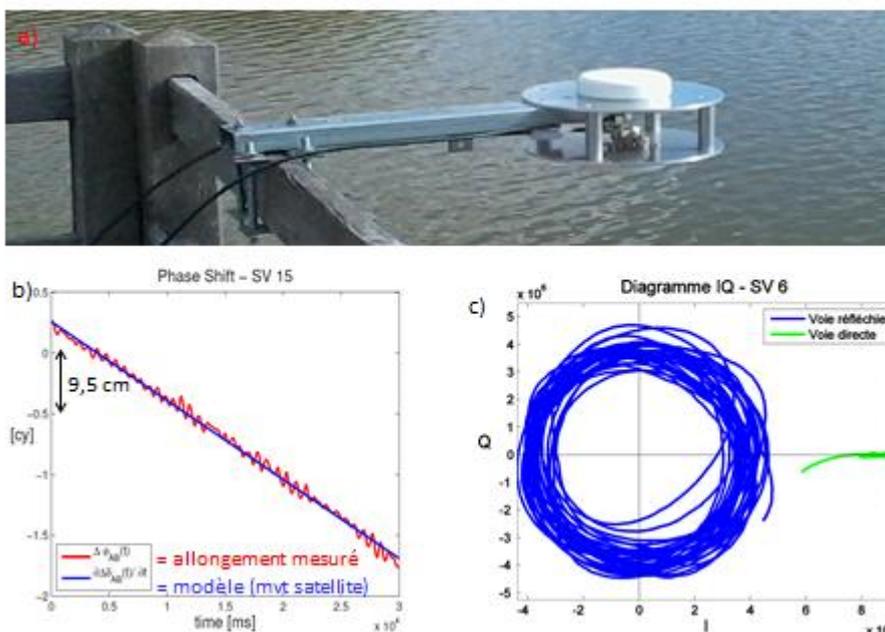


Fig. 3 : a) support bi-antenne développé au GET, b) résultats de mesure d'allongement de phase obtenus au phare de Cordouan, les oscillations observées pourraient être un phénomène de scintillation de phase engendré par les vagues, c) enroulement de la phase de porteuse sur un diagramme de Fresnel observé lors d'un vol SAFIRE de GLORI à 600 mètres d'altitude.

Prospective

Nous souhaitons poursuivre les objectifs scientifiques suivants en nous appuyant sur l'expérience acquise par notre équipe au sein du Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS) au GET depuis 2012, dans le cadre des projets PNTS GRAEL (2017-2019) et OSTST FOAM (2017-2020):

- Proposer un suivi spatialisé des paramètres environnementaux suivants : niveau de la mer en zone côtière là où les données manquent cruellement, donner l'état de surface de l'océan, mais aussi des informations plus continentales comme la topographie des plages et des

zones d'estran, les niveaux d'eau des lacs et fleuves, les apports sédimentaires liés au fleuves ou à l'action des vagues,

- Examiner la faisabilité technique de détection des phénomènes extrêmes ou nécessitant des observations à haute-fréquence comme les mascarets, la houle et les vagues avec des applications aux phénomènes de surcôte
- Etudier l'hydrodynamique côtière et estuarienne et leur impact sur la dynamique sédimentaire au moyen de la spatialisation des niveaux d'eau,
- Estimer des paramètres dérivés comme le géoïde local ou la bathymétrie,
- Mettre en place des sites permanents d'étalonnage et validation des mesures réalisées par les missions altimétriques actuelles (Jason-2, SARAL, Jason-3, Sentinel-3A) et futures (Sentinel-3B, Sentinel-6 (Jason-CS), SWOT) le long de la côte atlantique des pertuis charentais au Pays Basque.

Nous désirons aussi, dans le cadre de notre projet SUDOE Soil Take Care, expérimenter une nouvelle approche de caractérisation de la contamination minière associée aux métaux lourds par réflectométrie. En effet, ces métaux tendent à modifier la réflectivité (conductivité électrique, permittivité relative) des surfaces exposées en fonction de leur concentration en métaux lourds.

Enfin dans le cadre du projet MOMMHYS financé par le RTRA STAE nous désirons combiner réflectométrie et perturbations des signaux de télécommunication pour avoir un continuum des variations de l'humidité depuis la troposphère jusqu'aux premiers centimètres (sols argileux) ou mètres de sols (sols à dominante sableuse).

Au niveau instrumental, l'usage de la phase de porteuse apporte une haute précision, mais la mesure étant ambiguë, des travaux pour permettre le levé d'ambiguïtés doivent être menés. Les premières études ont montré que les biais et « erreurs » de mesures doivent être calibrés, modélisés, et/ou estimés avec précision. Il s'agit des erreurs troposphériques et de la courbure troposphérique, de la pente locale du géoïde, de la loi de phase des antennes, et des interférences entre signaux directs et réfléchis. De nouvelles mesures de loi de phase d'antenne sont prévues avec le CNES. L'usage de mesures bi-fréquence communes aux systèmes GPS et GALILEO permises par le nouvel instrument devrait faciliter ce levé d'ambiguïté.

Participants au projet

Permanents :

| | |
|----------------------------|-------------|
| Richard Biancale | CNES/GS |
| José Darrozes | OMP/UPS/GET |
| Thierry Fayard | CNES/GS |
| Frédéric Frappart | OMP/GET |
| Pascal Gegout | OMP/GET |
| Laurent Lestarquit | CNES/GS |
| Guillaume Ramillien | OMP/GET |

Non Permanents :

K. Boniface (post-doc RTRA STAE, 2016),

A. Gay (stage CNES 2015),

C. Ha (thèse du gouvernement vietnamien, depuis 2013),

N. Roussel (stage CNES 2012, thèse MESR 2012-2015, post-doc H2020 2016),

D. Schiavulli (post-doc RTRA STAE, 2015-2016),

P-L. Vu (thèse du gouvernement vietnamien, depuis 2015),

S. Zhang (post-doc RTRA STAE, 2015-2016).

Projets sur la période quinquennale :

TOSCA HORG (2012-2015), GRAEL (2016)

AO1 OMP (2014)

RTRA STAE PRISM (2014-2016)

H2020 MISTRALE (2015-2018)

RTRA STAE MOMMHYS

SUDOE SOL TAKE CARE

6 - GEODESIE PLANETAIRE

6.1. Champ de gravité planétaire

6.2. Thermosphère planétaire

6.3. Mission ROSETTA

6.1. Champ de gravité planétaire

Traitement des données de tracking de MEX lors du flyby de Phobos de décembre 2013

En supplément des données de tracking doppler classiques (réseau ESTRACK), ont été ajoutées les données de tracking doppler fait par le réseau VLBI lors d'une campagne dédiée, et aussi des données VLBI position dans le plan du ciel. Le traitement de toutes ces données ont permis une nouvelle estimation du GM de Phobos.

Dans le cadre du projet FP7 ESPACE (mi2011-mi2015), piloté par l'IMCCE à Paris, nous avons fourni des orbites des sondes interplanétaires et des biais de distance des mesures, dans le but de mieux contraindre la structure internes des satellites naturels de Mars, Jupiter et Uranus. En collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique, nous avons recalculé les trajectoires des sondes Mariner, Viking 1 et 2, Phobos2 et MEX, avec les derniers modèles disponibles de champ de gravité, de modèle de rotation et d'atmosphère de Mars. Ces données permettront de raffiner les modèles de trajectoire et de structure interne de Phobos et Deimos.

Prospective

L'arrivée de la mission ExoMars autour de Mars et notamment l'analyse des données de tracking de l'orbiteur TGO devrait permettre d'affiner notre connaissance du champ de gravité martien et notamment de ses variations temporelles. Après l'année 2017 dédiée à la circularisation de l'orbite, les traitements pour le champ de gravité commenceront en 2018.

Participants au projet

| | |
|----------------------|---------|
| Jean-Charles Marty | CNES/GS |
| Julien Laurent-Varin | CNES/GS |
| Pascal Rosenblatt | ORB |

6.2. Thermosphère planétaire

GRACE est toujours en opération mais avec des sérieux problèmes de batteries depuis fin 2010. La qualité des paramètres d'étalonnage souffre de ce problème car le contrôle thermique est très lâche depuis. De plus, pendant les périodes d'éclipses (2 fois 2 mois par an) les instruments sont éteints. Les densités ont été mises à jour jusqu'à juin 2016, mais avec des trous dus aux éclipses. Les données GOCE, traitées par l'Université de Delft, ont été validées (sous contrat ESA) et utilisées dans beaucoup d'études (voire ci-dessous).

Les densités GOCE ont été analysées à l'OMP/IRAP, Université de Delft, et le CNES/GRGS dans une étude de des ondes infrason générées par le séisme de Tohoku qui ont propagé jusqu'au thermosphère, et qui ont été détectées pour la première fois par GOCE grâce à ses mesures très précises. L'étude a été publiée dans GRL, et a également été un webstory de l'ESA. La détection dans les données GOCE et la modélisation de l'onde de gravité générée par un tsunami à cause du séisme de Tohoku ont été faites et publiées également.

DTM2013 a été créé dans le cadre du 7^{ème} PCRD ATMOP. Ce modèle a bénéficié en particulier des données GOCE à basse altitude, mais aussi de 10 ans de données CHAMP et GRACE. Un nouveau proxy solaire a été testé et validé aussi, en collaboration avec LPC2E (Orléans), le flux radiométrique à 30 cm. La modélisation de la haute atmosphère (DTM2013) est plus précise avec F30 qu'avec F10.7. Le modèle et la proxy F30 sont publiés dans SWSC.

La collaboration avec l'Université de Colorado à Boulder (UC) s'est poursuivie sur des études portant sur les marées et la variabilité thermosphérique en particulier, avec pour nouveauté l'effet dû à la lune. Les données GOCE permettent une meilleure comparaison avec les modèles numériques et le couplage de la basse avec la haute thermosphère. Les résultats ont été publiés.

En ce qui concerne les thermosphères planétaires, nous avons dérivé des températures exosphériques en utilisant les densités des sondes MGS et Mars Odyssey (MO), calculées avec notre logiciel GINS. Cette opération permet d'obtenir une seule série temporelle de 1999 à 2010 qui contient le maximum et le minimum étendus du cycle solaire. La variabilité de l'exosphère de Mars a été analysée et les résultats ont été publiés (JGR). La première campagne VExADE (Venus Express Drag Experiment) en collaboration avec l'Observatoire Royal de Belgique et l'Imperial College London, s'est déroulée en octobre 2009. En fin de vie, l'ESA a décidé de faire une campagne aérofreinage en juin-juillet 2014, en plaçant le péricentre de VEx à 130 km. Les données des accéléromètres (instruments d'ingénierie) ont été traitées avec succès et des densités ont été calculées. L'analyse des densités a montré la présence des ondes dans la basse thermosphère de Venus. Ces résultats ont été publiés (Nature Physics).

Participant au projet

Sean BRUINSMA

6.3. Mission ROSETTA

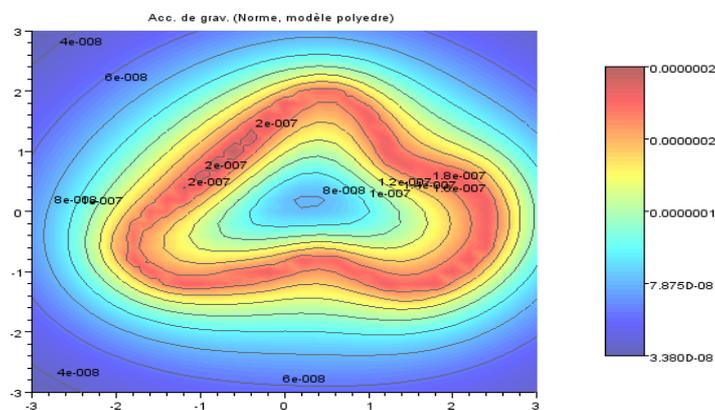
Les études accompagnant la mission ROSETTA se sont découpées en deux volets distincts :

- Tout d'abord, des analyses préparatoires avant l'approche de la comète ;
- Puis des activités pendant la mission avec des données réelles au profit du projet.

L'objectif des premières études était d'analyser les possibilités de restitution du champ de gravité de Churyumov-Gerasimenko (67P) par l'analyse des perturbations d'orbite de la sonde ROSETTA. Ceux-ci s'appuyaient sur les données de radioscience simulées qui allaient être collectées par l'expérience RSI embarquée à bord de la sonde.

Pour toutes ces études préparatoires le logiciel GINS a été exploité avec ses fonctionnalités de géodésie planétaire.

Après la phase d'hibernation de la sonde, le GRGS est intervenu dans le projet ROSETTA en support au projet CNES dont la responsabilité concernait le lander PHILAE. En effet, le CNES avait en charge l'orchestration du choix du site d'atterrissage et des opérations associées. Afin de disposer d'un modèle de gravité le plus précis possible étant donné les informations disponibles au fur et à mesure que la sonde se rapprochait du noyau, les équipes de dynamique du vol ont intégré dans leurs analyses trajectoire les modèles de champ issus des calculs GRGS. Ceux-ci s'appuyaient sur la forme de la comète dans un premier temps, puis ont intégré les mesures doppler par la suite. Le calcul a été d'ailleurs validé par la réalisation de la trajectoire de descente qui a suivi parfaitement la trajectoire prévue.



Suite au support au projet ROSETTA du CNES pour la préparation à la descente de PHILAE sur la comète, des contributions à des communications ont été écrites pour différents articles de journaux ou colloques.

Participants au projet

| | |
|-----------------------------|------|
| Julien Laurent-Varin | CNES |
| Jean-Charles Marty | CNES |

7 – PHYSIQUE FONDAMENTALE

7.1. Test du principe d'équivalence

7.2. Transfert du temps par lien laser

7.1. Test du principe d'équivalence

Introduction

Le test de l'universalité de la chute libre est une des plus anciennes expériences de dynamique. D'un point de vue expérimental, le test consiste à vérifier si deux masses, soumises à un même champ de gravitation, avec les mêmes conditions initiales et environnementales, vont avoir des lois de mouvement identiques en l'absence de toute autre action extérieure. Du point de vue de l'écriture des équations de la dynamique, la question revient à savoir si la masse grave et la masse inerte sont identiques (ou du moins proportionnelles) pour tous les corps indépendamment de leur composition. En formulation newtonienne cela n'a rien d'évident a priori : la masse grave quantifie la force gravitationnelle de même que la charge électrique quantifie la force électrostatique tandis que la masse inertielle quantifie la résistance d'un corps à une modification de son mouvement par une force, quelle que soit l'origine de cette force.

Galilée fut le premier à effectuer et décrire de façon précise des expériences d'universalité de la chute libre au moyen de boules descendant des plans inclinés¹. Un peu plus tard, Newton qui faisait parfaitement la distinction des rôles différents de la masse grave et de la masse inertielle dans ses équations s'étonnait de leur identité ; il a réalisé de nombreuses expériences en mesurant la période d'oscillation d'un pendule de longueur fixée avec à son extrémité des masses de compositions différentes et conclu à l'universalité de la chute libre pour tous ces matériaux avec une précision de l'ordre de un pour mille. Depuis lors, les expériences se sont succédé avec un gain d'environ dix ordres de grandeur en moins de quatre siècles. Actuellement les expériences les plus précises sont la balance de torsion de l'Université de Washington test en laboratoire pour divers types de matériaux) d'une part, et la télémétrie laser Lune (comparaison de la chute libre de la Terre et de Lune dans le champ de gravité du Soleil) d'autre part. Les deux expériences concluent à une absence de violation avec une précision de quelques 10^{-13} et sont très complémentaires : la première teste uniquement l'effet de composition tandis que la seconde teste aussi le fait que l'énergie interne de gravitation contribue de façon identique à la masse grave et à la masse inertielle.

Durant ce temps, le paysage théorique a profondément évolué. Dans un premier temps, Einstein a introduit son Principe d'Equivalence². Le principe d'équivalence d'Einstein contient le principe d'équivalence faible (WEP) qui correspond à l'universalité de la chute libre de corps de compositions différentes. Plus récemment de nouvelles théories ont tenté de répondre, d'une part à la question de l'unification de la gravitation avec les autres interactions, et d'autre part à des problèmes issus de la cosmologie tels que par exemple la nature de la matière noire et de l'énergie noire. Dans la plupart des cas, ces théories prévoient, en plus de la composante classique de la relativité générale, l'existence d'une composante de la gravitation qui ne respecte pas le principe d'équivalence. Dans ce contexte, le test de l'universalité de la chute libre à un niveau bien meilleur que celui des résultats actuels est fondamental. Il a été réaffirmé par de nombreux théoriciens dans un colloque

¹ Il n'a en revanche probablement pas réalisé d'expérience concluante du haut de la Tour de Pise : il était conscient des limites expérimentales dues en particulier au freinage aérodynamique.

² Il existe plusieurs formulations du Principe d'Equivalence : le Principe d'Equivalence faible (WEP), le Principe d'Equivalence d'Einstein (EEP) et le principe d'Equivalence fort (SEP).

international qui s'est déroulé en 2011 que le test du PE avec une précision nettement améliorée était d'une importance fondamentale pour progresser dans le développement des théories d'unification.

Malgré les progrès instrumentaux incessants, Il semble très difficile d'obtenir rapidement (à l'échelle de quelques années) un progrès de plusieurs ordres de grandeur en s'appuyant soit sur des expériences au sol avec des masses de laboratoires, soit sur l'observation du mouvement des corps célestes du type laser lune. Pour franchir un tel pas les solutions proposées sont des expériences dans l'espace. C'est dans ce contexte que se place la mission spatiale MICROSCOPE avec un objectif de test du PE au niveau de 10^{-15} .

Statut actuel du test du principe d'équivalence

On peut distinguer plusieurs types d'expériences pour tester le principe d'équivalence :

Les tests dans des laboratoires au sol avec des corps macroscopiques,

La télémétrie laser sur la Lune,

Les tests avec des atomes (au sol ou dans l'espace),

Les expériences dans l'espace avec des corps macroscopiques.

Tests en laboratoire

Les expériences au sol consistent à comparer (directement ou indirectement) la chute libre de masses d'épreuve de compositions différentes dans le champ de gravitation de la Terre ou du Soleil. Il existe deux types de techniques : les tests directs dans des tours de chute libre et les expériences utilisant des balances de torsion. Cette deuxième méthode est la plus performante ; c'est la mise en œuvre avec les technologies modernes de l'expérience d'Eötvös. La source gravitationnelle utilisée peut être soit le Soleil (ce qui limite le gradient de gravité au prix d'une source 1000 fois plus faible comparée à la Terre) ou la Terre (il faut alors faire tourner la balance de torsion pour observer une fréquence bien caractéristique). C'est cette deuxième option qui a donné les meilleurs résultats avec une absence de violation de principe d'équivalence au niveau de $1.5 \cdot 10^{-13}$. Les principales limitations de ces expériences sont les gradients de gravité locaux et les perturbations sismiques.

Télémétrie laser sur la Lune

C'est en quelque sorte une expérience de chute libre en utilisant des corps naturels : la mesure de la distance Terre-Lune permet de comparer les chutes libres de la Terre et de la Lune dans le champ de gravité du Soleil. Bien entendu cela requiert une très bonne modélisation des mouvements relatifs incluant les rotations autour du centre de masse. Cette technique permet de borner la violation de l'universalité de la chute libre pour le couple Terre-Lune au niveau de 10^{-13} .

Dans cette expérience, l'universalité de la chute libre pourrait être violée non seulement en raison des compositions différentes de la Terre et de la Lune, mais aussi en raison de l'effet Nordtvedt. Cet effet modélise une possible dépendance du rapport masse grave sur masse inerte, proportionnel à l'énergie de gravitation interne aux masses en chute libre. Cette énergie est bien trop faible dans le cas de masses de laboratoire pour pouvoir tester l'effet

Nordtvedt. Elle est en revanche 15 à 20 ordres de grandeur plus importante dans le cas de la Lune et de la Terre. L'effet Nordtvedt est une façon possible de violer le Principe d'Équivalence fort (SEP en anglais). L'analyse des données laser Lune permet ainsi de borner la somme des effets de composition et de l'effet Nordtvedt.

Les limitations principales de la contribution de la télémétrie laser sur la Lune au test du principe d'équivalence sont d'une part la répartition non uniforme des mesures dans le temps (essentiellement en raison des phases de la Lune) qui ne permet pas une décorrélation complète de la constante GM du système Terre-Lune, et d'autre part la précision des mesures corrigées (des effets atmosphériques, de la géométrie des réflecteurs, des mouvements de stations...).

Les tests avec des atomes

Les nouvelles techniques d'interférométrie atomique permettent maintenant de comparer la chute libre des atomes. Les résultats obtenus jusqu'à présent sont moins précis que les tests macroscopiques par plusieurs ordres de grandeur, mais c'est une technique prometteuse et complémentaire des deux précédentes (elle permettrait par exemple de tester l'impact des fluctuations quantiques sur la chute libre). Des expériences plus ambitieuses sont à l'étude en France et aux USA dans le cadre de missions spatiales.

Les expériences dans l'espace

Une expérience idéalisée de test du principe d'équivalence dans l'espace consiste à comparer la chute libre des différentes masses d'épreuve. En pratique, ces masses doivent être placées dans une enceinte (le satellite) pour les protéger des effets non gravitationnels qui sinon perturberaient fortement l'expérience. De plus, les masses doivent avoir le même centre pour éviter que le signal de gradient de gravité ne masque un éventuel signal de violation du PE. C'est pourquoi il s'avère plus efficace de mesurer des forces asservies pour annuler le mouvement relatif des masses que de mesurer directement le mouvement relatif. Ces principes sont à la base des expériences spatiales proposées jusqu'à présent. Parmi celles-ci, MICROSCOPE est la seule qui a vu le jour.

La mission MICROSCOPE

Présentation générale

La mission spatiale MICROSCOPE a pour objectif le test de l'universalité de la chute libre (ou principe d'équivalence faible) au niveau de 10^{-15} à l'aide d'accéléromètres spatiaux. Elle est développée dans une coopération CNES, ESA, ONERA, GRGS/OCA dans le cadre de la filière Myriade (microsatellites) du CNES.

Le principe de l'expérience est le suivant : on cherche à détecter une différence d'accélération entre deux masses d'épreuve de même centre et de compositions différentes (signe d'une violation de l'équivalence entre masse grave et masse inerte pour des matériaux différents). Un tel couple de masses d'épreuve concentriques constitue un accéléromètre différentiel. Chaque masse, "suspendue" électrostatiquement, est asservie pour rester immobile par rapport au reste du satellite, la mesure du déplacement étant assurée par des détecteurs capacitifs. La force électrostatique exercée compense (et permet donc de mesurer) les autres accélérations de la masse par rapport au satellite.

A part des perturbations (thermiques, magnétiques, gravité du satellite) qu'il faut contrôler, les sources d'accélération sont :

Les forces non-gravitationnelles exercées sur le satellite mais pas sur les masses qui sont à l'intérieur,

Le gradient de gravité et le gradient d'inertie entre le centre du satellite et le centre de chaque masse,

Des rapports masse grave sur masse inerte différents pour le satellite et chaque masse d'épreuve.

Le fait d'observer la différence d'accélération entre deux masses d'épreuve cylindriques de même centre permet d'annuler les deux première sources (mode commun) et d'observer la différence de "chute libre" des deux masses soumises au champ de gravité de la Terre. De plus les propulseurs du satellite asservis sur l'accélération mesurée en mode commun permettent d'asservir le mouvement du satellite sur le mouvement moyen des masses ; c'est ce que l'on appelle la traînée compensée. Ceci a le gros avantage de diminuer l'accélération agissant sur chaque masse prise individuellement et donc de permettre une meilleure précision sur la mesure de la différence d'accélération. La compensation de traînée est à la fois une originalité de la mission MICROSCOPE et une raison pour laquelle le satellite et la charge utile (deux accéléromètres différentiels) doivent être considérés comme un système unique.

MICROSCOPE embarque deux accéléromètres différentiels : un accéléromètre pour le test proprement dit avec deux masses de compositions différentes (platine et titane) et un accéléromètre de référence avec deux masses de compositions identiques.

Statut actuel

MICROSCOPE a été lancé le 25 avril 2016 depuis Kourou par un lanceur Soyouz. La mise en orbite a été nominale : altitude de 707 km, excentricité de 0.002, inclinaison de 98°.2 (héliosynchrone). La fin de recette en vol s'est terminée à la mi-novembre et la mission est depuis en phase opérationnelle. Des sessions d'étalonnage et des sessions scientifiques ont été achevées avec succès. Elles sont encore en cours d'analyse mais les résultats préliminaires nous assurent déjà de bien meilleures performances qu'au sol. Bien entendu nous n'aurons des résultats définitifs qu'en fin de mission, pas avant 2018.

Résultats marquants sur la période 2012-2016

Lors de ce quinquennal, les plus gros efforts ont été consacrés à l'évolution des algorithmes et logiciels d'analyse des données. En particulier un gros effort a été consacré à la prise en compte d'éventuels trous de mesure. La plupart des trous de mesures potentiels ne sont pas dû à des pertes de mesures mais à des mesures existantes invalides. Ces invalidités sont en général liées à des saturations qui peuvent avoir trois origines :

L'impact de micrométéorites ou micro-débris sur le satellite.

Le craquement des réservoirs de gaz froids lorsqu'ils se dépressurisent.

Le craquement de la MLI lors de variations de flux thermique arrivant sur les faces du satellite.

Lors de ce type d'événement, il est possible que l'accélération induite dépasse la gamme des accéléromètres, ce qui conduit à une mesure saturée, non représentative de l'accélération réelle. Ces mesures sont détectées automatiquement au niveau des calculateurs de bords et signalées dans les fichiers de données. On pourrait penser qu'il suffit de rejeter ces mesures lors des traitements, mais cela a deux types de conséquences qui peuvent dégrader les performances :

La projection de signaux harmoniques à la fréquence du signal de violation du PE.

L'augmentation du bruit apparent à la fréquence du signal de violation du PE.

Il faut en effet rappeler que le principe de la détection d'un signal de violation du principe d'équivalence consiste à rechercher un signal de même fréquence (appelée f_{ep}) et de même phase que la gravité terrestre projetée sur l'axe sensible des instruments.

La projection de signaux harmoniques à la fréquence du signal de violation du PE

Comme très souvent, le principe des analyses consiste à comparer les mesures réelles à un modèle physique qui les représente. Ce modèle contient entre autres le signal de violation du PE et le gradient de gravité. Le paramètre de violation (paramètre d'Eötvös) et les écarts entre les centres des 2 masses d'un même accéléromètre sont des quantités considérées comme inconnues et sont estimées par inversion. Mais en cas de modèle incomplet et d'existence d'un signal non modélisé, en particulier périodique, il y'a un risque que ce signal se projette très partiellement sur le signal PE recherché, provoquant une erreur de détection. Cette erreur peut être amplifiée par l'existence de trous de mesures. Nous avons traité ces problèmes de la manière suivante [Hardy et al., 2013]:

- Nous avons fait en sorte que les fréquences que nous maîtrisons (fréquence de rotation du satellite, fréquences mises en jeu dans l'étalonnage) soient en rapport rationnel avec la fréquence orbitale et avons choisi des durées de session de mesure de durée adéquate afin qu'elles contiennent un nombre entier de toutes les périodes fondamentales mises en jeu. Dans ces conditions, et en l'absence de trous de mesure, tous les signaux à des combinaisons de ces fréquences sont tous orthogonaux entre eux sur la fenêtre de traitement et donc parfaitement décorrélés. On minimise ainsi le risque de projection d'un signal perturbateur.
- L'existence de trous de mesures perturbe le principe ci-dessus : l'échantillonnage non régulier induit une fuite des signaux harmoniques à toutes les fréquences (phénomène de « leakage »). Nous avons alors dimensionné, sous l'hypothèse la plus pessimiste pour l'occurrence de trous, les amplitudes perturbatrices acceptables en fonction de leur de fréquence et vérifié que tout signal gênant serait suffisamment important pour être facilement visible par analyse spectrale.

L'augmentation du bruit apparent à la fréquence du signal de violation du PE

La fuite de signal entre les différentes fréquences évoquée ci-dessus pour les signaux harmoniques déterministes touche aussi les composantes aléatoires : en cas d'échantillonnage non régulier (trous de mesure), les différentes composantes spectrales du bruit vont se mélanger. En particulier, pour MICROSCOPE, une proportion très faible du bruit haute fréquence (qui n'interfère pas avec le signal PE) va se projeter sur la bande des basses fréquences qui contient le potentiel signal PE. Mais comme l'amplitude du bruit haute fréquence est comparativement élevée, ce faible taux de projection est suffisant pour perturber les analyses. Des procédures efficaces ont été développées pour pallier ce problème [Baghi et al., 2015, 2016 ; Bergé et al., 2015 ; Pires et al. 2016].

Prospective

Test du Principe d'Equivalence faible avec MICROSCOPE

Nous avons d'ores et déjà des séries de mesures qui vont nous permettre de proposer une publication de résultats préliminaires prévue pour l'été 2017.

En même temps nous continuons à recevoir et à analyser de nouvelles mesures qui nous permettent à la fois de progresser dans les performances et dans la compréhension de l'expérience. Nous prévoyons une série de publications pour l'année 2018.

Par ailleurs les mesures vont commencer à être distribuées aux groupes dont les propositions d'analyses ont été sélectionnées lors d'un appel à proposition en 2015. Cette distribution sera accompagnée d'un premier atelier d'échange et de réponse aux questions qui se déroulera au printemps 2017.

Test du Principe d'Equivalence fort avec la télémétrie laser sur la Lune

L'analyse des données de télémétrie laser sur la Lune bénéficie de deux grosses améliorations récentes :

- la faculté de la station de Grasse à faire des mesure en infra-rouge qui permet d'obtenir des mesures plus précises, plus nombreuses, mieux réparties sur les différents réflecteurs lunaires et mieux répartie dans le temps (au cours des différentes phases de la Lune) ;
- des progrès important dans le modèle dynamique élaboré par le groupe de Géoazur.

Ce double progrès nous fait espérer un résultat très compétitif du test du principe d'Equivalence fort (effet Nordvedt), très prochainement.

Participants GRGS au projet

- MICROSCOPE :
 - Gilles Métris
 - Quentin Baghi
 - Laura Serron
 - Olivier Laurain

- Test du Principe d'Equivalence au moyen de la télémétrie laser Lune :
 - Agnes Fienga
 - Vishnu Wiswanathan

7.2. Transfert de temps par lien-laser

Introduction

La mission de transfert de temps par lien laser T2L2, proposée dès 1993 par l'OCA, a été décidée par le CNES mi 2005 pour un lancement avec le satellite Jason-2 en juin 2008. L'OCA a pris en charge la réalisation du programme scientifique, la définition et le développement des algorithmes par le Centre de Mission Scientifique (CMS) avec son site web (<http://www.geoazur.fr/t2l2/en/data/v4/>) pour la diffusion des produits T2L2 et le suivi de la mission (avec 1000 connexions par an en moyenne), les développements technologiques au sol, et enfin les opérations et campagnes. La mission, prévue pour 2 ans (2008-2010), a été prolongée de plusieurs fois 2 ans jusqu'en 2016, ce qui a permis d'obtenir de longues séries temporelles, avec les mêmes instruments bord, sans interruption ou presque, favorisant les applications scientifiques (repère de référence, comportement de DORIS sur Jason-2, réseau des stations laser, orbitographie, radiations en zone SAA) et l'étalement de campagnes de transfert de temps. La première campagne d'envergure a été effectuée à Tahiti, en 2011.

De 2012 à 2016, de nouvelles campagnes impliquant nos stations laser MéO et FTLRS (station mobile, fig. ci-contre) se sont ensuite déroulées régulièrement : co-localisation des deux stations laser sur le site du plateau de Calern en 2012, campagne à l'Observatoire de Paris en 2013 impliquant 3 stations européennes, étalonnages et comparaisons à GPS sur plusieurs sites, campagne en 2016 avec la Chine. Enfin, en 2016, nous avons effectué un aménagement (station CATS) à Calern permettant la surveillance de la turbulence atmosphérique, ce qui nous a conduits à mieux considérer le bilan de liaison sol-satellite de la télémétrie laser.



Le Labex FIRST-TF a soutenu de nombreux travaux depuis 2013 en participant au financement d'une thèse et de plusieurs expériences au sol impliquant en synergie les laboratoires de l'OCA (ARTEMIS et LAGRANGE en plus de GEOAZUR).

Kit (électronique) d'étalonnage

Le kit T2L2 est une instrumentation de photo détection et de chronométrie adaptée au projet T2L2. Cette instrumentation (Fig. 1) a 2 objectifs :

- permettre aux stations laser participantes de s'équiper d'un dispositif de chronométrie capable de dater de façon exacte les événements (pulses),
- étalonner les équipements de télémétrie et de transfert de temps radio électrique avec un instrument unique.

Ce Kit a été développé à l'OCA avec le soutien du CNES, et a été transporté en Europe en 2013 et en Chine en 2016, afin d'étalonner les stations laser impliquées dans les campagnes de transfert de temps. Ces travaux font l'objet de plusieurs proceedings, dans l'EFTF et le PTTI ; en outre un article (*Metrologia*) décrit de manière unique l'ensemble du bilan des erreurs retenues en station laser pour le transfert de temps.



Fig 1 : Kit T2L2. De gauche à droite : face arrière avec les modules de métrologie et les entrées sorties réseaux, USB, ... ; vue de dessus avec alimentation et PC embarqué ; logiciel embarqué

Centre de Mission Scientifique et Validations

Le segment spatial T2L2 est complexe et a nécessité le développement d'un modèle instrumental, qui permet de traduire les données brutes de l'instrument en données intelligibles et corrigées. Le modèle complet qui prend en compte tous les paramètres, internes et externes de la télémétrie et des sensibilités instrumentales (photo-détecteur, orientation, énergie, etc.) a été mis au point puis publié en 2012 (*Metrologia*).

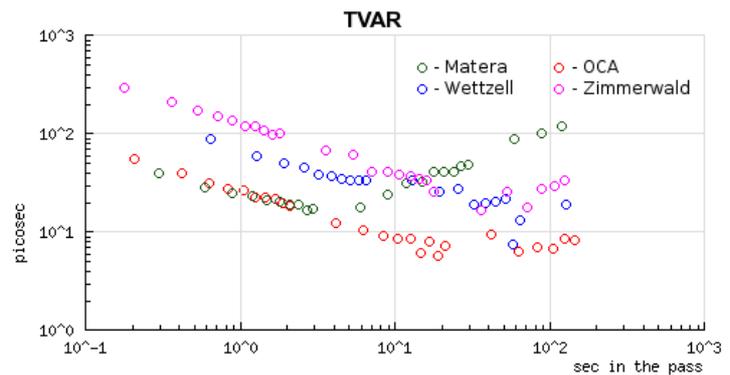
Le segment sol est naturellement constitué par le réseau des stations laser; cependant, seules les stations laser de ce réseau ayant la possibilité de s'équiper d'un système de temps performant (stabilité temporelle dans la gamme de quelques picosecondes sur 1000 sec) sont pertinentes pour l'expérience de transfert de temps T2L2. Le GRGS a pris contact avec l'ILRS et de nombreuses stations laser ; ce qui a permis l'organisation du suivi laser de Jason-2 et de plusieurs campagnes.

Le nombre de stations laser participant à la poursuite de Jason2 est d'environ 30-35 stations (sur environ 40). Le nombre de stations impliquées dans l'expérience T2L2 était de 5-6 en juillet 2008, et ce chiffre a augmenté très vite jusqu'à 22-24 stations en 2016 qui nous adressent les données laser brutes. Cette augmentation nette de la participation des stations laser à l'expérience T2L2 est due en bonne partie à la diffusion des messages et des retours scientifiques de T2L2/Jason2 vers les stations et les centres d'analyse, ce à travers l'ILRS et l'IDS, notamment aussi via le site web.

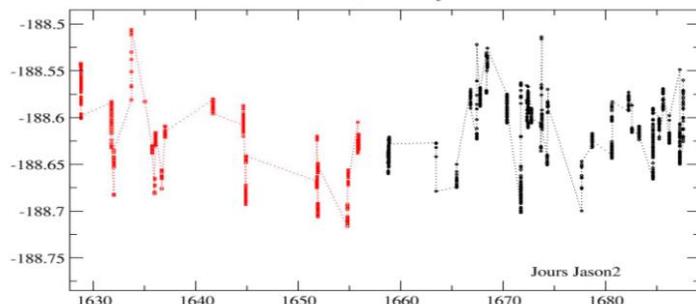
Répartition des stations laser impliquées dans T2L2.

| Stations Laser | US, Am. du Sud | Europe | Eu.-centrale | Afrique | Asie | Océanie |
|----------------|----------------|--------|--------------|---------|------|---------|
| | 5 | 8 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 60 ns | 4 | 1 | 2 | 1 | | 1 |
| 2-4 ns | | 2 | | | 1 | 1 |
| < 1 ns | 1 | 5 | | | 2 | |

Les transferts de temps réalisés avec des masers à hydrogène au sol ont permis de mesurer les performances du lien sol-espace. La stabilité mesurée est typiquement de l'ordre de 10 ps/30 s. Cela correspond à la stabilité de l'horloge spatiale (quartz DORIS). C'est le meilleur transfert sol-espace jamais réalisé à ce jour ; exemple figure ci-contre sur la stabilité du transfert de temps sol-espace (T-Var) : Zimmerwald (02/09/2010, 00h36), Grasse (03/09/2010, 23h23), Matera (05/09/2010, 01h49), et Wettzell (06/09/2010, 16h44).



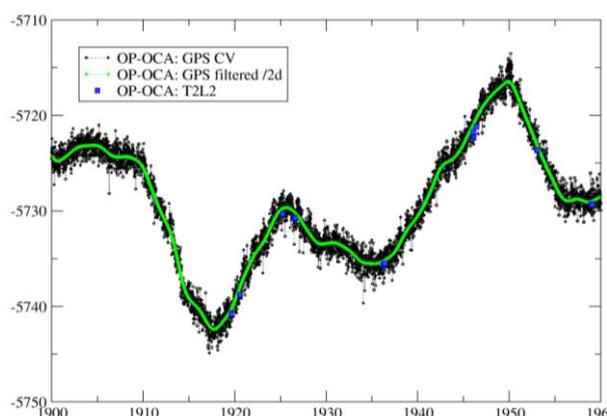
Une campagne de transfert de temps entre les 2 stations MeO et FTLRS en colocation sur le site de Calern a été menée fin 2012, début 2013. Les 2 stations étaient alimentées par un étalon primaire commun (maser-H arrivé à l'OCA en mai 2010) de telle sorte que les différences individuelles des transferts de temps sol-espace pour chaque station fournissent ensuite par calcul/combinaison directement la valeur du transfert sol-sol. La Figure ci-contre est exemple de différence MeO-FTLRS à Calern; à partir de ces données, on calcule une stabilité de 20 ps/10 s pour les passages en co-localisation (déc.2012 à janv.2013) avec une répétabilité du lien sol-sol entre 50 et 70 ps.



Ces travaux font l'objet de plusieurs publications dans le journal ASR (2014), dans Metrologia (2014 et 2015) et dans IEEE (2014).

Campagnes de comparaison T2L2 vs GPS et Two-Way

Une campagne de comparaison de transfert de temps T2L2 et TwoWay a été engagée en automne 2013 sur une période de 4 mois avec les 4 laboratoires suivants : OCA France, Paris OP, Angleterre (Herstmonceux), Allemagne (Wettzell).



Avec l'OP tous ces sites sont équipés de laser et de GPS et/ou TWSTFT. Pour palier l'absence de laser à OP, la station mobile FTLRS de l'OCA a été installée sur le toit du bâtiment B de l'Observatoire (Fig. : FTLRS à l'Observatoire de Paris). Les résultats qualitatifs et quantitatifs à Paris, sont très satisfaisants, y compris à Herstmonceux (Angleterre et à l'OCA). Ils ont permis de montrer une stabilité à 50-90ps de passage à passage ; les analyses effectuées sur les comparaisons à GPS et au Two-way sont à

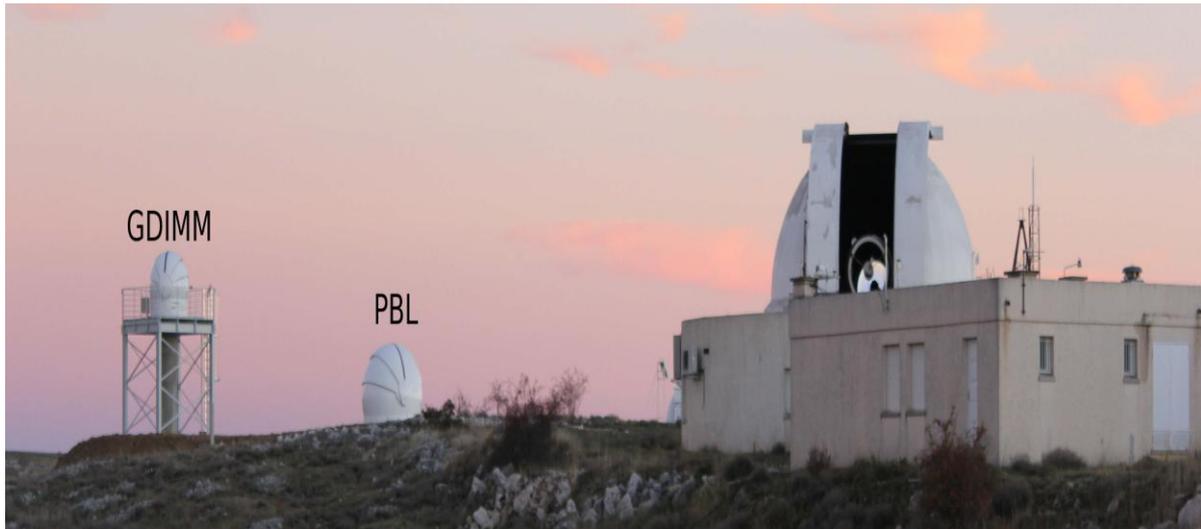
moins de 1 nanosec (Fig. ci-dessus, la comparaison du lien T2L2 avec le lien GPS CV filtré) ; publication en collaboration OCA et OP (GRGS) dans Metrologia (2016).

Apports scientifiques à DORIS et au réseau laser (ITRF)

Les travaux de caractérisation de l'OUS DORIS sur Jason-2 sont aujourd'hui établis et permettent de proposer un modèle sur 10 jours, toutes les minutes de l'oscillateur bord soumis aux effets de température, radiations, vieillissement et relativité (publié sur le web). Ces travaux font l'objet d'une publication dans le journal ASR, numéro spécial sur le traitement de données DORIS qui est publié en 2016.

Cet apport de T2L2 est lié à plusieurs éléments : i) il faut en effet pouvoir atteindre une stabilité de 10-20 picosec sur 10sec pour espérer décrire le comportement fin de l'OUS, grâce à T2L2, on arrive à 3-4 10^{-13} ii) le suivi court terme de l'environnement radiatif à l'altitude de J2 grâce aux données de Carmen-2 (ONERA, Toulouse), iii) le suivi long terme des variations du biais de fréquence de l'oscillateur de Jason-2 avec CLS-Toulouse (et l'IDS Goddard, US). Aujourd'hui la question des radiations est au cœur des discussions concernant les satellites d'observation de la Terre traversant la SAA (South Atlantic Anomaly) équipés d'un oscillateur DORIS. Le travail mené grâce à T2L2 propose une définition très fine de l'évolution de la fréquence dues aux radiations, ce qui ouvre à l'étude des liens avec les environnements géomagnétique et solaire, y compris pour Jason-3 (recommandations OSTST et IDS, 2016).

L'apport de T2L2 est aussi remarquable dans l'idée de proposer à l'IERS-ITRF, un moyen long terme d'appréhender les biais de temps des stations laser (article en cours, 2016-2017). Ces biais se sont révélés beaucoup plus importants que la limite prévue dans les recommandations aux stations (soit 100 ns à UTC, maxi). Ces travaux ouvrent une porte en 2017 vers l'amélioration du repère de référence international, et vers la physique fondamentale (par correction de l'oscillateur en vol avant interprétation de démonstration de l'invariance de Lorentz : isotropie de c).



Station CATS à l'OCA

Afin de mieux comprendre l'impact de la turbulence atmosphérique sur les liens lasers pour la télémétrie et le transfert de temps (mission T2L2), une station de mesure de la turbulence atmosphérique (appelée CATS pour Calern Atmosphérique Turbulence Station, voir figure ci-dessus) a été mise en place à la fin de l'été 2015 à proximité du télescope MéO. Cet équipement unique rassemble deux instruments à l'état de l'art de la qualification de site astronomique.

L'instrument GDIMM est un moniteur de turbulence généralisé, il permet de mesurer les paramètres intégrés du front d'onde déformé par l'atmosphère (Paramètre de Fried, Seeing, Isoplanétisme, Echelle externe). Cet instrument est installé sur une tour de 4m de haut afin d'éviter l'interaction avec la couche turbulente du sol. Au sol, le second instrument, le « profileur bord lunaire » permet de mesurer le profil altimétrique de la turbulence (C_n^2) en observant le limbe lunaire ou solaire.

Ces deux instrumentations sont abrités sous deux coupoles « allsky » et l'ensemble, équipé d'une caméra allsky et d'une station météo, est entièrement automatisé dans sa gestion des observations.

Prospective

Travaux 2017

Les travaux proposés au CNES en 2017 concernent le suivi long terme de l'oscillateur DORIS, et l'adéquation du modèle à l'oscillateur de Jason-3 (plus sensible d'un facteur 2.5 que celui de J2), l'estimation des biais de temps (à UTC) des horloges des stations laser du réseau de l'ILRS, et la recherche d'une synergie entre mesure de la turbulence atmosphérique et mesure du bilan de liaison sol-Jason-2 avec le laser. En outre, nous proposons des campagnes dédiées, pour le transfert de temps, la synchronisation d'horloges distantes et la physique fondamentale avec les Etats-Unis et la Russie.

Ces travaux s'inscrivent dans une perspective de service à la communauté internationale. Les études menées jusqu'en 2016 avec les produits T2L2 ont obtenu une reconnaissance importante et ont démontré l'intérêt d'obtenir de longues séries temporelles, aussi bien pour caractériser l'oscillateur DORIS (ce qui devrait améliorer l'orbite et le positionnement, à terme) que pour obtenir de l'ensemble des biais en temps des stations laser, ce qui devrait améliorer la solution laser de l'ITRF.

E-GRASP

Le projet E-GRASP est l'occasion de poursuivre les travaux concernant l'apport du laser, en mode transfert de temps, aux aspects de géodésie spatiale. En proposant une co-location à bord entre DORIS, GNSS et le laser, T2L2-GRASP est une opportunité de maintenir un très haut niveau de suivi de la fréquence bord de l'oscillateur, à la fois pour des questions relativistes et pour l'orbitographie et donc le positionnement.

Participants aux projets

| | |
|---------------------------|---|
| Etienne Samain | OCA/ Geoazur |
| Philippe Guillemot | CNES |
| Pierre Exertier | OCA/Geoazur |
| C.I. Foussard | mi-temps |
| J.M. Torre | OCA/Geoazur |
| Clément Courde | OCA/Geoazur |
| D. Rovera | Observatoire de Paris |
| M. Abgrall | Observatoire de Paris |
| Ch. Jayles | CNES |
| H. Capdeville | CLS |
| N. Martin | CDD 2012-2014 |
| Alexandre Belli | OCA/Geoazur (Doctorant, First-TF,2014-16) |

Equipe AstroGeo pour les Observations laser à Grasse et en campagne avec la station mobile FTLRS (M. Aimar, D. Albanèse, H.Mariey, G. Martinot-Lagarde)

8. SERVICES SCIENTIFIQUES ET DIFFUSION DE L'INFORMATION

8.1. Services scientifiques nationaux

8.2. Services scientifiques internationaux + BGI

8.3. Outils en ligne

8.1. Services scientifiques nationaux

Le nécessité d'observer, de comprendre et de modéliser les interactions du système terre - océan a conduit à la mise en place progressive de systèmes d'observations transdisciplinaires à même de fournir aux différentes communautés scientifiques des données d'observation in-situ fiables, qualifiées et dans des délais adaptés aux utilisations qui en sont faites.

L'observation du niveau de la mer se trouve à la croisée des domaines liés à l'hydrographie et la marégraphie, la géodésie terrestre et les techniques de positionnement spatial GNSS. Ses applications se sont largement diversifiées durant les dernières décennies et recouvrent les domaines de la modélisation des variations à long terme du niveau des océans, la connaissance des niveaux statistiques extrêmes permettant de planifier l'aménagement du littoral, la détection, l'alerte et la gestion des événements de type tsunami ou onde de tempête, sans oublier la sécurité de la navigation dans un contexte où la taille des bateaux rend critique la connaissance et la prédiction des hauteurs d'eau.

Au niveau international, le programme GLOSS, conduit notamment sous l'égide de l'UNESCO, fédère les initiatives visant à mettre en place des infrastructures d'observation à long terme du niveau marin. En France, l'observation et la diffusion des variations du niveau moyen des mers est assurée par le SOERE SONEL qui regroupe deux laboratoires de recherche (LEGOS et LIENSs) et deux Etablissement publics à caractère administratif (IGN et Shom).

SONEL vise à fournir des données du niveau de la mer de grande qualité métrologique obtenues à partir de marégraphes (niveaux relatifs de la mer) et de techniques modernes de géodésie (déplacements verticaux et niveaux absolus de la mer) pour l'étude des tendances à long terme du niveau de la mer ou la calibration d'altimètres radar embarqués sur satellite, par exemple.

Observation du niveau marin

Le Shom a pour vocation de connaître et de décrire l'environnement physique marin, notamment dans les zones littorales. A ce titre, le Shom observe le niveau de la mer depuis de nombreuses décennies grâce à son réseau marégraphique RONIM (Réseau d'observation du niveau de la mer), présent sur le littoral métropolitain et outre-mer. Ce réseau s'est fortement développé au cours des années 2000 et 2010, notamment sous l'impulsion des nouveaux enjeux liés à la prévention des risques.

En 2017, RONIM compte 48 marégraphes dont 39 en métropole. Au cours des cinq dernières années, ce réseau a été densifié pour répondre aux besoins à la fois de la modélisation des phénomènes de surcote dans le contexte de la mise en place par Météo-France de la Vigilance Vagues-Submersion (VVS) suite à la catastrophe Xynthia, et de l'alerte tsunami plus particulièrement sur la façade méditerranéenne.

En parallèle de cette densification, les stations du réseau RONIM ont été dotées de capacités de transmission en temps réel permettant un suivi des événements extrêmes. Les mesures des marégraphes sont transmises toutes les secondes par liaison ADSL ou GPRS. 34 stations sont en outre équipées d'une liaison par satellite permettant une redondance des moyens de

communication. Le réseau RONIM bénéficie du soutien financier de la DGPR et de la DGSCGC.

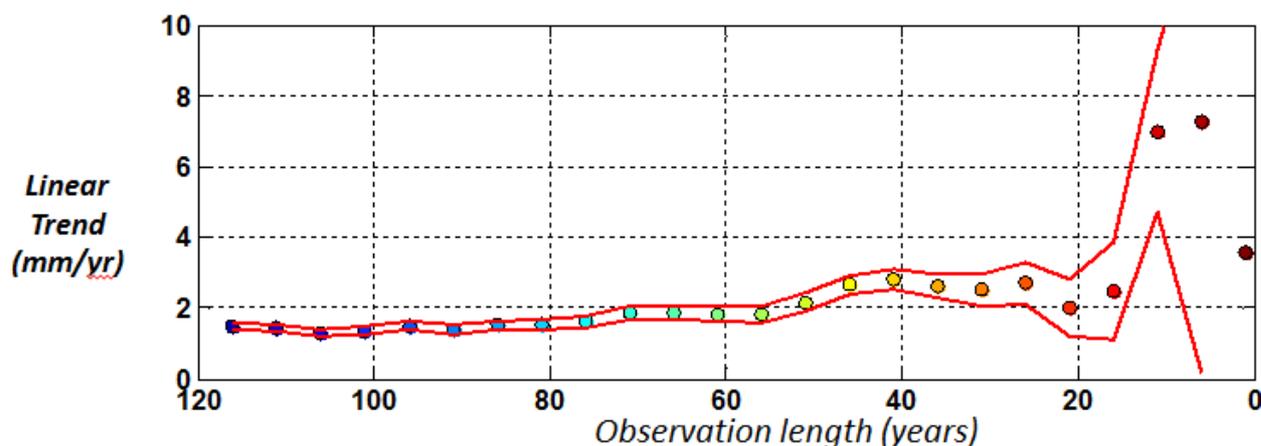
En plus du réseau RONIM, SONEL s'appuie sur des observatoires marégraphiques du Réseau d'observation subantarctique et antarctique du niveau de la mer (ROSAME), dépendant du LEGOS et soutenu par l'INSU et l'Ifremer avec le soutien logistique de l'IPEV.

Ces stations d'observations sont situées dans les TAAF, à Kerguelen, Saint-Paul, Crozet et Dumont d'Urville. Elles ont été implantées initialement pour réaliser une calibration des satellites altimétriques mais constituent des observatoires privilégiés de l'évolution à long terme du niveau de la mer dans ces régions peu instrumentées.

Observations in-situ :

L'évolution du niveau marin est soumise à une forte variabilité temporelle. Les variations hautes fréquences, vagues, marées, s'ajoutent à des cycles plus lents, lunaires, saisonniers, climatiques.

La discrimination des tendances d'évolution à long terme du niveau moyen, dont les vitesses ont des ordres de grandeur de 1 à 2mm/an, nécessitent des observations longues permettant de filtrer toutes les contributions non climatiques.



(Y. Ferret/Shom)

La détermination d'une tendance à long terme réaliste nécessite une soixantaine d'année d'observations du niveau marin. La période d'altimétrie spatiale ayant débuté au début des années 1990, les stations marégraphiques, dont les plus anciennes remontent au XVIIIe siècle, demeurent indispensables à la connaissance du niveau des océans dont elles sont les témoins privilégiés.

Maîtrise de la composante verticale

Les stations d'observations marégraphiques côtières, mesurant l'évolution du niveau marin depuis la terre, sont soumises aux mouvements verticaux du sol sur lequel elles sont fixées. Ces mouvements peuvent avoir diverses origines : affaissement d'un quai, évolution sédimentaire ou dynamique tectonique. Non pris en compte, ces mouvements vont se traduire dans les enregistrements marégraphiques par une élévation ou une diminution

tendancielle du niveau marin, selon que le socle sur lequel est posé le marégraphe s'enfonce ou s'élève.

La correction de ces mouvements nécessite un suivi météorologique très précis des capteurs afin de déterminer leur vitesse verticale.

Depuis 1995, un effort est mené pour équiper la majorité des stations marégraphique SONEL d'antennes GNSS permanentes qui enregistrent les mouvements verticaux du sol. L'installation de ces stations GNSS est assurée par l'IGN avec le concours financier du CNRS.

En 2017 16 stations du réseau RONIM et les quatre stations du réseau ROSAME sont ainsi co-localisées avec un GNSS permanent.



(Source : Shom)

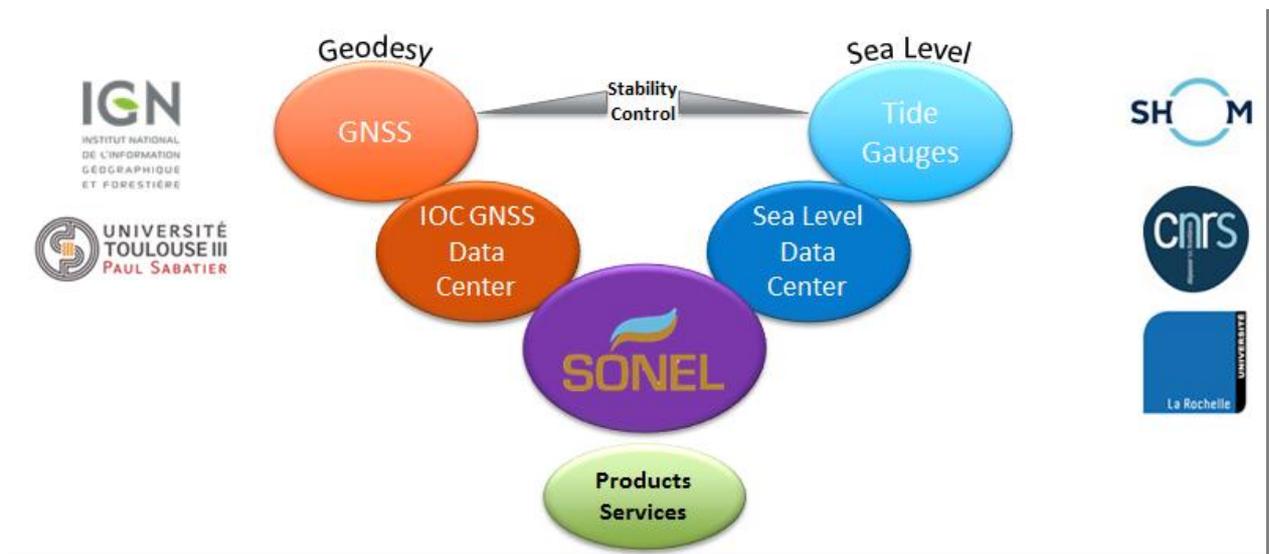
Pour les stations non-colocalisées, le Shom procède à intervalle régulier à des campagnes de mesure de hauteur ellipsoïdale permettant un suivi dans le temps des évolutions verticales du site. Ces contrôles sont réalisés par station de 48 heures dont les données sont post-traitées par le logiciel GAMIT-GLOBK.

De manière plus générale, les partenaires SONEL procèdent à des contrôles réguliers de l'ensemble des stations marégraphiques afin de s'assurer du bon fonctionnement du capteur et de la stabilité globale de l'observatoire. Des mesures de hauteur d'eau par sonde lumineuse sont réalisées deux fois par an sur chaque site et permettent de contrôler les mesures du capteur radar. Un nivellement complet des repères géodésiques composant l'observatoire est en outre réalisé tous les cinq ans afin de détecter d'éventuels défauts de stabilité du site.



Nivellement d'un observatoire de mare (Source : Shom)

L'ensemble de ces opérations, installation des marégraphes, contrôle des équipements, métrologie de précision, récupération, qualification et diffusion des données, représente un effort important de maintenance et des gestion sur des réseaux répartis sur quatre continents. La mise en commun de compétences complémentaires dans un système distribué de données intégrées.



Organisation (source : sonel.org)

Les produits issus de cette chaîne d'acquisition et de traitement sont mis à disposition sur le site www.sonel.org

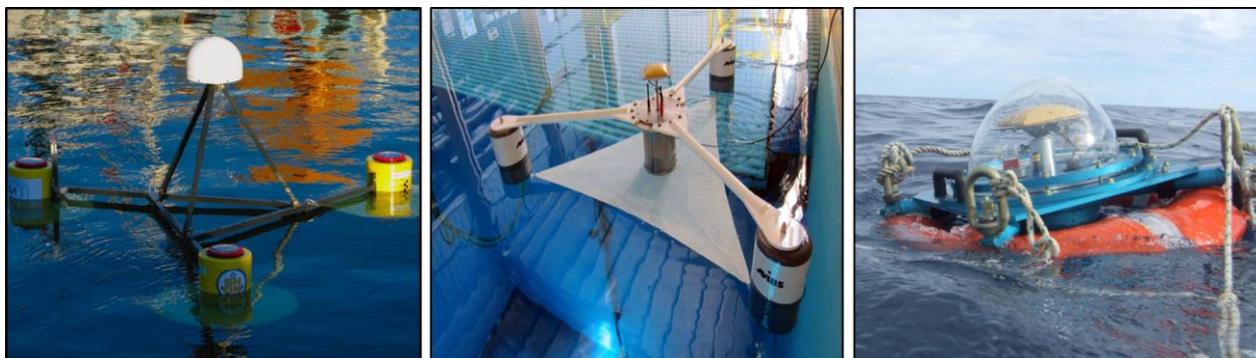
Il s'agit entre autre de cartes de tendances absolues (corrigées des mouvements verticaux) ou relatives (non corrigées) d'évolution du niveau moyen au niveau des marégraphes.



Exemple de produit SONEL – Carte de tendance verticale (source : sonel.org)

Prospective : Nouvelles techniques de mesure

En dépit des avancées technologiques récentes de l'altimétrie satellitaire, les mesures du niveau de la mer destinées aux applications marégraphiques et aux études sur les variations du niveau de la mer liées au changement climatique reposent encore essentiellement sur les mesures locales effectuées par les marégraphes. La constitution d'un observatoire de marée reste une opération complexe, nécessitant l'implantation de repères physiques, non exempts de défauts (impactés par tout mouvement du sol ou toute dégradation matérielle). Dans le cadre d'un déploiement léger, une solution consiste à utiliser des bouées équipées d'un système de positionnement par satellite GNSS (Global Navigation Satellite System) dont la constellation américaine GPS est la plus connue. Cette technique permet de mesurer la hauteur du niveau de la mer directement rapportée à un référentiel géocentrique absolu, indépendamment de la dérive d'un capteur marégraphique, d'une infrastructure à terre ou de la stabilité du terrain.



Bouées Shom, INSU, IGP (source : refmar.shom.fr)

Les 27 et 28 mars 2012 une expérience d'inter-calibration a été menée sur l'île d'Aix, où trois prototypes de bouées GNSS conçus par trois organismes indépendants (SHOM, INSU et IPGP) ont été déployés.

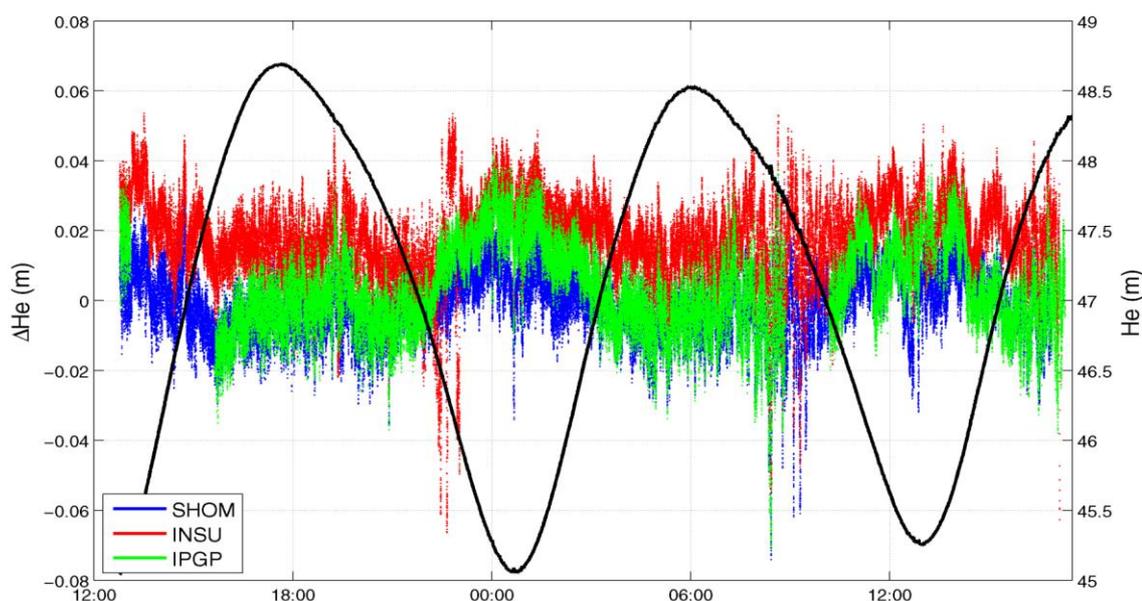
Cette expérience multi-appareils a permis d'évaluer les performances de plusieurs bouées pour la mesure précise du niveau de la mer. Les résultats démontrent que les bouées GNSS sont aujourd'hui capables de mesurer la hauteur du niveau marin au centimètre près, un degré de précision comparable à celui du marégraphe radar.

Les bouées GNSS constituent donc un outil très prometteur pour étalonner les marégraphes, mesurer le niveau de la mer dans des zones difficiles d'accès ou non instrumentées, calibrer la hauteur d'antennes GNSS d'un navire lors d'un levé bathymétrique référencé à l'ellipsoïde ou valider les surfaces de références verticales maritimes comme VORF (R-U) ou BATHYELLI (France).

Néanmoins, certains défis pratiques restent à relever, à la fois au niveau technique (autonomie des batteries, résistance en haute mer, télécommunications) et du traitement des données.

De nouvelles perspectives de traitement des données pour les zones off-shore sont offertes par le développement des techniques PPP (Precise Point Positioning) qui permettent de réaliser des mesures à grande distance des côtes sans avoir recours à une station fixe à terre.

Le Shom s'est clairement engagé dans le développement de ce type de capteur novateur : un marché de fiabilisation de notre prototype est actuellement en cours avec un industriel français. De plus, le Programme d'Etudes Amonts NOCALIT (NOUVEAUX CAPTEURS du LITtoral) permettra de démontrer sur les deux années à venir le fort potentiel de ces bouées allant des applications hydrographiques de Défense à l'amélioration des modélisations côtières.



Différences marégraphe radar / bouées GNSS (source : refmar.shom.fr)

Participants au projet

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Gaël André | SHOM, Brest |
| Vincent Donato | SHOM, Brest |
| Raphaël Legouge | SHOM, Brest |
| Nathalie Leidinger | SHOM, Brest |
| Nicolas Pouvreau | SHOM, Brest |
| Yves-Marie Tanguy | SHOM, Brest |
| Guillaume Voineson | SHOM, Brest |
| Florence Birol | OMP/LEGOS Toulouse |
| Laurent Testut | OMP/LEGOS/Univ. La Rochelle |
| Médéric Gravelle | Univ. La Rochelle |
| Mickaël Guichard | Univ. La Rochelle |
| Etienne Poirier | Univ. La Rochelle |
| Elisabeth Prouteau | Univ. La Rochelle |
| Guy Wöppelmann | Univ. La Rochelle |
| Philippe Techine | Legos |
| Alain Coulomb | IGN |
| Thomas Donal | IGN |
| Bruno Garayt | IGN |
| Thierry Person | IGN |

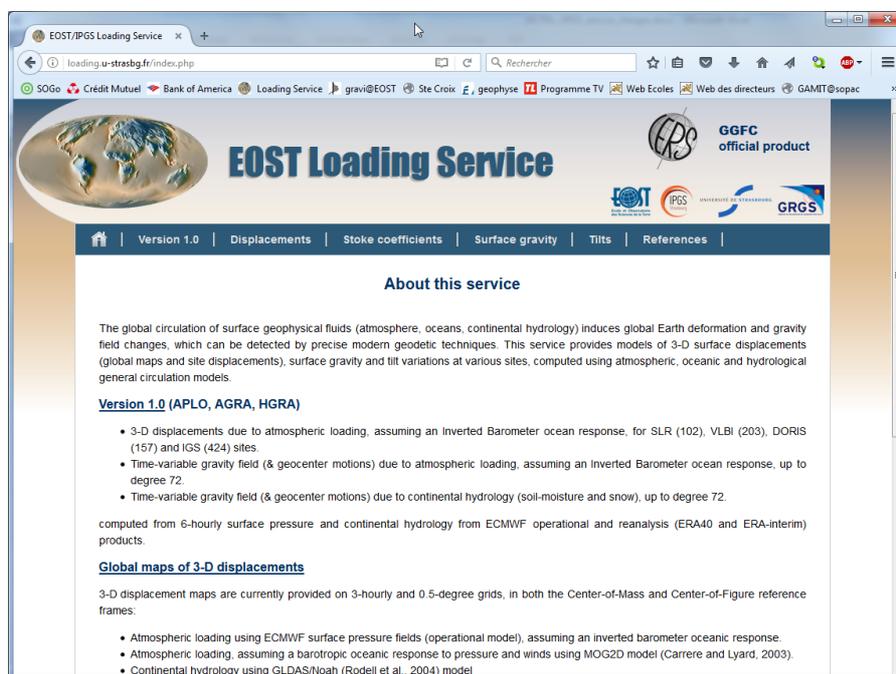
8.2. Services scientifiques internationaux + BGI

Service des charges

L'EOST a développé le Service des Charges (<http://loading.u-strasbg.fr>), reconnu depuis 2013 comme produit officiel par le Global Geophysical Fluid Center (GGFC), une des composantes depuis 1998 de l'IERS, et dont J.-P. Boy est depuis 2016 le Chair.

Ce service propose (voir figure) :

- les déplacements horizontaux et verticaux induits par plusieurs modèles atmosphériques (ECMWF opérationnel et réanalyse), océaniques (TUGO-m, ECCO, etc.) et hydrologiques (GLDAS/Noah, MERRA-land, ERA interim, etc.) pour plus de 2000 stations, comprenant les différents sites de l'ITRF2014, les sites GNSS et DORIS traités par les différents groupes du GRGS, mais également sous forme de cartes avec une résolution de 0.5°.
- les variations du champ de pesanteur (coefficients de Stokes) pour ces mêmes modèles.
- Les variations de gravité en surface et d'inclinaison du sol pour les sites du service IAG/IGETS (International Geodynamics and Earth Tide Service).



Page d'accueil du service des charges GGFC/EOST

Services internationaux de l'Observatoire de Paris

Dans la thématique des « systèmes de référence spatio-temporels » ou des techniques les rendant accessibles, le GRGS anime 6 services internationaux, dont la plupart sont situés à l'Observatoire de Paris.

Trois composantes de l'International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) :

- Le Centre des Paramètres de Rotation de la Terre ou Earth Orientation Center (EOC),
- Le Centre du système céleste international ou International Celestial Reference System Product Center ICRS PC,
- Le Centre des conventions de l'IERS (IERS CC) dont la responsabilité est partagée avec l'US Naval Observatory.

Trois centres d'analyse astro-géodésique :

- Le centre d'analyse de l'International VLBI Service (IVS), dit IVS-OPA,
- Le centre d'analyse des observations laser-satellites de l'International Laser Ranging Service (ILRS) – Observatoire de Paris – IMCCE
- Le centre d'analyse POLAC de l'ILRS pour la réduction des observations laser-lune – Observatoire de Paris - SYRTE

Earth Orientation Center (EOC) (SYRTE)

De tous les services mentionnés, c'est celui dont la tâche est la plus lourde, car multiforme et quotidienne. Pour la résumer, il s'agit de fournir les séries temporelles de référence internationale en matière de Paramètre de Rotation de la Terre (PRT) à partir de la collecte et de la combinaison de l'ensemble des données de géodésie spatiale.

L'EOC fournit également des produits sous-jacents, comme les bulletins D (UT1-UTC à 0.1 s près) et C (annonce de la seconde intercalaire).

Pour les besoins nationaux, l'opérabilité des satellites du CNES en particulier, l'EOC fournit les variations rapides des PRT (des trente derniers jours) avec une prédiction couvrant un horizon de 6 mois.

Il fournit également de nouveaux produits, qui n'ont pas encore été codifiés par l'IERS ; c'est le cas des fonctions d'excitations géodésiques de l'EOC, lesquelles sont citées dans des études scientifiques novatrices touchant aux redistributions de masse terrestre.

La rationalisation des tâches et leur automatisation informatique ont permis une compression drastique du personnel affecté à celles-ci, passant de 6 en 2000 à 2 aujourd'hui (C. Bizouard, O. Becker).

Néanmoins, si un astronome-adjoint n'est pas recruté ces prochaines années dans ce service dans ce service, la pérennité de celui-ci ne serait plus garantie. Ce serait fort dommage eu égard à l'enjeu croissant des PRT en matière de géolocalisation et de navigation spatiale.

La période 2012-2016 a été marquée par le passage à l'ITRF 2014, l'arrivée de C. Bizouard à la tête du service en 2015 après le départ à la retraite de Daniel Gambis, une modernisation de la méthode de combinaison pour la série de référence C04, et son calage dans le nouvel ITRF (voir Section 5.1.2).

L'importance croissante de l'EOC est reflétée par la fréquentation de son site Internet (<http://iers.obspm.fr/eop-pc>), comptant environ 85000 visiteurs individuels en 2016, et utilisé par une communauté très éclectique, brassant géoscience, astronomie et métrologie du temps. Créé en 2001, rendu interactif en 2003, il a fait l'objet d'améliorations et d'ajouts substantiels durant les cinq années écoulées, grâce en particulier à deux stages d'un élève ingénieur informaticien de l'EPITA, Denis Gayral. Nous envisageons aussi une application mobile, déjà partiellement réalisée.

ICRS PC

Le Centre de Produit ICRS PC existe au sein de l'IERS depuis 2001. Il est co dirigé par un membre de l'observatoire de Paris (J.Souchay) et un membre de l'USNO (B.Dorland).

Son but est d'assurer, en lien avec l'UAI, un suivi et une participation active aux différents travaux concernant la définition, la matérialisation et la maintenance du système céleste, axés principalement sur le positionnement des quasars, tant dans les longueurs d'onde radio (VLBI) que dans les longueurs d'onde optique (Gaia). Les activités menées sur la période 2012-2016 au SYRTE concernent principalement :

- 1) la construction de l'ICRF3 au sein d'un groupe de travail UAI
- 2) la construction avec mise à jour régulière du LQAC (Large Quasar Astrometric Catalogue)
- 3) les inter-comparaisons entre catalogues de quasars VLBI; le suivi photométrique de radio sources de l'ICRF en lien avec Gaia; la validation du catalogue Gaia dans le cadre de la CU9 du DEPAC.

Toutes ces activités sollicitent au SYRTE un personnel composé de six personnes à temps partiel.

IVS Analysis Center « Observatoire de Paris »

Le centre d'analyse IVS OPAR est un centre d'analyse opérationnelle de l'IVS. Les activités consistent en l'analyse routinière de toutes les sessions VLBI programmées à des fins de mesures de rotation terrestre ou de repères de référence terrestre ou céleste (astrométrie), diurnes ou intensives. La diffusion des résultats se fait par le site Internet (<http://ivsopar.obspm.fr>), par la soumission des fichiers de résultats au centre de données de l'IVS et par l'envoi des équations normales à ce même centre de données à des fins de combinaison intra et inter-techniques.

Le personnel du centre OPAR contribue à de nombreuses activités de recherche sur des thématiques variées : astrométrie de très haute précision incluant la réalisation des repères célestes fondamentaux comme l'ICRF et Gaia (C. Gattano, C. Barache, T. Carlucci, S. Lambert), géodynamique et Terre interne (Y. Ziegler, S. Lambert) et physique fondamentale (S. Lambert). Des informations plus détaillées concernant les résultats majeurs obtenus ces dernières années sont disponibles dans la section "Apport des données VLBI" de ce rapport.

Centre d'analyse ILRS

A l'Observatoire de Paris se trouvent deux centres d'analyse de l'ILRS :

- un centre d'analyse des données de télémétrie laser sur satellites, à l'IMCCE / Observatoire de Paris
- un centre d'analyse, dit POLAC, des données de télémétrie laser sur la Lune, au SYRTE/Observatoire de Paris: <http://syрте.obsрm.fr/polac/>.

Ils jouent un rôle moteur dans l'Analysis Working Group de l'ILRS, renommé Analysis Steering Committee en 2016. Ces deux centres fournissent des produits d'analyse dans un mode opérationnel, et participent en parallèle au pilotage des traitements d'observation pour accroître la précision et l'exactitude des produits géodésiques.

Depuis une décennie, deux astronomes-adjoints, Sébastien Bouquillon et Florent Deleflie, animent ces deux centres dans le cadre de leurs tâches de service du CNAP (ANO-01). L'expérience ainsi acquise assure la cohérence et la continuité des paramètres astro-géodynamiques déterminée par télémétrie laser, à savoir : déplacement du centre de masse de la terre et des stations d'observations, mouvement du pôle et variations de la vitesse de rotation, variations des coefficients de bas degrés du champ de gravité, calcul d'orbite précis réalisé à des fins de calibration pour les satellites géodésiques et les satellites GNSS.

En plus de ces deux services, deux organismes du GRGS effectuent eux-même les observations de télémétrie laser de l'ILRS. Il s'agit de l'OCA avec les systèmes MeO (satellites et Lune) et FTLRS (satellites), et l'OGT avec le système MOBLAS-8 (satellites) (<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/stations/index.html>).

IERS Convention Center

A cheval sur l'ensemble des services mentionnés, les conventions IERS sont l'ensemble des modèles ou des valeurs de références concernant la rotation de la Terre et la modélisation des temps de vol astro-géodésiques. Leur responsabilité est partagée entre l'USNO et un organisme français. Suite à la démission de Gérard Petit au BIPM, cette charge a échu à en septembre 2016 à l'Observatoire de Paris sous la direction de C. Bizouard assisté par S. Lambert. L'ensemble des partenaires s'est accordé sur un effort de simplification et d'homogénéisation des conventions, s'illustrant pour le moment par un site WEB plus ergonomique (<http://iers-conventions.obsрm.fr>).

Le Bureau Gravimétrique international (BGI)

Rappel du contexte et des objectifs scientifiques

En tant que Service scientifique de l'IAG (International Association of Geodesy), le BGI assure pour la communauté scientifique mondiale, la collecte, l'archivage, la validation et la redistribution de l'ensemble des mesures gravimétriques relatives et absolues acquises à la surface du globe (campagnes terrestres, marines et aéroportées). Au sein de l'IAG, le BGI contribue ainsi directement à l'IGFS (International Gravity Field Service), entité regroupant l'ensemble des services internationaux relevant de l'étude ou de la modélisation du champ de gravité terrestre et à l'infrastructure GGOS (Global Geodetic Observing System). Au plan national, le BGI est reconnu comme une composante du Service National d'Observation (SNO) "Gravimétrie-Géodésie" de l'INSU (ST-ANO3) et est également identifié comme l'un des CDS (Centre de Données Scientifiques) du futur pôle national de données consacré à l'observation de la terre solide (projet ForM@Ter). Il contribue enfin aux activités du GRGS (Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale) et de l'Infrastructure de Recherche (IR) nationale RESIF (Réseau Sismologique et Géodésique Français).

Installé en France depuis sa création en 1951 (Paris puis Toulouse), le BGI est hébergé à l'Observatoire Midi-Pyrénées (GET/OMP). Son fonctionnement est assuré avec le soutien de plusieurs organismes nationaux impliqués dans l'acquisition et l'exploitation de mesures du champ de pesanteur (BRGM, CNES, CNRS/INSU, IFREMER, IGN, IRD, SHOM) et de divers établissements ou laboratoires académiques contribuant aux activités de recherche et de développement, de formation et d'expertise du BGI dans le domaine de la gravimétrie. Un partenariat privilégié a également été mis en place depuis 2008 avec le BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Allemagne) pour la mise en œuvre et le maintien de la base de données de gravimétrie absolue du BGI. Le mandat international du BGI a été reconduit lors de l'Assemblée Générale de l'Union Internationale de Géodésie et de Géophysique (UIGG) qui s'est tenue à Prague en Juillet 2015. Préalablement, une évaluation des services de l'IAG avait été conduite en 2014. Les missions et termes de référence du BGI sont définis dans « The Geodesist's Handbook, J. of Geod, 2016 » (DOI 10.1007/s00190-016-0948-z ; link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00190-016-0948-z.pdf).

Description et bilan des activités

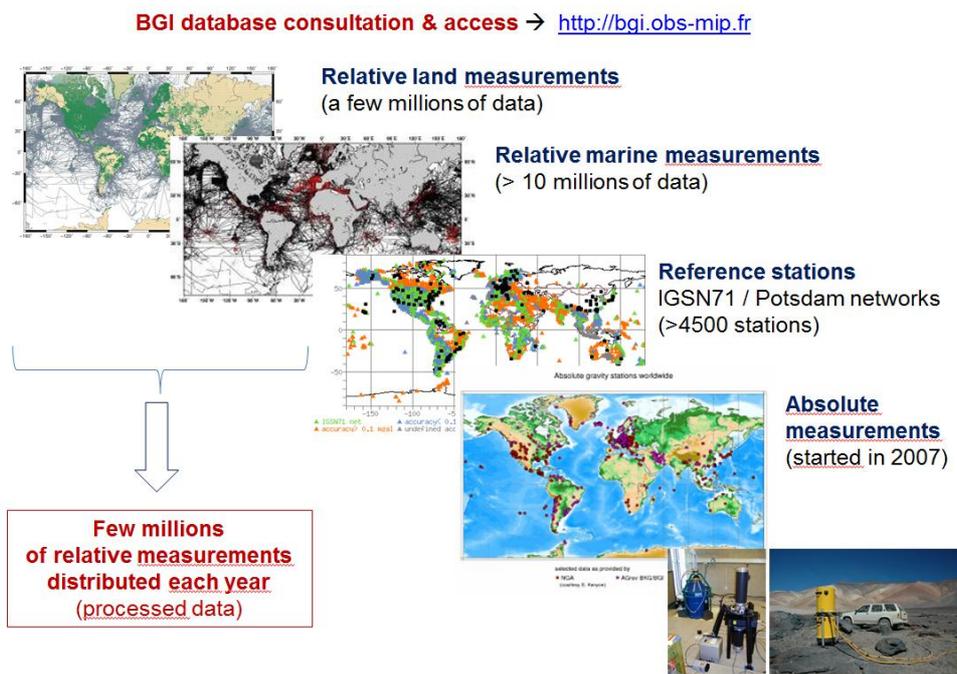
Les activités du BGI se déclinent principalement en (i) une activité de service (maintenance et évolution des bases de données et des services web, gestion des demandes de données, assistance aux utilisateurs, etc.) et (ii) une activité de recherche et de valorisation (projets de recherche, développements d'outils et de nouveaux produits, contribution aux travaux de l'IAG, etc.). Parallèlement à ces activités, le BGI contribue également à des actions de formation et d'expertise en gravimétrie. L'ensemble des services et l'accès aux bases de données et produits du BGI sont accessibles depuis le site <http://bgi.obs-mip.fr>.

Activités de service

- Site Internet et services Web

Une part significative de l'activité du BGI est consacrée à la distribution des mesures relatives terrestres et marines (objet des principales requêtes des utilisateurs auprès du BGI) et à l'assistance aux utilisateurs. Les requêtes formulées à travers le site BGI sont traitées de façon automatique jusqu'à l'extraction et la mise à disposition des données. De nouvelles fonctionnalités sont régulièrement développées pour faciliter la gestion des bases de données et améliorer les services proposés.

Le site internet du BGI (<http://bgi.obs-mip.fr/>) donne accès aux 4 bases de données gravimétriques fondamentales (mesures relatives terrestres ou marines, mesures absolues, stations gravimétriques de référence) et sert d'interface aux utilisateurs pour la requête de données (plusieurs millions de mesures relatives distribuées par an) ou de produits dérivés (cartes ou grilles numériques d'anomalies, etc.). Il présente également l'ensemble des activités du BGI et fournit les principaux liens vers d'autres services ou sites utiles dans le domaine de la gravimétrie.



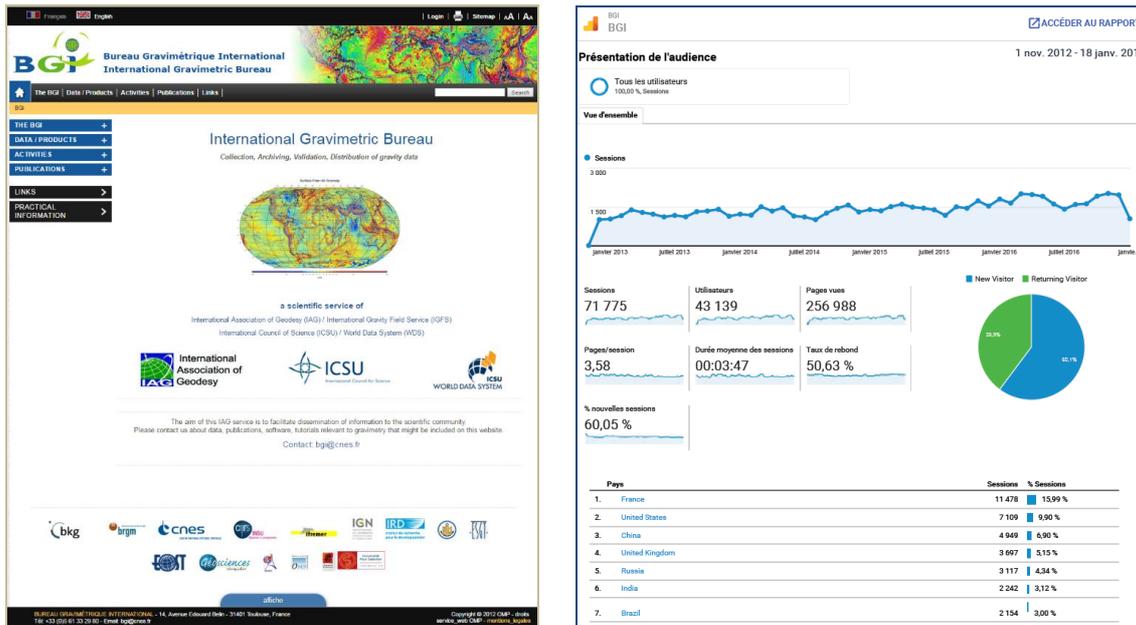
Principales bases de données gravimétriques globales du BGI

Au cours de la période 2012-2016, ont été mises en ligne en particulier :

- La collection complète des Bulletins et notices techniques du BGI (de 1959 à 2002) numérisés par N. Lestieu et désormais disponibles au format PDF (http://bgi.obs-mip.fr/publications/bgi_bulletin) ;

- Les grilles numériques à haute résolution d'anomalies (Bouguer, isostatiques, Air libre) du modèle WGM2012 (BGI) [<http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012>] et d'effets gravimétriques de la topographie à haute résolution du modèle GGMplus (CURTIN Univ. Australie) [<http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012>].

Les statistiques Google de consultation du site BGI sur la période 2012-2016 indiquent environ 256000 pages consultées, 43000 visiteurs uniques et 71000 sessions, faisant l'objet de demandes quotidiennes de données et de produits.



Interface du site BGI (<http://bgi.obs-mip.fr>) et statistiques Google sur la période 2012-2016

- Bases de données gravimétriques relatives : nouveautés

Le BGI gère et maintient deux bases de données gravimétriques comportant à ce jour plus de 12 millions de mesures issues respectivement de campagnes à terre ou en mer et collectées depuis plusieurs décennies (ces deux bases de données faisant l'objet des principales demandes émanant d'utilisateurs privés ou publics). L'intégration de nouvelles données relatives (données marines et terrestres) s'effectue avec le SHOM et l'IFREMER pour les données marines issues de campagnes françaises, avec le BRGM et l'IGN pour les données du territoire français et avec d'autres contributeurs de tous pays pour des campagnes réalisées en différentes régions du globe.

Un effort important a été entrepris au cours des dernières années pour moderniser les outils de validation des données. Pour les données terrestres, une nouvelle chaîne de validation des campagnes gravimétriques a été développée incluant à la fois des outils d'analyse (contrôle des systèmes de référence, prédiction des anomalies par colocation, etc.) et des outils de contrôle graphique interactifs (développés sous Java avec interface graphique

NASA WorldWind). Ces nouveaux outils (cf. paragraphe « Développements logiciels » p 64 du rapport) permettent d'améliorer sensiblement les opérations de validation et de contrôle des données issues de campagnes terrestres. Pour les données marines, une installation au BGI du logiciel développé par le SHOM pour la validation de campagnes marines est prévue en 2017.

- **Base de données gravimétriques absolues : nouveautés**

La collecte et l'intégration de mesures absolues de la pesanteur de divers pays se poursuivent en collaboration avec le BKG (Allemagne). Au 02/2017, cette base recense ainsi 3839 observations acquises sur 1132 sites (25 pays) par 60 institutions et 73 instruments. Une nouvelle version de la base de données (AGrav2), développée et maintenue pour le BGI par le BKG, est en cours de développement. Elle offrira de nouvelles fonctionnalités, en particulier la possibilité de classification des sites en sous-réseaux (nationaux ou internationaux), une interopérabilité avec la base de données de mesures gravimétriques permanentes (réseau de gravimètres supraconducteurs). Cette base, destinée à répondre aux besoins des 2 services internationaux BGI (mesures ponctuelles) et IGETS (mesures permanentes) devrait être testée courant 2017.

La contribution des équipes françaises aux mesures absolues a été particulièrement significative ces dernières années. Les observations issues des gravimètres français FG5 (#206 et #227) et A10 (#014) ont été intégrées dans la base de données globale. C'est le cas des mesures effectuées en France métropolitaine par l'IGN sur plus de 200 sites avec le gravimètre A10 #014 et de nombreuses autres mesures effectuées dans les ROM COM ou à l'étranger (Amérique du Sud, Afrique, Europe, Asie, Antarctique...) par les équipes françaises avec des gravimètres FG5 ou A10 (principaux organismes et labo contributeurs : IRD, IGN, EOST Strasbourg, Univ. de Montpellier, IPGP).

A noter également qu'au cours des dernières années, 2 nouveaux gravimètres absolus A10 ont été acquis en France par le SHOM et l'IGN respectivement en 2014 et 2015. Les premiers gravimètres absolus atomiques transportables (instruments de nouvelle génération développés et commercialisés par la société française MUQUANS dans le cadre d'un partenariat avec l'Infrastructure de Recherche RESIF) sont également en cours d'évaluation ou de développement (livraison de 2 instruments en 2016 et 2018 acquis sur financements EQUIPEX, IDEX, IRD, CNRS/INSU). Tous ces instruments, contribueront à l'acquisition par les équipes françaises de nouveaux sites de référence dans le monde.

- **Mise en place d'un DOI pour le BGI : 10.18168**

En vue de mieux pouvoir référencer les services et activités, le BGI s'est doté en 2015 d'un identifiant numérique DOI (Digital Object Identifier). Le BGI a désormais la capacité de référencer à la fois ses services (bases de données), ses produits ou ses logiciels. Il peut également affecter un DOI sur des jeux de données ou des produits fournis par les

contributeurs du BGI. Nous espérons ainsi par ce biais pouvoir stimuler le dépôt de données au BGI et ainsi faciliter la mise à jour et un référencement des bases de données.



Interface de la base de données de gravimétrie absolue du BGI/BKG (<http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Absolute-Gravity-data>)

Participants au projet

| | |
|--------------------|----------------|
| Georges Balmino | GET (Toulouse) |
| Sylvain Bonvalot | GET (Toulouse) |
| Anne Briais | GET (Toulouse) |
| Sean Bruinsma | GET (Toulouse) |
| Vincent Carrassus | GET (Toulouse) |
| Germinal Gabalda | GET (Toulouse) |
| Nicole Lestieu | GET (Toulouse) |
| Franck Reinquin | GET (Toulouse) |
| Lucia Seoane | GET (Toulouse) |
| Gilles Martelet | BRGM Orléans |
| Renaud Degoy | IGN/SGN |
| Alain Coulomb | IGN/SGN |
| Thierry Gattacceca | IGN/SGN |
| Thierry Person | IGN/SGN |
| Michel Diament | IGN/LAREG |
| Olivier Jamet | IGN/LAREG |
| Emilie Ostanciaux | IGN/LAREG |

| | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Gwendoline Pajot-Metivier | IGN/LAREG |
| Marie-Françoise Lalancette | SHOM (Brest) |
| Didier Rouxel | SHOM (Brest) |
| Corinne Salaün | SHOM (Brest) |
| Nicolas Le Moigne | Univ. Montpellier (GM) |
| Jean-Daniel Bernard | EOST/Univ. Strasbourg |
| Jean-Paul Boy | EOST/Univ. Strasbourg |
| Jacques Hinderer | EOST/Univ. Strasbourg |
| Harmut Wziontek | BKG Frankfurt/Leipzig |
| Reinhard Falk | BKG Frankfurt/Leipzig |
| Herbert Wilmes | BKG Frankfurt/Leipzig |

8.3. Outils en ligne

Mise à jour du site

Un site Web, en français et en anglais <http://grgs.obs-mip.fr> est dédié au GRGS. Il possède une palette d'informations mises à disposition du public. Il offre des données de recherches, de formation et de communication. L'historique du GRGS en est également retracé.

D'autre part, son site intranet, soumis à mot de passe et identifiant, est administré par Pierre VERT, Développeur Web multimédia de l'OMP, qui le conçoit, le développe et active les authentifications des membres. Dans ce cadre, la configuration de liens, permettant l'inscription aux écoles d'été et aux ateliers, est faite lors de ce type d'événement.

Il est à noter qu'une rubrique intitulée « coopération » a été ajoutée à « documents divers » et « comptes-rendus internes », suite à la décision du dernier bureau exécutif. Elle concerne la coopération et développe les conventions de partenariat.

Une mise à jour régulière, effectuée par Nicole LESTIEU jusqu'en 2016, l'est aujourd'hui par Agnès PATU, qui assure à présent le secrétariat du GRGS. A ce titre, elle coordonne les informations données par les membres du GRGS et met à jour la page d'accueil notamment ainsi que l'annuaire, en collaboration avec les équipes qui lui fournissent les éléments d'informations. Il en est de même pour les ateliers et les écoles d'été.

Elle met en ligne les comptes-rendus d'activité annuels et les publications. D'autre part, elle veille à actualiser les données d'organisation concernant les membres des instances du GRGS.

Un comité WEB, formé de représentants Web pour chaque tutelle du GRGS (confère liste « comité Web » du rapport) a pour mission de veiller à l'organisation et à la gestion des informations du site, pour ce qui concerne chacune des tutelles.

L'OMP s'est donné pour mission de reconfigurer tous les sites administrés en 2017, ceci afin de simplifier les procédures. Un point pourra être fait prochainement avec Pierre VERT.

Outils GRGS de visualisation

Le site web du GRGS contient un certain nombre de liens vers des outils spécifiques de valorisation en ligne des données, le plus souvent dans le cadre de Services Nationaux d'Observations dans lesquels le GRGS est fortement impliqué. On peut citer :

MIRIADE, composante du portail VO Solar System (labellisé SO5 par l'INSU) (<http://vo.imcce.fr/webservices/miriade>) ;

Gaia-GBOT (SO4) (<http://gbot.obspm.fr>) ;

IERS EOP-PC (SO1) (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>)

ILRS POLAC (<http://polac.obspm.fr>) (SO1)

ILRS SLR (<http://vo.imcce.fr/slr-ac>) (SO1)

IVS (<http://ivsopar.obspm.fr>) (SO1)

Le site de l'ITRF, hébergé par l'IGN : <http://itrf.ensg.ign.fr/>

Les visualisations et l'accès aux variations temporelles du champ de gravité

Le site du CMS de T2L2 : <https://t2l2.oca.eu/?lang=fr>

Sur le site du GRGS : la visualisation des séries temporelles des positions de stations déterminées par les Centres d'Analyses GRGS pour l'IDS, l'IGS, l'ILRS (en cours), l'IVS (à venir) (adresse provisoire : <http://apps.ids-doris.org/apps/grgs/>)

Exploitation et comparaison de séries temporelles

Le GRGS dispose maintenant d'un outil performant et reconnu de comparaison de séries temporelles de produits géodésiques construits à partir de données de type différent (DORIS, GNSS, SLR en particulier) :

- <http://apps.ids-doris.org/apps/grgs/> : outils de visualisation de séries temporelles DORIS, GNSS, SLR (en cours), VLBI (à venir) du GRGS en cours de développement sur la base des outils développés par CLS pour le CNES pour le web service de l'IDS (cf <http://apps.ids-doris.org/apps/>)

- <http://vo.imcce.fr/slr-ac/>

A ce titre, ces outils sont quelque peu comparables à ceux fournis par les autres centres d'analyse internationaux présents au sein des services internationaux, et en lien avec GGOS en particulier. Ils permettent :

Une estimation des biais dans les séries temporelles issues des techniques ;

Une visualisation facilitée des résultats des combinaisons de ces techniques ;

D'ajouter, grâce au formalisme « VO-event », des informations complémentaires (comme les évolutions technologiques), permettant d'interpréter les biais, évolutions majeures et discontinuités présentes dans les séries temporelles.

Prospective

Le développement de cette partie du site WEB du GRGS se poursuivra au fur et à mesure que l'ensemble des projets continueront à progresser, ce qui permettra le développement et la mise en ligne de nouveaux outils.

Les outils existants devront suivre l'évolution des technologies Web, pour rester opérationnels.

Les projets 2015 concernent :

- la poursuite du développement et de l'homogénéisation de l'outil de comparaison de séries temporelles de produits géodésiques (avec la finalisation de l'insertion des résultats SLR);
- la mise en chantier d'un outil générique d'exploitation et d'analyse de séries temporelles au format VO, et avec les outils du VO ;
- la mise en chantier au SYRTE d'un nouvel outil VO de transformations de coordonnées, qui sera utile également dans la communauté « planétologie ».

Participants au projet

| | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Xavier Collilieux | IGN/LAREG |
| David Coulot | IGN/LAREG |
| Anne Duret | IGN/LAREG |
| Kevin Eyermann | IGN/LAREG |
| Sébastien Bouquillon | IGN/LAREG |
| Sébastien Lambert | SYRTE/Observatoire de Paris |
| Christophe Barache | SYRTE/Observatoire de Paris |
| Olivier Becker | SYRTE/Observatoire de Paris |
| Jérôme Berthier | SYRTE/Observatoire de Paris |
| Florent Deleflie | IMCCE/Observatoire de Paris |
| Christophe Portmann | IMCCE/Solussio |
| Laurent Soudarin | Cadre contrat CNES/GRGS |

9 - PROJETS

Les projets futurs

Un des rôles du GRGS est de réfléchir aux moyens de la géodésie du futur et de proposer des nouveaux scénarios de missions satellitaires. Plusieurs équipes contribuent à cette réflexion et sont source de propositions, que ce soit en prospective nationale (par exemple au séminaire de prospective du CNES) ou en coopération européenne ou internationale.

Proposition d'Observatoire Géodésique Fondamental à Tahiti

Le projet d'Observatoire géodésique fondamental (OGF) à Tahiti émane du constat de manque d'infrastructure VLBI (interférométrie à très longue base) dans le Pacifique sud et des considérations des instances géodésiques nationales et internationales, des agences spatiales et des centres de recherche scientifique pour le combler.

Une prospection du GRGS avec l'aide d'instances locales a permis en 2014 de se rapprocher de Tahiti Nui Telecom (TNT) pour la réalisation d'un tel projet qui comprendrait, outre une antenne VLBI proposée par la NASA, un récepteur GNSS Regina et une balise émettrice DORIS (CNES), une station laser (OCA avec participation du CNES, voire de l'ESA). L'Observatoire de Paris pourrait être mis à contribution pour fournir la référence de temps/fréquence. Le site de TNT est occupé en partie par des antennes de Telecom et par un ensemble d'instruments de suivi, télémétrie et commande du système de positionnement européen Galileo.

En avril 2016, la NASA a envoyé trois ingénieurs pour tester la qualité électromagnétique du site. Une autre campagne de validation du site est prévue en 2017 en coordination avec l'ESA pour tester l'impact radioélectrique de l'antenne TTC Galileo et la compatibilité des émissions DORIS.

La réalisation du projet dépend dorénavant du budget accordé par les tutelles du GRGS et pourrait intervenir au mieux en 2020.

Proposition E-GRASP/Eratosthenes en réponse à l'appel Earth Explorer-9 de l'ESA

En 2016, en réponse à l'appel Earth Explorer-9 de l'ESA, plusieurs membres du GRGS ont participé à l'élaboration d'une proposition de mission de géodésie spatiale pour la détermination du système de référence terrestre à la précision millimétrique. La proposition dénommée E-GRASP/Eratosthenes a été portée par Richard Biancale (CNES) avec la contribution nationale de D. Coulot, A. Pollet, Zuheir Altamimi, L. Métivier (IGN), J.-M. Lemoine, B. Meyssignac (CNES), P. Exertier, E. Samain (OCA), P. Delva, C. Le Poncin-Lafitte, S. Lambert, P. Wolf (OP), J.-P. Boy (EOST).

E-GRASP/Eratosthenes (European-Geodetic Reference Antenna in Space) a pour objectif d'améliorer et d'homogénéiser les références d'espace-temps sur Terre et en particulier de réaliser le système de référence terrestre à la précision du millimètre avec une stabilité de 0,1 mm/an.

Le projet consiste à équiper une même plateforme avec les quatre techniques fondamentales de géodésie spatiale (récepteurs DORIS et GNSS, réflecteurs laser, transpondeur VLBI) reliée à une horloge maser très précise. De plus le système de synchronisation par lien laser T2L2 assurera la synchronisation des horloges des stations laser.

De nombreuses simulations réalisées au LAREG/IGN ont permis de préciser les caractéristiques orbitales les plus favorables aux objectifs techniques et scientifiques de la mission. Le choix s'est finalement tourné vers une orbite excentrique entre 762 et 7472 km d'altitude à l'inclinaison critique (63,4°).

La précision du système de référence se répercute sur de nombreuses applications scientifiques, voire sociétale. Elle est par exemple fondamentale pour les calculs d'orbite des satellites géodésiques ou altimétriques et en conséquence pour quantifier les variations du niveau des mers et des glaces, les déplacements tectoniques ou les déformations de la croûte terrestre.

Aucune mission n'a été sélectionnée par l'ESA en 2016. E-GRASP/Eratosthenes ayant été bien évaluée scientifiquement, la proposition sera resoumise au nouvel appel EE-9 en 2017.

Proposition e.motion² en réponse à l'appel Earth Explorer-9 de l'ESA

En 2016 nous avons participé à l'élaboration d'une proposition de mission gravimétrique spatiale, en réponse à l'appel Earth Explorer 9 de l'ESA : la proposition e.motion², portée par Thomas Gruber (TU Munich). Nous intervenons en tant que co-proposante (Isabelle Panet), en charge de coordonner le soutien scientifique de la proposition, et en tant que membres de l'équipe proposante (au sein du GRGS : Richard Biancale, Guillaume Ramillien, Lucia Seoane, Sean Bruinsma).

L'objectif de la constellation e.motion² est de déterminer les variations temporelles du champ de gravité terrestre avec une résolution spatiale et temporelle significativement améliorées par rapport à ce que fournit GRACE. Dans le scénario bas, on vise une précision de 1 mm sur les géoïdes mensuels à 150 km de résolution (et 10 cm sur les hauteurs d'eau à 200 km de résolution chaque mois) ; dans le scénario haut, une précision dix fois meilleure est envisagée (soit, en hauteur d'eau équivalente, 5 cm de précision à 150 km de résolution chaque mois). Ces performances correspondent à une amélioration d'un facteur 5 (scénario bas) à 50 (scénario haut) par rapport à GRACE.

Ce gain de précision et de résolution doit permettre d'observer le signal gravimétrique associé à un nombre croissant de transferts de masse au sein de la planète Terre, reflétant son évolution à différentes échelles de temps et d'espace. Il devient alors possible de suivre le cycle de l'eau entre atmosphère, océans, calottes polaires et continents, et de fermer les bilans d'eau, de la résolution temporelle des phénomènes hydro-météorologiques extrêmes à celle des variations climatiques, et pour des résolutions spatiales globales à plus locales, avec un compromis entre résolution spatiale et résolution temporelle. Par exemple, dans le scénario haut, 85 % des bassins hydrologiques peuvent être résolus. Ce gain de résolution est indispensable également pour avancer dans l'assimilation des données de gravimétrie spatiale dans les modèles géophysiques, sur lesquels repose toute prévision. De la même manière, il doit permettre de mieux comprendre et modéliser les processus dynamiques internes et les déformations de la surface terrestre, en particulier associées au cycle sismique.

Pour atteindre ces objectifs, le concept e.motion² consiste en deux paires de satellites suivant le principe de low-low satellite-to-satellite tracking, l'une proposée dans le cadre de EE9, l'autre qui serait réalisée dans un cadre de coopération internationale (il pourrait s'agir de GRACE Follow-On ou d'une éventuelle mission ultérieure de la NASA). Les variations de distance entre les satellites d'une paire, provenant des variations d'attraction gravitationnelle ressentie par chaque satellite, sont suivies par interférométrie laser avec une précision de quelques dizaines de nm. A bord de chaque satellite, un accéléromètre électrostatique de précision 10^{-11} m/s²/√Hz permet la mesure des accélérations non-gravitationnelles, et un système de réduction ou de compensation de traînée permet de voler selon des orbites plus basses que GRACE. Une option instrumentale possible mais hors budget et ne faisant pas partie du cœur de la proposition, serait d'embarquer en démonstrateur un accéléromètre à atomes froids à un axe. Pour ce qui est des orbites, une configuration de type « Bender » est proposée pour la constellation, avec une paire en orbite polaire et une paire en orbite inclinée, cette dernière en tant que mission EE9. Deux orbites sont étudiées pour la paire EE9, à 420 km ou à 340 km d'altitude, menant aux performances des scénarios haut et bas précédemment décrites pour la constellation. On attend une réduction des artefacts de striping dans les géoïdes reconstruits, associés à l'échantillonnage unidirectionnel de GRACE ; de plus, le gain en résolution temporelle à grande échelle spatiale ouvre un nouveau type d'applications à la gravimétrie spatiale, par le suivi des variations de masses atmosphériques.

10. BIBLIOGRAPHIE

MECANIQUE ORBITALE ET CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE

2016

ACL - Lopez T., R. Antoine, Y. Kerr, J. Darrozes, M. Rabinowicz, G. Ramillien, A. Cazenave and P. Genthon, Subsurface hydrology of the Lake Chad basin from convection modelling and observations, *Surveys in Geophysics*, 37, 2, 471-502, doi: 10.1007/s10712-016-9363-5, 2016.

ACL - Lopez, T.; Antoine, R.; Kerr, Y.; Ramillien, G. L. et al. Subsurface Hydrology of the Lake Chad Basin from Convection Modelling and Observations. *SURVEYS IN GEOPHYSICS* Volume: 37 Issue: 2 Special Issue: SI Pages: 471-502 Published: MAR 2016.

ACL - Ramillien G., F. Frappart and L. Seoane, 2016, Global surface density of water mass variations by using a two-step inversion of cumulating daily satellite gravity information, *Remote Sensing of Environment*, 2016.

C-ACTI - Lestarquit L., M. Peyrezabes, J. Darrozes, E. Motte, N. Roussel, G. Wautelet, F. Frappart, G. Ramillien, R. Biancale and M. Zribi, Reflectometry devoted to coastal and continental altimetry with an open-source software GNSS receiver: use case with carrier phase altimetry, *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*, 9, 10, 4843, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2568742, 2016.

C-ACTI - Roussel N., F. Frappart, G. Ramillien, J. Darrozes, F. Baup, L. Lestarquit and M. C. Ha, Detection of soil moisture variations using GPS and GLONASS SNR data for elevation angles ranging from 2° to 70°, *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*, 9, 10, 4781, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2537847, 2016.

C-ACTI - Roussel N., F. Frappart, G. Ramillien, J. Darrozes, F. Baup and H. C. Ha, 2016, Detection of soil moisture content changes by using a single geodetic antenna: the case of an agricultural plot, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International*, Milan, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326192, 2016.

C-ACTI - Schiavulli D., F. Nunziata, M. Migliaccio, F. Frappart, G. Ramillien and J. Darrozes, Reconstruction of radar image from actual DDMS collected by TechDemoSat-1 GNSS-R mission, *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*, 9, 10, 4700, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2543301, 2016.

C-COM - IUGG 2016, poster : "New insights on the 2011 Tohoku earthquake from a 4D analysis of GRACE and GPS data".

OS - Ramillien G., F. Frappart and L. Seoane, "La mission de gravimétrie spatiale GRACE: instruments et principe de fonctionnement", in *Collection Système Terre – Environnement, Série Télédétection pour l'observation des surfaces continentales*, Volume 2, Observation des surfaces continentales par télédétection micro-onde, ISTE Editions, ISBN: 978-1-78405-157-0, 2016.

2015

ACL - Frappart F., F. Papa, Y. Malbeteau, J. G. Leon, G. Ramillien, C. Prigent, L. Seoane, F. Seyler and S. Calmant, Surface freshwater storage variations in the Orinoco floodplains

using multi-satellite observations, *Remote Sensing*, Special Issue: "Towards remote long-term monitoring of wetland landscapes", 7, 1, 89-110, doi: 10.3390/rs70100089, 2015.

ACL - Papa F., F. Frappart, Y. Malbeteau, M. Shamsudduha, V. Vuruputur, M. Sekhar, G. Ramillien, C. Prigent, F. Aires, R. K. Pandey and S. Calmant, 2015, Satellite-derived surface and sub-surface water storage in the Ganges-Brahmaputra river basin, *Journal of Hydrology, Regional Studies*, Special Issue: "Groundwater systems of the Indian sub-continent", doi: 10.1016/j.ejrh.2015.03.004.

ACL - Ramillien, G. L.; Frappart, F.; Gratton, S.; et al. Sequential estimation of surface water mass changes from daily satellite gravimetry data. *JOURNAL OF GEODESY* Volume: 89 Issue: 3 Pages: 259-282 Published: MAR 2015.

ACL - Ramillien G. L., F. Frappart, S. Gratton and X. Vasseur, Sequential estimation of surface water mass changes from daily satellite gravimetry data, *Journal of Geodesy*, 89, 3, 259-282, doi: 10.1007/s00190-014-0772-2, 2015.

ACL - Roussel N., G. Ramillien, F. Frappart, J. Darrozes, A. Gay, R. Biancale, N. Striebig, V. Hanquiez, X. Berthin and D. Allain, 2015, Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver, *Remote Sensing of Environment*, 171, 261-277, doi: 10.1016/j.rse.2015.10.011.

C-ACTI - Roussel N., G. Ramillien, F. Frappart, J. Darrozes, A. Gay, N. Striebig and R. Biancale, 2015, Enhancement in interference pattern technique for altimetry and tide/wave measurements: offshore 60-meter lighthouse case study, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2015 IEEE International, INSPEC Accession Number: 15599608, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326675.

C-COM - EGU2015-13532, présentation orale : "Analysis of C21 and S21 time series over long periods of time from SLR data".

C-COM - EGU2015-14461, présentation orale : "GRACE RL03-v2 monthly time series of solutions from CNES/GRGS"

C-COM - EGU2015-3608, présentation orale : "EIGEN-6S4: A time-variable satellite-only gravity field model to d/o 300 based on LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse"

C-COM - IUGG 2015, présentation orale : "Oceanographic validation of time variable gravity solutions from GRACE"

C-COM - IUGG 2015, présentation orale : "EIGEN-6S4: A new satellite-only gravity field model to d/o 300 based on LAGEOS, GRACE and GOCE data"

C-COM - GSTM 2015, présentation orale : "Discussion on the compared virtues of un-stabilized and stabilized GRACE solutions"

2014

ACL - Bruinsma, S. L., C. Förste, O. Abrikosov, J.-M. Lemoine, J.-C. Marty, S. Mulet, M.-H. Rio, and S. Bonvalot, ESA's satellite-only gravity field model via the direct approach based on all GOCE data, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7508–7514, doi:10.1002/2014GL062045, 2014.

ACL - Chanard K., J. P. Avouac, G. Ramillien and J. Genrich, 2014, Modeling deformation induced by seasonal variations of continental water in the Himalaya region: sensitivity to Earth elastic structure, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 119, 6, 5097-5113, doi: 10.1002/2013JB010451.

ACL - W. Feng, J.-M. Lemoine, M. Zhong, H.T. Hsu, Mass-induced sea level variations in the Red Sea from GRACE, steric-corrected altimetry, in situ bottom pressure records, and hydrographic observations, *Journal of Geodynamics*, Volume 78, August 2014, Pages 1-7, ISSN 0264-3707, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2014.04.008>.

ACL - Habib B. Dieng, Anny Cazenave, Benoit Meyssignac, Olivier Henry, Karina von Schuckmann, Hindumathi Palanisamy, Jean Michel Lemoine (March 2014), Effect of La Niña on The Global Mean Sea Level And North Pacific Ocean Mass Over 2005-2011, *Journal of Geodetic Science*. Volume 4, Issue 1, ISSN (Online) 2081-9943, DOI: 10.2478/jogs-2014-0003, 2014.

ACL - Ramillien G., F. Frappart and L. Seoane, 2014, Application of the regional water mass variations from GRACE satellite gravimetry to large-scale water management in Africa, *Remote Sensing, Special Issue: "Earth Observation for Water Resource Management in Africa"*, 6, 7379-7405, doi: 10.3390/rs6087379.

ACL - Roussel N., F. Frappart, G. Ramillien, J. Darrozes, C. Desjardins, P. Gégout, F. Pérosanz and R. Biancale, 2014, Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments, *Geoscientific Model Development*, 7, 2261-2279, doi: 10.5194/gmd-7-2261-2014.

ACL - Sergei Rudenko, Denise Dettmering, Saskia Esselborn, Tilo Schöne, Christoph Förste, Jean-Michel Lemoine, Michaël Ablain, David Alexandre, Karl-Hans Neumayer, Influence of time variable geopotential models on precise orbits of altimetry satellites, global and regional mean sea level trends, *Advances in Space Research*, Volume 54, Issue 1, 1 July 2014, Pages 92-118, ISSN 0273-1177, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.03.010>.

ACL - Sakumura, C., S. Bettadpur, S. Bruinsma, Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/GL058632, 2014.

2013

ACL - Frappart F., G. Ramillien and J. Ronchail, Changes in terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin, *International Journal of Climatology*, Royal Meteorological Society, 33, 302 9-3046, doi: 10.1002/joc.3647, 2013.

ACL - Frappart F., L. Seoane and G. Ramillien, Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America, *Remote Sensing of Environment*, 137, 69-83, doi: 10.1016/j.rse.2013.06.008, 2013.

ACL - Seoane L., G. Ramillien, F. Frappart and M. Leblanc, 2013, Regional GRACE-derived water mass variations over Australia: validation and interpretation, *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 5355-5395, doi: 10.5194/hessd-10-5355-2013.

2012

ACL - Frappart F., F. Papa, J. Santos da Silva, G. Ramillien, C. Prigent, F. Seyler and S. Calmant, Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought, *Environmental Research Letters*, online first, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044010, 2012.

ACL - Panet I., J. Flury, R. Biancale, T. Gruber, J. Johannesen, M. R. van den Broeke, T. van Dam, P. Gégout, C. W. Hughes, G. Ramillien, I. Sasgen, L. Seoane and M. Thomas, Earth system mass transport mission (e.motion): a concept for future Earth gravity field measurements from space, *Surveys in Geophysics*, online first, doi: 10.1007/s10712-012-9209-8, 2012.

ACL - Ramillien G. L., L. Seoane, F. Frappart, R. Biancale, S. Gratton, X. Vasseur and S. Bourgogne, Constrained regional recovery of continental water mass time-variations from GRACE-based geopotential anomalies over South America, *Surveys in Geophysics*, 33, 5, 887-905, doi: 10.1007/s10712-012-9177-z, 2012.

C-ACTI - Leblanc M., S. Tweed, G. Ramillien, P. Tregoning, F. Frappart, A. Fakes and I. Cartwright, 2012, Groundwater change in Murray basin from long-term in-situ monitoring and GRACE estimates, in: *Climate change effects on groundwater resources. A global synthesis of findings and recommendations*, 27, International Association of Hydrogeologists, Chapter 10, 169-187, Eds. H. Treigel, J. L. Martin-Bordes and J. J. Gurdak, CRC Press, UNESCO, ISBN: 978-0-415-68936-6, 398 pp.

C-ACTI - Vaz de Almeida F. G., S. Calmant, F. Seyler, G. Ramillien, D. Blitzkow, A. C. O. C. Matos and J. S. Silva, 2012, Variações temporais do equivalente à altura d'água obtidas da Missão Grace e da altura d'água in-situ nos rios da bacia Amazônica, Time-variations of equivalent water heights from Grace Mission and in-situ river stages in the Amazon basin, *Acta Amazonica*, 42, 1, 125-134, doi: 10.1590/50044-59672012000100015.

OS - Frappart F. and G. Ramillien, 2012, Contribution of GRACE satellite gravimetry in global and regional hydrology and ice sheets mass balance, *Hydrology*, INTECH, Chapter 9, 191-214, ISBN: 979-953-307-369-8, Eds. Dr. P. C. Nayak, National Institute of Hydrology, Kakinada, India, 310 pp.

SYSTEMES DE REFERENCE ET ROTATION DE LA TERRE

2016

ACL - Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux, ITRF2014: A norelease of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, doi:10.1002/2016JB013098, 2016.

ACL - Appleby, G., R. Rodriguez, and Z. Altamimi, Assessment of the accuracy of global geodetic satellite laser ranging observations and estimated impact on ITRF scale: estimation of systematic errors in LAGEOS observations 1993–2014, *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-016-0929-2, 2016.

ACL - Gattano, C., Lambert, S.B., Bizouard, C. : Observation of the Earth's nutation by the VLBI: how accurate is the geophysical signal, *Journal of Geodesy*, 65G, 2016.

ACL - Rebischung, P., Z. Altamimi, J. Ray and B. Garayt (2016) The IGS contribution to ITRF2014, *Journal of Geodesy*, doi:10.1007/s00190-016-0897-6, 2016.

ACL - Schmid, R., R. Dach, X. Collilieux, A. Jäggi, M. Schmitz and F. Dilssner, Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements, *Journal of Geodesy*, 90(4), p. 343-364, doi:10.1007/s00190-015-0876-3, 2016.

ACL - Taris, F.; Andrei, A.; Roland, J.; Klotz, A.; Vachier, F.; Souchay, J., Long-term R and V-band monitoring of some suitable targets for the link between ICRF and the future Gaia celestial reference frame, *A&A* 587A,112T, 2016.

ACL - Zoulida M, Pollet A, Coulot D, Perosanz F, Loyer S, Biancale R, Rebischung P, Multi-technique combination of space geodesy observations: impact of the Jason-2 satellite on the GPS satellite orbits estimation. *Advances in Space Research* 58(7):1376–1389, DOI 10.1016/j.asr.2016.06.019, 2016.

C-AFF - Benoist C, Rebischung P, Altamimi Z (2016) Vers la prise en compte de la dépendance spatiotemporelle des séries de position GNSS dans leur analyse. Présentation aux Journées de la Recherche de l'IGN, Marne-la-Vallée, France, 24-25 Mar.

C-AFF - Li, Z., T.M. van Dam, Q. Chen, M. Weigelt, A. Guntner, A. Jaggi, U. Meyer, Y. Jean, Z. Altamimi and P. Rebischung (2016) Validation of the ESGIEM combined monthly GRACE gravity fields, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 17th-22nd.

C-AFF - Li, W., T.M. van Dam, J. Ray, Z. Altamimi, P. Rebischung and Y. Sheng (2016) A comparison of three environmental load combinations with repro2 residuals, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 17th-22nd.

C-AFF - Métivier, L., Rouby, H., Rebischung, P., Altamimi, Z. (2016). ITRF2014 GNSS vertical, geocenter motions and ellipticity time variations. Presented at AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, 12-16 Dec.

C-AFF - Nahmani S, Rebischung P, Bock O (2016) A bayesian approach to constrain the time evolution of tropospheric parameters in GNSS data processing : implications for meteorology. Presented at AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, 12-16 Dec.

C-AFF - Rebischung P, Schmid R (2016) Preparations for the IGS realization of ITRF2014. Presented at EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 Apr.

C-AFF - Rebischung P, Schmid R (2016) IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products. Presented at AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, 12-16 Dec.

C-AFF - Santamaria-Gomez A, Rebischung P, Ray J (2016) Separating station-dependent from regionally coherent GPS draconitics in station positions. Presented at AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, 12-16 Dec.

C-AFF - Zoulida M, Pollet A, Rebischung P, Coulot D, Biancale R (2016) Multi-technique combination of space geodesy observations. Presented at IGS Workshop 2016, Sydney, Australia, 8-12 Feb.

C-AFF - Zoulida M, Pollet A, Rebischung P, Coulot D, Biancale R (2016) Multi-technique TRF realization with Jason-2 as a space tie. Presented at EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 Apr.

C-COM - Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux (2016) Key Performance Indicators of the ITRF2014 Products, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 17th-22nd, April 2016.

C-COM - Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux (2016) ITRF2014 : prise en compte des mouvements non linéaires, Présentation aux Journées de la Recherche de l'IGN, Marne la Vallée, France 24-25 Mars.

C-COM - Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux (2016) ITRF2014 and the IGS contribution, Abstract presented at IGS Workshop 2016, Sydney, Australia, 8-12 February

C-COM - Altamimi Z, Métivier L, Rebischung P, Rouby H, Collilieux X (2016) Estimation of a plate motion model from the ITRF2014 horizontal velocity field. Presented at AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, 12-16 Dec.

C-COM - Bruni, S., S. Zerbini, Z. Altamimi, P. Rebischung, M. Errico and E. Santi (2016) Can space ties on board GNSS satellites replace terrestrial ties in the implementation of Terrestrial Reference Frames ?, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 17th-22nd.

C-COM - Métivier, L., H. Rouby, P. Rebischung and Z. Altamimi (2016) ITRF2014 GNSS vertical velocities and global Earth figure variations, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 17th-22nd.

C-COM - Nahmani S, Rebischung P, Bock O (2016) Comment contraindre de façon optimale l'évolution temporelle des délais troposphériques humides lors des traitements de données GNSS ? Présentation aux Journées de la Recherche de l'IGN, Marne-la-Vallée, France, 24-25 Mar.

C-COM - Rebischung, P., Z. Altamimi, J. Ray and B. Garayt (2016) Error analysis of the IGS repro2 station position time series, Abstract presented at IGS Workshop 2016, Sydney, Australia, 8-12 February.

C-COM - Reischung P, Garayt B, Collilieux X, Altamimi Z (2016) IGS Reference Frame Working Group Coordinator Report 2015. In: Jean Y, Dach R (eds) IGS Technical Report 2015, pp 169–172.

C-COM - Richard J.Y., Lambert S.B., Bizouard C., 2016, “A Combination of GNSS and VLBI at the Normal Equation Level over 2002-2014”, AGU2016, San Francisco, December 12-16 2016.

C-INV - Richard J.Y., Gambis D., Bizouard C., Lambert S., Becker O., Carlucci T., Loyer S., Soudarin L., Bourda G., Bellanger A., Deleflie F., Coulot D., Pollet A., Lemoine J.M., Biancale R., Marty J.C., Perozan F., GRGS Solutions EOP, TRF, CRF by multi technique Combination DORIS, GPS, SLR, VLBI at normal equation level, period 2002-2013, 7th COL-Wg meeting, Frankfurt, 19 february 2016.

OS - Altamimi, Z. and R. Gross (2016), Geodesy, in Teunissen P.J.G. and P. Montenbruck (Eds.) (2016), Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems.

2015

ACL - Coulot D, Reischung P, Pollet A, Grondin L, Collot G, Global optimization of GNSS station reference networks. *GPS Solutions* 19(4):569–577, DOI 10.1007/s10291-014-0416-2, 2015.

ACL - Fey,A., Gordon,D., Jacobs, C.S., Ma,C. ...Lambert, S,... Souchay, J, The Second realization of the International celestial reference Frame bt VLBI ", *Astr.J.*150,58F, 2015.

ACL - Gazeaux, J., E. Lebarbier, X. Collilieux and L. Métivier, Joint segmentation of multiple GPS coordinate series, *Journal de la Société Française de Statistique*, 156(4), 2015.

ACL - Souchay J., Andrei A.H., Barache,C. Kalewicz,T., Gattano,C., Coelho,B. Taris, F. Bouquillon, S., Becker O., “The third release of the Large Quasar astrometric Catalogue (LQAC-3): a compilation of 321 957 objects, *A&A* 583A,75S, 2015.

ACL - Valty, P., O. de Viron, I. Panet and X. Collilieux, Impact of the North Atlantic Oscillation on Southern Europe water distribution: insights from geodetic data, *Earth Interactions*, 19(10), p. 1-16, doi:10.1175/EI-D-14-0028.1, 2015.

ACL - Wu, X., C. Abbondanza, Z. Altamimi, T. M. Chin, X. Collilieux, R. S. Gross, M. B. Heflin, Y. Jiang, and J. W. Parker, KALREF—A Kalman filter and time series approach to the International Terrestrial Reference Frame realization, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 3775–3802, doi:10.1002/2014JB011622, 2015.

C-ACTI - Bergstrand, S., X. Collilieux, J. Dawson, R. Haas, J. Long, E.C. Pavlis, J. Saunier, R. Schmid and A. Nothnagel, Resolution on the nomenclature of space geodetic reference points and local tie measurements, *Proceedings of the Symposium on Reference Frames for Applications in Geosciences (REFAG2014)*, Kirchberg, Luxembourg, 13-17 October, International Association of Geodesy Symposia, Vol.146, 2015.

C-ACTI - Gazeaux, J., Lebarbier, E., Collilieux, X., & Métivier, L., Joint segmentation of multiple GPS coordinate series. *Journal de la Société Française de Statistique*, 156(4), 163-179, 2015.

C-ACTI - Li Z, van Dam T, Collilieux X, Altamimi Z, Rebischung P, Nahmani S, Quality evaluation of the weekly vertical loading effects induced from continental water storage models. In: Rizos C, Willis P (eds) IAG Scientific Assembly 2013 Proceedings, Springer Berlin Heidelberg, International Association of Geodesy Symposia, vol 143, pp 45–54, DOI 10.1007/1345 2015 174, 2015.

C-AFF - Bruni, S., S. Zerbini, Z. Altamimi, P. Rebischung, M. Errico and E. Santi (2015) Effect of combining GNSS and SLR measurements via their space-ties on the definition of terrestrial reference frame parameters, Presented at the 26th IUGG General Assembly, June 22-July 2nd, Prague, Rép Tchèque.

C-AFF - Bruni, S., S. Zerbini, Z. Altamimi, P. Rebischung, M. Errico, E. Santi and F. Petracca (2015) Combining GNSS and SLR measurements using the space tie : effects on terrestrial reference frame origin and scale, Presented at AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 14-18 December.

C-AFF - De Viron O, van Camp M, Rebischung P, Bizouard C (2015) Avoiding negative value with three cornered hat method, with application to polar motion data. Presented at AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 14-18 Dec.

C-AFF - Legrand, J., C. Bruyninx, M. Craymer, J. Dawson, J. Griffiths, A. Kenyeres, P. Rebischung, L. Sanchez, Á. Santamaría, S. Elifuraha and Z. Altamimi (2015) GNSS-based densification of the ITRF velocity field through a collaborative approach, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 12-17th

C-AFF - Métivier, L., P. Rebischung and Z. Altamimi (2015) ITRF2014 vertical velocities : the impact of climate changes, Presented at AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 14-18 December.

C-AFF - Rebischung, P., B. Garayt, Z. Altamimi and X. Collilieux (2015) Combination and stacking of the IGS repro2 terrestrial frames, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 12-17th.

C-AFF - Rebischung, P., J. Ray, C. Benoist, L. Métivier and Z. Altamimi (2015) Error analysis of the IGS repro2 station position time series, Presented at AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 14-18 December.

C-AFF - Zoulida M, Pollet A, Coulot D, Rebischung P, Biancale R (2015) Multi-technique combination of space geodesy observations. Presented at IUGG General Assembly, Prague, 22 June – 2 July.

C-COM - Altamimi, Z., X. Collilieux, P. Rebischung and L. Métivier (2015) ITRF2014 status, data analysis and results, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 12-17th.

C-COM - Altamimi Z, Collilieux X, Rebischung P, Métivier L (2015) 1985-2015: Thirty years of R&D on the International Terrestrial Reference Frame. Presented at IUGG General Assembly, Prague, 22 June - 2 July.

C-COM - Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, Métivier L, ITRF2014: analyse préliminaire. Présentation aux Journées de la Recherche de l'IGN, Marne-la-Vallée, France, 19-20 Mars 2015.

C-COM - Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux (2015) ITRF2014: main results, Presented at AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 14-18 December.

C-COM - Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier and X. Collilieux (2015) ITRF2014: preliminary results and ILRS contribution, Presented at ILRS Technical Workshop 2015, Matera, Italy, 26-30 October.

C-COM - Legrand, J., C. Bruyninx, M. Craymer, J. Dawson, J. Griffiths, A. Kenyeres, P. Rebischung, L. Sanchez, Á. Santamaría, E. Saria and Z. Altamimi, The IAG Working Group "Integration of dense velocity fields in the ITRF": final results and conclusions, Presented at the 26th IUGG General Assembly, June 22-July 2nd, Prague, Rép Tchèque, 2015.

C-COM - Rebischung, P., B. Garayt, Z. Altamimi and X. Collilieux (2015) The IGS contribution to ITRF2014, Presented at the 26th IUGG General Assembly, June 22-July 2nd, Prague, Rép Tchèque.

C-COM - Rebischung P, Altamimi Z (2015) Modélisation du mouvement des stations GNSS pour l'ITRF2014 et au-de
Abbaye de Sorèze, 7-8 Sep.

C-COM - Richard J.Y., Bellanger A., Biancale R., Bizouard C., Bourda G., Bouquillon S., Coulot D., Deleflie F., Gambis D., Lemoine J.M., Loyer S., Pollet A., Soudarin L., Multi-Techniques Combination for Earth Orientation Parameters, station and quasar coordinates, EGU2015, Vienna, 12th – 19th April 2015, id. EGU2015-6051.

C-COM - Zoulida M, Pollet A, Rebischung P, Coulot D, Biancale R (2015) Multi-technique combination of space geodesy observations. Presented at AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 14-18 Dec.

RAPP - Altamimi, Z., X. Collilieux, B. Garayt and L. Métivier (2015) 3.5.5 ITRS Centre , IERS Annual Report 2014, International Earth Rotation and Reference Systems Service.

RAPP - Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier (2015) 3.6.2 ITRS Combination Centres, IGN , IERS Annual Report 2014, International Earth Rotation and Reference Systems Service.

RAPP - Rebischung P, Garayt B, Altamimi Z (2015) IGS Reference Frame Working Group Coordinator Report 2014. In: Dach R, Jean Y (eds) IGS Technical Report 2014.

2014

ACL - Abbondanza, C, Z. Altamimi, T. M. Chin, R. S. Gross, M. B. Heflin, Three-Corner Hat for the assessment of the uncertainty of non-linear residuals of space-geodetic time series in the context of terrestrial reference frame analysis, Journal of Geodesy, doi: 10.1007/s00190-014-0777-x, 2014.

ACL - Gattano, C., Souchay, J., Barache, C., A whole sky study of quasars known population starting from the LQAC-2 compiled catalogue 2014, A&A, 564A, 117G, 2014.

ACL - Métivier, L., X. Collilieux, D. Lercier, Z. Altamimi, and F. Beauducel, Global coseismic deformations, GNSS time series analysis, and earthquake scaling laws, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, doi:10.1002/2014JB011280, 2014.

ACL - Reischung, P., Z. Altamimi and T. Springer, A collinearity diagnosis of the GNSS geocenter determination, *Journal of Geodesy*, 88(1), p. 65-85, doi:10.1007/s00190-013-0669-5, 2014.

C-ACTI - Bouquillon, S. **et al**, "Quasi-automatic software supports for Gaia ground based optical tracking" in [Software and Cyberinfrastructure for Astronomy III], Chiozzi and Radziwill, eds., *Proceedings of SPIE Vol. 9152 (SPIE, Bellingham, WA, 2014) 9152-1*, 2014.

C-ACTI - Collilieux, X., Z. Altamimi, D. F. Argus, C. Boucher, A. Dermanis, B. J. Haines, T. A. Herring, C. W. Kreemer, F. G. Lemoine, C. Ma, D. S. Mac Millan, J. Mäkinen, L. Métivier, J. Ries, F. N. Teferle, X. Wu (2014). External evaluation of the Terrestrial Reference Frame: report of the task force of the IAG sub-commission 1.2. In *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet* (pp. 197-202). Springer Berlin Heidelberg, 2014.

C-ACTI - Métivier, L., X. Collilieux, Z. Altamimi & D. Lercier (2014), The ITRF and its scientific applications, *Actes des Journées 2013 Systèmes de référence spatio-temporels 'Scientific developments from highly accurate space-time reference systems'*, Observatoire de Paris, 2016.

C-AFF - Collilieux, X., E. Lebarbier, D. Coulot and E. Bernard (2014) How does the non-linear estimation of periodic terms improve the detection of offsets in GNSS position time series ?, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April-02 May.

C-AFF - Deleflie, F., L. Soudarin, C. Portmann, J. Berthier, C. Barache, D. Coulot, S. Bouquillon and X. Collilieux (2014) Dissemination of data-related products through a Virtual Observatory : developments 2014-2015, Presented at the International Workshop on Laser Ranging, Annapolis, USA, 27-31 October.

C-AFF - Deleflie, F., L. Soudarin, C. Portmann, S. Bouquillon, J. Berthier, X. Collilieux, C. Barache and D. Coulot (2014) Dissemination of Space Geodesy Data-Related Products Through a Virtual Observatory, Presented at AGU Fall Meeting, 15-19 December, San Francisco, USA.

C-AFF - Gazeaux, J., E. Lebarbier, X. Collilieux and L. Métivier (2014) Segmentation of multiple GNSS coordinate series for an accurate determination of non-linear motions, Presented at REFAG Symposium, Luxembourg, October, 13-17th.

C-AFF - Legrand, J., C. Bruyninx, M. Craymer, J. Dawson, J. Griffiths, A. Kenyeres, P. Reischung, L. Sanchez, Á. Santamaría, E. Saria and Z. Altamimi (2014) IAG Working Group "Integration of Dense Velocity Fields in the ITRF" : combination of regional solutions toward a global velocity field, Presented at REFAG Symposium, Luxembourg, October, 13-17th, October 2014.

C-AFF - Lercier, D., Collilieux, X., Métivier, L., Altamimi, Z., Vigny, C. (2014). Evaluation of parametric post-seismic models and application in reference frame determination. *EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 16, p. 16750)*.

C-AFF - Métivier, L., X. Collilieux, D. Lercier and Z. Altamimi (2014) Evidence of non-linear geodetic station motions induced by accumulated co-seismic deformations, EGU General Assembly, 17 April-02 May, Vienna, Austria.

C-AFF - Métivier, L., X. Collilieux, D. Lercier, Z. Altamimi and F. Beauducel (2014) Co-Seismic Deformations Impact on Geodetic Time Series and Reference Frame Determination, AGU Fall Meeting, 15-19 December, San Francisco, USA.

C-AFF - Zoulida M, Pollet A, Coulot D, Biancale R, Rebischung P, Collilieux X (2014) Multi technique combination of space geodesy observations. Presented at EGU General Assembly 2014, Vienna, Austria, 27 Apr. - 2 May

C-AFF - Zoulida M, Pollet A, Coulot D, Biancale R, Rebischung P (2014) Multi-technique combination of space geodesy observations. Presented at AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, 15-19 Dec.

C-COM - Abbondanza, C., Z. Altamimi, T.M. Chin, X. Collilieux, R. Dach, R.S. Gross, M.B. Heflin, R. König, F.G. Lemoine, D.S. MacMillan, J.W. Parker, T.M. van Dam and X. Wu (2014) Assessing the impact of non-tidal atmospheric loading on a Kalman filter-based terrestrial reference frame, Presented at EGU General Assembly, 2014, April 2014.

C-COM - Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier, P. Rebischung and D. Lercier (2014) Results and Analysis of ITRF2013, Presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, December 2014, December 2014.

C-COM - Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier, P. Rebischung and D. Lercier (2014) ITRF2013: preliminary analysis and early results, Presented at EGU General Assembly, 2014, April 2014.

C-COM - Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier, P. Rebischung and D. Lercier (2014) ITRF2013 analysis and SLR contribution, Presented at ILRS Workshop 2014, Annapolis, Maryland, 27-31 October.

C-COM - Altamimi, Z., L. Métivier, X. Collilieux and P. Rebischung (2014) IDS contribution to the ITRF2013, Presented at IDS Workshop 2014, Konstanz, Germany, 27-28 October.

C-COM - Bock, O., P. Willis and X. Collilieux (2014) Precipitable water trends and variability investigated from homogenized global, long-term, GPS and DORIS datasets, Presented at EGU General Assembly, 2014, April.

C-COM - Bock, O., P. Willis and X. Collilieux (2014) Precipitable water trends and variability investigated from homogenized global, long-term, GPS and DORIS datasets, Presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April-02 May.

C-COM - Collilieux, X., O. Bock, E. Lebarbier, J. Gazeaux and P. Bosser (2014) How to homogenize GNSS ZTD series? , Workshop ES1206 - GNSS4SWEC, feb.

C-COM - Coulot D, Deleflie F, Rebischung P, Decosta R, Pollet A, Grondin L, Collot G (2014) Application d'algorithmes génétiques au calcul d'orbites de satellites artificiels et à la recherche de sous-réseaux de stations GNSS. Présentation aux Journées de la Recherche de l'IGN, Saint-Mandé, France, 20-21 Mar.

C-COM - Gazeaux, J., E. Lebarbier, X. Collilieux & L. Métivier, Segmentation of multiple GNSS coordinate series for an accurate determination of non-linear motions, Presented at REFAG Symposium, Luxembourg, October, 13-17th, 2014.

C-COM - Lebarbier, E., K. Bertin, X. Collilieux and C. Meza (2014) A segmentation-Lasso approach for the homogenization of GPS series, Presented at EGU General Assembly, 2014, April.

C-COM - Poyard, J.-C., J.-M. Muller and X. Collilieux (2014) Co-location survey at Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory, Presented at REFAG Symposium, Luxembourg, October, 13-17th.

C-COM - Ray J, Chen W, Collilieux X, Griffiths J, Rebischung P (2014) Frame-related polar motion errors. Presented at REFAG Symposium 2014, Kirchberg, Luxembourg, 13-17 Oct.

C-COM - Ray J, Griffiths J, Collilieux X, Rebischung P (2014) Subseasonal GNSS errors in IGS products. Presented at EGU General Assembly 2014, Vienna, Austria, 27 Apr. - 2 May.

C-COM - Rebischung, P., B. Garayt, X. Collilieux and Z. Altamimi (2014) The IGS contribution to ITRF2013, Presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, December 2014, December 2014

C-COM - Richard J.Y., Bellanger A., Biancale R., Bizouard C., Bourda G., Bouquillon S., Coulot D., Deleflie F., Francou G., Gambis D., Lemoine J.M., Loyer S., Pollet A., Soudarin L., Combination at the Observation Level: contribution to ITRF2013, EGU General Assembly 2014, Vienna, 27th April - 2nd May 2014, id. EGU2014-12530, 2014.

C-INV - Richard J.Y., Gambis D., Bizouard C., T. Carlucci, S. Loyer, L. Soudarin, G. Bourda, A. Bellanger, F. Deleflie, D. Coulot, A. Pollet, J.M. Lemoine, R. Biancale, J.C. Marty, F. Perozan, Combinaison d'Observations Géodésies Multi-Techniques, Journée Scientifiques de l'Actio Spécifique GRAM 2014, Bordeaux 2-4 avril 2014.

C-INV - Richard J.Y., Gambis D., Bizouard C., T. Carlucci, IERS COL-WG project GRGS COMBINATION CENTRE, 6th COL-WG meeting, OP, Paris, 27 mai 2014.

RAPP - Altamimi, Z., X. Collilieux, B. Garayt and L. Métivier (2014) 3.5.5 ITRS Centre , IERS Annual Report 2013, International Earth Rotation and Reference Systems Service.

RAPP - Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier (2014) 3.6.2 ITRS Combination Centres, IGS, IERS Annual Report 2013, International Earth Rotation and Reference Systems Service.

RAPP - Rebischung P, Garayt B, Collilieux X, Altamimi Z (2014) IGS Reference Frame Working Group Coordinator Report 2013. In: Dach R, Jean Y (eds) IGS Technical Report 2014.

2013

ACL - Chen Q, van Dam T, Sneeuw N, Collilieux X, Weigelt M, Rebischung P, Singular spectrum analysis for modeling seasonal signals from GPS time series. *Journal of Geodynamics* 72:25–35, DOI 10.1016/j.jog.2013.05.005, 2013.

ACL - Collilieux, X. and R. Schmid, Evaluation of the ITRF2008 GPS vertical velocities using satellite antenna z-offsets, *GPS Solutions*, 17(2), p. 237-246, doi:10.1007/s10291-012-0274-8, 2013.

ACL - Gambis D., Richard J.Y., Biancale R., Bizouard Ch., Why combining at the Observation Level Reference Frame for Applications in Geodesy (REFAG) (Altamimi and Collilieux, eds) IAG series, Vol. 138, pp 111-117, 2013.

ACL - Ray J, Griffiths J, Collilieux X, Rebischung P, Subseasonal GNSS positioning errors. *Geophysical Research Letters* 40(22):5854–5860, DOI 10.1002/2013GL058160, 2013.

ACL - Saria, E., E. Calais, Z. Altamimi, P. Willis and H. Farah, A new velocity field for Africa from combined GPS and DORIS space geodetic solutions, Contribution to the definition of the African Reference Frame (AFREF), *J. Geophys. Res.* 118(B4), p. 1677-1697, doi:10.1002/jgrb.50137, 2013.

ACL - Taris, F., Andrei, A., Klotz, A., Vachier, F., Côte, R., Bouquillon, S., Souchay, J., Lambert, S.; Anton, S.; Bourda, G.; Coward, D., Optical monitoring of extragalactic sources for linking the ICRF and the future Gaia celestial reference frame. I. Variability of ICRF sources, *A&A* 552A, 98T, 2013.

C-ACTI - Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier ITRF combination: theoretical and practical considerations and lessons from ITRF2008, Proceedings of the IAG Symposium. REFAG2010. Marne-La-Vallée, Z. altamimi and X. Collilieux Ed., vol. 138, pp. 7-12, International Association of Geodesy Symposia, Springer, doi:10.1007/978-3-642-32998-2_2, 2013.

C-ACTI - Collilieux, X. and Z. Altamimi, External Evaluation of the Origin and the Scale of the International Terrestrial Reference Frame, Proceedings of the IAG Symposium. REFAG2010. Marne-La-Vallée, Z. altamimi and X. Collilieux Ed., vol. 138, pp. 27-31, International Association of Geodesy Symposia, Springer, doi:10.1007/978-3-642-32998-2_5, 2013.

C-ACTI - Ray JR, Rebischung P, Schmid R, Dependence of IGS products on the ITRF datum. In: Altamimi Z, Collilieux X (eds) Reference Frames for Applications in Geosciences, Springer Berlin Heidelberg, International Association of Geodesy Symposia, vol 138, pp 63–67, DOI 10.1007/978-3-642-32998-2_11, 2013.

C-ACTI - Rebischung P, Garayt B (2013) Recent results from the IGS terrestrial frame combinations. In: Altamimi Z, Collilieux X (eds) Reference Frames for Applications in Geosciences, Springer Berlin Heidelberg, International Association of Geodesy Symposia, vol 138, pp 69–74, DOI 10.1007/978-3-642-32998-2_12, 2013.

C-ACTI - Richard J.Y., Lopez P., Barache C., Bizouard C., Gambis D., PREDICTION OF UNIVERSAL TIME USING THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK, in Proc. Journées Systèmes de Référence 2013, N. Capitaine (ed.), pp 222-223, 2013.

C-ACTI - Santamaría, Á., M.-N. Bouin, X. Collilieux and G. Wöppelmann, Time-correlated GPS noise dependency on data time period, Proceedings of the IAG Symposium. REFAG2010. Marne-La-Vallée, Z. Altamimi and X. Collilieux Ed., International Association of Geodesy Symposia, Vol.138, p. 119-124, Springer, doi:10.1007/978-3-642-32998-2_19, 2013.

C-AFF - Deleflie, F., J. Berthier, C. Barache, L. Soudarin, C. Portmann, S. Lambert, S. Bouquillon and X. Collilieux (2013) Time series visualization tools through a virtual Observatory in geodesy, Presented at EGU General Assembly, Vienne, April.

C-AFF - Ismaïl, Z., O. Jamet and Z. Altamimi (2013) Influence of different sources of errors on the accuracy of a quasi-geoid model, Presented at IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, September 2013.

C-AFF - Legrand, J., C. Bruyninx, M. Craymer, J. Dawson, J. Griffiths, A. Kenyeres, P. Rebischung, L. Sanchez, Á. Santamaría, E. Saria and Z. Altamimi (2013) A collaborative approach toward the densification of the ITRF velocity field, Abstract G13B-0947 presented at AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, 9-13 Dec., dec 2013.

C-AFF - Li, Z., T.M. van Dam, X. Collilieux, S. Nahmani, J. Ray, Z. Altamimi and P. Rebischung (2013) Quality evaluation of continental water storage models, Presented at IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, September 2013.

C-AFF - Métivier, L., X. Collilieux and Z. Altamimi, ITRF2008, Glacial Isostatic Adjustment and Recent Ice Melting, EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria, 2013.

C-AFF - Métivier, L., X. Collilieux, D. Lercier and Z. Altamimi (2013) Handling station position discontinuities in reference frame determination using co-seismic deformations modelling, EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria.

C-AFF - Rebischung, P., Z. Altamimi and T. Springer (2013) (In)sensitivity of GNSS techniques to geocenter motion, EGU General Assembly 2013, apr 2013.

C-AFF - Romero I, Rebischung P, Ray J, Schmid R, Fisher S, Griffiths J (2013) Position corrections due to uncalibrated GNSS antenna radomes at IGS co-located geodetic observing stations. Presented at AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, 9-13 Dec.

C-COM - Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier (2013) Preliminary analysis in preparation for the ITRF2013, Presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2013.

C-COM - Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier, P. Rebischung and D. Lercier (2013) The International Terrestrial Reference Frame : current status and future challenges, Presented at IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, September 2013.

C-COM - Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier and P. Rebischung (2013) The International Terrestrial Reference Frame : preparation for ITRF2013, Présenté aux Journées Luxembourgeoises de Géodynamique, Luxembourg, Octobre 2013.

C-COM - Collilieux X, Altamimi Z, Métivier L, Rebischung P (2013) Surcharge atmosphérique et repère de référence terrestre. Présentation aux Journées de la Recherche de l'IGN, Marne-la-Vallée, France, 24-25 Apr.

C-COM - Collilieux, X., Z. Altamimi, L. Métivier, T.M. vanDam, G. Appleby, J. Boehm, R. Dach, M. Fritsche, R. Govind, R. Koenig, H. Krasna, M. Kuzmich-Cieslak, S. Lambert, F.G. Lemoine, C. Luceri, D.S. MacMillan, M. Mareyen, E.C. Pavlis and D. Thaller (2013) Using

non-tidal atmospheric loading model in space geodetic data processing: Preliminary results of the IERS analysis campaign, Presented at EGU General Assembly, Vienne, April 2013.

C-COM - Coulot D, Pollet A, Rebischung P, Collot G, Grondin L (2013) Global optimization of GNSS station reference networks. Presented at IAG Scientific Assembly 2013, Potsdam, Germany, 1-6 Sep.

C-COM - Garayt, B., X. Collilieux, A. Cogent and J.-C. Poyard (2013) Status of the activity of IGN survey operational group, IERS Workshop on Local Surveys and Co-locations, Paris, France, 21-22, May.

C-COM - Lercier, D., X. Collilieux, L. Métivier, Z. Altamimi and C. Vigny, Assessment of parametric post-seismic models in reference frame determination, Presented at IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, September 2013.

C-COM - Morel, L., Durand, F. GNSS for tropospheric studies Processing assessments Gradient analysis Meeting COST Action, Valence, 2013.

C-COM - Nahmani, S., X. Collilieux, T.M. van Dam, L. Métivier, J. Ray and Z. Altamimi (2013) Assessing differences between existing atmospheric non-tidal loading models, Presented at IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, September 2013.

C-COM - Ray, J., J. Griffiths, X. Collilieux and P. Rebischung (2013) Subseasonal GNSS Positioning Errors, Présenté aux journées Luxembourgeoises de Géodynamique, Luxembourg, Octobre.

C-COM - Ray, J., X. Collilieux, P. Rebischung, T.M. vanDam and Z. Altamimi (2013) Using GPS to Observe Crustal Loading Signals in the TibXS Region, Presented at TibXS Workshop, YiNing, China, July 2013.

C-COM - Rebischung, P., Z. Altamimi and T. Springer (2013) A collinearity diagnosis of the GNSS geocenter determination, Presented at IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, sep 2013.

C-COM - Rebischung P, Altamimi Z, Springer T (2013) (In)sensibilité des GNSS aux mouvements du géocentre. Présentation aux Journées de la Recherche de l'IGN, Marne-la-Vallée, France, 24-25 Apr.

C-COM - Rebischung P, Altamimi Z, Springer T (2013) Insensitivity of GNSS to geocenter motion through the network shift approach. Presented at AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, 9-13 Dec.

C-COM - Richard, J.-Y.; Gambis, D.; Biancale, R.; Bizouard, C., Handling systematic effects before combining space techniques at the level of normal equations, EGU General Assembly 2013, held 7-12 April, 2013 in Vienna, Austria, id. EGU2013-7604, 2013.

C-COM - Wu, X., C. Abbondanza, Z. Altamimi, T.M. Chin, X. Collilieux, R.S. Gross, M.B. Heflin, Y. Jiang and J.W. Parker (2013) Direct Determination of Geocenter Motion by combining SLR, VLBI, GNSS and DORIS Time Series, Abstract G21C-07 presented at 2013 Fall Meeting.

C-INV - Richard J.Y., Gambis D., Biancale R., Bizouard C., IERS-WG COL project GRGS Combination Centre, COL-WG meeting, OMP, Toulouse, janvier 2013.

C-INV - Richard J.Y., Gambis D., Biancale R., Bizouard C., Carlucci T., 5th IERS COL-WG meeting, project GRGS Combination Centre, Munich, DGFI, 3rd may 2013.

C-INV - Richard J.Y., Gambis D., Bizouard C., T. Carlucci, Combinaison d'Equations Normales Multi-Techniques au service Rotation de la Terre et Géodésie Spatiale du SYRTE, Réunion Journée GINS, OMP, Toulouse, juin 2013.

C-INV - Richard J.Y., Gambis D., Bizouard C., T. Carlucci, Projet COL-WG de l'IERS CENTRE de COMBINATION du GRGS, Observatoire de Paris, 2 octobre 2013.

DO - Altamimi, Z. and X. Collilieux (Editors), (2013), Reference Frames for Applications in Geosciences, Proceedings of IAG Symposium REFAG2010 (Marne la Vallée, France, October 4-8, 2010), International Association of Geodesy Symposia, Vol. 138, Springer Berlin Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-32998-2 (ISBN: 978-3-642-32997-5).

RAPP - Altamimi, Z., X. Collilieux, B. Garayt and L. Métivier, 3.5.5 ITRS Centre , IERS Annual Report 2012, International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2013.

RAPP - Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier, 3.6.2 ITRS Combination Centres, IGN , IERS Annual Report 2012, International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2013.

RAPP - Rebischung P, Garayt B, Collilieux X, Altamimi Z, IGS Reference Frame Working Group Coordinator Report 2012. In: Dach R, Jean Y (eds) IGS Technical Report 2012, pp 171–178, 2013.

OV - Collilieux, X., Z. Altamimi, L. Métivier and D. Lercier (2013) Un système de référence pour mesurer les déformations de la Terre: l'ITRF2008, Journées porte ouverte de l'ENSG, feb 2013.

OV - Collilieux, X. (2013) Un repère pour référencer les déformations de la Terre, Mathématiques de la Planète Terre (Blog français de l'initiative internationale MPT)

2012

ACL - Altamimi, Z., L. Métivier and X. Collilieux, ITRF2008 plate motion model, J. Geophys. Res.,117, B07402, doi:10.1029/2011JB008930,2012.

ACL - Collilieux X., van Dam T., Ray J., Coulot D., Métivier L., Altamimi Z., Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parameters, Journal of Geodesy, 86(1):1-14, doi: 10.1007/s00190-011-0487-6, 2012.

ACL - Métivier, L., X. Collilieux, and Z. Altamimi, ITRF2008 contribution to glacial isostatic adjustment and recent ice melting assessment, Geophys. Res. Lett., 39(L01309), doi:10.1029/2011GL049942, 2012.

ACL - Nahmani, S., O. Bock, M.-N. , Bouin, A. Santamaría, J.-P. Boy, X. Collilieux, L. Métivier, I. Panet, P. Genthon, C. de Linage and G. Wöppelmann (2012) Hydrological deformation induced by the West African Monsoon: Comparison of GPS, GRACE and

loading models, *Journal of Geophysical Research*, 117(B05409), doi:10.1029/2011JB009102, 2012.

ACL - Rebischung P, Griffiths J, Ray J, Schmid R, Collilieux X, Garayt B, IGS08: the IGS realization of ITRF2008. *GPS Solutions* 16(4):483–494, DOI 10.1007/s10291-011-0248-2, 2012.

ACL - Santamaría, Á., M. Gravelle, X. Collilieux, M. Guichard, B. Martín Míguez, P. Tiphaneau and G. Wöppelmann, Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field, *Global and Planetary Change*, 98-99, p. 6-7, doi:10.1016/j.gloplacha.2012.07.007, 2012.

ACL - Souchay J., Andrei A.H., Barache,C., Bouquillon,S., Suchet,D., Taris, Peralta,R. , “The second release of the Large Quasar Astrometric Catalogue (LQAC-2), *A&A*,537A,99S, 2012.

ACL - van Dam, T.M., X. Collilieux, J. Wuite, Z. Altamimi and J. Ray, Nontidal ocean loading: amplitudes and potential effects in GPS height time series, *Journal of Geodesy*, 86(11), p. 1043-1057, doi:10.1007/s00190-012-0564-5, 2012.

C-AFF - Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier and P. Rebischung (2012) The International Terrestrial Reference Frame : lessons from the past and preparation for the future, Presented at EGU General Assembly, Vienne - Autriche, 19th-27th April 2012.

C-AFF - Chen Q, van Dam T, Sneeuw N, Collilieux X, Rebischung P (2012) Extracting seasonal signals from continuous GPS time series with modern statistical methods. Presented at EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, 23-27 Apr.

C-AFF - Coulot, D., E. Bernard, X. Collilieux and S. Lambert (2012) Influence of the station and quasar referencing on the quality of EOP time series, AGU Fall meeting 2012, dec.

C-AFF - Lercier, D., Z. Altamimi, X. Collilieux and C. Vigny (2012) A focus on estimated coseismic displacements using IGS weekly station positions, IGS workshop 2012, jul.

C-AFF - Rebischung P, Springer T, Altamimi Z (2012) An attempt to decorrelate geocenter motion from empirical accelerations. Presented at IGS Workshop 2012, Olsztyn, Poland, 23-27 Jul.

C-AFF - Romero I, Rebischung P, Ray J, Schmid R, Fisher S, Griffiths J (2012) The IGS campaign to measure position corrections for un-calibrated IGS radome stations. Presented at IGS Workshop 2012, Olsztyn, Poland, 23-27 Jul.

C-AFF - Van Dam, T.M., X. Collilieux, P. Rebischung, J. Ray and Z. Altamimi (2012) Comparison of IGS station position time series with loading model: what can we learn?, AOGS Meeting., aug.

C-AFF - Wu, X., C. Abbondanza, Z. Altamimi, T.M. Chin, X. Collilieux, R.S. Gross, M.B. Heflin, K. Hurst and J.W. Parker (2012) KALREF - A Kalman filter approach to the International Terrestrial Reference Frame Realization, AGU Fall meeting 2012, dec.

C-COM - Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L, Rebischung P (2012) The International Terrestrial Reference Frame: lessons from the past and preparation for the future. Presented at EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, 23-27 Apr.

C-COM - Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L, Rebischung P (2012) Strengths and weaknesses of the IGS contribution to the ITRF. Presented at IGS Workshop 2012, Olsztyn, Poland, 23-27 Jul.

C-COM - Chen Q, van Dam T, Sneeuw N, Collilieux X, Rebischung P (2012) Separation of modulated seasonal signals from GPS time series with singular spectrum analysis. Presented at International Symposium and Summer School on Space Geodesy and Earth System, Shanghai, China, 21-25 Aug.

C-COM - Gambis D, 2012, Global Combination of techniques, 7th IVS meeting, Madrid, March 2012.

C-COM - Gambis D. and R. Biancale, 2012, Combination at the observation level, Colloquium TOSCA/ CNES conference, Paris, 20-21 mars 2012.

C-COM - Greff-Lefftz, M., Métivier, L., The geocenter motion from decadal to geological time-scales: geophysical modelling. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 14, p. 3056), 2012, April.

C-COM - Griffiths J, Rebischung P, Garayt B, Ray J (2012) IGS preparations for the next reprocessing and ITRF. Presented at EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, 23-27 Apr.

C-COM - Ray J, Griffiths J, Rebischung P, Kouba J, Chen W (2012) Rotational errors in IGS orbit and ERP products. Presented at IGS Workshop 2012, Olsztyn, Poland, 23-27 Jul.

C-COM - Rebischung P, Collilieux X, Altamimi Z (2012) Geocenter motion estimates from the IGS Analysis Center solutions. Presented at EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, 23-27 Apr.

C-COM - Rebischung P, Collilieux X, van Dam T, Ray J, Altamimi Z (2012) Analysis effects in IGS station motion time series. Abstract presented at IGS Workshop 2012, Olsztyn, Poland, 23-27 Jul.

C-COM - Richard J.Y. , R. Biancale, C. Bizouard, F. Deleflie, G. Gambis, R. Koenig, S. Loyer, C. Sciaretta, M. Seitz, H. Spicakova, T. Springer, and D. Thaller, IERS Working group on Combination of Space Geodetic Techniques at the Observation Level (COL), id. EGU2012-1439-2.

C-COM - Van Dam T, Collilieux X, Rebischung P, Ray J, Altamimi Z (2012) Comparison of IGS station position time series with loading model: what can we learn? Presented at AOGS Meeting 2012, Singapore, 13-17 Aug.

RAPP - Rebischung P, Garayt B, Collilieux X, Altamimi Z, IGS Reference Frame Working Group Coordinator Report 2011. In: Meindl M, Dach R, Jean Y (eds) IGS Technical Report 2011, pp 175–182, 2012.

OV - Altamimi, Z., X. Collilieux and L. Métivier, Le Repère International de Référence Terrestre (ITRF) : Etat actuel et Perspectives, XYZ(133) (ISSN 0290-9057), 2012.

MESURES GEODESIQUES

2016

ACL - Bourgoïn A., Hees A., Bouquillon S., Le Poncin-Lafitte C., Francou G., Angonin M.-C., "Testing Lorentz Symmetry with Lunar Laser Ranging" dans Physical Review Letters, Volume 117, Issue 24, 2016.

ACL - Daquin J., A.J. Rosengren, E.M. Alessi, Deleflie F., et al., The dynamical structure of the MEO region: long term stability, chaos, and transport, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 124, 335, 2016.

ACL - Martinot-Lagarde, G. et al., Laser ranging ; improvements made recently at OCA, Journ. of Applied Optics, 2016.

ACL - Mémin, A., J.-P. Boy and A. A. Santamaria-Gomez, Vertical land motion due to non-tidal loading observed with GPS measurements, J. Geodesy, soumis, 2016.

ACL - Nicolas J., M. Ferenc, T. van Dam, Z. Li, J.-P. Boy and F. Durand, Detection of Xynthia windstorm atmospheric and oceanic loading deformations using iPPP sub-daily GPS positioning, Geophys. Res. Lett., soumis, 2016.

ACL - Kačmařík M., Douša J., Dick G., Zus F., Brenot H., Pottiaux E., Möller G., PVáclavovic P., Morel L., Hordyniec P., and Kaplon J. Validation of tropospheric slant total delays from different techniques, Soumis 2016.

AP - Delva P., F. Deleflie, et. al, the GREAT experiment: Galileo gravitational Redshift Experiment with eccentric satellites, ESA Technical Note, 2016.

C-ACTI - Delva P., F. Deleflie, et. al, A SLR campaign on Galileo satellites 5 and 6 for a test of the gravitational redshift – the GREAT experiment, ILRS workshop, Matera 2016 (+ proceedings).

C-ACTI - Le Poncin-Lafitte, C.; Bourgoïn, A.; Hees, A.; Bouquillon, S.; Lambert, S.; Francou, G.; Angonin, M.-C.; Bailey, Q. G.; Hestroffer, D.; David, P.; Meynadier, F.; Wolf, P., "Constraints on SME Coefficients from Lunar Laser Ranging, Very Long Baseline Interferometry, and Asteroid Orbital Dynamics", proceeding of the Seventh Meeting on CPT and Lorentz Symmetry, Bloomington, Indiana, June 20-24, 2016.

C-ACTI - Roque D., E. Simonetto, A.P. Falcao, D. Perissin, F. Durand, L. Morel, A.M. Fonseca and L. Polidori, An analysis of displacement measurements for Lisbon, Portugal, using combined INSAR and GNSS data, Living Planet Symposium, ESA, Prague, 9-13 May 2016.

C-AFF - Mémin, A., V. Viswanathan, A. Fienga, A. Santamaria-Gomez and J.-P. Boy, Multi-geodetic characterization of the seasonal signal at the CERGA geodetic reference, France, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 12-16 December 2016.

C-AFF - Nicolas J., J.-P. Boy, F. Durand and A. Mémin, New hydrological loading model validation by space geodesy in South America, G33B-1088, AGU Fall Meeting, 12-16 December 2016.

C-AFF - Oliveira P., Fund F., Morel L., Monico J., Durand S., and Durand F., Assessment of ionospheric and tropospheric corrections for PPP-RTK, EGU General Assembly, Vienna, 17-22 April 2016.

C-COM - Boy, J.-P., P. Baudet, B. Loomis and S. B. Luthcke, Forward modeling of atmospheric, oceanic and hydrological loading effects in GPS processing, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 12-16 December 2016.

C-COM - Boy, J.-P., Modeling river storage from radar altimetry and remote sensing: validation using GRACE and GPS, 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tides, Trieste (Italy), June 2016.

C-COM - Boy, J.-P., P. Baudet, A. Mémin and P. Ulrich, Validation of EOST loading service using global GPS solutions, 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tides, Trieste (Italy), June 2016.

C-COM - Gruszczynska, M., A. Klos, M. S. Bos, J.-P. Boy and J. Bogusz, Assessing the seasonal signals between environmental loadings and GPS coordinates with singular spectrum analysis, 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tides, Trieste (Italy), June 2016.

C-COM - Reinquin F., Ranging error determination using geodetic satellites in support of altimeter mission precise orbit determination, 20th International Workshop of Laser Ranging, Potsdam, 2016.

C-INV - Galina Dick, Jan Dousa, Michal Kacmarik, Eric Pottiaux, Florian Zus, Hugues Henri Brenot, Gregor Moeller, Jan Kaplon, Laurent Morel, and Paweł Hordyniec, Benchmark Campaign of the COST Action GNSS4SWEC: Main Goals and Achievements (Invited), G43C-04, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 12-16 December 2016.

2015

ACL - Bhowmick, S.A., R. Sharma, R. Kumar, K.N Babu, A.K. Shukla, R. Venkatesan, Remya P.G, B. Nair, R.M Gairola, P. Bonnefond and N. Picot (2015) Validation of AltiKa SWH and SLA using Jason-2 Altimeter and Various In-situ Observations. SARAL/AltiKa special issue, Marine Geodesy, 38(S1):193–205, 10.1080/01490419.2015.1042602. 2015.

ACL - Collilieux X., T. van Dam, Z. Altamimi, D. Coulot, F. Deleflie, et al., Non-tidal atmospheric loading corrections of space geodetic data, JoG, 2015.

ACL - Oliveira P.-S., Morel L., Fund F., Legros R., Durand F., and Durand S., Modeling tropospheric ZWD for real-time PPP, GPS solution, July 2015.

ACL - Santamaría-Gómez, A. and A. Mémin, Geodetic secular velocity errors due to interannual surface loading deformation, Geophysical Journal International, 202, 763-767, doi: 10.1093/gji/ggv190, 2015.

C-ACTI - Bourgoïn A.; Le Poncin-Lafitte C.; Bouquillon S.; Francou G.; Angonin M.-C. "A new 4-D dynamical modelling of the Moon orbital and rotational motion developed at POLAC", SF2A-2015: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics. Eds.: F. Martins, S. Boissier, V. Buat, L. Cambrésy, P. Petit, pp.111-114, 2015.

C-ACTI - Simonetto E., L. Morel, Y. El Hamri, S. Durand, F. Durand, J.-L. Froger, L. Polidori and J. Nicolas-Duroy, Influence of GNSS Configuration and Map Interpolation Method on INSAR Atmospheric Phase Assessment, FRINGE 2015, Frascati, 23-27 March 2015.

C-AFF - Ferenc M., J. Nicolas, F. Durand, Z. Li, J.-P. Boy, F. Perosanz and T. van Dam, IPPP GPS for tracking loading deformations induced by the storm Xynthia, session G1.3, Geophysical Research Abstracts, EGU2015-10611, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 12-17 April 2015.

C-AFF - Morel L., Pottiaux E., Durand F., Fund F., Boniface K., Van Baelen J., Follin J.-M., Durand S., and Oliveira P.-S., Global validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS, IUGG, Prague, 2015.

C-AFF - Oliveira P.S., Fund F., Morel L., Legros R., Monico J.-F.-G., Durand S., and Durand F., Modeling tropospheric ZWD for real-time PPP, IUGG, Prague, 2015.

C-AFF - Oliveira P.S., Fund F., Morel L., Legros R., Monico J.-F.-G., Durand S., and Durand F., Modeling tropospheric ZWD for real-time PPP, Workshop COST Action, Thessalonique, 2015.

C-AFF - Roque D., E. Simonetto, A. P. Falcão, F. Durand, A. M. Fonseca, L. Polidori and L. Morel, Displacement Measurement for Lisbon, Portugal, Using Combined InSAR and GNSS Data, MDIS Workshop, Autrans, France, 7-9 Oct. 2015.

C-COM - Boy, J.-P. and A. Mémin, Surcharges et déplacements verticaux, colloque G2, Toulouse, 16-18 novembre 2015.

C-COM - Boy, J.-P., Estimation of surface water variations from space gravity, altimetry and remote sensing, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 12-17 April 2015.

C-COM - Deleflie F., D. Coulot, C. Bizouard, J.M. Lemoine, P. Bonnefond, J.Y. Richard, F. Reinquin, Analysis of C21 S21 time series over long periods of time from SLR data, EGU 2015 (va sans doute faire l'objet d'une publication à comité de lecture, avec une recommandation vers l'IERS d'une modélisation long terme du pôle moyen), 2015.

C-COM - Deleflie F., L. Soudarin, J.Y. Richard, C. Barache, Tectonic motion visualization through a Virtual Observatory, from space techniques, EGU 2015.

C-COM - Mémin, A., J.-P. Boy, A. Santamaría-Gómez, M. Gravelle, C. Watson, P. Tregoning, Effets des charges atmosphérique, océanique et hydrologique observés par GPS, Séminaire GRGS géodésie millimétrique, Sorèze, 7-8 septembre 2015.

C-COM - Mémin A., Boy J.-P., Santamaria-Gomez A., Watson C., & Tregoning P., Atmospheric, non tidal oceanic and hydrological loading effects observed with GPS

measurements, International Union of Geodesy and Geophysics, Prague, Czech Republic, June-July 2015.

C-COM - Morel, L., Pottiaux, E., Durand, F., Fund, F., Boniface, K., Van Baelen, J., Follin J.-M., Durand, S., Oliveira, P.-S. Global validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS. Workshop COST Action. Thessalonique, 2015.

C-COM - Nicolas J., T. van Dam, J.-P. Boy, Z. Li, F. Durand et M. Ferenc, Les effets de surcharge liés à la tempête Xynthia mesurés par GPS, colloque G2, Toulouse, 16-18 novembre 2015.

C-COM - Nicolas J., F. Durand, M. Ferenc et A. Corbeau, IPPP pour l'étude des surcharges – 2 exemples : la tempête Xynthia et le bassin amazonien, Séminaire GRGS géodésie millimétrique, Sorèze, 7-8 septembre 2015.

C-COM - Santamaria-Gomez, A. and A. Mémin, Impact of interannual mass loading deformation on secular surface velocities, International Union of Geodesy and Geophysics, Prague, Czech Republic, June-July 2015.

C-COM - Simonetto E., S. Durand, J. Burdack, L. Morel, L. Polidori and J. Nicolas-Duroy, Least squares combination of INSAR and GNSS measurements for ground displacement monitoring, Multitemp, Annecy, France, 22-24 July 2015.

2014

ACL - Exertier, P., E. Samain, N. Martin, et al. Time Transfer by Laser Link : Data analysis and validation to the ps level, *Advances in Space Research*, Adv. Space Res. 54(11), 2371-2385, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.015>, 2014.

ACL - Ferenc, M., J. Nicolas, T. van Dam, L. Polidori, A. Rigo and P. Vernant, An estimate of the influence of loading effects on tectonic velocities in the Pyrenees, *Stud. Geophys. Geod.*, 58(1), 56-75, doi 10.1007/s11200-012-0458-2, 2014.

ACL - Mémin A., C. Watson, I. Haigh, L. MacPherson and P. Tregoning, Non-linear motions at Australian geodetic stations induced by non-tidal ocean loading and the passage of tropical cyclones, *Journal of Geodesy*, 88 (4), 927-940, doi:10.1007/s00190-014-0734-8, 2014.

ACL - Mémin, A., G. Spada, J.-P. Boy, Y. Rogister and J. Hinderer, Decadal geodetic variations in Ny-Alesund (Svalbard): role of past and present ice-mass changes, *Geophysical Journal International*, 198, 285-297, doi: 10.1093/gji/ggu134, 2014.

ACL - Morel L., Pottiaux E., Durand F., Fund F., Boniface K., Oliveira P.S., and Van Baelen J., Validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS in Corsica. *Adv. Space Res.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.10.004>, 2014.

ACL - Wang X., P. Bonnefond, P. Exertier, F. Deleflie, R. Biancale, J.-M. Lemoine, J.C. Poyard, C. Courde, J.P. Barriot, F. Barlier, Laser telemetry data analysis for a colocation campaign of French Transportable Laser Ranging System (FTLRS), *Journal of Geodesy*, Tahiti, *Journal of Geodesy*, in Tahiti, DOI 10.1007/s00190-014-0755-3, 2014.

C-ACTI - Deleflie F., L. Soudarin, C. Portmann, J. Berthier, C. Barache, Dissemination of SLR data-related products through a Virtual Observatory: developments 2014-2015, ILRS workshop, Annapolis, (+ proceedings), 2014.

C-ACTI - Deleflie F., D. Coulot, J.M. Torre, F. Reinquin, Impact of 25 years of Etalon-1 and Etalon-2 data, ILRS workshop, Annapolis, (+ proceedings), 2014.

C-ACTI - Simonetto E., S. Durand, J. Burdack, L. Polidori, L. Morel and J. Nicolas-Duroy, Combination of INSAR and GNSS measurements for ground displacement monitoring. Proc. SARWatch workshop, 15-17 October 2014, Troia, Portugal, Procedia Technology, Special Issue, Elsevier, Vol. 16, pp. 192-198, doi:10.1016/j.protcy.2014.10.083, 2014.

C-AFF - Chauveau, J. and J.-P. Boy, Modeling Niger river surface water changes from radar altimetry and space gravity missions, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.

C-AFF - Krásná, H., J. Bohm, M. King, A. Mémin, S. Shabala and C. Watson, Impact of seasonal and postglacial surface displacement on global reference frames, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.

C-AFF - Nicolas J., M. Ferenc, Z. Li, T. van Dam and L. Polidori, Ocean dynamics during the passage of Xynthia storm recorded by GPS, session G1.3, Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-11356, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.

C-AFF - Oliveira P.S., Fund F., Morel L., Legros R., Monico J.-F.-G., Durand S., and Durand F., Modeling tropospheric ZWD for real-time PPP, COST Action Summer School, 2014.

C-COM - Boy, J.-P., Precise computation of loading effects for various geodetic observations, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.

C-COM - Boy, J.-P., A. Mémin, C. Watson & P. Tregoning, Atmospheric, non-tidal oceanic and hydrological loading effects observed with GPS measurements, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2014.

C-COM - Mémin, A., J.-P. Boy, C. Watson, P. Tregoning, Non-tidal atmospheric and oceanic loading effects on geodetic stations, Australian Geodesy Meeting, Canberra, 1-2 July 2014.

C-COM - Mémin, A., J.-P. Boy, C. Watson & P. Tregoning, Corrections of geodetic time series for atmospheric and induced oceanic loading obtained by combining dynamic and inverted barometer ocean's responses to atmospheric changes, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.

2013

ACL - Bonnefond, P., P. Exertier, O. Laurain, P. Thibaut and F. Mercier, GPS-based sea level measurements to help the characterization of land contamination in coastal areas, *Advances in Space Research*, Volume 51, Issue 8, Pages 1383-1399, ISSN 0273-1177, 10.1016/j.asr.2012.07.007, 2013.

C-ACTI - Polidori L., P.-A. Bacci, E. Simonetto, L. Morel, F. Durand, S. Durand and J. Nicolas, on the potential of GPS-SAR combination to improve the accuracy of ground

deformation monitoring: simulation-based evaluation, Proc. XVI SBSR, Foz do Iguacu (Brésil), pp. 8467-8474, 13-18 April 2013.

C-AFF - Ferenc M., Z. Li, J. Nicolas and T. Van Dam, Study of seasonal and sub-daily loading effects using IPPP GPS time series, session S.1.6, IAG Scientific Assembly, Potsdam, 1-6 September 2013.

C-COM - Ferenc M., Nicolas J. and van Dam T., Application of PPP for subdaily loading deformation observation, Colloque G2, Rennes, France, 13 – 15 novembre 2013.

C-COM - Ferenc M., Z. Li, J. Nicolas and T. Van Dam, GPS observation of subdaily loading deformation in France associated with a violent storm surge, session 3.5, IAG Scientific Assembly, Potsdam, 1-6 September 2013.

2012

ACL - Mémin, A., J. Hinderer, Y. Rogister, Separation of the geodetic consequences of past and present ice-mass change: influence of the topography with application to Svalbard (Norway), *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 169, p. 1357-1372, doi: 10.1007/s00024-011-0399-7, 2012.

ACL - Nahmani, S., O. Bock, M.-N. Bouin, A. Santamaría-Gomez, J.-P. Boy, X. Collilieux, L. Metivier, I. Panet, P. Genthon, C. de Linage, and G. Woppelmann, Hydrological deformation induced by the West African Monsoon: Comparison of GPS, GRACE and loading models, *J. Geophys. Res.*, 117 (B5), B05409, 2012.

ACL - Simonetto E. and Follin J.M., An overview on interferometric SAR software and a comparison between DORIS and SARSCAPE processing, Chapter 7, Springer series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography (LNG&C) series. Geospatial free and open source software in the 21st century, 2012.

C-ACTI - Nicolas J., F. Perosanz, A. Rigo, G. Le Bliguet, L. Morel and F. Fund, Impact of Loading Phenomena on Velocity Field Computation from GPS Campaigns: Application to ResPyr GPS Campaign in the Pyrenees, *International Association of Geodesy Symposia*, 136(3), 643-649, DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_79, 2012.

C-ACTI - Nicolas J., S. Durand, M. Vergnolle, L. Morel, S. Melachroinos, M.-N. Bouin, and F. Fund, Ocean Loading in Brittany, Northwest France: Impact of the GPS Analysis Strategy, VII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy, *International Association of Geodesy Symposia*, 137(9), 367-372, DOI: 10.1007/978-3-642-22078-4_55, 2012.

C-AFF - Ferenc M., Nicolas J., T. van Dam and P. Gegout, Can environmental loading effects be an artifact in tectonic velocity obtained from GPS measurements?, EGU General Assembly 2012 session G5.3, EGU2012-8184, Vienna, Austria, 22 – 27 April 2012.

C-AFF - Mémin, A., C. Watson, I. Haigh, L. MacPherson and P. Tregoning, Non-linear motions at Australian geodetic stations induced by non-tidal ocean loading and the passage of tropical cyclones, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2012.

C-AFF - Mémin, A., C. Watson, I. Haigh, L. MacPherson and P. Tregoning, Non-linear site motion at Australian geodetic stations induced by non-tidal ocean loading and the passage

of the tropical cyclone Yasi, Asian Oceania Geosciences Society- American Geophysical Union, Singapore, August 2012.

C-AFF - Morel L., De Oliveira P.-S., and Durand F., Etude de sensibilité de l'estimation de la troposphère par GNSS. Colloque CNFGG. Clermont Ferrand, 2012.

OCEANS, HYDROLOGIE GLOBALE

2016

ACL - Ablain M., Legeais J.F., Prandi P., Fenoglio-Marc L., Marcos M., Benveniste J. and Cazenave A., Altimetry-based sea level, global and regional, *Surveys in Geophysics*, doi:10.1007/s10712-016-9389-8, 2016.

ACL - Carret A., Johannessen J., Andersen O., Ablain M., Prandi P., Blazquez A. and Cazenave A., Arctic sea level during the altimetry era, *Surveys in Geophysics*, doi:10.1007/s10712-016-9390-2, 2016.

ACL - Chambers D., Cazenave A., Champollion N., H. Dieng, W. Llovel, R. Forsberg, K. von Schuckmann and Y. Wada, Evaluation of the global mean sea level budget between 1993 and 2015, in press, *Surveys in Geophysics*, 2016.

ACL - Dieng H., Cazenave A., Meyssignac B., von Schuckmann K. and Palanisamy H., Sea and land surface temperatures, ocean heat content Earth's energy imbalance and net radiative forcing, in revision, *International Journal of Climatology*, 2016.

ACL - Lestarquit L., Peyrezabes M., Darrozes J., Motte E., Roussel N., Wautelet G., Frappart F., Ramillien G., Biancale R., Zribi M. Reflectometry with an open-source Software GNSS Receiver. Use Cases with Carrier Phase Altimetry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4843-4853, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2568742, 2016.

ACL - Melet A., Almar R., Meyssignac B., What dominates sea level at the coast: a case study for the Gulf of Guinea. *Ocean Dynamics*. 66, 623-636. Doi: 10.1007/s10236-016-0942-2, 2016.

ACL - Meyssignac B., Fettweis X., Chevrier R., Spada G. (2016b) Regional sea level changes for the 20th and the 21st century induced by the regional variability in Greenland ice sheet surface mass loss. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0337.1.

ACL - Meyssignac B., C.G. Piecuch, C.J. Merchant, M.-F. Racault, H.Palanisamy, C. MacIntosh, S. Sathyendranath, R. Brewin, (2016a) Causes of the regional variability in observed sea level, sea surface temperature and ocean colour over the period 1993-2011. *Survey in geophysics*. DOI: 10.1007/s10712-016-9383-1.

ACL - Motte, E; Zribi, M; Fanise, P; Egido, A; Darrozes, J; Al-Yaari, A; Baghdadi N; Baup F.; Dayau S; Fieuzal R; Frison PL; Guyon D., Wigneron JP; (2016) GLORI: A GNSS-R Dual Polarization Airborne Instrument for Land Surface Monitoring, *Sensors* 2016, 16(5), 732; doi:10.3390/s16050732, 2016.

ACL - Roussel N., Frappart F., Darrozes J., Ramillien G., Roblou L., Cornu G., Koummarasy K. (soumis). Sectorized estimates of sea level from GNSS L1 and L2 signal to noise ratio data

collected by a single geodetic receiver, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

ACL - Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Baup F., Ha C., Lestarquit L., Detection of Soil Moisture variations using GPS and GLONASS SNR data for elevation angles ranging from 2° to 70°, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4781–4794, doi:10.1109/JSTARS.2016.2537847, 2016.

ACL - Schiavulli D., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Nunziata F., Migliaccio M. (sous presse). Observing sea/ice transition by radar images generated by TechDemoSat-1 Delay Doppler Maps. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.

ACL - Schiavulli D., Nunziata F., Migliaccio M., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J. Reconstruction of the radar image from actual DDMs collected by TechDemoSat-1 GNSS-R mission. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4700-4708, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2543301, 2016.

ACL - Sérazin G., Meyssignac B., Penduff T., Terray L., Barnier B., Molines J.M., Quantifying uncertainties on regional sea level rise induced by multi-decadal oceanic intrinsic variability. 43, 2016GL069273, doi: 10.1002/2016GL069273, 2016.

ACL - Von Schukmann K., Palmer M.D., Trenberth K.E., Cazenave A., D. Chambers, Champollion N. et al., Earth's energy imbalance: an imperative for monitoring, *Nature Climate Change*, 26, 138-144, 2016.

ACL - F. Wang, D. Yang, B. Zhang, W. Li and J. Darrozes, "Wind Speed Retrieval Using Coastal Ocean-Scattered GNSS Signals," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 11, pp. 5272-5283, Nov. 2016. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2611598, 2016.

AP - Cazenave A., Champollion N., Benveniste J. and Lecompte P., Foreword of the special issue of *Surveys in Geophysics* on 'The global mean sea level and its components', *Surveys in Geophysics*, in press, 2016.

AP - Cazenave A., Sea level rise and future Earth, in "Global Change and Future Earth: The Geodetic and Geophysical Perspective", Cambridge University Press, submitted, 2016.

AP - Nerem S., Ablain M., Cazenave A., Church J. and Leuliette E., A 25-year long satellite altimetry-based global mean sea level record: Closure of the sea level budget & missing components, CRC book on "satellite altimetry over the oceans and land surfaces", Stammer & Cazenave eds., submitted.2016.

AP - Cazenave A., La hausse du niveau de la mer; observations et projections; ouvrage "Chimie et Changement Climatique", EDP Sciences, 254p, 2016.

AP - White Paper of the ISSI Forum on "Monitoring the evolution of coastal zones under various forcing factors using space-based observing systems", several authors including A. Cazenave, B. Meyssignac & P. Maisongrande, 2016.

C-ACTI : G. André et al. La mesure du niveau marin par bouée GNSS et les références verticales maritimes rapportées à l'ellipsoïde (BATHYELLI) ; Journées REFMAR 2016, Paris, 2-4 Février 2016.

C-ACTI : Maspataud A., Schmitt T., Biscara L., Créach R., 2016. High resolution coastal DEM of the Dover Strait: managing dynamic bedforms. Marine and River Dunes Dynamics – MARID V–, 4-6 April 2016, Caernarfon, North Wales, UK, 133-136. (article et poster).

C-ACTI : H. Michaud, A. Pasquet, F. Leckler, R. Baraille, A. Dalphinnet, L. Aouf. Improvements of the new French coastal wave forecasting system and application to a wave-current interaction study. Wise Venice , 2016.

C-ACTI -Motte E., Peyrezabes M., Lestarquit L., Frappart, F., Zribi M., Fanise P., Darrozes J., Centimeter level lake altimetry from airborne GNSS Reflectometry. Proceedings of the ESA Living Planet Symposium 2016, 9-13 May 2016, Prague, Czech Republic, ESA SP-740, 2016.

C-ACTI - Roussel N., Darrozes J., Ha C., Boniface K., Frappart F., Ramillien G., Van de Vyvere L., Desenfans O., Gavart M., Baup F, Multi-scale volumetric soil moisture detection from GNSS SNR data: ground-based and airborne applications. IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 573 - 578, doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573279, 2016.

C-ACTI - Schiavulli D., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Nunziata F., Migliaccio M., TECHDEMOSAT-1 DDM deconvolution to retrieve the NRCS field in a gridded format. IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2016, 4807-4810, doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730254, 2016.

C-ACTI - Schiavulli D., Nunziata F., Migliaccio M., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J. , Gns-Reflectometry Sea/Land and Sea/Ice Transition Detection from Techdemosat-1 Delay-Doppler Maps. Proceedings of the ESA Living Planet Symposium 2016, 9-13 May 2016, Prague, Czech Republic, ESA SP-740, 2016.

C-COM : Didier JOURDAN, Denis PARADIS, Laurie BISCARA, Sophie CASITAS, Héloïse MICHAUD, Audrey PASQUET, Alice DALPHINET, Patrick OHL ; HOMONIM Phase-II : Une contribution à l'amélioration de la prévision des submersions marines sur l'Outre-Mer ; GMMC Toulon, 2016.

OS - Darrozes J., ROUSSEL N. and ZRIBI M., The Reflected Global Navigation Satellite System (GNSS-R): de la théorie à la pratique, in 1st Edition Ed. Baghdadi, Zribi, Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrolog, Chapter 7, vol 2, 2016.

OS - Darrozes J., ROUSSEL N. and ZRIBI M., The Reflected Global Navigation Satellite System (GNSS-R): from Theory to Practice in 1st Edition Ed. Baghdadi, Zribi, Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrolog, Chapter 7, vol 2, 2016.

OS - Motte E., Egido A., Roussel N., Boniface K., Frappart F., Applications of GNSS- R in continental hydrology. In Baghdadi N., Zribi M. (Eds.), Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology, Elsevier, 281-321, doi: 10.1016/B978-1-78548-104-8.50009-7, 2016.

OS - Motte E., Egido A., Roussel N., Boniface K., Frappart F. Application du GNSS-R en hydrologie continentale. In Baghdadi N., Zribi M. (Eds.), *Téledétection pour l'Observation des Surfaces Continentales*, Volume 3: Hydrologie continentale, ISTE Editions, 267-306, 2016.

2015

ACL - M. Ablain, A. Cazenave, G. Larnicol, M. Balmaseda, P. Cipollini, Y. Faugère, M. J. Fernandes, O. Henry, J. A. Johannessen, P. Knudsen, O. Andersen, J. Legeais, B. Meyssignac, N. Picot, M. Roca, S. Rudenko, M. G. Scharffenberg, D. Stammer, G. Timms, and J. Benveniste, Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project. *Ocean Sci.*, 11, 67-82, doi:10.5194/os-11-67-2015.

ACL - Adalbert Arsen, Jean-François Crétaux & Rodrigo Abarca del Rio, Use of SARAL/AltiKa over Mountainous Lakes, Intercomparison with Envisat Mission, *Marine Geodesy*, 38:sup1, 534-548, DOI: 10.1080/01490419.2014.1002590, 2015.

ACL - Balmaseda MA, Fabrice Hernandez, A Storto, MD Palmer, O Alves, L Shi, GC Smith, T Toyoda, M Valdivieso, B Barnier, D Behringer, T Boyer, YS Chang, GA Chepurin, N Ferry, Gael Forget, Y Fujii, S Good, S Guinehut, K Haines, Y Ishikawa, S Keeley, Armin Köhl, T Lee, MJ Martin, S Masina, S Masuda, B Meyssignac, K Mogensen, L Parent, KA Peterson, YM Tang, Y Yin, G Vernieres, X Wang, J Waters, R Wedd, O Wang, Y Xue, M Chevallier, JF Lemieux, F Dupont, T Kuragano, M Kamachi, T Awaji, A Caltabiano, K Wilmer-Becker, Fabienne Gaillard (2015) The ocean reanalyses intercomparison project (ORA-IP). *Journal of Operational Oceanography*. 8, s80-s97. Doi: 10.1080/1755876X.2015.1022329.

ACL - Bhowmick, S.A., R. Sharma, R. Kumar, K.N Babu, A.K. Shukla, R. Venkatesan, Remya P.G, B. Nair, R.M Gairola, P. Bonnefond and N. Picot, Validation of AltiKa SWH and SLA using Jason-2 Altimeter and Various In-situ Observations. SARAL/AltiKa special issue, *Marine Geodesy*, 38(S1):193–205, 10.1080/01490419.2015.1042602, 2015.

ACL - Bonnefond, P., O. Laurain, P. Exertier, A. Guillot, P. Picot, M. Cancet, F. Lyard, SARAL/AltiKa absolute calibration from the multi-mission Corsica facilities, SARAL/AltiKa special issue, *Marine Geodesy*, 38(S1):171–192, 10.1080/01490419.2015.1029656, 2015.

ACL - Dieng H.B, Champollion N., Cazenave A., Wada Y., Schrama E., Seneviratne S., Meyssignac B. (2015c) Total land water storage change over 2003-2013 estimated from a global mass budget approach. *Environment Research Letter*.10, 124010. Doi: 10.1088/1748-9326/10/12/124010.

ACL - Dieng H.B., Palanisamy H., Cazenave A., Meyssignac B., von Schuckmann K. (2015a) The Sea Level Budget Since 2003: Inference on the Deep Ocean Heat Content. *Survey in Geophysics* 36:209–229, doi:10.1007/s10712-015-9314-6.

ACL - Dieng H.B., Cazenave A., von Schuckmann K., Ablain M., Meyssignac B. (2015b) Sea level budget over 2005-2013: Missing contributions and data errors. *Ocean Science*. 11, 789-802. Doi: 10.5194/os-11-789-2015.

ACL - Dieng H.B., Palanisamy H., Cazenave A., Meyssignac B., von Schuckmann K. (2015a) The Sea Level Budget Since 2003: Inference on the Deep Ocean Heat Content. *Survey in Geophysics* 36:209–229, doi:10.1007/s10712-015-9314-6

ACL - Frappart, F., N. Roussel, J.J. Benjamin, R. Biancale, F. Perosanz, M. Salazar, M., Hernandez Pajares, J.M. Davila, J. Garate, B. Perez, C. Gracia, R. Lopez, A. Tapia, I. Valles, J. Gili and P. Bonnefond, The 2013 Ibiza Calibration campaign of Jason-2 and Saral altimeters. SARAL/AltiKa special issue, *Marine Geodesy*, 38(S1):219–232, 10.1080/01490419.2015.1008711, 2015.

ACL - F. Frappart, F. Papa, V. Marieu, Y. Malbeteau, F. Jordy, S. Calmant, F. Durand & S. Bala, Preliminary Assessment of SARAL/AltiKa Observations over the Ganges- Brahmaputra and Irrawaddy Rivers, *Marine Geodesy*, 38:sup1, 568-580, DOI: 10.1080/01490419.2014.990591, 2015.

ACL - Frappart F., Roussel N., Gay A., Ramillien G., Darrozes J., Lestarquit L., Perosanz F., Modeling of GNSS multipath signals for altimetry applications using signal to noise ratio data, IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2015, 1598-1601, doi:10.1109/IGARSS.2015.7326089, 2015.

ACL: Hong Son Hoang and Remy Baraille, *Essays on Mathematics and Statistics: Volume 5 Chapter 17 - On a Recursive Procedure for Parameter Estimation in Linear Model with Possibly Singular Covariance*, pp. 181-200.

ACL - Le Cozannet G., Raucoules D., Wöppelmann G., Garcin M., Da Sylva S., Meyssignac B., Gravelle M., Lavigne F. (2015) Vertical ground motion and historical sea-level records in Dakar (Senegal). *Environmental Research Letters*, 10 084016. Doi:10.1088/1748-9326/10/8/084016.

ACL - Melet A. and Meyssignac B. (2015) Explaining the spread in global mean thermosteric sea level rise in CMIP5 climate models. *Journal of Climate*.28, 9918-9940. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0200.1.

ACL - Palanisamy H, Meyssignac B, Cazenave A, Delcroix T., Is anthropogenic sea level fingerprint already detectable in the Pacific Ocean? *Environmental Research Letter*, 10, 084024, doi:10.1088/1748-9326/10/8/084024, 2015.

ACL - Palanisamy H., Cazenave A., Delcroix T, Meyssignac B., Spatial trend patterns in the Pacific Ocean sea level during the altimetry era: the contribution of thermocline depth change and internal climate variability. *Ocean Dynamics*, 65,3, 341-356, DOI 10.1007/s10236-014-0805-7, 2015.

ACL - Roussel N., Ramillien G., Frappart F., Darrozes J., Gay A., Striebig N., Biancale R., Hanquiez V., Allain D., Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver. *Remote Sensing of Environment*, 171, 261-277, doi:10.1016/j.rse.2015.10.011, 2015.

ACL - Roussel N., Ramillien G., Frappart F., Darrozes J., Gay A., Striebig N., Biancale R.(2015). Improved IPT technique for altimetry and tide/wave measurements: offshore 60 – meter lighthouse case study, IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2015, 3894-3897, doi:10.1109/IGARSS.2015.7326675, 2015.

AP - L. Biscara ; SHOM, 2015. MNT topo-bathymétrie côtier des pertuis charentais à 20m (HOMONIM)
http://dx.doi.org/10.17183/MNT_COTIER_PERTUIS_HOMONIM_20m_WGS84.

C-ACTI - Biscara L., Maspataud A., Schmitt T., Créach R., Présentation de la gamme de MNT bathymétriques pour la modélisation océanographique (Projets HOMONIM et TANDEM). Colloque merIGéo, 24-26 novembre 2015, Brest, 17-20, 2015.

C-ACTI - Frappart F., Roussel N., Gay A., Ramillien G., Darrozes J., Lestarquit L., Perosanz F., Modeling of GNSS multipath signals for altimetry applications using signal to noise ratio data. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 1598-1601, doi:10.1109/IGARSS.2015.7326089, 2015.

C-ACTI - Hong Son Hoang and Remy Baraille, IGARS15, July 26th through Friday July 31th, 2015, On a Method for Estimation of Prediction Error Covariance in Very High Dimensional Systems.

C-ACTI - Maspataud A., Biscara L., Hébert H., Schmitt T., Créach R., 2015. Coastal Digital Elevation Models (DEMs) for tsunami hazard assessment on the French coasts. EGU 2015, 13-17 avril 2015, Vienne, Autriche.

C-ACTI - Roussel N., Ramillien G., Frappart F., Darrozes J., Gay A., Striebig N., Biancale R., Improved IPT technique for altimetry and tide/wave measurements: offshore 60 – meter lighthouse case study. IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2015, 3894-3897, doi:10.1109/IGARSS.2015.7326675, 2015.

C-ACTI - Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Baup F., Ha C., Detection of changes in soil moisture content using GNSS SNR signals. IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2015, 2008-2011, doi:10.1109/IGARSS.2015.7326192, 2015.

C-ACTN : G. Fromant, France Floc'h, Anne Lebourges-Dhaussy, Frédéric Jourdin, Yannick Perrot, Nicolas Le Dantec, Christophe Delacourt, 2015. A multi-frequency acoustic inverse model of suspended estuarine aggregates with constant porosity, submitted to Continental Shelf Research on 2015/10/02.

2014

ACL - Cazenave A., Dieng H.B., Meyssignac B., von Schuckmann K., Decharme B. and Berthier E., The rate of sea level rise. *Nature Climate Change*, 4, 358–361. doi: 10.1038/NCLIMATE2159, 2014.

ACL - Dieng H.B., Henry O., Meyssignac B., Cazenave A., von Schuckmann K. and Lemoine J.M., (2014). Effect of La Nina on the global mean sea level and North Pacific ocean mass over 2005-2011, *Journal of Geodetic Science*, 4:19–27, doi: 10.2478/jogs-2014-0003.

ACL - Le Cozannet G., Garcin M., Yates M., Idier D., Meyssignac B., (2014) Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes, *Earth-Science Reviews*, 138, 47-60. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.08.005.

ACL - Palanisamy H., Cazenave A., Meyssignac B., Woppelmann G. and Soudarin L., (2014) Regional sea level variability, total relative sea level rise and its impacts on islands and coastal zones of Indian Ocean over the last sixty years, *Global Planetary Change*, 116, 54-67. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.02.001.

ACL - Palanisamy H., Cazenave A., Henry O., Prandi P., and Meyssignac B., (2014) Sea level variations measured by the new altimetry mission SARAL-AliKa and its validation based on spatial patterns and temporal curves using Jason-2, steric sea level, ocean mass and tide gauge data, *Marine Geodesy*.

ACL - Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Desjardins C., Gegout P., Pérosanz F., Biancale R. (2014). Simulations of direct and reflected waves trajectories for in situ GNSS-R experiments. *Geoscientific Model Development*, 7(5), 2261-2279, doi:10.5194/gmd-7-1-2014.

ASCL - Y-M Tanguy, G. Jan, Y. Pastol. Les références verticales maritimes en France ; revue xyz, n°140, 3^{ème} trimestre 2014, pp 51-56.

C-ACTN - Biscara L., et al. (2014) : Modèles numériques de bathymétrie pour la prévision Hydrodynamique du dispositif vigilance vagues-submersions. Actes des XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, 2-4 juillet 2014, Dunkerque (Poster).

C-ACTN - Jourdan D., et al. (2014) : Le projet HOMONIM, une contribution à l'amélioration de la prévision des submersions marines pour la Vigilance Vagues-Submersion. Actes du colloque "Connaissance et compréhension des risques côtiers", 3-4 juillet 2014, Brest. p88-97 (http://cocorisco.sciencesconf.org/conference/cocorisco/pages/cocorisco_2014_actes.pdf).

C-ACTN - Pasquet A., Michaud H., et al. (2014) : Implémentation d'un nouveau modèle opérationnel de prévision des vagues et surcotes marines. Actes des XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, 2-4 juillet 2014, Dunkerque (http://www.paralia.fr/jngcg/13_17_pasquet.pdf).

2013

ACL - André, G., B. Martin Miguez, V. Ballu, L. Testut, G. Wöppelmann, Measuring sea-level with GPS-equipped buoys: A multi-instruments experiment at Aix Island. *International Hydrographic Review* 27-38, 2013.

ACL - Ballu, V., P. Bonnefond, S. Calmant, M.-N. Bouin, B. Pelletier, O. Laurain, W.C. Crawford, C. Baillard, O. de Viron, Using altimetry and seafloor pressure data to estimate vertical deformation offshore: Vanuatu case study, *Advances in Space Research*, Volume 51, Issue 8, 15 April 2013, Pages 1335-1351, ISSN 0273-1177, 10.1016/j.asr.2012.06.009, 2013.

ACL - Calmant, S., J. Santos da Silva, D. Medeiros Moreira, F. Seyler, C.K. Shum, J.-F. Crétaux, G. Gabalda, Detection of Envisat RA2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS, *Advances in Space Research*, Volume 51, Issue 8, 15 April 2013, Pages 1551-1564, ISSN 0273-1177, 10.1016/j.asr.2012.07.033, 2013.

ACL - Cancet, M., Bijac, S., Chimot, J, Bonnefond, P., Jeansou, E., Laurain, O., Lyard, F., Bronner, E., Féménias, P., Regional in situ validation of satellite altimeters: calibration and cross-calibration results at the Corsican sites, *Advances in Space Research*, Volume 51, Issue 8, 15 April 2013, Pages 1400-1417, ISSN 0273-1177, 10.1016/j.asr.2012.06.017, 2013.

ACL - Crétaux J-F., Bergé-Nguyen M., Calmant S., Romanovski V.V., Meyssignac B., Perosanz F., Tashbaeva, S., Arsen A., Fund F., Martignago N., Bonnefond P., Laurain O., Morrow R., Maisongrande P., Calibration of Envisat radar altimeter over the Lake Issykkul,

Advances in Space Research, Volume 51, Issue 8, 15 April 2013, Pages 1523-1541, ISSN 0273-1177, 10.1016/j.asr. ACL - Fenoglio-Marc L., A. Mariotti, G. Sannino, B. Meyssignac, A. Carillo, M.V. Struglia. Decadal variability of net water flux at the Mediterranean sea Gibraltar strait. Global and Planetary Change, 100:1-10.doi:10.1016/j.gloplacha.2012.08.007, 2013.

ACL - Fund, F., F. Perosanz, L. Testut, S. Loyer, An Integer Precise Point Positioning Technique for Sea Surface Observations Using a GPS Buoy, Advances in Space Research, Volume 51, Issue 8, 15 April 2013, Pages 1311-1322, ISSN 0273-1177, 10.1016/j.asr.2012.09.028, 2013.

ACL - Le Cozannet G., Garcin M., Petitjean L., Cazenave A., Becker M., Meyssignac B., Walker P., Devilliers C., Lebrun O., Lecacheux S., Bails A., Bulteau T., Yates M., Wöppelmann G. (2013). Exploring the relation between sea level rise and shoreline erosion using reconstructions: an example in French Polynesia. Journal of Coastal Research, 65,doi: 10.2112/SI65-361.1

ACL - Meyssignac B., Lemoine J.M., Cheng M., Cazenave A., Gégout P., Maisongrande P. Variations in degree 2 spherical harmonics of the gravity field reveal large-scale mass transfers of climatic origin in the ocean and over land. Geophysical Research Letter, Geophysical Research Letter, doi: 101002/grl.50772, 2013.

ACL - Peng D., Palanisamy H., Cazenave A., Meyssignac B. (2013). Sea level change and variability in the South China Sea, in press, Marine Geodesy.

ACL - Romanovsky V.V., S. Tashbaeva, J-F. Crétaux, S. Calmant, and V. Drolon, The closed Lake Issyk-Kul as an indicator of global warming in Tien-Shan, Journal of Natural Science, Vol.5, No.5, 608-623, 2013.

ACL - Seyler, F., S. Calmant, J. Santos da Silva, D. Medeiros Moreira, F. Mercier, C.K. Shum, From TOPEX/Poseidon to Jason-2/OSTM in the Amazon basin, Advances in Space Research, Volume 51, Issue 8, 15 April 2013, Pages 1542-1550, ISSN 0273-1177, 10.1016/j.asr.2012.11.002.

2012

ACL - Lillibridge, J., H. Bonekamp, J. Willis & P. Bonnefond, Preface, Marine Geodesy, 35:sup1, 1-2, 10.1080/01490419.2012.721634, 2012.

ACL - Testut L., F. Birol and C. Delebecque, Regional tidal modeling and evaluation of tidal geophysical correction for Jason-2 altimeter data: a case study over the Kerguelen Plateau, Southern Indian Ocean. Marine Geodesy, 35:sup1, 299-313, 10.1080/01490419.2012.718642, 2012.

GEODESIE PLANETAIRE

2016

ACL - J.M. Forbes, S.L. Bruinsma, E.N. Doornbos, X. Zhang, Gravity Wave-Induced Variability of the Middle Thermosphere, J. Geophys. Res., doi:10.1002/2016JA022923, 2016.

ACL - Garcia, R.F., S. Bruinsma, L. Massarweh, E. Doornbos, Medium scale gravity wave activity in the thermosphere inferred from GOCE data, J. Geophys. Res., doi:10.1002/2016JA022797, 2016.

ACL - Gasperini, F., J.M. Forbes, E.N. Doornbos, S.L. Bruinsma, Synthetic thermosphere winds based on CHAMP neutral and plasma density measurements, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2016JA022392, 2016.

ACL - Mueller-Wodarg, I.C.F., S. Bruinsma, J.M. Marty, H. Svedhem, In-situ observations of waves in Venus' polar lower thermosphere with Venus Express aerobraking, *Nature Physics*, doi:10.1038/NPHYS3733, 2016.

2015

ACL - Bruinsma, S.L., The DTM-2013 thermosphere model, *J. Space Weather Space Clim.*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2015001>

ACL - Gasperini, F., J.M. Forbes, E.N. Doornbos, S.L. Bruinsma, Wave Coupling between the Lower and Middle Thermosphere as viewed from TIMED and GOCE, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2015JA021300, 2015.

2014

ACL - Bruinsma, S.L., E. Doornbos, B.R. Bowman, Validation of GOCE densities and thermosphere model evaluation, *Adv. Space Res.*, 54, 576-585, doi:10.1016/j.asr.2014.04.008, 2014.

ACL - Dudok de Wit, T., S. Bruinsma, K. Shibasaki, Synoptic radio observations as proxies for upper atmosphere modelling, *J. Space Weather Space Clim.*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014003>, 2014.

ACL - Forbes, J.M., X. Zhang, S.L. Bruinsma, New perspectives on thermosphere tides: 2. Penetration to the upper thermosphere, *Earth, Planets and Space*, 66, doi:10.1186/1880-5981-66-122, 2014.

ACL - Garcia, R.F., E. Doornbos, S. Bruinsma, H. Hebert, Atmospheric gravity waves due to the Tohoku-Oki tsunami observed in the thermosphere by GOCE, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2013JD021120, 2014.

ACL - Häusler, K., M.E. Hagan, A.J.G. Baumgartner, A. Maute, G. Lu, E. Doornbos, S. Bruinsma, J.M. Forbes, F. Gasperini, Improved short-term variability in the TIME-GCM, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2014JA020006, 2014.

ACL - Häusler, K., M.E. Hagan, J.M. Forbes, X. Zhang, E. Doornbos, S. Bruinsma, and G. Lu, Intra-annual variability of tides in the thermosphere from model simulations and in-situ satellite observations, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2014JA020579, 2014.

ACL - Lu, G., M. Hagan, K. Häusler, E. Doornbos, S. Bruinsma, B. Anderson, and H. Korth, Global ionospheric and thermospheric response to the April 2010 geomagnetic storms: An integrated data-model investigation, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2014JA020555, 2014.

ACL - J.T. Zhang, J.M. Forbes, C.H. Zhang, E. Doornbos, S.L. Bruinsma, Lunar tide contribution to thermosphere weather, *Space Weather*, doi:10.1002/2014SW001079, 2014.

2013

ACL - Bruinsma, S.L., J.M. Forbes, J.C. Marty, X.Zhang and M.D. Smith, Long term variability of Mars' exosphere based on precise orbit analysis of Mars Global surveyor and Mars Odyssey, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2013JE004491, 2013.

ACL - Choury, A., S. Bruinsma, P. Schaeffer, Neural networks to predict exosphere temperature corrections, *Space Weather*, Vol. 11, 592–602, doi:10.1002/2013SW000969, 2013.

ACL - Garcia, R.F., S. Bruinsma, P. Lognonné, E. Doornbos, F. Cachoux, GOCE satellite: the first seismometer in orbit around the Earth, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/grl.50205, 2013.

2012

ACL - Bruinsma, S.L., N. Sánchez-Ortiz, E. Olmedo, N. Guijarro, Evaluation of the DTM-2009 thermosphere model for benchmarking purposes, *J. Space Weather Space Clim.*, <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2012005>, 2012.

ACL - Forbes, J.M., X. Zhang, S.L. Bruinsma , J. Oberheide, Lunar semidiurnal tide in the thermosphere under solar minimum conditions, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2012JA017962, 2012.

ACL - Forbes, J.M., X. Zhang, S.L. Bruinsma (2012) Middle and Upper Thermosphere Density Structures due to Nonmigrating Tides, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2012JA018087.

OBSERVATOIRES GEODESIQUES

2016

ACL - Barriot, J.-P., Serafini, J., Maamaatuaiahutapu, K. and Sichoix, L., The Island of Tubuai (French Polynesia) Landfall of Cyclone Oli on the 5th of February 2010, *Open Access Library Journal*, 3: e2615, <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1102615>, 2016.

ACL - JP Barriot and B. Ducarme, Tidal Effects, chapter in *Encyclopedia of Geodesy*, Springer International Publishing Switzerland 2016, E.W. Grafarend (ed.), DOI 10.1007/978-3-319-02370-0_69-1, 2016.

ACL - Fei Li, Mao Ye, Jianguo Yan, Weifeng Hao, Jean-Pierre Barriot, A simulation of the Four-way lunar Lander–Orbiter tracking model for the Chang'E-5 mission, *Adv. Space Research*, 57, 2376-2384, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.007>, 2016.

ACL - Fortunato A. B., K. Li, X. Bertin, M. Rodrigues, B. Martin Miguez, Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic coast. *Ocean Engineering*, Vol. 111, 1 January 2016, pp. 471-48, 2016.

ACL - M. Pätzold, T. Andert, M. Hahn, S.W. Asmar, J.-P. Barriot, M.K. Bird, B. Häusler, K. Peter, S. Tellmann, E. Grün, P.R. Weissman, H. Sierks, L. Jorda, R. Gaskell, F. Preusker, F. Scholten, A homogeneous nucleus for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from its gravity field, *Nature*, Vol 3, Feb 4, 2016.

ACL - Rogister Y., Mémin A., Rosat S., Hinderer J., Calvo M., Constraints provided by ground gravity observations on geocentre motions, *Geophysical Journal International*, vol.206, pp.1431–1439, 2016.

ACL - A.R. Tazkia, Y. Krien, F. Durand, L. Testut, AKM S Islam, F. Papa, X. Bertin, Seasonal modulation of M2 tide in the northern Bay of Bengal, *Continental Shelf Research*, Available online 19 December 2016, ISSN 0278-4343, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.12.008>.

ACL - L. Testut and A.S. Unnikrishnan. Improving Modeling of Tides on the Continental Shelf off the West Coast of India. *Journal of Coastal Research* 2016 321, 105-115.

ACL - Wöppelmann, G., and M. Marcos (2016), Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability, *Rev. Geophys.*, 54, 64–92, doi: 10.1002/2015RG000502.

AP - Enet S. (2016). Rapport d'activité technique du réseau de marégraphes RONIM géré par le Shom. N°23 Shom/DMGS/NP du 13 janvier 2017.

AP - Ferret Y. (2015). Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire. Rapport Shom, septembre 2016, 122p.

AP - Lamarre V. (2016). Rapport des MCO des marégraphes réalisés par le Shom/GOP en 2016. Rapport Shom RAP2017-001.

AP - Equipe RONIM (2016). Rapport des installations et interventions sur les marégraphes du réseau d'observation du niveau de la mer (RONIM) gérés par le Shom en 2016. Rapport Shom, RAP2016-081.

ASCL - Y.-A. Liou, C.-R. Ho, Y. Kuleshov and JP. Barriot. Earth Observations and Societal Impacts 2015. Editorial of *Advances in Meteorology*, 2016.

ASCL - Y.-A., Liou, C.-R. Ho, Y. Kuleshov, J.-P. Barriot, Earth Observations and Societal Impacts 2015, Editorial, *Advances in Meteorology*, 2016.

C-ACTI - D. Raucoules, P. Cyril, L. C. Gonéri, W. Guy and M. de Michele, "Use of DInSAR techniques for the assessment of tide gauge measurements for long term past sea level evolution estimation reliability," 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, 2016, pp. 5941-5942. doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730552.

C-ACTI - Santamaría-Gómez, Alvaro; King, Matt; Schöne, Tilo; van Dam, Tonie; Wöppelmann, Guy Constraining vertical land motion of tide gauges (IAG JWG 3.2): aims and scope. EGU General Assembly 2016, held 17-22 April, 2016 in Vienna Austria, p.5239.

C-ACTI - Petit C., Védrenne N., Velluet M.-T., Michau V., Artaud G., Samain E., Toyoshima M., Investigation on adaptive optics performance from propagation channel characterization with the small optical transponder, *Optical Engineering*, SPIE, vol.55, n°11, pp.111611, 2016.

2015

ACL - J.P. Barriot, Cumulative Perturbations Affecting a Spacecraft on a Mars Equatorial Orbit from the Waxing and Waning of the Polar Caps of the Planet, *Open Access Library Journal*, 2: e2272, 2015, <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1102272>.

ACL - Belli A., Exertier P., Samain E., Courde C., Vernotte F., Jayles C., Auriol A., Temperature, radiation and aging analysis of the DORIS Ultra Stable Oscillator by means of the Time Transfer by Laser Link experiment on Jason-2, *Advances in Space Research*, pp.in press, corrected proof, 2015.

ACL - Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Guillot A., Picot N., Cancet M., Lyard F., SARAL/AltiKa Absolute Calibration from the Multi-Mission Corsica Facilities, *Marine Geodesy*, vol.38, n°1, pp.171-192, Special Issue: The SARAL/AltiKa Satellite Altimetry Mission, 2015.

ACL - O. Francis, JP. Barriot, D. Reymond. Analysis of 4-year observations of the gPhone#59 in Tahiti. *Bulletin d'Information des Marées* n°149, pp 12012-12023, 2015. ISSN 0542-6766.

ACL - W. Kofman, A. Herique, Y. Barbin, JP. Barriot, V. Ciarletti, S. Clifford, P. Edenhofer, C. Elachi, C. Eyraud, J.-P. Goutail, E. Heggy, L. Jorda, J. Lasue, A.-C. Levasseur-Regourd, E. Nielsen, P. Pasquero, F. Preusker, P. Puget, D. Plettemeier, Y. Rogez, H. Sierks, C. Statz, H. Svedhem, I. Williams, S. Zine and J. Van Zyl. Properties of the 67P/Churyumov-Gerasimenko interior revealed by CONSERT radar. *Science*, Vol. 349, Issue 6247, 2015.

ACL - H.-C. Shih, C. Hwang, JP. Barriot, M. Mouyen, P. Corrêia, D. Lequeux and L. Sichoix, High-resolution gravity and geoid models in Tahiti obtained from new airborne and land gravity observations: data fusion by spectral combination. *Earth, Planets and Space*, 67: 124, 2015.

ACL - Wang-Faivre X., Bonnefond P., Exertier P., Deleflie F., Coulot D., Biancale R., Lemoine J.-M., Poyard J.-C., Courde C., Barriot J.-P., Barlier F., Laser ranging data analysis for a colocation campaign of French Transportable Laser Ranging System (FTLRS) in Tahiti, *Journal of Geodesy*, vol.89, n°1, pp.1-11, 2015.

ASCL - JP. Barriot, J.-Y. Prado, C. Lamotte. Observing Near Earth Objects from French Polynesia. Conference paper IAA-PDC-15-P-33, 4th IAA Planetary Defense Conference – PDC 2015, Frascati, April 13-17, 2015.

ASCL - JP. Barriot, D. Crossley. International Center for Earth Tides (ICET) and Global Geodynamics Project (GGP). *Int. Association of Geodesy Reports 2011-2015 (Travaux de l'AIG)*, Vol. 39, 2015.

ASCL - JP. Barriot, D. Crossley. International Center for Earth Tides (ICET) and Global Geodynamics Project (GGP). *Int. Association of Geodesy Reports 2011-2015 (Travaux de l'AIG)*, Vol. 39, 2015.

C-ACTI - JP. Barriot, J. Serafini, and L. Sichoix. Estimating the 3D Time Variable Water Vapor Contents of the Troposphere from a Single GNSS Receiver. *Proceedings ICEO&SI 2013 Conference*, June 23-25, Tainan, Taiwan.

C-ACTI - JP. Barriot, J.Y. Prado. Determination of the solar diameter from photometer measurements taken during the solar eclipse of Nov. 13, 2012 in North Australia. *Proceedings of the Third PICARD Scientific Workshop*, CNES HQ, Sept 25-26 2013, Paris.

2014

ACL - Rovera G. D., Torre J.-M., Sherwood R., Abgrall M., Courde C., Laas-Bourez M., Uhrich P., Link calibration against receiver calibration: an assessment of GPS time transfer uncertainties, *Metrologica*, vol.51, n°5, pp.476, 2014.

ACL - J. Serafini, JP. Barriot, L. Sichoix. The evolution of precipitable water and precipitation over the Island of Tahiti from hourly to seasonal periods. *International Journal of Remote Sensing*, 35:18, 6687-6707, 2014. DOI: 10.1080/01431161.2014.950763.

ACL - Voyez J., Robert C., Conan J.-M., Mugnier L. M., Samain E., Ziad A., First on-sky results of the CO-SLIDAR C2n profiler, *Optic Express*, vol.22, n°9, pp.10948, 2014.

ASCL - Torre J.-M., Exertier P., Barlier F., Le Cerga : la télémétrie laser-Lune, *Revue l'Astronomie*, vol.128, n°72, pp.28-33, 2014.

C-ACTI - Courde C., Exertier P., Fienga A., Samain E., Torre J.-M., Manche H., Aimar M., Albanèse D., Belli A., Feraudy D., Mariey H., Martinot-Lagarde G., Paris J., Viot H., French LLR Station and New Project, 19th International Workshop on Laser Ranging ILRS, Octobre 27-31, Annapolis (USA), 2014.

C-ACTI - Deleflie F., Coulot D., Torre J.-M., Reinquin F., Impact of 25 years of Etalon-1 and Etalon-2 data, 19th International Workshop on Laser Ranging ILRS, Octobre 27-31, Annapolis (USA), 2014.

C-ACTI - Torre J.-M., D'Amour B., Station best practices and requests, 19th International Workshop on Laser Ranging ILRS, Octobre 27-31, Annapolis (USA), 2014.

C-COM - Bonnefond P., Laurain O., Exertier P., Guillot A., Picot N., Guinle T., Femenias P., Corsica: a Cal/Val experiment to link offshore and coastal altimetry, 8th Coastal Altimetry Workshop, 23-24 October, Lake Constance (Germany), 2014.

2013

ACL - Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Thibaut P., Mercier F., GPS-based sea level measurements to help the characterization of land contamination in coastal areas, *Advances in Space Research*, vol.51, n°8, pp.1383-1399, 2013.

ACL - Gabillon, JP. Barriot, Y. Verschelle, B. Ducarme. Toward a normalized XML schema for the GGP data archive. *Data Science Journal*, Volume 12, 30 April 2013.

2012

ACL - Braxmaier C., Dittus H., Foulon B., Göklü E., Grimani C., Guo J., Herrmann S., Lämmerzahl C., Ni W.-T., Peters A., Rievers B., Samain E., Selig H., Shaul D., Svehla D., Touboul P., Wang G., Wu A.-M., Zakharov A.F., Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices I (ASTROD I)—a class- M fundamental physics mission proposal for cosmic vision 2015–2025: 2010 Update, *Experimental Astronomy*, vol.34, n°2, pp.181-201, 2012.

ACL - Fadil, L. Sichoix, JP. Barriot, P. Ortega and Pascal Willis. Evidence for a slow subsidence of the Tahiti Island from GPS, DORIS, and combined satellite altimetry and tide gauge sea level records. CRAS Geoscience 2011. DOI:10.1016/j.crte.2011.02.002.

ACL - M. Pätzold, T. P. Andert, S. W. Asmar, J. D. Anderson, JP. Barriot, M. K. Bird, B. Häusler, M. Hahn, S. Tellmann, H. Sierks, P. Lamy, and B. P. Weiss. Asteroid 21 Lutetia: Low Mass, High Density. Science, 28 October 2011: 491-492. DOI:10.1126/science.1209389.

C-ACTI - Ballu V., Bonnefond P., Calmant S., Bouin M.-N., Pelletier B., Crawford W.C., Baillard C., Laurain O., de Viron O., Using radar altimetry, combined with bottom pressure data, to measure underwater vertical movements, Abstract Venice, 2012.

C-ACTI - Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Guinle T., Féménias P., Corsica: a Multi-mission Absolute Calibration Site, 20 years of Progress in Radar Altimetry Symposium proceedings, ESA, Venice (Italy), 2012.

C-ACTI - Courde C., et al., Laser Ranging on Space debris with the MeO station, Proceedings of the International Laser Ranging Workshop, Missions Working Group, November, 5-9, Frascati (Italy), 2012.

C-ACTI - Courde C., et al., Current Performances and developments of MeO laser station, Proceedings of the International Laser Ranging Workshop, Missions Working Group, November, 5-9, Frascati (Italy), 2012.

C-ACTI - J. Serafini, JP. Barriot, M. Hopuare, L. Sichoix, A. Fadil. Modeling of tropospheric integrated water vapor content using GPS, radiosonde, radiometer, rain gauge and surface meteorological data in a tropical region (French Polynesia). Proc. of SPIE Vol. 8523, 852313 (2012), published in Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation IV, edited by Tadahiro Hayasaka, Kenji Nakamura, Eastwood Im, Kyoto, Japan, October 29, 2012.

C-COM - Bonnefond P., Exertier P., Laurain O., Calmant S., Crétaux J.-F., Testut L., Ballu V., Cancet M., FOAM: From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring, Venice Convention Centre Palazzo del Casinò Venice-Lido, Ocean Surface Topography Science Team Meeting, September 27-28 (Italy), 2012.

OS - Exertier P., et al., pp.40p., Observatoires Géodésiques Fondamentaux, recommandations et perspectives, Ed. GRGS – CNES / INSU, 2012.

PHYSIQUE FONDAMENTALE/ETUDE DE L'UNIVERS

2016

ACL – Baghi, Q., G. Métris, J. Bergé, B. Christophe, P. Touboul, M. Rodrigues. Gaussian regression and power spectral density estimation with missing data: the MICROSCOPE space mission as a case study. Physical Review D, 93(122007), 2016.

ACL - Exertier P, E Samain, C Courde, M Aimar, J M Torre, G D Rovera , M Abgrall, P Uhrich, R Sherwood, G Herold, U Schreiber, Ph Guillemot (2016) Sub-ns time transfer

consistency: a direct comparison between GPS CV and T2L2. *Metrologia* 53, 1395, doi:10.1088/0026-1394/53/6/1395, 2016.

ACL - Martinot-Lagarde, G., M. Aymar, D. Albanese, C. Courde, P. Exertier, A. Fienga, H. Mariey, G. Métris, R. Rigard-Cerison, E. Samain, J.-M. Torre, H. Viot Laser enhancements for Lunar Laser Ranging at 532 nm *Results in Physics*, 6, 329-336, doi:10.1016/j.rinp.2016.05.011, 2016.

ACL – Pires, S., J. Bergé, Q. Baghi, P. Touboul, G. Métris. Dealing with missing data in the MICROSCOPE space mission: An adaptation of inpainting to handle colored-noise data. *Phys. Rev. D*, 94(123015), 2016.

ACLN - Touboul, P., G. Métris, H. Selig, O. L. Traon, A. Bresson, N. Zahzam, B. Christophe, M. Rodrigues. Gravitation and geodesy with inertial sensors, from ground to space, 2016.

C-ACTI - Belli, A, Exertier P (2016) From Jason-2 to Jason-3 USO studies. International DORIS Service, AWG Meeting, Delft, The Netherlands, May 26, 2016.

C-ACTI - Belli, A, Exertier P, Capdeville H (2016) Comparison between DORIS oscillators on Jason satellites in terms of radiation sensitivity. IDS & OSTST joint meeting, La Rochelle, France Oct. 31 Nov. 4, 2016.

C-COM - Rodrigues, M., P. Touboul, R. Chhun, F. Liorzou, G. Métris. MICROSCOPE a micro-satellite for a major corner stone in fundamental physics, from qualification to launch. The 4S Symposium 2016.

C-INV - Baghi, Q., G. Métris, P. Touboul. MICROSCOPE: the test of the equivalence principle and possible other scientific applications. Journées Scientifiques du PN GRAM, Paris, 1-2 juin 2016.

2015

ACL – Baghi Q., G. Métris, J. Bergé, B. Christophe, P. Touboul, and M. Rodrigues. Regression analysis with missing data and unknown colored noise: application to the microscope space mission. *Phys. Rev. D*, 91(062003), 2015.

ACL - Belli A, Exertier P., Samain E., Courde C., Vernotte F., Jayles C., Auriol A. Temperature, Radiation and Aging Analysis of the DORIS Ultra Stable Oscillator by means of the Time Transfer by Laser Link Experiment on Jason-2, *Adv. Space. Res.*, doi:10.1016/j.asr.2015.11.025, 2015.

ACL – Bergé, J., S. Pires, Q. Baghi, P. Touboul, G. Métris. Dealing with missing data: An inpainting application to the MICROSCOPE space mission. *Physical Review D*, 92(112006), 2015.

ACL - Jayles, C., P. Exertier, N. Martin, P. Chauveau, E. Samain, C. Tourain, A. Auriol and P. Guillemot, Comparison of the frequency estimation of the DORIS/Jason2 oscillator thanks to the onboard DIODE and Time Transfer by Laser Link experiment, *Adv. Space Res. DORIS Special Issue, Precise Orbit Determination and Applications to Earth Sciences*, P. Willis (Ed.), doi:10.1016/j.asr.2015.08.033, 2015.

ACL - Laas-Bourez, M., Courde, C., Samain, E., Exertier, P., Guillemot, Ph., Torre, J.M., Martin, N., Foussard, C. Accuracy Validation of T2L2 Time Transfer in co-Location. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, DOI: 10.1109/TUFFC.2014.006662, vol. 62(2), 255-265, 2015.

ACL - Samain, E., Exertier, P., Courde, C., Fridelance, P., Guillemot, Ph., Laas-Bourez, M., Torre, J.-M., Time Transfer by Laser Link: A complete analysis of the error budget. *Metrologia* 52, 423-432, 2015.

C-ACTI - Belli A, Exertier P, Samain E, Courde C, Torre J-M, Vernotte, F, (2015) Synchronization of distant Laser stations thanks to Time Transfer by Laser Link : Proposal for a dedicated campaign, International Laser Ranging Workshop, Matera, Italy, October 26-30, 2015.

C-ACTI - Belli A, Exertier P, Samain E, Vernotte, F, Synchronization of Geodetic Observatories thanks to Time Transfer by Laser Link, IAU General Assembly, Honolulu, Hawaii - August 3-14, 2015, vol. 22, 51448, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015IAUGA..2251448B>, 2015.

C-ACTI - Characterization of an ultra stable quartz oscillator thanks to Time Transfer by Laser Link (T2L2, Jason2) Proceedings of the EFTF \& International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Denver Colorado, US, April 13-17 2015, doi:10.1109/FCS.2015.7138964, pp. 808-812, 2015.

C-COM - Baghi, Q., G. Métris, J. Bergé, B. Christophe, M. Rodrigues. Testing the equivalence principle with the MICROSCOPE space mission: The data analysis challenges. Fourteenth Marcel Grossmann Meeting - MG14, Rome (Italy), 12-18 July 2015.

C-COM - Baghi, Q., G. Métris, J. Berge, B. Christophe, M. Rodrigues. Linear regression with missing data and unknown colored noise: Application to a space mission in fundamental physics. Colloquium MissData, Rennes (France), 18-19 June 2015.

C-COM - Baghi, Q., J. Bergé, G. Métris, S. Pires, P. Touboul, M. Rogrigues, B. Christophe. The performance of the data processing. Testing the Equivalence Principle - MICROSCOPE Colloquium IV - On the Way to Data Analysis, Palaiseau (France), 16-17 November 2015.

C-COM - Baghi, Q., G. Métris, I. Panet, M. Greff-Lefftz, P. Touboul. Mapping and analyzing earth's gravity gradients using MICROSCOPE data: interests and feasibility. Testing the Equivalence Principle - MICROSCOPE Colloquium IV - On the Way to Data Analysis, Palaiseau (France), 16-17 November 2015.

C-COM - Hardy, E., Q. Baghi, J. Berge, R. Chhun, M. Rodrigues, P. Touboul, et G. Métris. Scientific data processing for the MICROSCOPE space experiment. Testing the Equivalence Principle - MICROSCOPE Colloquium IV - On the Way to Data Analysis. Palaiseau (France), 16-17 November 2015.

C-COM - Métris, G., The MICROSCOPE space mission to test the equivalence principle. Journées Scientifiques de la SFSA, Toulouse (France), 1-5 Juin 2015.

C-COM - Rodrigues, M., J. Bergé, R. Chhun, E. Hardy, V. Lebat, F. Liorzou, P. Touboul, G. Métris. Status of the next space mission for the test of the equivalence principle. Fourteenth Marcel Grossmann Meeting - MG14, Rome (Italy), 12-18 July 2015.

C-COM - Rodrigues, M., P. Touboul, G. Métris. MICROSCOPE science mission center status. Testing the Equivalence Principle - MICROSCOPE Colloquium IV - On the Way to Data Analysis, Palaiseau (France), 16-17 November 2015.

C-INV - Baghi, Q., G. Métris, B. Christophe. In-orbit test of the equivalence principle with MICROSCOPE: the missing data challenge. Conference Missing data in physics, Nice (France), 11-12 May 2015.

C-INV - Métris, G., P. Touboul. The MICROSCOPE space mission to test the equivalence principle. Conference Missing data in physics, Nice (France), 11-12 May 2015.

2014

ACL - Exertier, P., Samain, E., Martin, N., et al. Time Transfer by Laser Link : Data analysis and validation to the ps level. *Adv. Space Res.* 54(11), 2371-2385, 2014.

ACL - Rovera, G.D., Torre, J.M., Sherwood, R., Abgrall, M., Courde, C., Laas-Bourez, M., Uhrich, P. Link calibration against receiver calibration: an assessment of time transfer uncertainties. *Metrologia*, 51(5), 476, 2014.

ACL - Samain, E., Vrancken, P., Guillemot, Ph., Fridelance, P., Exertier, P. Time Transfer by Laser Link (T2L2): Characterization and Calibration of the flight instrument, *Metrologia* 51, 1-13, 2014.

C-ACTI - Exertier P, Samain E, Belli A, Courde C, Guillemot Ph (2014) Time Transfer by Laser Link (T2L2): A way to synchronize laser observatories to the ns level. Proceedings of the International Laser Ranging Workshop, Invited paper, October 26-31, 2014, Annapolis, MD, US, 2014.

C-ACTI - Guillemot, P., E. Samain, C. Courde, C. Foussard, P. Exertier, M. Laas-Bourez, N. Martin, J.M. Torre, M. Abgrall, J. Achkar, Ph. Laurent, D. Rovera, P. Urich T2L2: 6 Years of Sub Nanosecond Time and Frequency Metrology. Proceedings of the PTTI 2014, pp. 127-132, 2014.

C-ACTI - Rovera, G.D. ; Abgrall, M. ; Courde, C. ; Exertier, P. ; Fridelance, P. ; Guillemot, P. ; Laas-Bourez, M. ; Martin, N. ; Samain, E. ; Sherwood, R. ; Torre, J.-M. ; Urich, P. A direct comparison between two independently calibrated time transfer techniques: T2L2 and GPS common-views Proc. of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014), DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898561, pp. 666-667, 2014.

C-ACTI - Samain, E., Laas-Bourez, M., Courde, C., Exertier, P., Martin, N., Torre, J.-M., Rovera, G.D., Abgrall, M, Urich, P., Guillemot, Ph., Sherwood, R., Appleby, G., Fridelance, P. A sub-ns comparison between GPS Common View and T2L2. Proceedings of the 28th European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, Switzerland, June 23-26, 2014.

C-COM - Baghi, Q., B. Christophe, G. Métris. Analyse de données de la mission spatiale MICROSCOPE. Journées scientifiques de l'Action Spécifique GRAM Bordeaux (France), 2-4 avril 2014. C-COM - Baghi, Q., G. Métris, J. Bergé. Measuring the Lense-Thirring effect with MICROSCOPE. Microscope Colloquium III, Palaiseau (France), 3-4 November 2014.

C-COM - Hardy, E., G. Métris, M. Rodrigues, P. Touboul, J. Bergé, R. Chhun,, Q. Baghi. Scientific data processing for the microscope space experiment. COSPAR General Assembly, Moscow, 2-10 August 2014.

C-COM - Métris, G., Tests de physique fondamentale à partir de la dynamique du satellite GRASP. Atelier GRASP CNES, 23 Octobre 2014.

C-COM - Rodrigues, M., P. Touboul, G. Métris. MICROSCOPE data tree for science. MICROSCOPE Colloquium III, Palaiseau (France), 3-4 November 2014.

2013

ACL - Exertier, P. ; Samain, E. ; Courde, C. ; Martin, N. ; Torre, J.-M. ; Oneto, J.-L. ; Laas-Bourez Geozur, M. ; Guillemot, P. ; Leon, S. T2L2: Five years in space, Proceedings of the EFTF & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC) 2013, Prague, Rep. Tcheque, July 21-25, DOI: 10.1109/EFTF-IFC.2013.6702281, pp. 632-635, 2013.

ACL - Hardy, E., A. Levy, M. Rodrigues, P. Touboul, G. Métris, and A. Robert, « Validation of the in-flight calibration procedures for the MICROSCOPE space mission », Advance in Space Research, 52(9):1634-1646, 2013.

ACL - Hardy, A. Levy, G. Métris, M. Rodrigues, and P. Touboul, Determination of the equivalence principle violation signal for the MICROSCOPE space mission: optimization of the signal processing. Space Science Reviews, 180: 177-191, 2013.

C-ACTI - Guillemot, P.; Delporte, J. ; Samain, E. ; Laas-Bourez, M. Combination of T2L2 and GPS-CP Data: Towards an improvement of Time Transfer accuracy. Proc. of the European

Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), DOI: 10.1109/EFTF-IFC.2013.6702104, pp. 372 - 375, 2013.

C-ACTI - Laas-Bourez, M., Samain, E., Courde, C., Oneto, J.L., Exertier, P., Rovera, D., Abgrall, M., Fridelance, P., Guillemot, Ph. Time and Frequency distribution improvement in Calern/Geoazur laboratory for T2L2 campaigns. Proc. of the European Frequency and Time Forum (EFTF) \& International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC) 2013, Prague, Republik Tcheque, July 21-25, pp 869-872, 2013.

C-ACTI - Samain, E., Courde, C., Exertier, P. et al. Time transfer by laser link - T2L2: Microwave link comparison. Proc. of the 18th International Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan, November 11-15 2013, 13-Po47, 2013.

C-ACTN - Hardy, E., A. Levy, M. Rodrigues, P. Touboul, and G. Métris, « Software tools for the validation of the in- flight calibration performance of the MICROSCOPE space mission. « In L. Cambrésy, F. Martins, E. Nuss, and A. Palacios, editors, Proceedings of the annual meeting of the French Astronomical Society (SF2A). Société Française d’Astronomie et d’Astrophysique (SF2A), 2013.

C-COM - Hardy, E., A. Levy, M. Rodrigues, P. Touboul, G. Métris, A. Robert. Tone errors, data lacks and observation period. MICROSCOPE Colloquium II, 29-30 Jan. 2013, Palaiseau (France), 2013.

C-COM - Levy, A., M. Rodrigues, P. Touboul, E. Hardy, G. Métris, A. Robert. The in-flight calibration plan for the instrument of the MICROSCOPE space mission. MICROSCOPE Colloquium II, 29-30 Jan. 2013, Palaiseau (France), 2013.

C-COM - Touboul, P., G. Métris. MICROSCOPE science management. MICROSCOPE Colloquium II, 29-30 Jan. 2013, Palaiseau (France), 2013.

C-COM – Touboul, P., G. Métris. MICROSCOPE mission scenario. MICROSCOPE Colloquium II, 29-30 Jan. 2013, Palaiseau (France), 2013.

C-COM - Touboul, P., G. Métris. MICROSCOPE mission overview. Testing the Equivalence Principle - MICROSCOPE Colloquium II, 29-30 January 2013, Palaiseau (France), 2013.

2012

ACL - Touboul, P., G. Métris, V. Lebat, A. Robert. « The MICROSCOPE experiment, ready for the in-orbit test of the equivalence principle », *Class. Quantum Grav.* 29, 2012.

C-ACTI - Guillemot, Ph. et al. Improvement of comparisons between T2L2 \& RF Links. Proceedings of the European Frequency and Time Forum (EFTF), Gothenburg, Sweden, May 23-27 2012, DOI: 10.1109/EFTF.2012.6502398, pp 345-348, 2012.

C-ACTI - Levy, A., E. Hardy, M. Rodrigues, B. Foulon, P. Touboul, G. Métris. « The MICROSCOPE Space Mission: from Flight Hardware to In-Orbit Calibration ». Proceedings of the 63th International Astronautical Congress, Naples, 1-5 octobre 2012.

C-ACTI - Samain, E.; Laas-Bourez, M. ; Courde, C. ; Exertier, P. ; Torre, J.-M. ; Martin, N. ; Oneto, J. ; Aimar, M. ; Pierron, F. ; Guillemot, P. ; Leon, S. T2L2 : Ground to ground Time Transfer Proc. of the 26th European Frequency and Time Forum (EFTF), Gothenburg, Sweden, May 23-27 2012, DOI: 10.1109/EFTF.2012.6502328, pp. 36-40, 2012.

C-ACTN - Hardy, E., A. Levy, M. Rodrigues, P. Touboul, G. Métris, and A. Robert. Influence of the data process in the determination of the equivalence principle violation signal for the MICROSCOPE experiment. In S. Boissier, P. de Laverny, N. Nardetto, R. Samadi, D. Valls-Gabaud, and H. Wozniak, editors, Proceedings of the annual meeting of the French Astronomical Society (SF2A), pages 139–144, Nice, France, 2012.

C-COM - Hardy, E., A. Levy, M. Rodrigues, P. Touboul, G. Métris,, A. Robert. In-flight calibration of the MICROSCOPE space mission instrument. Mysore, INDIA, July 14-22 2012. 39th COSPAR Scientific Assembly.

SERVICES SCIENTIFIQUES ET DIFFUSION DE L'INFORMATION

2016

ACL - Balmino, G. et S. Bonvalot, Gravity Anomalies. In: Grafarend Ed., Encyclopedia of Geodesy Springer (solicited paper). http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-02370-0_45-1, 2016.

ACL - Bottelin, P; Dufrécho, G; Seoane, L; Llubes, M; Monod, B, Quaternary sediment thickness in the Saint-Lary basin (French Pyrenees): new insights from geophysical methods. Journal of Quaternary Science. (soumis)

ACL - H. Drewes, F. Kuglitsch, J. Adám, S. Rózsa (Ed.). Journal of Geodesy. The international Gravimetric Bureau. In "The Geodesist's Handbook 2016". October 2016, Volume 90, Issue 10, pp1186–1190. ISSN0949-7714. Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/journal/190/90/10/page/1>; 2016.

ACL - Frappart F., Ramillien G., Seoane L., Monitoring Water Mass Redistributions on Land and Polar Ice Sheets using the GRACE Gravimetry from Space Mission. In Baghdadi N., Zribi M. (Eds.), Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology, 255-279, Elsevier, Amsterdam, Nederland, doi: 10.1016/B978-1-78548-104-8.50008-5, 2016.

ACL - Lequentrec-Lalancette, MF.; Salaün, C.; Bonvalot, S.; Rouxel, D.; Bruinsma, S. "Exploitation of marine gravity measurements in the validation of global gravity field models." IAG Symposia Series. IUGG General Assembly in Prague, 2015. © Springer International Publishing Switzerland 2016 (sous presse).

ACL - Martin, R., Chevrot, S., Komatitsch, D., Seoane, L., Sprangenberg, H., Wang, Y., Dufrechou, G., Bonvalot, S., Bruinsma, S. A high-order 3D spectral-element method for the forward modelling and inversion of gravimetric data - Application to the western Pyrenees. Geophysical Journal International (sous presse - GJI-16-0592.R1), 2016.

ACL - Pallero, J.L.G., Fernandez-Martinez, J.L., Bonvalot, S., Fudym, O. 3D gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization. Journal of Applied Geophysics. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.004>, 2016.

ACL - Pereira Dos Santos, F. et S. Bonvalot (2016). Cold Atom Absolute Gravimetry. In : Grafarend, Ed., Encyclopedia of Geodesy. Springer (solicited paper). http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-02370-0_30-1, 2016.

ACL - G. Ramillien, F. Frappart, L. Seoane, Space Gravimetry Using GRACE Satellite Mission: Basic Concepts Chapter · December 2016 DOI: 10.1016/B978-1-78548-159-8.50006-2 In book: Microwave Remote Sensing of Land Surface, pp.285-302, 2016.

ACL - Wilmes, H., L. Vitushkin, V. Palinkas, R. Falk, H. Wziontek, S. Bonvalot. Definition and Realization of a Global Absolute Gravity Reference System. IAG Symposia Series. IUGG General Assembly in Prague, 2015. DOI 10.1007/1345_2016_245, © Springer International Publishing Switzerland 2016 (on line). http://link.springer.com/chapter/10.1007/1345_2016_245

2015

ACL - Pallero, J.L.G., Fernandez-Martinez, J.L., Bonvalot, S., Fudym, O., Gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization. Journal of Applied Geophysics. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.03.008, 2015.

ACL - Perrouty, S., Moussirou, B., Martinod, J., Bonvalot, S., Carretier, S., Gabalda, G., Monod, B., Herail, G., Regard, V., Remy, D. (2015). Geometry of two glacial valleys in northern Pyrenees estimated using gravity data. Comptes Rendus Geosciences. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2015.01.002>

ACL - Rigo, A., C. Adam, M. Grégoire, M. Gerbault, R. Meyer, M. Rabinowicz, F. Fontaine, S. Bonvalot. Insights for the melt migration, the volcanic activity and the ultra-fast delamination of lithosphere related to the Yellowstone plume (Western USA). Geophys. Journal Int., 203, 1274–1301 doi: 10.1093/gji/ggv360, 2015.

2014

ACL - Bruinsma S., Förste C., Abrikosov O., Lemoine, J-M., Marty J-C., Mulet S., Rio M-H., Bonvalot S., ESA's satellite-only gravity field model via the direct approach based on all GOCE data". Geophys. Res. Lett., 41, doi:10.1002/2014GL062045, 2014.

ACL - Mikhailov, V.O, Panet, I., Hayn, M. Timoshkina, E.P., Bonvalot, S., Lyakhovsky, V., Diament, M. Viron, O.de. Comparative study of temporal variations in the earth's gravity field using GRACE gravity models in the regions of three recent giant earthquakes, 2014. J Izvestiya, Physics of the Solid Earth, March 2014, Volume 50, Issue 2, pp 177-191. doi:10.1134/S1069351314020062

ACL - Ramillien G., Frappart F., Seoane L., "Application of the Regional Water Mass Variations from GRACE Satellite Gravimetry to Large-Scale Water Management in Africa". Remote Sensing 6(8):7379-7405. DOI: 10.3390/rs6087379, 2014.

2013

ACL - Bruinsma S., Förste C., Abrikosov O., Marty J-C., Rio M-H., Mulet S., Bonvalot S. The new ESA satellite-only gravity field model via the direct approach: Confrontation with the GOCE mission objectives *Geophys. Res. Letters*, 40,1-6, DOI:10.1002/grl.50716, 2013.

ACL - Frappart F., Seoane L., Ramillien G. , “Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America”. *Remote Sensing of Environment* 137:69-83. DOI: 10.1016/j.rse.2013.06.008, 2013.

ACL - Martin, R., Monteiller, V., Komatitsch, D., Perrouty, S., Jessell, M., Bonvalot, S., Lindsay, M. Gravity inversion using wavelet-based compression on parallel hybrid CPU/GPU systems: application to SW Ghana region. *Geophysical Journal International*. Volume 195, Issue 3, pp. 1594-1619, doi:10.1093/gji/ggt334, 2013.

ACL - Mikhailov, V.O, Panet, I., Hayn, M. Timoshkina, E.P., Bonvalot, S., Lyakhovsky, V., Diament, M. Viron, O.de. Comparative study of temporal variations in the earth’s gravity field using GRACE gravity models in the regions of three recent giant earthquakes, 2014. *J Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, March 2014, Volume 50, Issue 2, pp 177-191. doi:10.1134/S1069351314020062, 2013.

ACL - Seoane L., Ramillien G., Frappart F., Leblanc M. (2013) “Regional GRACE-based estimates of water mass variations over Australia: Validation and interpretation”. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10(4):5355-5395. DOI: 10.5194/hessd-10-5355-2013.

2012

ACL - Balmino, G., Vales, N., Bonvalot, S., Briais, A. (2012). Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies. *Journal of Geodesy*, V86, 7, 499-520, DOI:10.1007/s00190-011-0533-4, 2012.

ACL - Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., M. Kuhn, Peyrefitte, A., Vales, N., Biancale, R., Gabalda, G., Moreaux, G., Reinquin, F., Sarrailh, M. (2012). *World Gravity Map, 1:50000000 map*, Ed. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris, 2012.

ACL - H. Drewes, H. Hornik, J. Adam, S. Rozsa Eds. (IAG). The International Gravimetric Bureau. In “The Geodesist’s Handbook 2012”, *Journal of Geodesy*, V86, 10. doi: 10.1007/s00190-012-0584-1, 2012.

ACL - Jiang, Z., V Palinkas, F E Arias, J Liard, S Merlet, H Wilmes, H Baumann, S Mizushima, J Mäkinen, C Lee, I M Choi, B Karaboce, W Ji, Q Wu, D Ruess, C Ullrich, D Winester, M Eckl, L Timmen, N Le Moigne, M Barlik, J Ågren, Del Negro, G Filippo, M Diament, S Bonvalot, J Krynski, M Sekowski, L Wang, S Sergiy, A Gemark, O Francis, M Becker, L Vitushkin, L Robersson, L Tisserand, R Davis, 2012. The 8th International Comparison of Absolute Gravimeters 2009 - the First Metrological Key Comparison CCM.G-K1. *Metrologia*.49, 666 doi:10.1088/0026-1394/49/6/666.

ACL - Ramillien G., Seoane L., Frappart F., Biancale R., Gratton S., Bourgogne S., “Constrained Regional Recovery of Continental Water Mass Time-variations from GRACE-based Geopotential Anomalies over South America” *Surveys in Geophysics*, pp. 1-19., DOI:10.1007/s10712-012-9177-z, 2012.

ACL - Seoane L., Biancale R., Gambis D. (2012) "Adequacy between Earth's rotation and mass displacement as detected by GRACE" *Journal of Geodynamics, Journal of Geodynamics* 62:49-55, DOI: 10.1016/j.jog.2012.02.008, 2012.

RAPPORTS

Pierre Baudet, Prise en compte des effets de charges dans le traitement des données GPS, Stage TFE ESGT, dir. J.-P. Boy, effectué à l'EOST, 5 mois, 2016.

Ferret Y. (2015). Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire. Rapport Shom, septembre 2016, 122p.

Equipe RONIM (2016). Rapport des installations et interventions sur les marégraphes du réseau d'observation du niveau de la mer (RONIM) gérés par le Shom en 2016.

Adélie Corbeau, Etude des déformations saisonnières observées par GPS appliquées à l'île de la Réunion et au bassin Amazonien, Stage TFE ESGT, dir. J. Nicolas, co-encadrement avec Frédéric Durand, 5 mois, 2015.

Asri Ayoub, Développement d'un outil d'analyse des séries temporelles pour l'étude des effets saisonniers déterminés par GPS, Stage Master 2 SISEA Univ. Rennes, dir. J. Nicolas, co-encadrement avec Frédéric Durand et Marcell Ferenc, 6 mois, 2014.

THESES

Bourgoin A.; "Contraintes sur les violations à la symétrie de Lorentz par analyse des données de télémétrie laser Lune", thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie (2016).

Ismail, Z., Détermination de l'exactitude d'un géoïde gravimétrique, PSL Research University, may 2016.

Wang ,S., Modélisation spatio-temporelle du champ de gravité terrestre, Université Sorbonne Paris Cité, sep 2016.

Zoulida, M., Determination of terrestrial frames by optimal combination of GNSS, DORIS and SLR measurements , Université Sorbonne Paris Cité, may 2016.

Daquin J. (IMCCE) : Quantification et comparaison du chaos dans les orbites long terme de satellites artificiels. Soutenance décembre 2015.

Fromant G., Mesures de Matières en suspension (MES) dans la colonne d'eau par combinaison de méthodes acoustiques et optiques, Thèse Océanographie de l'UBO soutenue à l'IUEM le 10 novembre 2015.

Monjarret R., The multi-layer shallow-water model with free surface: treatment of the open boundaries. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2015.

Ngoc-Dung Luong (OCA) : Analyse de constellations de satellites en terme d'erreurs sur l'orbitographie et sur le positionnement. Soutenance décembre 2015.

Roussel N., L'application de la réflectométrie GNSS pour l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre, Thèse, 2015.

Desjardins C., Modélisation de la propagation troposphérique des signaux de systèmes de positionnement par satellites : un tour d'horizon, Thèse de Doctorat, co-tutelle CNES-CLS, 2014.

Ferenc Marcell, GPS observation of geophysical deformations induced by non-tidal loading, soutenue le 9 décembre 2014, encadrement L. Polidori, J. Nicolas, Membres du jury : Rapporteurs E. Calais et G. Woppelmann, Examineurs : T. van Dam, A. Mocquet et J.-P. Boy ; financement CNES - Région Pays de la Loire, ED SPIGA, Doctorat du CNAM spécialité géomatique.

Lercier D., Prise en compte des déformations co- et post-sismiques pour la détermination d'un repère de référence, Thèse de doctorat, Ecole doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile-de-France, Observatoire de Paris, 2014.

Rebischung P., Can GNSS contribute to improving the ITRF definition ?, Thèse de doctorat, Ecole doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile-de-France, Observatoire de Paris, 2014.

Hardy, E., PHD Thesis, Ecole doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile de France, 2013.

Lion G., Dynamique des orbites fortement elliptiques, Thèse de Doctorat, Observatoire de Paris, 2013.

HDR

Frappart F., Analyse des propriétés des surfaces continentales par altimétrie, HdR soutenue à l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse, Octobre 2015.

Morel L., HDR - Influence des stratégies de traitement en géodésie spatiale, ED SPIGA, 9 octobre 2015.

Ramillien G., Les redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre observées par gravimétrie spatiale, HDR, Toulouse le 28 mars 2012.

11 - EVENEMENTS ET FORMATIONS ORGANISES PAR LE GRGS

11.1. Enseignements

11.2. Ateliers

11.3. Ecoles d'été

11. 1. Enseignements

Liste non exhaustive :

- ENSTA-Bretagne module marée théorie de la marée et hydrographie contenant une partie géodésie (Elèves Ingénieurs de deuxième année).
- École Navale au sein de la voie d'approfondissement des élèves ingénieurs. Shom.
- Théorie de la marée École du Shom.
- Enseignement marée à l'ENSTA Bretagne.
- Histoire de l'hydrographie et de l'océanographie à l'UBO Brest.
- Cours MASTER 2 – Université Paris Diderot – Sciences de la Terre de l'Environnement et des Planètes.
- Cours en MASTER 2 de l'Observatoire de Paris : Spécialité : Astrophysique et dynamique des systèmes gravitationnels.
- Cours PPMD, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée.
- Cours Géodésie en 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année de l'ZSGT, Le Mans.
- Cours Géodésie en 1^{ère} année de l'ENSG, en commun avec les étudiants de l'ESGT, Le Mans.
- Cours de Mécanique Céleste pour étudiants de l'Observatoire de Paris, dans le cadre du LMD, (4^{ème} année) pour la période 2012-2016.
- Université Paul Sabatier, Master2 Techniques Spatiales et Instrumentation (TSI)
- Université de la Rochelle, Master-1 Sciences pour l'environnement, parcours « Gestion de l'environnement et écologie littorale ».
- Université Paris Diderot, Master-2 : Sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes, parcours « Systèmes spatiaux de navigation et géolocalisation ».
- EUROSAT Toulouse (filiale de l'ISAE et de l'ENSTA ParisTech) : Introduction à la géodésie, aux GNSS et à leurs usages.
- Master 2 « Dynamique des Systèmes gravitationnels de l'ED 127 « Astronomie et Astrophysique d'Ile de France », en géodésie spatiale (plus précisément Dynamique Orbitale).
- Master 2 « Imagerie et Modélisation Astrophysique et Géophysique, Espace et Environnement » de l'université de Nice (module « satellites »).
- Cours de Géodésie spatiale : en école d'ingénieur (INSA Strasbourg).
- enseignements dispensés à l'ESGT, Le Mans, sous forme de cours magistraux, travaux dirigés et travaux pratiques.
- Enseignement sous forme de projets à l'ESGT, Le Mans: Projets pluridisciplinaires (IG4) et projets préprofessionnels (IG5).
- Encadrement (autre que thèse et post-doctorat) à l'ESGT, Le Mans : Suivi des travaux de fin d'étude (TFE) et encadrement de stages (IG4, IG5).
- Cours général d'histoire de la terre » avec CM, TD en première année de sciences à l'UPF (L1) (Genèse de l'Univers, genèse de la Terre, l'évolution géologique de celle-ci, l'apparition de la vie, la fin de la biosphère, la fin du système solaire et la fin de l'univers).

- Cours en CM à l'Université d Wuhan sur les processus de moindre carrés et les problèmes inverses, niveau master M1.
- Mastère Spécialisé en Photogrammétrie, Positionnement et Mesure de Déformations (PPMD) de l'ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques). Titre du cours : les modèles globaux du champ de gravité.
- TD au Master 2 Recherche « Astronomie, Astrophysique et Ingénierie Spatiale » (AAIS), parcours « Dynamique des Systèmes Gravitationnels », de l'Observatoire de Paris.
- M2 TS SSNG cours de mécanique spatiale et orbitographie de précision, à l'UFE
- M2 TS SSNG travaux dirigés Orbitographie de précision, à l'UFE.

11.2. Ateliers

Le partage du savoir entre les équipes et la réflexion sur l'orientation des activités de recherche relèvent de l'action fédératrice du GRGS. A cet effet, le GRGS a organisé en 2015 un séminaire de deux jours sur le thème de « la géodésie millimétrique ». Ce séminaire s'est tenu à l'abbaye de Sorrèze (81) les 7-8 septembre 2015. 41 membres du GRGS et invités ont discuté sur quatre thèmes principaux :

- Techniques de mesures géodésiques (modérateur : P. Exertier)
- Mesures et modélisation orbitale (modérateur : F. Deleflie)
- Mesures et modélisation de propagation (modérateur : R. Biancale)
- Mesures et modélisation des surcharges et déformations (modérateur : J.-P. Boy)

Il s'en est suivi une liste de recommandations rapportée dans le chapitre 9 sur la prospective.

Il est à noter que le GRGS organise en mars 2017 à l'Université de Bordeaux un atelier sur le VLBI et prévoit d'organiser un second séminaire sur « la géodésie millimétrique » à l'automne 2017. La tenue de ce second séminaire sera discutée à la prochaine réunion du Conseil scientifique.

11.3. Ecoles d'été

Depuis 2002, le GRGS participe à des activités de formation par l'organisation d'Ecoles d'été, régulièrement tous les deux ans au début septembre. Ces Ecoles traitent des thèmes de la géodésie spatiale et accueillent jusqu'à une quarantaine de participants, étudiants ou actifs dans le domaine. Trois Ecoles d'été ont été organisées dans la mandature :

- 6ème Ecole, 1-5 septembre 2012 à l'HEIG/Yverdon-les-Bains sur la « Localisation précise par moyens spatiaux » ;
- 7ème Ecole, 6-10 septembre 2014 au CAES de Saint-Pierre d'Oléron sur l'« Altimétrie spatiale » ;
- 8ème Ecole, 5-9 septembre 2016 au CAES d'Aussois sur les « Trajectoires planétaires et interplanétaires ».

A chaque fois, ces Ecoles subventionnées par les organismes du GRGS ont été plébiscitées. Les cours de toutes les Ecoles sont mis à disposition sur le site web du GRGS et constituent dorénavant une base très complète des sujets de géodésie spatiale. Après 13 années et l'organisation de huit Ecoles, quasiment l'ensemble de la thématique géodésique a été abordée. Le sujet de l'Ecole 2018 sera discuté au sein du Conseil scientifique à l'automne 2017.

12 - ANNEXE

Personnel GRGS 2016 : liste et coordonnées par équipe

Directeur Exécutif : Richard Biancale (CNES, Tél. : 05 61 33 29 78)

1. Equipe GRGS, Centre National d'Etudes Spatiales

18, Avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9

Géodésie Spatiale (GS)

Personnel Permanent

| | | |
|----------------------|------------------------------|----------------|
| BALMINO Georges | balmino@get.omp.eu | 05 61 33 28 89 |
| BIANCALE Richard | Richard.Biancale@cnes.fr | 05 61 33 29 78 |
| BRUINSMA Sean | Sean.Bruinsma@cnes.fr | 05 61 33 28 41 |
| FAYARD Thierry | Thierry.Fayard@cnes.fr | 05 61 33 29 39 |
| LAURENT-VARIN Julien | Julien.Laurent-Varin@cnes.fr | 05 61 33 29 40 |
| LEMOINE Jean-Michel | Jean-Michel.Lemoine@cnes.fr | 05 61 33 28 94 |
| LESTARQUIT Laurent | Laurent.Lestarquit@cnes.fr | 05 61 33 30 85 |
| MARTY Jean-Charles | Jean-Charles.Marty@cnes.fr | 05 61 33 29 96 |
| PEROSANZ Félix | Felix.Perosanz@cnes.fr | 05 61 33 28 96 |
| REINQUIN Franck | Franck.Reinquin@cnes.fr | 05 61 33 28 91 |

LEGOS (LG)

Personnel permanent

| | | |
|-----------------------|-------------------------------|----------------|
| BERGE-NGUYEN Muriel | Muriel.Berge-Nguyen@cnes.fr | 05 61 33 29 75 |
| BLAZQUEZ Alejandro | Alejandro.Blazquez@cnes.fr | 05 61 33 29 23 |
| BLUMSTEIN Denis | Denis.Blumstein@cnes.fr | 05 61 33 30 44 |
| CAZENAVE Anny | Anny.Cazenave@legos.omp.eu | 05 61 33 29 22 |
| CRETAUX Jean-François | Jean-Francois.Cretaux@cnes.fr | 05 61 33 29 89 |
| MAISONGRANDE Philippe | Philippe.Maisongrande@cnes.fr | 05 61 33 28 76 |
| MEYSSIGNAC Benoît | Benoit.Meyssignac@cnes.fr | 05 61 33 29 90 |

2. Equipe GRGS, Institut National de l'Information Géographique et Forestière

LAREG – Université Paris-Diderot – Bât. Lamarck A – 5, Rue Thomas Mann – Case courrier 7011 – 75205 Paris Cedex 13

Personnel permanent

| | | |
|------------------------|----------------------------|----------------|
| ALTAMIMI Zuheir | zuheir.altamimi@ign.fr | 01 57 27 53 28 |
| BEILIN Jacques | jacques.beilin@ensg.eu | 01 64 15 31 09 |
| BOCK Olivier | Olivier.Bock@Ign.fr | 01 57 27 53 29 |
| COLLILIEUX Xavier | xavier.collilieux@ign.fr | 01 57 27 53 31 |
| COULOT David | david.coulot@ign.fr | 01 57 27 53 30 |
| JAMET Olivier | olivier.jamet@ign.fr | 01 57 27 53 38 |
| METIVIER Gwendoline | gwendoline.metivier@ign.fr | 01 57 27 53 35 |
| METIVIER Laurent | Laurent.Metivier@ign.fr | 01 57 27 53 32 |
| NAHMANI Samuel | samuel.nahmani@ign.fr | 01 57 27 53 23 |
| PANET-STORINO Isabelle | isabelle.panet@ign.fr | 01 57 27 53 34 |
| POLLET Arnaud | arnaud.pollet@ign.fr | 01 57 27 53 23 |
| REBISCHUNG Paul | Paul.Rebischung@ign.fr | 01 57 27 53 36 |
| SANDRI Thomas | thomas.sandri@ign.fr | 01 57 27 53 30 |

Doctorants et Post-Doc

| | | |
|-----------------|--------------------------|----------------|
| BENOIST Clément | clement.benoist@ign.fr | 01 57 27 53 26 |
| DAVID Leslie | leslie.david@ign.fr | 01 57 27 53 25 |
| LION Guillaume | guillaume.lion@obspm.fr | 01 57 27 84 85 |
| PARRACHO Ana | ana.parracho@etu.upmc.fr | 01 57 27 53 23 |

SGN - 73, Avenue de Paris - 94165 Saint Mandé Cedex

Fax : 01 43 98 84 50

Personnel permanent

| | | |
|----------------|-----------------------|----------------|
| GARAYT Bruno | bruno.garayat@ign.fr | 01 43 98 81 97 |
| PERSON Thierry | thierry.person@ign.fr | 01 43 98 83 26 |

3. Equipe GRGS, Observatoire de Paris

SYRTE (UMR 8630)

61, Avenue de l'Observatoire - 75014 Paris

Fax : 01 40 51 22 91

Personnel permanent

| | | |
|------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| BARACHE Christophe | christophe.barache@obspm.fr | 01 40 51 22 30 |
| BAUDOIN Pascale | pascale.baudoin@obspm.fr | 01 40 51 22 26 |
| BECKER Olivier | olivier.becker@obspm.fr | 01 40 51 22 11 |
| BIZOUARD Christian | christian.bizouard@obspm.fr | 01 40 51 23 35 |
| BONNEFOND Pascal | pascal.bonnefond@obspm.fr | 01 40 51 23 96 |
| BOUQUILLON Sébastien | sebastien.bouquillon@obspm.fr | 01 40 51 20 03 |
| CAPITAINE Nicole | nicole.capitaine@obspm.fr | 01 40 51 20 03 |
| CARLUCCI Teddy | teddy.carlucci@obspm.fr | 01 40 51 22 28 |
| DELVA Pacôme | pacome.delva@obspm.fr | 01 40 51 22 86 |
| FRANCOU Gérard | gerard.francou@obspm.fr | 01 40 51 22 30 |
| GAMBIS Daniel | daniel.gambis@obspm.fr | 01 40 51 22 29 |
| LAMBERT Sébastien | sebastien.lambert@obspm.fr | 01 40 51 22 30 |
| LAURENT Philippe | philippe.laurent@obspm.fr | 01 40 51 23 95 |
| LE PONCIN-LAFITTE Christophe | christophe.leponcin-lafitte@obspm.fr | 01 40 51 20 20 |
| RICHARD Jean-Yves | jean-yves.richard@obspm.fr | 01 40 51 23 67 |
| SOUCHAY Jean | jean.souchay@obspm.fr | 01 40 51 23 22 |
| TARIS François | francois.taris@obspm.fr | 01 40 51 21 17 |
| TEYSSANDIER Pierre | pierre.teyssandier@obspm.fr | 01 40 51 23 41 |
| WOLF Peter | Peter.wolf@obspm.fr | 01 40 51 23 24 |

Doctorants et Post-Doc

| | | |
|-----------------|--------------------------|----------------|
| BAILLIE Kevin | Kevin.baillie@obspm.fr | 01 40 51 22 72 |
| BOURGOIN Adrien | Adrien.bourgoin@obspm.fr | 01 40 51 22 11 |
| GATTANO César | Cesar.Gattano@obspm.fr | 01 40 51 22 11 |

IMCCE

77, Avenue Denfert Rochereau – 75014 Paris

Fax : 01 40 51 20 58

Personnel permanent

| | | |
|--------------------|----------------------------|----------------|
| BERTHIER Jérôme | berthier@obspm.fr | 01 40 51 22 61 |
| BOUE Gwenaël | gwenael.boue@obspm.fr | 01 40 51 20 35 |
| DAVID Pedro | david@obspm.fr | 01 40 51 22 80 |
| DELEFLIE Florent | florent.deleflie@obspm.fr | 01 40 51 22 74 |
| HESTROFFER Daniel | daniel.hestroffer@obspm.fr | 01 40 51 22 60 |
| LAINÉY Valéry | valery.lainey@obspm.fr | 01 40 51 22 72 |
| LASKAR Jacques | jacques.laskar@obspm.fr | 01 40 51 21 14 |
| MANCHE Hervé | herve.Manche@obspm.fr | 01 40 51 20 24 |
| MAQUET Lucie | lucie.maquet@obspm.fr | 01 40 51 21 59 |
| PATU Agnes | agnes.patu@obspm.fr | 01 40 51 21 32 |
| RAMBAUX Nicolas | nicolas.rambaux@obspm.fr | 01 40 51 22 63 |
| THUILLOT William | william.thuillot@obspm.fr | 01 40 51 22 62 |
| VAUBAILLON Jérémie | jeremie.vaubailon@obspm.fr | 01 40 51 22 64 |
| VIENNE Alain | alain.Vienne@obspm.fr | 03 20 52 44 24 |

4. Equipe GRGS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géosciences Azur

Bât. 4, 250 Rue Albert Einstein – Les Lucioles – Sophia Antipolis – 06560 Valbonne

Fax :

Personnel permanent

| | | |
|---------------------------|----------------------------------|----------------|
| AIMAR Mourad | mourad.aimar@oca.eu | 04 93 40 54 24 |
| ALBANESE Dominique | dominique.albanese@oca.eu | 04 93 40 54 91 |
| BARLIER François | francois.barlier@oca.eu | 04 83 61 85 46 |
| CHABE Julien | chabe@geoazur.unice.fr | 04 83 61 86 39 |
| COURDE Clément | clement.courde@oca.eu | 04 93 40 54 12 |
| EXERTIER Pierre | pierre.exertier@oca.eu | 04 83 61 85 82 |
| FIENGA Agnès | fienga@geoazur.unice.fr | 04 83 61 85 29 |
| KOVALEVSKY Jean | jean.kovalevsky@geoazur.unice.fr | 04 83 61 85 46 |
| LAURAIN Olivier | olivier.laurain@oca.eu | 04 83 61 85 45 |
| MARIEY Hervé | herve.mariey@oca.eu | 04 93 40 54 39 |
| MARTINOT-LAGARDE Grégoire | gregoire.martinot-lagarde@oca.eu | 04 93 40 54 11 |
| METRIS Gilles | gilles.metris@oca.eu | 04 83 61 85 56 |

| | | |
|------------------|-------------------------------|----------------|
| SAMAIN Etienne | etienne.samain@oca.eu | 04 93 40 54 29 |
| SESSON Laura | laura.sesson@geoazur.unice.fr | |
| TORRE Jean-Marie | jean-marie.torre@oca.eu | 04 93 40 54 27 |
| VIOT Hervé | herve.viot@oca.eu | 04 93 40 54 77 |

Doctorants et Post-Doc

| | | |
|--------------------|----------------------------------|----------------|
| BAGHI Quentin | quentin.baghi@geoazur.unice.fr | 04 83 61 85 69 |
| BELLI Alexandre | Alexandre.belli@geoazur.unice.fr | 04 83 61 85 66 |
| VISWANATHAN Vishnu | viswanathan@geoazur.unice.fr | 01 83 61 86 74 |

5. Equipe GRGS, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

13, Rue du Chatellier - CS 92803 - 29228 Brest Cedex 2

Fax : 02 98 22 17 45

Personnel permanent

| | | |
|----------------------------|------------------------------------|----------------|
| ANDRE Gael | gael.andre@shom.fr | 02 56 31 25 59 |
| DONATO Vincent | vincent.donato@shom.fr | 02 56 31 22 88 |
| JAN Gwenaële | gwenaele.jan@shom.fr | 02 56 31 23 29 |
| LALANCETTE Marie-Françoise | Marie-Francoise.lalancette@shom.fr | 02 56 31 23 85 |
| LEDU Pascal | ledu@shom.fr | 02 56 31 24 17 |
| LEGOUGE Raphael | raphael.legouge@shom.fr | 02 56 31 22 15 |
| LUCAS Sylvain | sylvain.lucas@shom.fr | 02 56 31 24 22 |
| MISSAULT Adélaïde | Adelaide.missault@shom.fr | 02 56 31 24 38 |
| POUVREAU Nicolas | nicolas.pouvreau@shom.fr | 02 56 31 24 26 |
| ROUXEL Didier | didier.rouxel@shom.fr | 02 56 31 25 39 |
| SALAUN Corinne | corinne.salaun@externes.shom.fr | 02 56 31 24 82 |
| TANGUY Yves-Marie | yves-marie.tanguy@shom.fr | 02 56 31 24 34 |
| VOINESON Guillaume | guillaume.voineson@shom.fr | 02 56 31 25 59 |
| WOPPELMANN Guy | guy.woppelmann@univ-lr.fr | 05 46 45 86 13 |

6. Equipe GRGS, Observatoire Midi-Pyrénées

14, avenue Edouard Belin – 31400 TOULOUSE

- LEGOS (UMR 5566)

Personnel permanent

| | | |
|------------------|------------------------------|----------------|
| CALMANT Stéphane | stephane.calmant@ird.fr | 05 61 33 29 37 |
| REMY Frédérique | frédérique.remy@legos.omp.eu | 05 61 33 29 58 |
| TESTUT Laurent | laurent.testut@legos.omp.eu | 05 61 33 27 85 |

- GET (UMR 5563)

Personnel permanent

| | | |
|---------------------|--------------------------------|----------------|
| BONVALOT Sylvain | sylvain.bonvalot@ird.fr | 05 61 33 28 80 |
| BRIAIS Anne | anne.briais@get.omp.eu | 05 61 33 29 07 |
| DARROZES José | jose.darrozes@get.omp.eu | 05 61 33 26 65 |
| FRAPPART Frédéric | frederic.frappart@get.omp.eu | 05 61 33 29 40 |
| GEGOUT Pascal | pascal.gegout@get.omp.eu | 05 61 33 28 93 |
| RAMILLIEN Guillaume | guillaume.ramillien@get.omp.eu | 05 61 33 29 30 |
| SANTAMARIA Alvaro | alvaro.santamaria@get.omp.eu | 05 61 33 46 16 |
| SEOANE Lucia | lucia.seoane@get.omp.eu | 05 61 33 47 04 |

Doctorants et Post-Docs

| | | |
|---------------------|-----------------------------|----------------|
| KATSIKIANNI Georgia | georgia.katsigianni@cnes.fr | 05 61 33 28 92 |
| ZOULIDA Myriam | myriam.zoulida@get.omp.eu | 05 61 33 47 52 |

Personnel GRGS 2016 : liste et statut par organismes

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES/DCT/SI)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|-----------------------|----------|------------------------|-----------|------------------------|
| BALMINO Georges | Dr. | Ingénieur Emérite/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| BERGE-NGUYEN Muriel | Mme | Ingénieur/CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| BIANCALE Richard | Dr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| BLAZQUEZ Alejandro | Dr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| BLUMSTEIN Denis | Dr. | Ingénieur CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| BRUINSMA Sean | Dr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| CAZENAVE Anny | Dr. Etat | Ingénieur Emérite/CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| CRETAUX Jean-François | Dr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| FAYARD Thierry | Mr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| LAURENT-VARIN Julien | Mr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| LEMOINE Jean-Michel | Mr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| LESTARQUIT Laurent | Mr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| MAISONGRANDE Philippe | Mr. | Ingénieur CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| MARTY Jean-Charles | Dr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| MENA Martine | Mme | Secrétaire/CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| MEYSSIGNAC Benoît | Mr. | Ingénieur CNES | DCT/SI/LG | CNES |
| PEROSANZ Félix | Dr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| REINQUIN Franck | Mr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |
| WAUTELET Gilles | Dr. | Ingénieur/CNES | DCT/SI/GS | CNES |

Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|------------------------|----------|---------------------------|--------|------------------------|
| ALTAMIMI Zuheir | Dr. Hab. | DR ITGCE | LAREG | IGN |
| BEILIN Jacques | Mr. | Ingénieur ITGCE | ENSG | IGN |
| BENOIST Clément | Mr. | Doctorant | LAREG | IGN |
| BOCK Olivier | Dr.Hab. | DR/Chercheurs équipements | LAREG | IGN |
| BOSSER Pierre | Dr. | CR ITGCE | LAREG | ENSTA |
| COLLILIEUX Xavier | Dr. | CR ITGCE | LAREG | IGN |
| COULOT David | Dr. | CR ITGCE | LAREG | IGN |
| DAVID Leslie | Melle | Doctorante | LAREG | IGN |
| GARAYT Bruno | Mr. | Ingénieur ITGCE | SGN | IGN |
| JAMET Olivier | Mr. | CR IPEF | LAREG | IGN |
| LION Guillaume | Mr. | Post-Doctorant | LAREG | OBSPM |
| METIVIER Gwendoline | Mme | CR Chercheurs Equipement | LAREG | IGN |
| METIVIER Laurent | Mr. | CR Chercheurs Equipement | LAREG | IGN |
| NAHMANI Samuel | Mr. | CR ITGCE | LAREG | IGN |
| PANET-STORINO Isabelle | Dr. | CR IPEF | LAREG | IGN |
| PARRACHO Ana | Melle | Doctorante | LAREG | IGN |

| | | | | |
|-----------------|-----|-----------------|-------|-----|
| PERSON Thierry | Mr. | Ingénieur ITGCE | SGN | IGN |
| POLLET Arnaud | Dr. | CR ITGCE | LAREG | IGN |
| REBISCHUNG Paul | Mr. | Ingénieur ITGCE | LAREG | IGN |
| SANDRI Thomas | Mr. | Ingénieur ITGCE | LAREG | IGN |

Observatoire de Paris (OP)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|----------------------------------|----------|-----------------------------------|--------|------------------------|
| BAILLIE Kevin | Dr. | Post-Doctorant | IMCCE | MESR |
| BARACHE Christophe | Mr. | IR1/CNRS | SYRTE | CNRS |
| BAUDOIN Pascale | Mme | Adjoint Administratif | SYRTE | MENRT |
| BECKER Olivier | Mr. | Technicien/MENRT | SYRTE | MENRT |
| BERTHIER Jérôme | Dr. | IR/CNRS | IMCCE | CNRS |
| BIZOUARD Christian | Dr. | Astronome Adjoint | SYRTE | CNAP |
| BONNEFOND Pascal | Dr. | Astronome en mission longue durée | SYRTE | CNAP |
| BOUQUILLON Sébastien | Dr. | Astronome Adjoint | SYRTE | CNAP |
| BOURGOIN Adrien | Mr. | Doctorant | SYRTE | UPMC |
| CAPITAINE Nicole | Dr. Hab. | Astronome Emérite | SYRTE | CNAP |
| CARLUCCI Teddy | Mr. | Assistant Ingénieur | SYRTE | MENRT |
| DAVID Pedro | Mr. | IE/CNRS | IMCCE | CNRS |
| DELEFLIE Florent | Dr. | Astronome adjoint | IMCCE | CNAP |
| DELVA Pacôme | Mme | Enseignant Chercheur | SYRTE | UPMC |
| FRANCOU Gérard | Mr. | Astronome Adjoint | SYRTE | CNAP |
| GAMBIS Daniel | Mr. | Astronome | SYRTE | CNAP |
| GATTANO César | Mr. | Doctorant | SYRTE | MENRT |
| HESTROFFER Daniel | Dr. | Astronome | IMCCE | CNAP |
| LAINÉY Valéry | Dr. | Astronome Adjoint | IMCCE | CNAP |
| LAMBERT Sébastien | Dr. | Astronome Adjoint | SYRTE | CNAP |
| LASKAR Jacques | Dr. | DR/CNRS | IMCCE | CNRS |
| LAURENT Philippe | Mr. | Ingénieur LNE | SYRTE | LNE |
| LE PONCIN LAFFITTE Christophe | Dr. | Astronome Adjoint | SYRTE | CNAP |
| MANCHE Hervé | Dr. | Ingénieur d'Etudes/CNRS | IMCCE | CNRS |
| MAQUET Lucie | Dr. | Astronome Adjoint | IMCCE | |
| PATU Agnès | Mme | Tech | IMCCE | MESR |
| RAMBAUX Nicolas | Dr. | Maître de conférence | IMCCE | MENRT |
| RICHARD Jean-Yves | Mr. | IR2/CNRS | SYRTE | CNRS |
| SOUCHAY Jean | Dr. | Astronome | SYRTE | CNAP |
| TARIS François | Mr. | Assistant Ingénieur | SYRTE | MENRT |
| TEYSSANDIER Pierre | Dr. | CR/CNRS associé | SYRTE | CNRS |
| THUILLOT William | Dr. | Astronome | IMCCE | CNAP |
| VAUBAILLON Jérémie | Dr. | Astronome adjoint | IMCCE | CNAP |
| VIENNE Alain | Dr. | Professeur des Universités | IMCCE | MENRT |
| WOLF Peter | Dr. | CR/CNRS | SYRTE | CNRS |

Observatoire de la Côte d'Azur (OCA)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|---------------------------|-------|---------------------------|---------|------------------------|
| AIMAR Mourad | Mr. | Technicien/MENRT | GEOAZUR | MENRT |
| ALBANESE Dominique | Mr. | Technicien/MENRT | GEOAZUR | MENRT |
| BAGHI Quentin | Mr. | Post-Doctorant | GEOAZUR | CNES/INSU |
| BARLIER François | Dr. | Astronome Émérite/CNAP | GEOAZUR | CNAP |
| BELLI Alexandre | Mr. | Doctorant | GEOAZUR | CNRS |
| CHABE Julien | Dr. | Astronome adjoint | GEOAZUR | MENRT |
| COURDE Clément | Mr. | CDD/IR | GEOAZUR | CNRS |
| EXERTIER Pierre | Dr. | DR/CNRS | GEOAZUR | CNRS |
| FIENGA Agnès | Mme | Astronome Adjoint | GEOAZUR | MENRT |
| KOVALEVSKY | Dr. | Astronome Émérite/CNAP | GEOAZUR | CNAP |
| LAURAIN Olivier | Mr. | IE/MENRT | GEOAZUR | MENRT |
| MARIEY Hervé | Mr. | Technicien/MENRT | GEOAZUR | MENRT |
| MARTINOT-LAGARDE Gregoire | Mr. | IR/CNRS | GEOAZUR | CNRS |
| METRIS Gilles | Dr. | Astronome/CNAP | GEOAZUR | CNAP |
| SAMAIN Etienne | Dr. | IR/CNRS | GEOAZUR | CNRS |
| SESSON Laura | Melle | Ingénieur CDD | GEOAZUR | CNES/INSU |
| TORRE Jean-Marie | Mr. | IR/MENRT | GEOAZUR | MENRT |
| VIOT Hervé | Mr. | IE/MENRT | GEOAZUR | MENRT |
| VISHWANATHAN Vishnu | Mr. | Doctorant | GEOAZUR | MENRT |

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|--|-------|---|------------------------------------|------------------------|
| ANDRE Gael | Mr. | Ingénieur Contractuel du Ministère de la Défense | DOPS/MIP/HydroDy namiqueCotière | SHOM |
| DONATO Vincent | Mr. | Ingénieur d'Etudes et Techniques d'Armement | DOPS/HOM/MAC | SHOM |
| JAN Gwenaële | Dr. | Ingénieur Contractuel du Ministère de la Défense | DOPS/MIP/HydroDy namiqueCotière | SHOM |
| LEQUENTREC-LALANCETTE Marie-Françoise | Dr. | Ingénieur Contractuel du Ministère de la Défense | DOPS/HOM/REC- CFuD/Géophysique | SHOM |
| LEDU Pascal | Mr. | Technicien Supérieur d'Etudes et Fabrication (TSEF) | DOPS/MIP/HydroDy namiqueCotière | SHOM |
| LEGOUGE Raphael | Mr. | Ingénieur d'Etudes et Techniques d'Armement | DOPS/HOM/REC- CFuD/Géophysique | SHOM |
| LUCAS Sylvain | Mr. | Ingénieur d'Etudes et Fabrication (IEF) | DGMS/IES/ISE | SHOM |
| MISSAULT Adélaïde | Melle | Ingénieur d'Etudes et Techniques d'Arment | DMGS/IES/ISE | SHOM |
| POUVREAU Nicolas | Dr. | Ingénieur Contractuel du Ministère de la Défense | DOPS/MIP/HydroDy namiqueCotière | SHOM |
| ROUXEL Didier | Mr. | Ingénieur Contractuel du Ministère de la Défense | DOPS/HOM/REC- CFuD/Géophysique | SHOM |
| SALAUN Corinne | Mrs. | Ingénieur contractuel CNRS | DOPS/HOM/REC- CFuD/Géophysique | IUEM |
| TANGUY Yves-Marie | Mr. | Ingénieur Principal d'Etudes et Fabrication (IEF) | DOPS/MIP/BATHY/ LITTO3D | SHOM |
| VOINESON Guillaume | Mr. | Ingénieur d'Etudes et | DOPS/MIP/HydroDy | SHOM |

| | | | | |
|----------------|-----|-----------------------|----------------|-------|
| | | Techniques d'Armement | namiqueCotière | |
| WOPPELMANN Guy | Dr. | Maître de conférence | SHOM | MENRT |

Observatoire Midi-Pyrénées (OMP)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|---------------------|-------|----------------------|----------------|------------------------|
| BONVALOT Sylvain | Mr. | DR/IRD | BGI/OMP | IRD |
| BRIAIS Anne | Mme | CR1/CNRS | UMR 5563/GET | CNRS |
| CALMANT Stéphane | Mr. | DR2/IRD | UMR 5566/LEGOS | IRD |
| DARROZES José | Mr. | Enseignant Chercheur | UMR 5563/GET | OMP |
| FRAPPART Frédéric | Mr. | Physicien Adjoint | UMR 5563/GET | CNAP |
| GEGOUT Pascal | Dr. | CR1/CNRS | UMR 5563/GET | CNRS |
| KATSIGIANNI Georgia | Mme | Doctorante | UMR/5536/GET | CNES |
| LEGRESY Benoit | Dr. | CR1/CNRS | UMR 5566/LEGOS | CNRS |
| LESTIEU Nicole | Mme | TCE/CNRS | UMR 5563/GET | CNRS |
| RAMILLIEN Guillaume | Dr. | CR1/CNRS | UMR 5563/GET | CNRS |
| REMY Frédérique | Dr. | DR2/CNRS | UMR 5566/LEGOS | CNRS |
| ROUSSEL Nicolas | Mr. | Doctorant | UMR 5563/GET | OMP |
| SANTAMARIA Alvaro | Mr. | Physicien Adjoint | UMR/5563/GET | CNAP |
| SEOANE Lucia | Dr. | Physicien Adjoint | UMR 5563/GET | CNAP |
| TESTUT Laurent | Mr. | Physicien Adjoint | UMR 5566/LEGOS | CNAP |
| ZOULIDA Myriam | Mme | Doctorante | UMR/5536/GET | OMP |

Université de Polynésie Française (UPF)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|---------------------|----------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| BARRIOT Jean-Pierre | Dr. Hab. | Professeur des Universités | Observatoire Géodésique de Tahiti | MENRT |
| SICHOIX Lydie | Melle | Maître de Conférence | Observatoire Géodésique de Tahiti | MENRT |
| VERSCHELLE Youri | Mr. | Technicien Electronicien/MENRT | Observatoire Géodésique de Tahiti | CNES |
| VOTA Yannick | Mr. | Technicien Electronicien/MENRT | Observatoire Géodésique de Tahiti | MENRT |

Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|----------------------|-------|----------------------|----------|------------------------|
| CALI José | Mr. | Maître de Conférence | ESGT/L2G | MENRT |
| DURAND Frédéric | Mr. | Ingénieur | ESGT/L2G | MENRT |
| DURAND Stéphane | Mr. | Maître de Conférence | ESGT/L2G | MENRT |
| MOREL Laurent | Mr. | Maître de Conférence | ESGT/L2G | MENRT |
| NICOLAS-DUROY Joelle | Mme | Maître de Conférence | ESGT/L2G | MENRT |
| ROUSSEL Clément | Mr. | Doctorant | ESGT/L2G | DGA/Pays de la Loire |
| SIMONETTO Elisabeth | Mme | Maître de Conférence | ESGT/L2G | MENRT |
| VERDUN Jérôme | Dr. | Maître de Conférence | ESGT/L2G | MENRT |

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST)

| Nom, P. | Titre | Corps | Equipe | Organisme rattachement |
|----------------------|-------|--------------------------|--|------------------------|
| BOY Jean-Paul | Mr. | Physicien Adjoint | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNAP |
| CHAMBODUT Aude | Mme | Physicien Adjoint | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNAP |
| DOUBRE Cécile | Mme | Physicien Adjoint | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNAP |
| FERHAT Gilbert | Dr. | Maître de Conférence | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| HENRION Eric | Mr. | Doctorant | IPGS/Dynamique et déformation active | MENRT |
| HINDERER Jacques | Mr. | DR/CNRS | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNRS |
| KALI Elise | Mme | Ingénieur Recherche/CNRS | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNRS |
| LEGROS Hilaire | Prof. | Professeur émérite | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| MAJSTOROVIC Josipa | Mme | Doctorante | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| MALET Jean-Philippe | Mr. | CR/CNRS | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNRS |
| MASSON Frédéric | Prof. | Professeur | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| MEGHRAOUI Mustapha | Mr. | Physicien | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNAP |
| MODESTE Guillaume | Mr. | Doctorant | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| PORTIER Nolwenn | Mme | Doctorante | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| REMAITRE Alexandre | Mr. | Maître de Conférence | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| ROGISTER Yves | Mr. | Maître de Conférence | IPGS/Dynamique globale et déformation active | MENRT |
| ROSAT Séverine | Mme | CR/CNRS | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNRS |
| ULRICH Patrice | Mr. | AI/CNRS | IPGS/Electronique | CNRS |
| VAN DER WOERD Jérôme | Mr. | CR/CNRS | IPGS/Dynamique globale et déformation active | CNRS |