



## Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale

Bureau des Longitudes

Centre National d'Etudes Spatiales

Observatoire de Paris

Institut Géographique National

Institut National des Sciences de l'Univers

Observatoire de la Côte d'Azur

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Observatoire Midi-Pyrénées

Université de Polynésie Française

Conservatoire National des Arts et Métiers

# Rapport d'Activité 2008

Avril 2009

Présenté par

**Nicole CAPITAINE**

Présidente du Conseil Scientifique

**Richard BIANCALE**

Directeur Exécutif

Réalisation technique: Christine Julienne (Géosciences Azur, OCA), Olivier Becker (SYRTE, OP)

# SOMMAIRE

## *Rédacteurs*

Avant-propos

*R. Biancale, N. Capitaine*

A - DONNÉES ADMINISTRATIVES

*R. Biancale, N. Capitaine*

B - EXPÉRIENCES ET TRAVAUX

### **1. TÉLÉMÉTRIE LASER**

1.1. Station laser ultra mobile (FTLRS)

*F. Pierron*

1.2. Stations laser fixes

*P. Exertier, E. Samain, J.P. Barriot*

1.3. Analyse des données Laser-Lune

*G. Francou*

### **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

*R. Biancale*

2.2.2 Altimétrie Haute résolution

*M.-F. Lalancette*

2.2.3 Gravimétrie de surface

*O. Jamet*

2.2.4 Bureau Gravimétrique International

*S. Bonvalot*

### **3. SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE**

3.1. Systèmes de référence et rotation de la Terre

3.1.1. Système céleste (ICRS)

*J. Souchay*

3.1.2. Rotation de la Terre

*D. Gambis*

3.1.3. Repère international de référence terrestre (ITRF)

*Z. Altamimi*

3.1.4. Centre de combinaison

*D. Gambis*

3.1.5. Aspects théoriques

*N. Capitaine*

3.2. Apport des mesures géodésiques

3.2.1. DORIS

*P. Willis*

3.2.2. Laser

*P. Exertier*

3.2.3. GNSS

*F. Perosanz*

3.2.4. VLBI

*A.M. Gontier*

3.2.5. Marégraphie

*R. Créach, L. Testut, G. Wöppelmann*

### **4. OCÉANS, HYDROLOGIE GLOBALE**

4.1. Altimétrie spatiale

4.1.1. Variations du niveau des océans

*A. Cazenave*

4.1.2. Etalonnages

*P. Bonnefond*

4.1.3. Hydrologie spatiale

*A. Cazenave, J-F. Cretaux*

4.2. Phénomènes côtiers

*L. Pineau-Guillou*

4.3. Glaces

*F. Rémy*

### **5. GEODESIE PLANETAIRE**

5.1. Champ de Gravité Martien

*J.C. Marty*

5.2. Missions Système Solaire

*J.P. Barriot*

**6. PHYSIQUE FONDAMENTALE / ETUDE DE L'UNIVERS**

- 6.1. Test du principe d'équivalence
- 6.2. Transfert de temps par lien laser
- 6.3. Effet Pioneer

*G. Métris*  
*E. Samain, P. Exertier*  
*G. Metris*

**7. DIFFUSION DE L'INFORMATION**

- 7.1. Observatoire virtuel
- 7.2. Services scientifiques internationaux

*F. Deleflie*  
*D. Gambis*

**C – AUTRES ACTIVITES GRGS**

- 1. Réunion ouverte du conseil scientifique du GRGS
- 2. Ecole d'été du GRGS

*N. Capitaine*  
*G. Metris, N. Capitaine*

ANNEXE : Liste et coordonnées du personnel GRGS 2008

## AVANT-PROPOS

Le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS), fondé en 1971, fonctionne actuellement selon un protocole signé entre les dix organismes suivants : Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Institut Géographique National (IGN), Observatoire de Paris (OP), Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), Université de Polynésie Française (UPF), Bureau des longitudes (BdL), Institut National des Sciences de l'Univers (INSU/CNRS) et Conservatoire National des Arts et Métiers. Le Comité Directeur du GRGS est constitué de l'ensemble des Directeurs/Présidents de ces organismes.

Le but du GRGS est de fédérer les activités de géodésie spatiale en France et développer les coopérations internationales dans ce domaine. Selon la charte d'organisation du GRGS, le Directeur exécutif dispose d'un Bureau Exécutif chargé de préciser la mise en œuvre matérielle des décisions du Comité Directeur (constitué par les Directeurs ou Présidents des organismes qui composent le GRGS) et d'un Conseil Scientifique chargé de coordonner les activités scientifiques du GRGS.

Le Groupe d'évaluation scientifique (GES) du GRGS s'est réuni en février 2008 et a fourni un rapport d'évaluation destiné au Comité directeur du GRGS, dont les conclusions et recommandations ont été les suivantes :

- *Le GRGS est une structure qui a fait ses preuves et fonctionne bien. Toutefois, les interrogations récurrentes sur son rôle montrent que l'équipe de direction et le CS doivent rechercher les moyens de mieux faire connaître le GRGS. Des suggestions sont par exemple une diffusion large du rapport d'activité, des invitations étendues pour les écoles d'été du GRGS et la journée scientifique ouverte, une plus forte implication des membres extérieurs du CS, une lettre électronique périodique, un site web vivant.*
- *Le RA quadriennal fourni pour l'évaluation du GRGS doit être amélioré afin de le rendre plus informatif et plus attrayant; il devrait en particulier mettre en valeur les synergies scientifiques et techniques qui font la force du GRGS avec un plan structuré autour des équipes.*
- *Le GRGS doit mettre à niveau son site web, améliorer les informations, la navigation et les liens.*
- *Le rapport quadriennal du GRGS doit inclure la prospective du GRGS, en particulier sur l'évolution du thème scientifique, des moyens techniques, des enjeux majeurs à court terme, et du positionnement du GRGS dans le contexte international.*
- *Le rapport quadriennal doit fournir l'information des besoins en personnel nécessaire afin de donner un message aux tutelles pour dégager les priorités après discussion au CS.*
- *Le GRGS doit continuer et améliorer la publicité des activités de formation (ex : Ecole du GRGS).*
- *La part du GRGS dans les publications internationales doit être améliorée, ainsi que le rang pris par ses membres dans la signature des publications travaux de longue haleine.*

Le GES a par ailleurs rappelé la définition plus stricte de la notion d'équipe du GRGS et de leur composition.

Le Comité Directeur du GRGS a pris acte le 29 mai 2008 du rapport du Groupe d'Evaluation Scientifique et a entériné la proposition faite de la nouvelle équipe dirigeante pour la période quadriennale 2008-2012. Le Comité Exécutif et le Conseil Scientifique ont été renouvelés pour 4 ans, les nouveaux conseils devenant opérationnels en novembre 2008.

L'équipe de direction et les conseils du GRGS ont pour mission de mettre en oeuvre les recommandations du GES et de faire en sorte que le GRGS demeure un groupe vivant, reconnu et considéré scientifiquement qui conserve une place de choix dans l'environnement géodésique français et aussi international. Pour atteindre ce but et tenir compte au mieux des recommandations du Groupe d'évaluation scientifique, l'équipe de direction a en particulier prévu les actions suivantes :

- Moderniser et actualiser le site web ;
- Cibler et renforcer les pôles d'excellence des équipes ;
- Assurer la coordination des travaux entre les équipes, de l'élaboration du rapport annuel et des propositions de programmes de recherche (selon la charte établie) ;
- Participer aux activités et services internationaux (techniques spatiales, BGI, IERS...)
- Veiller à l'attribution adéquate des moyens (financiers et en personnel) en fonction des expériences, projets et travaux avalisés
- Développer/maintenir les coopérations extérieures (GFZ, ORB...)
- Pérenniser l'Ecole d'Eté du GRGS, les années paires (actuellement sur le site IGN de Forcalquier).
- Organiser une réunion générale des équipes GRGS, les années impaires (en alternance sur les sites des équipes), dédiée aux bilan, prospective et coopération.

La partie A de ce rapport d'activité donne la composition 2008 nouvelle des conseils du GRGS et fournit des éléments d'information sur le personnel et le budget 2008. La liste complète du personnel est donnée en Annexe.

Les activités du GRGS, résumées dans la partie B du rapport d'activités, résultent de coopérations entre les différentes équipes du GRGS. Le rapport, présenté par thèmes scientifiques, comporte des contributions à la géodésie spatiale au niveau des observations, du traitement de données, de la modélisation et de la théorie.

La partie C du rapport donne un résumé de la réunion scientifique GRGS 2008, traditionnellement organisée après la réunion annuelle du Conseil scientifique, ainsi que de l'Ecole d'été 2008 du GRGS, qui s'est tenue à Forcalquier en septembre 2008 et a été consacrée aux « Interactions en géodésie spatiale : vers une compréhension globale de la Terre ».

L'année 2008, « Année internationale de la Planète Terre », a été marquée par le succès de projets GRGS résultant d'efforts déployés pendant plusieurs années. On peut noter l'appartenance dorénavant officielle du GRGS à l'ensemble des services internationaux géodésiques, les campagnes d'observations réussies de la station laser ultra-mobile en Tasmanie, le redémarrage de l'activité laser au plateau de Calern, les premières acquisitions de l'instrument T2L2, etc.

Par ailleurs, on peut noter le développement en cours d'un nouveau site web (qui ouvrira courant 2009 et rassemblera les informations marquantes du GRGS), ainsi que la modernisation du logo.

Suivant le cycle adopté en 2004, le rapport 2008 résume les progrès et les résultats obtenus depuis la fin 2007, en se limitant aux faits marquants et aux nouvelles publications. Tous les quatre ans, un rapport plus détaillé sert de base à l'examen quadriennal par le Groupe d'évaluation scientifique. Les travaux et les expériences en cours décrites dans le présent rapport seront examinés par le Conseil Scientifique du GRGS lors de sa réunion annuelle en avril 2009. Ce Conseil discutera également de la prospective et des avancées scientifiques pouvant concerner directement ou indirectement le GRGS. Un bilan sera présenté au Comité Directeur en mai 2009.

*L'équipe de direction*  
N. Capitaine, R. Biancale

# TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES .....	7
<b>A - DONNÉES ADMINISTRATIVES.....</b>	<b>9</b>
ORGANISMES MEMBRES COMITÉ DIRECTEUR et STRUCTURE (en 2008).....	11
<b>B - EXPÉRIENCES ET TRAVAUX.....</b>	<b>15</b>
<b>1. TELEMETRIE LASER</b>	<b>17</b>
1.1. STATION LASER ULTRA-MOBILE (FTLRS) .....	19
1.2. STATIONS LASER FIXES .....	22
1.3. ANALYSE DES DONNÉES LASER-LUNE .....	28
<b>2. MECANIQUE ORBITALE ET CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE</b>	<b>31</b>
2.1 MECANIQUE ORBITALE.....	33
2.2.1. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Missions spatiales .....	37
2.2.2. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Altimétrie Haute Résolution.....	40
2.2.3. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Gravimétrie de surface .....	42
2.2.4. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Bureau Gravimétrie International .....	43
<b>3. SYSTEMES DE REFERENCE</b>	<b>51</b>
3.1. SYSTEMES DE REFERENCE ET ROTATION DE LA TERRE .....	53
3.2.1. APPORT DES MESURES GEODESIQUES : DORIS .....	64
3.2.2. APPORT DES MESURES GEODESIQUES : Laser .....	68
3.2.3. APPORT DES MESURES GEODESIQUES : GNSS .....	71
3.2.4 APPORT DES MESURES GEODESIQUES : VLBI.....	75
3.2.5 APPORT DES MESURES GEODESIQUES : Marégraphie .....	79
<b>4. OCEANS, HYDROLOGIE GLOBALE</b>	<b>85</b>
4.1.1. ALTIMETRIE SPATIALE : Variations du niveau des océans.....	87
4.1.2. ALTIMETRIE SPATIALE : Etalonnages.....	93
4.1.3. ALTIMETRIE SPATIALE : Hydrologie spatiale .....	96
4.2. PHENOMENES COTIERS.....	107
4.3. GLACES.....	112
<b>5. GEODESIE PLANETAIRE</b>	<b>115</b>
5.1. CHAMP DE GRAVITE MARTIEN .....	117
5.2. MISSIONS SYSTEME SOLAIRE.....	118
<b>6. PHYSIQUE FONDAMENTALE/ETUDE DE L'UNIVERS</b>	<b>119</b>
6.1. TEST DU PRINCIPE D'EQUIVALENCE.....	121
6.2. TRANSFERT DE TEMPS PAR LIEN LASER.....	123
6.3. ANOMALIE PIONEER.....	127
<b>7. DIFFUSION DE L'INFORMATION</b>	<b>129</b>
7.1. OBSERVATOIRE VIRTUEL.....	131
7.2. SERVICES SCIENTIFIQUES INTERNATIONAUX .....	134
<b>C - AUTRES ACTIVITES GRGS .....</b>	<b>137</b>
Réunion ouverte du conseil scientifique du GRGS.....	139
Ecole d'été du GRGS.....	141
<b>D - ANNEXE.....</b>	<b>143</b>



**A - DONNÉES ADMINISTRATIVES**



<p style="text-align: center;"><b>ORGANISMES MEMBRES</b> <b>COMITÉ DIRECTEUR et STRUCTURE</b> <b>(en 2008)</b></p>
--

## 1. Organismes membres

Bureau des Longitudes :	BdL
Centre National d'Etudes Spatiales :	CNES
Observatoire de Paris :	OP
Institut Géographique National :	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

## 2. Comité Directeur

### 2.1. Membres des organismes

A. Lebeau	: Président, BdL
Y. D'Escatha	: Président Directeur Général, CNES
D. Egret	: Président, OP
P. Parisé	: Directeur Général, IGN
D. Le Queau	: Directeur, INSU
F. Vakili	: Directeur, OCA
G. Bessero	: Directeur, SHOM
B. Dupré	: Directeur, OMP
L. Peltzer	: Présidente de l'Université de Polynésie Française, UPF
L. Polidori	: CNAM-ESGT

### 2.2. Membres de droit

R. Biancale	: Directeur Exécutif, GRGS
N. Capitaine	: Président du Conseil, GRGS

## 3. Bureau Exécutif

Directeur Exécutif	M. R. BIANCALE
Présidente du Conseil du GRGS	Mme N. CAPITAIN (GRGS/BdL)
GRGS/CNES	M. Ph. MAISONGRANDE
GRGS/OP	M. D. GAMBIS
GRGS/IGN	M. O. JAMET
GRGS/OCA	M. P. EXERTIER
GRGS/SHOM	Mme M.F. LALANCETTE
GRGS/OMP	M. A. RIGO
GRGS/UPF	M. J.P. BARRIOT
GRGS/ESGT	Mme J. NICOLAS-DUROY

## 4. Conseil Scientifique

Président

Mme N. CAPITAINE

### 4.1. Membres

BdL :	Mme N. CAPITAINE*
CNES :	M. S. HOSFORD
	M. S. BRUINSMA
	M. Ph. MAISONGRANDE*
OP :	M. D. GAMBIS*
	Mme A.M. GONTIER
IGN :	M. Z. ALTAMIMI
	M. P. WILLIS
INSU :	M. B. GOFFE
OCA :	M. P. EXERTIER*
	M. F. DELEFLIE
SHOM :	Mme M.F. LALANCETTE*
	Mme L. PINEAU-GUILLOU
OMP :	Mme A. BRIAIS
	M. S. BONVALOT
UPF :	M. J.P. BARRIOT*
ESGT :	Mme J. NICOLAS-DUROY

### 4.2. Membres de droit

Directeur Exécutif

M. R. BIANCALE\*

\* *Membres du Bureau Exécutif*

### 4.3. Membres extérieurs

M. P. CHARLOT	(Observatoire de Bordeaux)
M. J. BENVENISTE	(ESA/ESRIN - Italie)
M. M. DIAMENT	(IPGP)

## 5. Comité WEB

CNES :	Mme M.C. GENNERO
OP :	M. C. BIZOUARD
IGN :	M. X. COLLILIEUX
OCA :	Mme Ch. JULIENNE
OMP :	Mme A. BRIAIS
SHOM :	M. D. ROUXEL
UPF :	M. J.P. BARRIOT
ESGT :	Mme J. NICOLAS-DUROY

## 6. Groupe d'Evaluation Scientifique

Le Groupe d'Evaluation Scientifique (GES) de la mandature 2004-2008 était constitué de :

### 6.1. Personnalités scientifiques extérieures (membres également pour la période 2008-2012)

Véronique Dehant : Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles, Belgique

François Mignard : Observatoire de la Côte d'Azur (Président)

Christophe Sotin : Université de Bretagne Sud, Nantes et Jet Propulsion Laboratory (USA)

### 6.2. Représentants d'instances nationales d'évaluation (pour la période 2004-2008)

Section 17 : Christophe SOTIN

Section 18 : Gautier HULOT (Institut de Physique du Globe de Paris)

Section 19: Guy DELRIEU (Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble)

## 7. Budget et personnel

### 7.1. Personnel

Le personnel des équipes GRGS a été redéfini à l'occasion du nouveau protocole d'accord sur le GRGS signé par les divers partenaires le 26-01-2004. La liste est mise à jour annuellement par le Bureau Exécutif en étroite collaboration avec les représentants des équipes au sein de ce bureau.

Le personnel mis à disposition du GRGS, à temps complet ou partiel, s'élevait, fin 2008 à 100 personnes environ.

Le tableau ci-après détaille la répartition par organisme et qualification, à cette date (voir en annexe la liste et les coordonnées du personnel GRGS par équipe au 31/12/2008).

Organisme	CNES	OP	IGN	OCA	SHOM	OMP <sup>1</sup>	UPF	ESGT	Total
Qualification									
<b>Chercheurs</b>	12	10	17	4	5	10	1	5	64
<b>Ingénieurs, Tech.</b>	5	3	0	8	4	0			20
<b>Administratifs</b>	1	1	1	1		1			5
<b>Thésards</b>	0	3	5	0	1			2	11
<b>Post-Doc</b>	1								1
<b>Total</b>	19	17	23	13	10	11	1	7	101

### 7.2. Budget

Le CNES met annuellement en place, pour le GRGS, des crédits dans le cadre d'une convention passée avec l'INSU.

Les crédits se décomposent comme suit (HT) pour 2008 :

- Matériel :	155,4 k€
- Vacances :	8,0 k€
- Missions :	146,2 k€
<b>Total :</b>	<b>309,6 k€</b>



**B - EXPÉRIENCES ET TRAVAUX**



# 1. TÉLÉMÉTRIE LASER

1.1. Station laser ultra-mobile (FTLRS)

1.2. Stations laser fixes

1.3. Analyse des données Laser-Lune



## 1.1. STATION LASER ULTRA-MOBILE (FTLRS)

### 1. Introduction

La Station Laser Ultra Mobile (ou FTLRS pour French Transportable Laser Ranging Station) reste à cette date la plus petite station de télémétrie laser opérationnelle au monde.

Développée à l'OCA en 1994/96 en collaboration avec le CNES, l'IGN et l'INSU, cette station est destinée à l'installation rapide pour des campagnes limitées dans le temps en des sites appropriés pour des observations géodésiques, pour répondre à des besoins de mesures sur des sites isolés. Elle a plus particulièrement été développée pour participer aux expériences de validation des orbites et d'étalonnage des altimètres embarqués (CAL/VAL) sur des satellites océanographiques tels que TOPEX/POSEIDON, JASON-1, ERS et ENVISAT et à des expériences de co-localisations géodésiques.

Les programmes de recherches associés à cet instrument ont donc essentiellement rapport avec l'orbitographie et le positionnement de très haute précision.

### 2. Campagne en Tasmanie (novembre 2007-Avril 2008)

A la suite de l'appel international à collaboration pour l'implication de la station Laser Ultra Mobile dans des projets scientifiques émis par le GRGS en 2005, nos collègues de l'université de Canberra et de Hobart, impliqués déjà depuis plusieurs années dans des opérations océanographiques liées aux programmes scientifiques menés sur Jason1, ont demandé et obtenu de la part du gouvernement Australien des financements permettant d'envisager un partenariat pour monter un projet.

Ce projet s'insère dans le cadre d'une expertise développée par nos collègues de Hobart et permettra de compléter par des mesures laser le site d'étalonnage multitechnique Jason mis en place entre Melbourne et Burnie depuis quelques années à l'aide de marégraphes, récepteurs GPS et campagnes de bouée permettant de modéliser le géoïde.

Dans ce contexte, notre apport a comporté deux volets :

- une campagne "Station Mobile" de 5 mois en Tasmanie sur ce site d'étalonnage au Nord de Hobart de novembre 2007 à Avril 2008,
- une collaboration scientifique d'exploitation des données intégrées dans les opérations de calibration/validation menées par le groupe de Grasse depuis plusieurs années.

Le financement global de l'opération a été assuré en très grande partie par le ministère Australien et en particulier toute la logistique et



Fig. 1 : Station Laser mobile en opération à Burnie

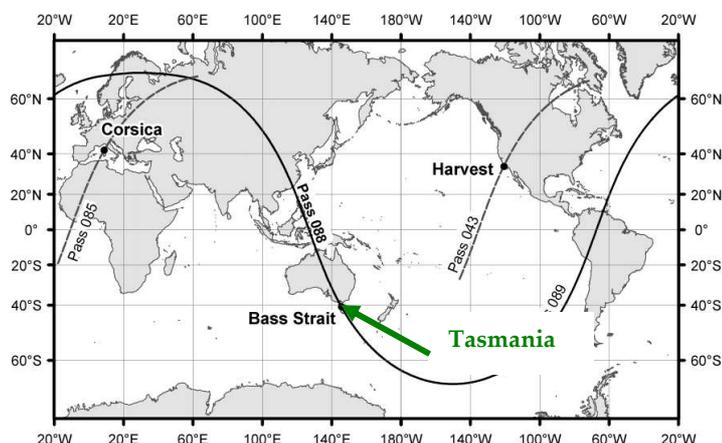


Fig. 2 : Orbite de Jason1 et sites de calibration.

les frais de missions de l'équipe Grassoise avec deux permanents sur place pour les opérations. Un budget de soutien pour préparation technologique de la station correspondant à environ 20% de l'opération complète est assurée par le CNES/GRGS.

Environ huit personnes de l'OCA et un géomètre IGN sont impliqués dans cette opération qui voit la station mobile sortir de France pour la première fois avec toutes les difficultés logistiques liées au transport, à l'éloignement et aux décalages horaires compliquant l'exploitation quotidienne.

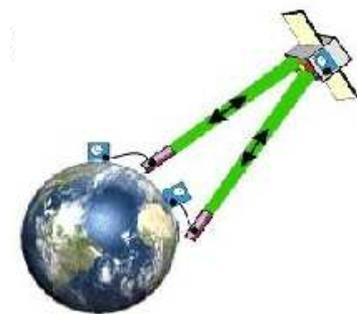
### 3. Premières mesures sur Jason2, validation du segment spatial T2L2

Dès le retour de la station Mobile de Tasmanie (fin Avril 2008), une amélioration majeure a été apportée sur ce système avec l'implémentation d'un ensemble de datation de très haute précision.

Ces dateurs fabriqués par Dassault et interfacés avec la station par des logiciels et des modules électroniques développés en interne permettent en particulier pour l'expérience de transfert de temps T2L2 d'obtenir les dates de tir et de détection retour avec une précision de la picoseconde.

En fait dans un système standard de télémétrie laser, la date de tir nécessite une résolution de 100 ns et seul le temps d'aller-retour doit avoir cette résolution à la picoseconde. Pour effectuer du transfert de temps par lien laser, toutes les dates (sol et espace) doivent être enregistrées au plus haut niveau de précision et c'est dans cette configuration que les toutes premières mesures sur Jason2 ont été effectuées de l'Observatoire de Calern par la station Laser UltraMobile fin juin 2008.

A la suite de ces tirs de validation fin juin 2008, la station mobile a été transportée puis installée à nouveau à Ajaccio, où pendant 6 mois les mesures ont continué.



### 4. Campagne à Ajaccio dans le cadre de la calibration Jason 1/Jason2



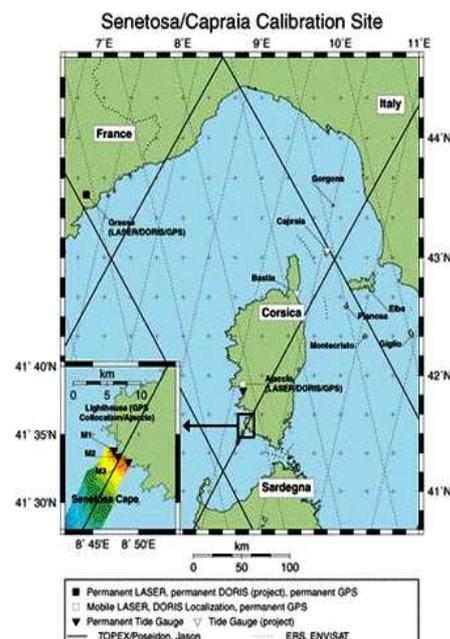
En 2008, la station Laser Ultra Mobile a effectué une campagne de 6 mois sur le site d'Ajaccio pour la quatrième fois (1996, 2002, 2005 pour les occupations précédentes). Ce déplacement s'insère dans le cadre scientifique de l'étalonnage des altimètres radars installés sur Jason1/Jason2 et de leur inter-calibration avec l'utilisation sur site d'une instrumentation en place depuis quelques années déjà (GPS, marégraphes, ...)

Fig.3 : La Station Laser Ultra Mobile – Ajaccio 2008

Les opérations ont débuté en juillet 2008 pour s'achever mi-décembre avec deux phases :

- de juillet à septembre où seuls les passages de calibration tous les dix jours ont été observés avec un très bon taux de réussite (90%)
- de fin septembre à mi décembre avec la présence permanente d'une équipe de deux personnes sur place pour assurer 24h/24 et 7 jours/7 les observations sur les huit satellites sélectionnés pour ce projet.

Pour définir les priorités de « tracking », deux groupes sont considérés : les satellites purement géodésiques (Lageos1&2,



Starlette et Stella) et les satellites océanographiques (Jason1/Jason2, Envisat et ERS2). Le premier groupe est utilisé dans les traitements scientifiques pour effectuer le positionnement de la station dans le système de référence avec une très grande précision (quelques millimètres) et le deuxième pour soutenir les projets associés comme l'inter-calibration des altimètres Jason1/2. Le bilan en terme d'observations sur 6 mois est très positif en particulier sur toute la période juillet - septembre 2008.

Sur les 18 passages (tous les 10 jours) de survol sur le point de calibration au cap de Senetosa durant cette période, 10 ont été bien observés avec en particulier des mesures laser simultanées avec l'altimètre à l'aplomb de ce point et donc une amélioration locale de l'orbite très significative.

Au niveau opérations, on peut ici souligner la performance et le professionnalisme de nos collègues ayant participé aux opérations sur place par équipe de deux avec une astreinte permanente et très lourde durant ces missions.

## 5. Participants au projet

### ***5.1 Observatoire de la Côte d'Azur***

F. Pierron, P. Bonnefond, P. Exertier, M. Pierron, M. Furia, M. Laplanche, D. Féraud, F. Para

### ***5.2 Institut Géographique National:***

F. Duquenne, H. Fagard, J.-C. Poyard, M. Kasser

### ***5.3 Centre National d'Etudes Spatiales***

R. Bianco, J.M. Lemoine

### ***5.4 Université de Hobart (Australie/Tasmanie)***

C. Watson, R. Coleman

## 1.2. STATIONS LASER FIXES

### 1. Introduction

Les activités en Géodésie Spatiale à l'OCA s'étendent de la Métrologie optique et temps fréquence (qui touche les deux secteurs : Observation de la Terre (OT) et Etude de l'Univers (EU)) à l'analyse et l'assimilation de données spatiales et *in situ*. Ceci suppose de maintenir un secteur technologique (développements, maintenances, services (campagnes et services récurrents) et recherche amont) et un secteur scientifique (recherche, modélisations, analyses, services et diffusion). Cet ensemble de savoir-faire est réuni au sein d'une même équipe, AstroGéo, qui a été affectée début 2008 dans l'UMR Géosciences Azur (l'ex UMR Gemini a été arrêtée fin 2007, par le CNRS et l'OCA).

Ce groupe est actif dans les deux secteurs OT et EU ; pour le secteur Observation de la Terre, le synoptique du groupe est indiqué dans le paragraphe « Personnels ».

### 2. Actions marquantes pour la télémétrie laser à l'OCA en 2008

- Lancement de Jason2 et démarrage des **activités CAL/VAL** Jason (orbitographie et étalonnage altimétrique).
- Mise en route de l'instrument **T2L2/Jason2** et de notre **Centre de Mission Scientifique** associé.
- Redémarrage de l'activité de **télémétrie laser au plateau de Calern** suite aux 3 ans de travaux de la rénovation (projet T2000) : (voir Table ILRS du bilan 2008 d'observations SLR à la fin de ce chapitre).
- **Campagnes** de télémétrie laser avec la station mobile (**FTLRS**) : Tasmanie (oct. 2007 – avr. 2008) et Corse (juil. – déc. 2008)

### 3. Travaux 2008 à l'OCA

#### 3.1 Activités scientifiques et de service

Depuis la fin du mois de septembre 2007, notre équipe est officiellement Centre d'Analyse de l'ILRS sur la base des traitements récurrents des données Laser avec les codes GINS-DYNAMO (GRGS, Toulouse) et MATLO (OCA-IGN). Les traitements (sous la forme d'un service d'observation, au sens de l'INSU) reposent sur l'estimation des orbites précises des satellites de référence (les deux LAGEOS, à 6000 km) ainsi que sur l'inversion des mesures par station pour le calcul des paramètres géométriques (repère) et cinématique (pôle), chaque semaine, donc mis sous la forme de séries temporelles.

En outre, deux types de séries sont calculées : d'une part les séries classiques (matrices inversées) pour la participation à l'ILRS, et d'autre part les séries devant contribuer à des calculs connexes (Calcul de Combinaisons, notamment vers l'IERS). Sur la période automne 2007 – automne 2008, il a fallu mettre en place et fiabiliser des outils performants, automatisés le plus possible, pour fournir des produits opérationnels destinés à la fois à un envoi au service international ILRS et à une valorisation scientifique. Nous envoyons régulièrement (base hebdomadaire) les solutions laser vers l'ILRS afin d'établir une solution combinée qui est ensuite présentée à l'ITRF/IERS. Nous analysons ces solutions et avons notre propre programme de recherche en méthodologie et sur des applications géophysiques (effets de charge, notamment, avec X. Collilieux de l'IGN/LAREG et J. Nicolas de l'ESGT/CNAM).

Le programme de travail a été dédié aux points suivants :

**Pour le fonctionnement en mode « opérationnel » du centre d'analyse laser :**

- Fiabilisation de l'automatisation des traitements opérationnels (solution à fournir à l'ILRS, projet de Recherche sur les combinaisons (CRC), mené dans l'ensemble des groupes GRGS).
- Production hebdomadaire du champ de gravité à grandes longueurs d'onde (un point par semaine), des coordonnées des stations laser (un point par semaine), et des paramètres d'orientation de la Terre (EOP : un point par jour).
- Préparation, finalisée fin 2008, à la production journalière de ces produits, avec des arcs d'une semaine, suivant les recommandations de l'AWG de l'ILRS.
- Préparation de la gestion, à tous les niveaux des logiciels, du nouveau format des données laser, le format CRD (indispensable pour le traitement des données T2L2, par exemple).
- Production d'une solution à long terme (1993-2008 et 1983-2008) : orbites, repère terrestre, rotation de la Terre, finalisée fin 2008, avant analyse scientifique au sein du GRGS et de l'ILRS.

**Pour le fonctionnement en mode « recherche » du centre d'analyse laser :**

- Prise en compte progressive, dans un mode à vocation opérationnelle, d'autres satellites laser que LA1 et LA2 : STA / STE / ET1 / ET2 / AJI, notamment.
- Recherches méthodologiques pour améliorer la décorrélation des paramètres (collaboration IGN/LAREG) : travail sur les erreurs d'orbite, les pondérations des orbites, l'association entre une approche « court terme » et une approche « long terme ».
- Production d'une solution à long terme également pour le champ de gravité (dont l'estimation de la dérive séculaire des premiers coefficients zonaux).
- Poursuite de l'évaluation de l'impact des effets de charge (atmosphériques, océaniques, hydrologiques) sur le mouvement du pôle, le mouvement du géocentre.

Enfin, nous avons entièrement développé le Centre de Mission Scientifique propre à valoriser les données de l'instrument T2L2 placé à bord de Jason2. Certes, le déroulement du projet de Transfert de Temps par Lien Laser est suivi par le secteur EU du CNES, mais il se trouve que la télémétrie laser est au coeur de la mission Jason2, qui est suivie par le secteur OT. Le CMS-T2L2 prend en compte les données Laser venant du réseau sol de stations laser à même de fournir des données brutes (différentes des données servant à l'orbitographie), depuis fin juin ; il a effectué les premiers transferts de temps sol bord à mieux que 1 nano sec ; ce bilan va s'améliorer avec les nombreuses corrections (physique instrumentale et relativiste) en cours de développement.

### **3.2 Activités techniques**

Le projet Télémétrie 2000 s'inscrit dans un programme de rénovation profonde de la télémétrie par laser en France (observations sur satellites et Lune et contribution à l'altimétrie et aux Systèmes de Référence de Temps et d'Espace). Télémétrie 2000 est achevé fin 2008 et permet:

- D'orienter la station laser Lune (Télescope de 154cm) vers des activités de recherche et de développement en métrologie optique et d'élargir la politique scientifique de la station : la station laser Lune est renommée Station MeO (Métrologie Optique).
- De démanteler l'ancienne station laser satellite fixe et d'y installer à la place un laboratoire d'accueil (maintenance et opérations) de la station ultra mobile FTLRS. Avec envoi cet été du télescope (100cm) de l'ancienne station fixe en Afrique du Sud pour coopération.

Ces deux systèmes sont capables de couvrir les programmes scientifiques actuels et futurs, depuis l'observation des satellites proches jusqu'aux futures cibles interplanétaires en passant par la Lune. Le budget total de cette opération s'est monté à environ 1.2 MEuros réparti comme suit, entre 2004 et 2008 : Région PACA (0.3), INSU (0,15 + 5 Homme An), CNES (0.6 + 3 Homme An),

OCA (0,15 + 1 Homme An).

Sur le Télescope MeO, station laser fixe du plateau de Calern, la motorisation d'origine a été conçue pour le suivi de la Lune et des objets stellaires. Elle était basée sur des moteurs couples et sur une mécanique du type roue vis sans fin. Elle n'est pas adaptée en terme de vitesse et d'accélération de pointé pour le suivi d'objets rapides. Elle n'était plus adaptée non plus au pointé en aveugle pour les futurs projets de télémétrie interplanétaire (exactitude). La mécanique a donc été entièrement reprise, et l'activité 2007-2008 s'est concentrée sur

- Mécanique, azimut (2007-2008) :
  - Conception mécanique de la motorisation azimut (avec DT INSU).
  - Fabrication industrielle mécanique lourde (avec DT INSU).
  - Intégration des éléments mécaniques de la motorisation de l'axe azimutal dans les locaux de la DT.
  - Démontage ancienne motorisation, adaptation Génie civil MeO azimut, et essai de résistance du génie civil.
  - Préparation intégration (palan, dispositif de sécurité, nettoyage, protection des sols).
  - Intégration capteur de pression palier hybride (avec DT INSU).
  - Réalisation du logiciel serveur Web SAIA pression pallier (avec DT INSU).
  - Réglage pallier (verticalité, pression).
- Mécanique, axe d'élévation (2008) :
  - Conception mécanique de la motorisation élévation (avec DT INSU).
  - Fabrication industrielle mécanique lourde (avec DT INSU).
  - Intégration des éléments mécaniques de la motorisation de l'axe élévation dans les locaux de la DT.
  - Démontage ancienne motorisation, adaptation Palier élévation (réglage géométrie).
  - Préparation intégration (grue, nettoyage, protection des sols).
  - Modification hydraulique du bac de décantation.
  - Intégration capteur de pression palier hybride (avec DT INSU).
  - Réalisation du logiciel serveur Web SAIA pression pallier (avec DT INSU).
  - Réglage pallier (verticalité, pression).
- La coupole (sa motorisation et sa synchronisation avec le télescope) :
  - Réalisation sol étanche fibré, et protection sol coupole.
  - Mise sur cale de la coupole, puis démontage de l'entraînement et du guidage.
  - Déflocage de la coupole et démontage des secteurs de la coupole.
  - Remplacement de la couverture de la coupole.
  - Intégration des secteurs et peinture couverture.
  - Conception module de guidage, puis réalisation industrielle et OCA du module de guidage ; intégration des modules de guidage.
  - Réalisation motorisation coupole, préparation génie civil motorisation, intégration de la motorisation.
  - Fabrication jupe mobile, et mise en place de la jupe mobile.
- Pilotage et logiciels :
  - Réalisation armoire de commande labo focal : Azimut, Elevation, Coupole (avec DT INSU).
  - Asservissement des axes ; intégration baie de pilotage.

- Programmation des drives de pilotage, et écriture du logiciel de pilotage (avec DT INSU) du télescope ; adaptation des anciens logiciels, nouvelles fonctions.
- Calcul des prévisions ; logiciel de pilotage laser et logiciel dateur.
- Pour la partie optique :
  - outillage traitement miroir primaire, tertiaire, secondaire.
  - Préparation du traitement des miroirs primaire, tertiaire, secondaire.
  - Traitement des optiques (à l'OCA), puis réglage optique coudé laser.
  - Réglage télescope.
- La table optique (toujours en cours) pour détection des échos retour en laboratoire. La table intègre le laser, le dispositif de photo détection, un module de filtrage optique, un module de commutation laser et un système de vidéo intensifiée. Deux baies électroniques sont dédiées au pilotage du laser et la troisième (baie de mesure) est dédiée à l'instrumentation électronique associée à la télémétrie laser. Avec comme travaux :
  - Conception opto-mécanique, et préparation du laboratoire de télémétrie opérationnelle.
  - Intégration table optique télémétrie laser, et intégration laser cavités.
  - Intégration amplis, périscope, moyens de réglage.
  - Intégration baie de pilotage puissance, conception électronique de pilotage (automatisation).
  - Intégration pilotage informatique.
  - Intégration nouveau groupe frigorifique.
- Le laser en version haute énergie est opérationnel à ce jour sur la table optique définitive. L'ensemble de la chaîne de mesure a été intégré en 2008, après intégration du coudé et de la mise au point du système de commutation laser et de toute la chaîne de photo détection. L'étude sur le module de commutation laser a fait l'objet d'une demande de R&T CNES qui a été financée à hauteur de 30 k€. Nous avons donc effectué :
  - Réintégration de la chaîne de photo détection et de la chaîne de datation.
  - Réintégration de la chaîne pilotage optique.
  - Modification miroirs tournants.

## 4. Personnels OCA

### 4.1 Personnels permanents :

- Technique :
  - D. Albanèse (T), D. Feraudy (IE), M. Furia (IE), J. Paris (IE), G. Martinot-Lagarde (IR), F. Pierron (IR), M. Pierron (IR), E. Samain (IR), J.-M. Torre (IR).
  - Départs 2007-2008 : M. Laplanche (T), M. Perrin (T), E. Cuot (AI), E. Queven (T).
  - Pour mémoire, les départs entre 2004 & 2007 : J.-L. Hatat (IR), J.-F. Mangin (IR), G. Vigouroux (IE).
- Scientifique :
  - P. Bonnefond (AA), F. Deleflie (AA), P. Exertier (DR), O. Laurain (IE).
  - Départs 2007-2008 : Ph Berio (IR), J.-J. Walch (A).

### 4.2 Personnels non permanents :

- Mécanique (construction) : A. DREAN (AI, CNES-INSU) : Electronique : O. Dupont (T, CDD OCA).

- Etudiants (OCA): nombreux stages et thèses suivantes :
  - Mécanique céleste & spatiale : M. Jordi Fontdecaba (Thèse soutenue le 20 novembre 2008, Présidente : Mme Nicole Capitaine, SYRTE/Observatoire de Paris, Directeur : P. Exertier, financement Ministère, ED Ile de France).
  - Géodésie altimétrie : M. Ludovic Andres (Thèse soutenue le 31 octobre 2008, Président : M. Kasser, ENSG-IGN, Directeurs : P. Exertier / H. Duquenne, pas de financement, Ingénieur en activité, ED Sciences UNice-SA).

## 5. Références bibliographiques

F. Pierron et al., Internat. Laser Ranging Workshop, Poland, 12-15 Oct. 2008.

## 6. Activités 2008 à l'Observatoire Géodésique de Tahiti

### 6.1 Station laser

La station laser a redémarré après une intervention, au mois d'avril 2008, d'ingénieurs de la NASA-Honeywell. Elle a, depuis, un fonctionnement normal. Un audit NASA-CNES-ILRS de la station a été fait en octobre 2008 afin d'estimer la viabilité de la station laser sur le moyen terme. Les conclusions du rapport seront communiquées au GRGS par le CNES.

### 6.2 Réseau marégraphique de Polynésie

La station marégraphique/GPS de Tubuaiï (îles Australes) construite sur crédits ANR a été mise en test. La station marégraphique/GPS de Rangiroa (Tuamotu) est en cours de construction. Un prototype de station marégraphique à bas coût pour être placé à l'OGT a été élaboré.

### 6.3 Stations permanentes GPS et DORIS et traitement

Un traitement par GIPSY-OASIS des 10 dernières années de mesure GPS acquises sur le site de l'OGT a été effectué. Ce traitement confirme la vitesse de subsidence du site à 1.4 mm/an. La mise en place de GINS à l'OGT a été préparé (mission A. Fadil au GRGS-Toulouse).

### 6.4 International Center for Earth Tides (ICET)

Une maquette de base de données gravimétriques en marégraphie terrestre et marine a été élaborée dans le cadre de l'ICET. La mise en service de cette base sur le réseau RENATER (Paris) est prévue en septembre 2009. Un logiciel de validation des données GGP a été développé. Une présentation de ces travaux a été faite à ETS 2008 à Iena.

### 6.5 Gravimétrie

Un gravimètre marégraphique gPhone a été acquis sur crédits CNES-UPF. Son installation est en cours sur le site GEOSCOPE à Tahiti-Pamatai.

### 6.6 Personnel permanent : JP Barriot

Site Information		Data Volume									Data Quality		
Column 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Location	Station Number	LEO pass Tot	LAGEOS pass Tot	High pass Tot	Total passes	LEO NP Total	LAGEOS NP Total	High NP Total	Total NP	Minutes of Data	Cal. RMS	Star RMS	LAG RMS
<b>Baseline</b>		<b>1000</b>	<b>400</b>	<b>100</b>	<b>1500</b>								
Yarragadee	7090	10460	2078	1496	14034	211998	26440	13824	252262	176895	4.8	8.9	9.6
San_Juan	7406	5939	1121	1458	8518	95627	12872	9660	118159	100806	8.4	10.8	11.6
Mount_Stromlo_2	7825	5971	1246	443	7660	78010	12809	3618	94437	68583	8.9	7.6	6.2
Graz	7839	4735	653	538	5926	91480	7138	4589	103207	60632	2.1	3.4	5.2
Zimmerwald	7810	4254	830	798	5882	77529	10904	6889	95322	75844	5.0	8.0	11.0
Zimmerwald_423		266	74	46	386	5323	946	362	6631	5061			
Zimmerwald_532		3988	756	752	5496	72206	9958	6527	88691	70783	5.9	9.0	12.0
Zimmerwald_846		265	73	46	384	5243	1022	329	6594	5048			
Wettzell	8834	4453	1011	366	5830	48720	7492	1604	57816	39061	5.1	12.7	18.5
Herstmonceux	7840	3952	870	426	5248	58544	10653	1780	70977	45460	5.4	10.3	13.5
Changchun	7237	3982	605	435	5022	42011	4090	2025	48126	30121	9.1	10.9	12.4
Riyadh	7832	3157	820	383	4360	38015	6802	2120	46937	35969	9.3	12.5	14.7
Greenbelt	7105	3376	511	251	4138	75612	5455	1653	82720	38578	4.8	9.1	9.9
Matera_MLRO	7941	2880	799	77	3756	37578	8832	625	47035	33609	1.1	3.4	4.9
San_Fernando	7824	3009	440	72	3521	44524	3187	307	48018	21802	5.8	11.1	14.1
Concepcion_847	7405	1775	816	353	2944	21900	9743	2579	34222	40508	6.2	15.3	19.2
Haleakala	7119	1819	403		2222	30009	4600		34609	17891	5.1	10.2	11.9
Potsdam_3	7841	1826	313	7	2146	34556	3618	66	38240	16312	12.7	13.4	17.4
Beijing	7249	1609	311	108	2028	22636	2705	789	26130	16605	7.1	33.1	16.3
Monument_Peak	7110	1531	363	115	2009	25735	4026	903	30664	19617	5.4	16.4	16.0
Katziwely	1893	1175	310	226	1711	18037	2562	1387	21986	17445	36.9	86.6	42.5
McDonald	7080	1073	335	201	1609	11797	3227	859	15883	14246	9.9	11.7	12.6
Arequipa	7403	1425	130		1555	16997	736		17733	6561	5.7	7.6	5.6
Hartebeesthoek	7501	1194	254	17	1465	13857	1827	89	15773	8433	5.0	9.9	10.5
Shanghai_2	7821	1240	156	29	1425	15427	1519	162	17108	8678	11.7	14.8	19.2
Simeiz	1873	816	282	85	1183	10251	2463	1205	13919	11015		56.6	54.2
Kiev	1824	725	90		815	7696	563		8259	3527	19.9	21.6	23.4
Ajaccio	7848	770	4		774	11162	27		11189	3564	4.4	10.8	10.9
Koganei	7308	472	125	60	657	6718	1118	422	8258	6734	9.3	12.9	15.0
Kunming	7820	593	60		653	7890	384		8274	3493	23.3	29.2	32.6
Tanegashima	7358	377	64	74	515	5829	612	473	6914	5287	3.0	5.0	5.8
Burnie_Tafe	7370	494	4		498	6321	13		6334	2121			
Papeete	7124	347	98	10	455	5884	1363	55	7302	4718	3.5	7.9	8.6
Riga	1884	319	57	4	380	6858	851	25	7734	3598	6.6		12.4
Borowiec	7811	143	65		208	1794	645		2439	1869	23.6	21.1	26.3
Lviv	1831	182	22		204	2878	168		3046	1243	20.2	60.3	63.1
Simosato	7838	123	40		163	2520	589		3109	1979	7.0	9.0	11.7
Grasse_LLRL	7845	36	32	9	77	825	325	47	1197	1119	6.2	15.1	13.3
Komsomolsk	1868		27	5	32		155	16	171	390			29.9
Helwan	7831	21			21	149			149	30	6.0		
Maidanak_1	1864		3		3		23		23	46			63.0

Table de performances des stations LLR publiée par le Service International Laser (ILRS)  
pour la période du 01/01/2008 au 31/01/2008

(Grasse-MeO : station N° 7845 ; Ajaccio- FTLRS : station N° 7848)

## 1.3. ANALYSE DES DONNÉES LASER-LUNE

### 1. Introduction

Le centre d'analyse des données laser-lune du SYRTE, laboratoire de l'Observatoire de Paris, exerce son activité dans le cadre de l'*International Laser Ranging Service (ILRS)*. Il collabore avec l'équipe de télémétrie laser de l'Observatoire de la Côte d'Azur (*OCA/GEMINI*), avec les deux centres de produits de l'*IERS* qui travaillent également au SYRTE (*EOP et ICRS PC*) et, depuis deux ans, avec l'équipe ASD de l'*IMCCE* à l'Observatoire de Paris.

### 2. Activités

Le travail commencé en 2007 sur le recensement de l'ensemble des observations laser-lune (*LLR*) réalisées jusqu'à 2006 est terminé. Il a été accompli à partir de nos propres archives, de celles fournies par James G. Williams (*JPL*) et des bases de données de l'*ILRS* et de l'*OCA*. Les stations et les périodes concernées sont : Calern (Grasse) 1984-2005, McDonald (Texas) 1969-2006 et Haleakala (Hawaï) 1984-1990. Ce travail a permis de récupérer des données de McDonald et de Haleakala datant d'avant 1987, d'exclure ou de corriger certaines données erronées ou redondantes et d'unifier leur format en respectant leurs spécificités. Après les avoir complétées par les données obtenues depuis 2006 jusqu'en 2008, on compte plus de 18000 observations *LLR* regroupées sur 7 fichiers selon la station et l'instrument utilisé (*fig.1*).

En exploitant ces observations avec le programme *CAROLL* (Calcul et Analyse des Résidus Laser-Lune) on constate que la dispersion des résidus est très proche de celle constatée avant le recensement, excepté une amélioration de 5 mm pour les données de McDonald avant 1984. On vérifie également que les résidus sont sensiblement plus réduits à partir de 1987, conséquence de l'amélioration de la qualité des mesures laser après le changement de l'équipement télémétrique de Grasse et de McDonald (*fig.2*).

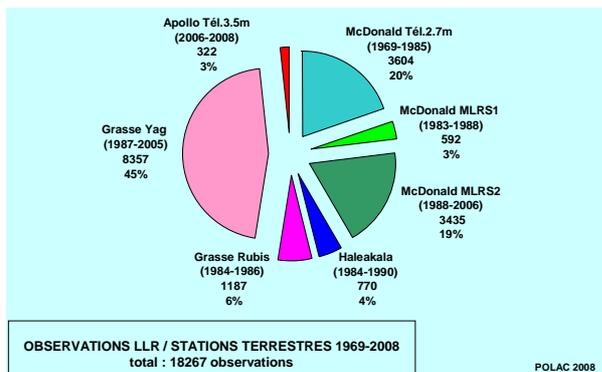


Fig.1 : Observations LLR 1969-2008

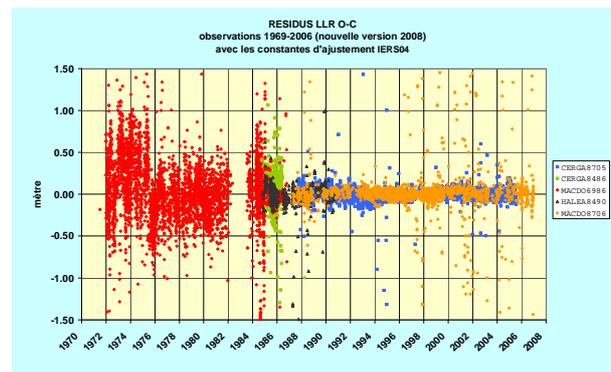


Fig.2 : Résidus LLR 1972-2006

Ces dernières années, les observations *LLR* ont été marquées par trois événements (*fig.3*) :

- l'arrêt des observations de Grasse mi-2005 pour installer la nouvelle station *MeO*; ce site reste néanmoins le plus productif des sites *LLR* depuis 1984 en attendant la reprise des tirs du plateau de Calern sur les réflecteurs lunaires dans le courant 2009,
- une diminution de la qualité des observations de McDonald due au vieillissement des détecteurs; on espère un rebond en qualité et en quantité pour les observations *LLR* de ce site qui n'a jamais interrompu ces tirs depuis juillet 1969 (mission Apollo 11),

- la diffusion publique, en 2008, des observations LLR de la station Apollo du Apache Point Observatory (Nouveau Mexique) faites entre 2006 et 2008 par l'équipe de Tom Murphy (Université de Californie, San Diego); la qualité de ces données semble prometteuse d'après les premiers résidus calculés par le programme CAROLL (fig.4).

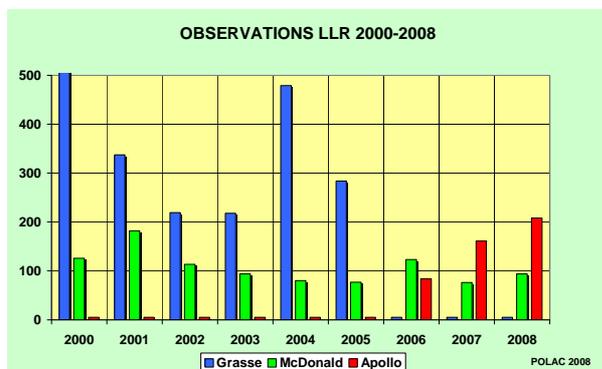


Fig.3 : Observations LLR 2000-2008

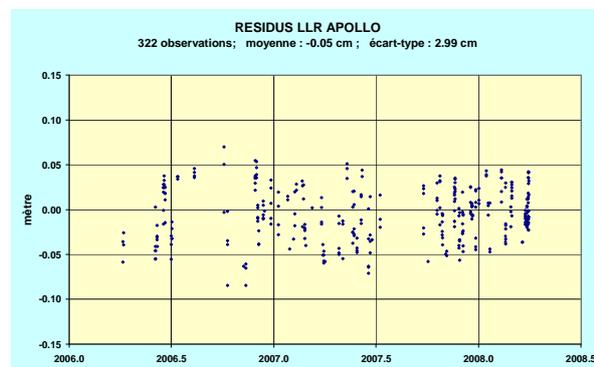


Fig.4 : Résidus LLR (station Apollo) 2006-2008

Actuellement, au SYRTE, Wassila Zerhouni prépare une thèse sous la direction de Nicole Capitaine sur l'utilisation conjointe des données LLR et VLBI appliquée à l'orientation du pôle céleste à partir du modèle de Précession-Nutation UAI 2000A-2006.

Par ailleurs, Hervé Manche (équipe ASD de l'IMCCE dirigée par Jacques Laskar), travaille avec notre collaboration à l'ajustement des éphémérides INPOP aux observations laser-lune.

### 3. Participants au projet

Sébastien Bouquillon (astronome adjoint), Nicole Capitaine (astronome), Gérard Francou (astronome adjoint) et Wassila Zerhouni (thèse sous la direction de Nicole Capitaine), tous membres du SYRTE à l'Observatoire de Paris.

### 4. Références bibliographiques

H. Manche, J. Laskar, A. Fienga, N. Capitaine, S. Bouquillon, G. Francou, M. Gastineau, 2008, "The geodesic precession in the INPOP ephemerides", Journées "Systèmes de référence spatio-temporels, Dresden, Germany, M. Soffel, N. Capitaine (eds.).

W. Zerhouni, N. Capitaine, G. Francou, 2008, "What could bring LLR observations in determining the position of the celestial pole", Journées "Systèmes de référence spatio-temporels", Dresden, Germany, M. Soffel, N. Capitaine (eds.).

W. Zerhouni, N. Capitaine, G. Francou, 2008, "The determination of the corrections to the IAU 2000A-2006 X, Y coordinates using LLR observations", Société Française de l'Astronomie, Paris, France.

W. Zerhouni, N. Capitaine, G. Francou, 2008, "The contribution of LLR data to the estimation of the celestial pole coordinates" (poster), 16th International Workshop on Laser Ranging, Poznan, Poland.

W. Zerhouni, N. Capitaine, G. Francou, 2008, "The determination of the celestial pole coordinates derived from LLR observations" (poster), European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria.



## 2. MÉCANIQUE 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 Altimétrie Haute résolution
  - 2.2.3 Gravimétrie de surface
  - 2.2.4 Bureau Gravimétrique International



## 2.1 MECANIQUE ORBITALE

### 1. Introduction

En 2008, le développement des méthodes de dynamique orbitale s'est poursuivi, avec une mise en œuvre dans les logiciels d'analyse de perturbations orbitales du GRGS, pour des applications spécifiques ayant pour buts :

- L'analyse de l'environnement gravitationnel dans lequel sont placées les sondes vues comme senseurs de force,
- L'analyse de l'environnement non gravitationnel,
- La physique fondamentale,
- L'analyse de mission de projets spatiaux, y compris sur le très long terme, et y compris les vols en formation.

Les outils logiciels du GRGS qui ont été développés durant cette période sont :

- GINS, au sein du GRGS-Toulouse, et en collaboration avec d'autres équipes,
- ODYSSEY, LAGRAN, CANEL, CODIOR, VOLFOR au sein du GRGS Grasse.

### 2. Les outils logiciels développés au GRGS en 2008

#### *2.1 GINS : Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées*

Le logiciel GINS sur PC a été mis à disposition des utilisateurs en 2007, et suite aux retours des premiers utilisateurs une version améliorée de l'Interface Homme Machine a été développée et livrée aux utilisateurs au moment de la deuxième formation GINS-PC en novembre 2008. On recense maintenant une quinzaine d'utilisateurs inscrits.

En parallèle, le logiciel GINS a subi une restructuration qui a permis de séparer totalement la partie intégration numérique des trajectoires de la partie traitement des observations. C'est une première étape en vue du GINS multi constellation (GPS/GLONASS en 2009 et Galileo plus tard).

Un soin particulier a aussi été apporté à l'optimisation du code dans la formation des équations normales notamment dans le cas des traitements GPS et Doppler

Enfin une comparaison du calcul d'une trajectoire interplanétaire (Terre-Mars en l'occurrence) avec le logiciel Exorsyst du CNES a permis de valider ce genre de calcul dans GINS.

#### *2.2 Intégration numérique des équations du mouvement*

Au sein de LAGRAN/Obiman, les développements concernent la mise en place des routines de régularisation des équations du mouvement, pour préparer l'intégration des orbites à fortes excentricités.

#### *2.3 CODIOR : Intégration numérique des équations moyennes du mouvement*

Les développements de CODIOR en 2008 ont eu lieu dans le cadre du contrat de R&T « Orbitographie long terme » qui lie le CNES à l'OCA. La principale innovation a été d'inclure la possibilité d'entrer des conditions initiales osculatrices dans l'intégrateur des équations moyennes du mouvement. Intrinsèquement, il a donc fallu écrire la transformation des variables osculatrices en variables moyennes. Cela a été exprimé dans les variables képlériennes

traditionnelles (l'équivalent en variables non singulières en excentricité est en cours d'écriture). D'autre part, la prise en compte d'un « modèle utilisateur » pour les fichiers d'activité solaire a été ajoutée, à la demande du CNES. Les applications de CODIOR au CNES concernent l'analyse de mission, et en particulier : l'analyse des risques de collision, la durée de vie des orbites basses, l'analyse de stabilité des orbites de parking, des populations de débris.

#### ***2.4 VOLFOR : Analyse des Vols en Formation***

Le logiciel VOLFOR, à travers différents modules, a pour but la mise en œuvre des théories analytiques du mouvement relatif. Le travail effectué par Jordi Fontdecaba s'est conclu par sa soutenance de thèse à l'automne 2008. Une bibliothèque de routines fortran « mouvement relatif » est ainsi disponible.

#### ***2.5 ODYSSEY: Intégration numérique du mouvement dans le système solaire***

Ce logiciel est développé autour de Gilles Métris et est dédié à l'intégration des trajectoires dans le système solaire. Voir la partie « physique fondamentale » de ce rapport.

### **3. Problèmes de mécanique céleste abordés**

#### ***3.1 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).

#### ***3.2 Stabilité de la constellation des débris spatiaux***

La stabilité des orbites sur de très longues périodes de temps est l'un des enjeux majeurs d'analyse de mission, en particulier dans la région des MEO où se situent la plupart des orbites dédiées à la radio-navigation. L'une des difficultés consiste à comprendre l'origine dynamique de l'excentricité des débris spatiaux, qui fait augmenter dans des proportions considérables les probabilités de collision avec des satellites opérationnels.

Dans ce contexte, le GRGS-Grasse :

- a réalisé un recensement des configurations dynamiques de type GPS ou Galileo, en propageant avec le logiciel CODIOR 36000 conditions initiales différentes sur des périodes de 150 ans, de manière à produire des cartes de stabilité. Les résultats sont les variations de chaque élément orbital (dont l'excentricité), ainsi que l'évolution temporelle des angles résonants, évolution qui est à l'origine des variations très importantes des paramètres orbitaux. Ces simulations numériques ont été menées sur des grilles de calcul.
- a écrit un modèle de variation des coordonnées du vecteur excentricité, prenant en compte : le potentiel interne de la Terre (termes zonaux pairs et impairs, termes tesséraux résonants), le potentiel de troisième corps (influence de la Lune et du Soleil).

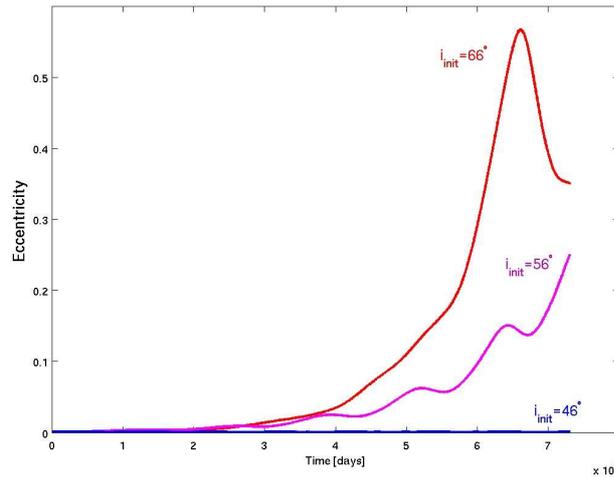


Fig1. : Exemple d'évolution de l'excentricité d'orbites MEO en fonction des conditions initiales

$$\psi'_{l,m,p,p',q,q'} = (l - 2p + q)M - (l - 2p' + q')M_p + (l - 2p)\omega - (l - 2p')\omega_p + m(\Omega - \Omega_p)$$

Fig2. : Angle « à la Kaula » utilisé pour détecter les zones de résonance

## 4. Applications : analyse de l'environnement terrestre et orbital

### 4.1 Le champ de gravité de la Terre et des planètes

Voir toute la partie spécifique aux nouvelles missions d'étude des champs de gravité terrestre et martien.

### 4.2 Applications en physique

Voir la partie de ce rapport consacrée à la physique fondamentale.

### 4.3 Applications en analyse de mission

Outre les applications du CNES utilisant CODIOR, les travaux de thèse de Jordi Fontdecaba ont permis deux applications en analyse de mission :

- ses travaux sur les vols en formation ont abouti à l'écriture des équations de sensibilité des mesures inter-satellites aux paramètres du champ de force, et le champ de gravité en particulier. Cela inclut les équations de sensibilité pour les câbles électrodynamiques, et les analyses de sensibilité pour toutes les configurations générales du type « GRACE follow-on ».
- dans le cadre d'un contrat avec Thalès, les équations du vol en formation ont été adaptées au cas de la mission Simbol-X, pour la définition de stratégies d'évitement dans des modes dégradés du mouvement libre des deux satellites de la mission, dont les orbites sont très excentriques.

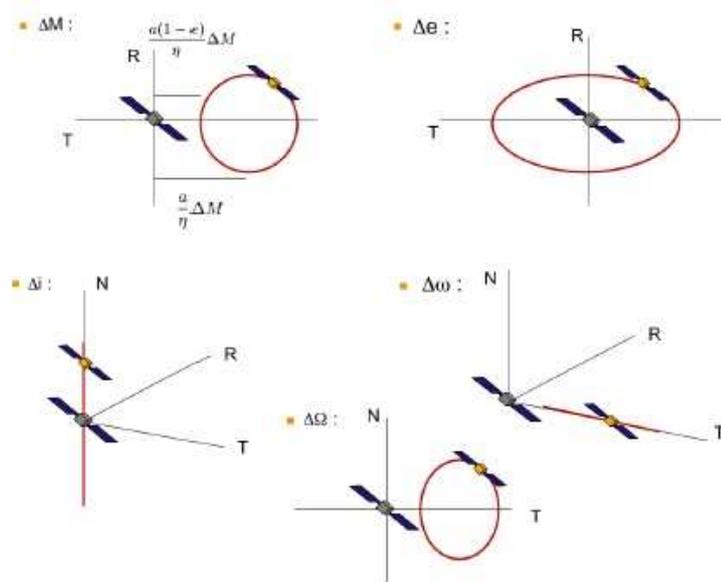


Fig. 3 : Exemples de mouvements relatifs dans l'étude des configurations de mission du type « GRACE follow-on »

## 5. Participants au projet

### 5.1 GRGS-Grasse

François Barlier, Philippe Berio, Florent Deleflie, Pierre Exertier, Jordi Fontdecaba, Olivier Laurain, Gilles Métris

Collaborations : David Coulot (LAREG), Massimiliano Guzzo (Univ. Padoue), Alessandro Rossi (Univ. Pise), Anne Lemaitre (FUNDP), Isabelle Panet (IPGP-LAREG), Alain Vienne (IMCCE) Jérôme Berthier (IMCCE), Pascal Rosenblatt (ORB).

### 5.2 GRGS-Toulouse

Georges Balmino, Richard Biancale, Sean Bruinsma, Jean-Michel Lemoine, Jean-Charles Marty, Felix Perosanz

## 6. Références bibliographiques

J. Fontdecaba, G. Métris, P. Exertier, An alternative representation of the relative motion: the local orbital elements, submitted to Adv. Sp. R., 2008

F. Deleflie, A. Rossi, C. Portmann, M. Guzzo, G. Métris, D. Hautesseres, B. Meyssignac, P. Rosenblatt, Long-term stability of trajectories of the space debris population, perturbed by gravitational effects, 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, July 2008

## 2.2.1. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Missions spatiales

### 1. Introduction

Les activités 2008 se sont principalement réparties autour de deux missions (CHAMP et GRACE) et deux projets dédiés (GOCE et MICROMEGA). En fait, des deux missions, seule la mission GRACE est actuellement utilisée pour la modélisation du champ de gravité de la Terre du fait de la sensibilité extrême de son système de mesure inter-satellites. Les données GRACE sont toutefois complétées par les données laser sur les satellites LAGEOS pour stabiliser la restitution du terme d'aplatissement dynamique. Les mesures de la mission CHAMP, moins performante sur le volet gravité, nous servent dorénavant, à travers la mesure accélérométrique, à étudier le comportement de la thermosphère et à le modéliser. Quant aux activités projets, elles se résument à des simulations, à la préparation des traitements et au suivi du projet ESA (dans le cadre du Consortium EGG) en attendant le lancement de GOCE prévu en mars 2009. Enfin, une activité de simulations de nouvelle mission de gravimétrie spatiale en suite de GRACE a démarrée en 2008 dans le cadre du projet MICROMEGA.

### 2. CHAMP et thermosphère

Le satellite allemand CHAMP, lancé le 15 juillet 2000, est toujours en opération, et on ne prévoit sa rentrée dans l'atmosphère qu'en novembre 2009 compte tenu de l'activité solaire toujours faible. Depuis le lancement de GRACE, ses mesures de suivi GPS ne sont plus utilisées pour la modélisation du champ de gravité. Cependant les mesures accélérométriques de CHAMP gardent un intérêt majeur pour la modélisation de la densité de la thermosphère. En effet, la densité thermosphérique totale se calcule à partir des mesures de l'accéléromètre embarqué (STAR), une fois étalonnées par calcul d'orbite à partir des mesures de suivi GPS. Huit ans de données sont dorénavant disponibles depuis le début de la mission. La base de données atmosphériques dérivées des mesures accélérométriques est complétée environ trois fois par an. Une série temporelle des paramètres d'étalonnage a été élaborée, lissée et éditée avec précision, et elle est mise à jour avec la même cadence. Pour GRACE, les paramètres d'étalonnage ont été calculés également, et les densités ont été dérivées en 2008. La série temporelle couvre actuellement 2003 à juin 2008.

Les satellites CHAMP et GRACE orbitent sous 500 km dans une atmosphère constituée en majorité d'azote et d'oxygène. L'accès à la connaissance des densités à plus haute altitude, et notamment de la concentration d'hélium, repose sur les mesures de suivi des satellites. A cette fin, le logiciel GINS a été adapté pour générer un nouveau fichier 'output' des facteurs ajustés des accélérations de frottement, ainsi que les résultats validés. Les densités d'un modèle a priori sont corrigées en appliquant les facteurs d'échelles estimés grâce aux mesures de suivi comme le laser sur les satellites STARLETTE et STELLA.

La collaboration avec l'Université de Colorado à Boulder (UC) s'est poursuivie en 2008, les études ont porté sur les ondes gravitationnelles, les 'traveling atmospheric disturbances' et la variabilité à moyenne échelle en particulier. Une nouvelle collaboration avec les universités de Kyushu et Tohoku au Japon a vu le jour, portant sur des marées, les ondes de gravité et leur interaction. En ce qui concerne les 'thermosphères planétaires', une étude de la variabilité de la densité thermosphérique martienne en fonction du flux solaire a été menée avec UC et GSFC.

Le groupe thermosphère national (CNES, CETP, CLS...) a progressé sur les études d'indices géomagnétiques, mais le choix des indices d'activités solaire n'est toujours pas fait. La stratégie de modélisation pour la prochaine version de DTM est cependant décidée.

### 3. GRACE

Les opérations routinières de traitement des données GRACE commencent par le rapatriement des fichiers de données (GPS, accélérométriques, d'attitude et de poussées pour les deux satellites, ainsi que les mesures KBR inter-satellites) du site d'archivage du GFZ (ISDC). Cette opération réalisée par le service des opérations du CNES se fait mensuellement avec un délai de 3 mois (décidé par le PI GRACE). Les données KBR de 'level-1B' sont ensuite dérivées selon les algorithmes élaborés en interne. Chaque jour de mesure est alors traité et l'équation normale des paramètres orbitaux, d'étalonnage des accéléromètres et du système KBR et des paramètres sensibles du champ de gravité ainsi que des marées océaniques générée. Ensuite les équations sont cumulées par paquet de 10 jours et résolues. Ces deux dernières opérations sont réalisées par la société NOVELTIS sous contrat CNES.

L'équipe CNES/GS a travaillé en 2008 à la réitération complète des traitements GRACE sur la période de juillet 2002 à septembre 2007. Les améliorations notables par rapport au premier traitement sont les suivantes :

- changement du modèle initial de champ de gravité de EIGEN-GL04S à EIGEN-GL04C ;
- extension du calcul des dérivées partielles du degré 150 au degré 160 ;
- introduction des dérivées partielles par rapport à 13 ondes de marées ;
- introduction d'une élimination des mesures KBR au dessus d'un critère de 4 sigmas ;
- utilisation de bulletins initiaux précis ;
- découpage des arcs pouvant aller jusqu'au quart de jour, en fonction des périodes d'indisponibilité des données.

Toutes ces améliorations cumulées ont permis de nettement réduire les résidus en cours d'ajustement et d'éliminer presque totalement les arcs à problème.

Les équations normales journalières sont ensuite cumulées par décades.

Le cumul de toute les décades disponibles a permis d'élaborer un nouveau modèle de champ moyen comportant dorénavant des termes variables (pente et signaux périodiques annuels et semi-annuels) jusqu'au degré 50. La partie statique est résolue jusqu'au degré 160, en même temps qu'un certain nombre d'ondes de marées. La contribution moyenne du séisme de Sumatra au champ de gravité permanent est par ailleurs introduite sous la forme d'une correction à appliquer avant le 24 décembre 2004. Ce nouveau modèle moyen, dénommé EIGEN-GRGS.RL02.MEAN\_FIELD est, tout comme les modèles décadaires, accessible sur le site Internet du BGI.

La qualité de ce nouveau modèle de champ de gravité peut être attestée par la comparaison à des données externes. Par exemple la circulation océanique moyenne calculée en formant la différence surface moyenne océanique (altimétrique) moins géoïde peut être comparée à la circulation océanique déduite des mesures du système de balises dérivantes Argo. Cette comparaison met en évidence d'une part la meilleure performance du nouveau champ à petite échelle (100, 200 km) par rapport aux autres modèles "satellite" disponibles, mais aussi la meilleure performance à grande échelle (> 700 km) par rapport à tous les modèles, EGM2008 compris.

En ce qui concerne les modèles décadaires, ceux-ci sont maintenant résolus par décade (et non plus par 3 décades cumulées comme précédemment) en appliquant une loi de stabilisation améliorée qui tient compte du degré et de l'ordre des coefficients au lieu d'être simplement fonction du degré comme précédemment. La stabilisation fait de plus tendre les solutions vers le nouveau champ "moyen-variable" EIGEN-GRGS.RL02.MEAN\_FIELD et non plus vers un champ strictement statique, ce qui a pour effet de résoudre en grande partie les problèmes d'atténuation du signal liés à la stabilisation.

## 4. GOCE

GOCE (Gravity field and Ocean Circulation Explorer), la première mission cadre sélectionnée à l'ESA dans le programme Earth Explorer, doit être lancé le 16 mars 2009 avec plusieurs années de retard. Le consortium EGGc (European GOCE Gravity consortium), dont l'équipe 'géodésie spatiale' du CNES fait partie, a réalisé des études supplémentaires pour l'ESA pendant les mois du printemps 2008 (méthode de solution par factorisation QR en particulier).

Le consortium avait déjà formellement passé avec succès le « Acceptance Review 3 » en novembre 2007, la dernière revue clé de l'ESA avant lancement. Les retards du projet ont provoqué des problèmes de personnel sous contrat dans EGGc, et pour cette raison l'ESA a accordé un contrat de 4 mois pour des études supplémentaires (Bridging Phase 3).

## 5. MICROMEGA

Des études de simulation sur la proposition MICROMEGA de « roue gravitationnelle » (faite par G. Balmino) ont démarré en 2008 dans le cadre des études PASO du CNES en réflexion à une suite de la mission GRACE. Un 'groupe mission MICROMEGA' a été constitué à cet effet sous la présidence d'Isabelle Panet. Un ou deux scénarios de mission seront retenus pour démarrer les études de faisabilité technique et seront proposés au colloque 2009 de prospective du CNES.

## 6. Participants au projet

G. Balmino	(CNES/GRGS, Toulouse)
R. Biancale	"
S. Bruinsma	"
J.-M. Lemoine	"
J.-C. Marty	"
F. Perosanz	"
M. Sarrailh	"
N. Vales	"

## 7. Références bibliographiques

Bruinsma, S.L., and J.M Forbes (2008) Properties of Traveling Atmospheric Disturbances (TADs) inferred from CHAMP accelerometer observations, *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2008.10.031.

Bruinsma, S.L., and J.M Forbes (2008) Medium to Large-Scale Density Variability as Observed by CHAMP, *Space Weather*, Vol. 6, S08002, doi:10.1029/2008SW000411.

Forbes, J.M., S.L. Bruinsma, Y. Miyoshi, H. Fujiwara (2008) A Solar Terminator Wave in Thermosphere Neutral Densities Measured by the CHAMP Satellite, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2008GL034075.

Forbes, J.M., Lemoine, F.G., Bruinsma, S.L., Smith, M.D., Zhang, X. (2008) Solar Flux Variability of Mars' Exosphere Densities and Temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, L01201, doi:10.1029/2007GL031904.

Guo, J., W. Wan, J. M. Forbes, E. Sutton, R S. Nerem, S. Bruinsma (2008), Inter-annual and Latitudinal Variability of the Thermosphere Annual Harmonics, *J. Geophys. Res.*, 113, A08301, doi:10.1029/2008JA013056.

Lathuillère, C., M. Menvielle, A. Marchaudon, S. Bruinsma (2008) A statistical study of the observed and modelled global thermosphere response to magnetic activity at mid and low latitudes, *J. Geophys. Res.*, 113, A07311, doi:10.1029/2007JA012991.

## 2.2.2. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Altimétrie Haute Résolution

### 1. Présentation du projet GRAL : GRavimétrie haute résolution par ALtimétrie.

Ce projet piloté par le GRGS/SHOM est réalisé en collaboration avec l'IFREMER (département géosciences marines) et l'IUEM (UMR 6538 Domaines océanique - UBO - CNRS) de Brest. Il se situe en amont des prochaines missions altimétriques. Il s'agit de réaliser un bilan des modèles gravimétriques actuellement disponibles et après avoir identifié les besoins précis en terme de couverture spatiale et de précision, de spécifier une future mission altimétrique. Les apports des missions déjà programmées ainsi que les possibilités induites par des constellations de micro satellites seront évalués.

### 2. Avancement

L'activité du projet GRAL a réellement démarré en 2008. Un CDD n'ayant été recruté sur les crédits du TOSCA qu'en novembre 2007. Les quelques actions réalisées en 2007 avant la mise en place des crédits TOSCA ont permis d'élaborer une base de réflexion à partir des besoins émis par la communauté nationale lors de la journée organisée en juin 2007 par l'équipe GRAL (ref a).

Les deux aspects importants des travaux menés se sont partagés entre l'étude géophysique du problème et l'étude de l'aspect technologique. Personne dans l'équipe n'ayant l'expérience pratique de mission spatiale, il a fallu acquérir un certain nombre de connaissances, établir des connexions avec les équipes d'excellence dans ce domaine.

Les travaux entrepris en 2008 ont permis d'analyser les limitations de l'altimétrie et de communiquer sur la problématique au niveau international. Cette analyse a été présentée lors de la session de l'EGU « G1 Marine gravity field modelling » (ref b). Un article est en préparation sur ce même sujet (ref c) : sa rédaction a été un peu retardée (+4 mois) car nous voulions évaluer les derniers modèles issus de l'altimétrie ainsi que les modèles combinés (EGM08 et/ou EIGEN5C).

Pour aborder le volet technologique du projet, une collaboration a été établie avec l'équipe de Thales Alenia Space (Business Unit Observation Systems & radar - TAS). Deux réunions d'informations réciproques, tenues durant l'année, ont permis d'élaborer des solutions d'altimétrie spatiale potentiellement réalisables pour répondre au besoin géophysique

Les réflexions menées ont permis de préparer un projet dans le cadre du séminaire de prospective du CNES.

### 3. Participants au projet

MF Lequentrec-Lalancette (GRGS/SHOM) D. Rouxel (GRGS/SHOM), Louis Géli (IFREMER), Jean-Yves Royer (UMR 6538 Domaines océanique UBO-CNRS), Marcia Maia (UMR 6538 Domaines océanique UBO-CNRS), Gilles Louis (UMR 6538 Domaines océaniques UBO-CNRS), M Faillot (SHOM).

### 4. Publications et présentations orales 2008 réalisées par l'équipe GRAL

M.F. Lequentrec-Lalancette, D. Rouxel, M Maia, J.Y. Royer, L. Géli. *Modeling the gravity field: constraints and limitations*, EGU2008 Meeting, Vienna, April 14-18, 2008.

G. Louis, M. F. Lequentrec-Lalancette, D. Rouxel, M. Maia, J. Y. Royer, L. Géli & M Faillot. *Modeling the gravity field by a high resolution altimetric satellite mission*. OSTST Meeting, Nice, November 2008.

MH Rio, P Schaeffer, MF Lequentrec-Lalancette. Use of oceanographic in situ measurements and altimetry to assess the accuracy of the latest geoid models;, OSTST Meeting , Nice, November 2008.

## 5. Proposition séminaire de prospective

Groupe de projet : GRAL : Projet « gravimétrie par altimétrie haute résolution » proposé au séminaire de prospective du CNES en avril 2008 ; en cours d'examen pour le séminaire prévu en mars 2009.

### 2.2.3. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Gravimétrie de surface

#### 1. Introduction

Dans le domaine de la gravimétrie de surface, le Service de la Géodésie et du Nivellement de l'IGN a achevé les mesures de gravimétrie relative et absolue sur le réseau géodésique RBF entreprises en 2000, avec en particulier l'observation des sites de Corse. De premières compensations de l'ensemble des observations ont été calculées. Une nouvelle détermination de la surface de référence des altitudes françaises bénéficiant de ces mesures est prévue en 2009.

Un géoïde et une surface de référence des altitudes ont également été déterminés pour la Nouvelle Calédonie, dans le cadre d'une étude financée par la Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres (Duquenne et Valty, 2008). Ce calcul, effectué en collaboration avec le BGI pour la validation des données gravimétriques, a donné lieu à la présentation d'un poster lors du symposium international du Service international du champ de pesanteur (GGEO2008), et à une publication dans les actes de ce symposium (Valty et Duquenne, 2008).

Dans le domaine de la recherche, une thèse a été soutenue en gravimétrie mobile (B. de Saint-Jean, direction J.-P. Barriot), proposant une méthodologie de traitement des observations d'accélérométrie vectorielle du gravimètre mobile mis au point par l'ESGT (de Saint-Jean, 2008).

#### 2. Références bibliographiques

de Saint-Jean, B. (2008) *Etude et développement d'un système de gravimétrie mobile*, Thèse de doctorat en gravimétrie mobile, Observatoire de Paris

Duquenne, H. and P. Valty (2008) Calcul du quasi-géoïde de Nouvelle-Calédonie QGNC08 et de la grille de référence altimétrique RANC08, rapport technique, publication LAREG n° R11

Valty, P. and H. Duquenne (2009) Quasi-geoid of New Caledonia : computation, results and analysis, *Proceedings IAG International Symposium GGEO2008, Chania, Crète, Greece, 23-27 June 2008*, in press, Springer

## 2.2.4. CHAMP DE GRAVITE DE LA TERRE : Bureau Gravimétrique International

**Rédacteurs :** S. Bonvalot (Directeur), A. Briais (Directrice Adjointe)

BGI – CNES/CNRS/IRD – Observatoire Midi-Pyrénées - Toulouse

### 1. Rappel des objectifs, missions et statuts du BGI

Le mandat du BGI est de collecter, valider et redistribuer les données gravimétriques acquises à la surface du globe (Geodesist Handbook, 2007). A ce titre, le BGI gère et développe une base de données gravimétriques comportant à ce jour plus de 12 millions de mesures issues de campagnes à terre, en mer ou de levés aéroportés (Fig. 1) et répond à des demandes d'extraction émanant d'utilisateurs privés ou publics.

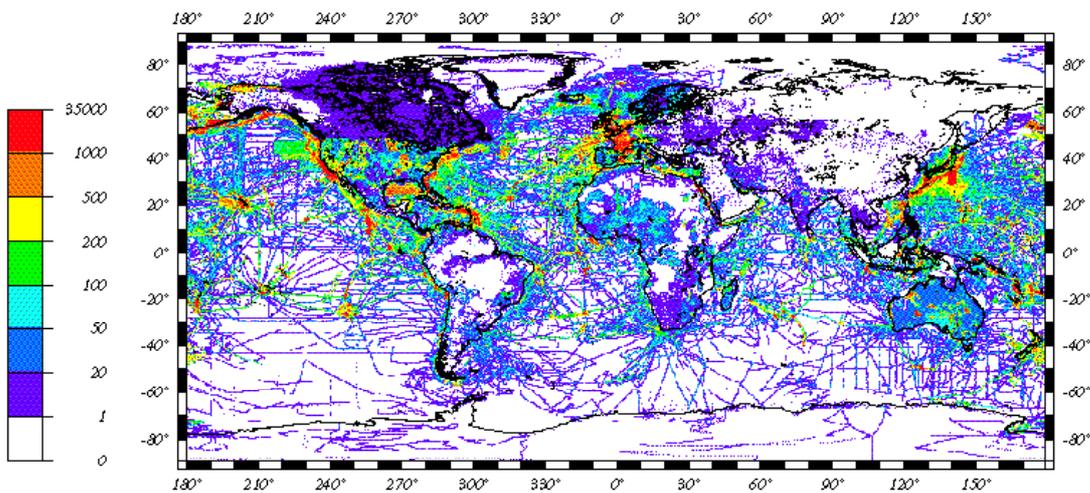


Fig. 1 : Densité de couverture des données gravimétriques terrestres et marines de la base du BGI.

Le Bureau Gravimétrique International (BGI) est un service de l'International Gravity Field Service (IGFS) rattaché à l'International Association of Geodesy (IAG) et de la Fédération des Services d'Astronomie et de Géophysique (FAGS) dépendant directement de l'ICSU (International Council for Science) et de l'UNESCO.

Le BGI contribue également, avec le soutien d'une dizaine d'organismes et de laboratoires français, à des actions de recherche et de développement dans le domaine de la validation, de l'interprétation ou de l'exploitation de données de pesanteur. Il participe en outre à des actions de formation et d'expertise en gravimétrie. Installé depuis sa création (1951) en France, le BGI est hébergé par l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) depuis 1981 et a été labellisé comme service d'observation par l'INSU en 1997.

Les activités du BGI en France sont soutenues par une dizaine d'organismes nationaux qui contribuent à son fonctionnement par des moyens matériels ou humains et qui participent directement aux activités de service, de recherche et développement et de formation menées au sein du BGI. La contribution de chacune des parties est définie par une convention cadre réactualisée tous les 4 ans.

### 2. Bilan des activités 2008

L'année 2007 avait été consacrée à redéfinir le cadre de travail du BGI et à proposer un nouveau projet et une nouvelle organisation pour les années à venir. Elle avait été marquée par plusieurs

événements importants pour le BGI : la préparation et le démarrage d'un nouveau projet quadriennal 2007-2011 accompagné d'un changement de direction et de mouvements de personnels ainsi que le démarrage de nouvelles actions de compilation et de valorisation de données (initiation d'une base de données de gravimétrie absolue, développement d'un nouveau site internet, définition d'un projet de carte gravimétrique mondiale WGM, etc.). L'année 2008 a donc été consacrée à mettre en place et consolider ce nouveau projet avec les différents partenaires.

Parallèlement, le BGI a poursuivi ses activités de service relatives à sa base de données gravimétriques (intégration et validation de nouvelles données, réponses aux demandes d'extraction de données, etc.) ou à sa base de données bibliographiques (mise à jour constante et intégration de nouvelles références...). Il a également poursuivi certaines actions entreprises sur des développements logiciels ou sur d'autres projets scientifiques (voir détail ci-après).

### ***2.1 Projet BGI 2007-2011 / Convention inter-organismes***

Le projet quadriennal<sup>1</sup> rédigé pour l'Assemblée Générale de l'IUGG à Perugia en Juillet 2007 et proposé aux instances internationales de tutelles du BGI (IAG, IGFS, FAGS) du BGI a été approuvé. Le BGI a ainsi été reconduit dans ses activités en France pour la période 2007-2011. Le BGI a également intégré, avec d'autres services nationaux (RENAG, FROG, Obs. Gravi EOST), le nouveau Service d'Observation « Gravimétrie-Géodésie » mis en place par l'INSU en 2008.

La convention relative au fonctionnement du BGI<sup>2</sup> a été soumise aux organismes partenaires (BRGM, CNES, ESGT, INSU, IGN, IRD, SHOM). Un élargissement a été proposé pour intégrer l'IFREMER, comme partenaire du BGI, la banque de données SISMER de l'IFREMER assurant déjà l'archivage des données gravimétriques collectées par les navires de recherche français. Cette convention, déjà signée par un certain nombre d'organismes, est en cours de circulation. Par ailleurs, une coopération a été engagée avec un partenaire étranger, le BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Allemagne) pour la mise en œuvre de la base de données de gravimétrie absolue du BGI. Cette collaboration fait l'objet d'un MOU (Memorandum of Understanding) entre le BGI et le BKG.

Trois grandes priorités ont été définies pour ce prochain quadriennal :

- relancer la collecte des données et faciliter une mise à disposition via internet des données et produits générés par le BGI,
- initier la construction d'une base de données de gravimétrie absolue globale,
- poursuivre des actions de recherche et de formation valorisant la base de données du BGI, en liaison avec les organismes de soutien du BGI.

### ***2.2 Réalisation d'une base de données globale de gravimétrie absolue***

Le BGI a entrepris en 2007 une collaboration avec le BKG (Allemagne) pour construire une base de données globale de gravimétrie absolue. L'application AGRAV développée par le BKG et basée sur une interface Google Map a été installée sur un serveur du BGI en Septembre 2007 (accueil de H. Wziontek du BKG pendant une semaine). Des modifications ont été apportées en 2007-2008 pour prendre en compte les besoins exprimés par le BGI. Cette base de données, installée sur un serveur de l'OMP (DTP) par L. Jahan, Informaticien du DTP, est opérationnelle depuis 2008 et accessible via le site Internet du BGI et sur un site miroir du BKG. Les

---

<sup>1</sup> "International Gravimetric Bureau: Project 2007-2011". Proposal submitted to the IAG Commission at the IUGG XXI General Assembly, Perugia, Italy, 2007, 42p.

<sup>2</sup> "Convention inter-organismes relative au fonctionnement du BGI", Déc. 2007, 9p.

informations consultables et téléchargeables allant de la « méta-donnée » (localisation des sites de mesure), à des données plus complètes (valeurs absolues de la pesanteur, détail des traitements, fiche descriptive des stations, etc.) jusqu'aux fichiers bruts d'observation. La collecte et l'intégration de données de divers pays dans la base ont été initiées soit par le BGI, le BKG ou leurs partenaires, soit encore directement par les utilisateurs eux-mêmes (possibilité aux contributeurs de télécharger directement les observations dans la base à travers l'interface Internet). Une partie des observations issues des gravimètres français FG5 et A10 a été intégrée. La compilation et l'intégration des données à l'échelle globale doit se poursuivre avec l'aide des partenaires du BGI, spécialisés dans le domaine de la gravimétrie absolue.

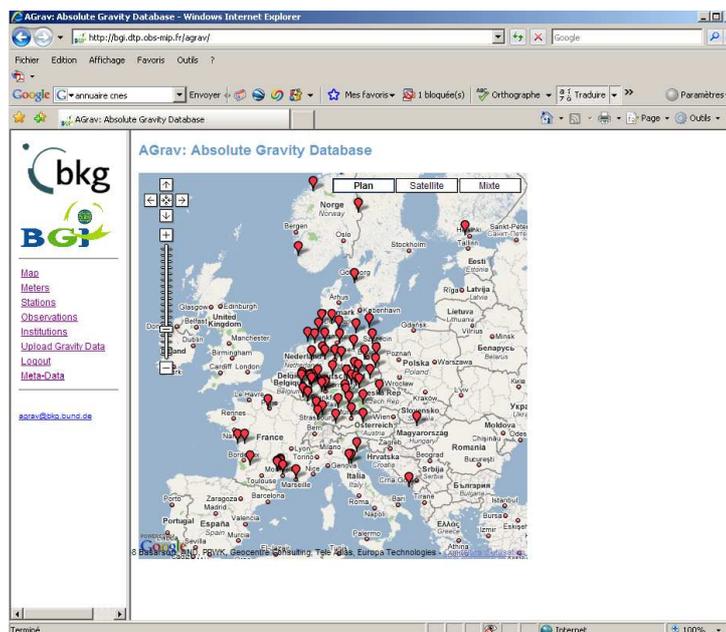


Fig 2 : Interface Internet de la base de données de gravimétrie absolue (BGI-BKG)

### 2.3 Réalisation d'un nouveau site Internet du BGI

Le site Internet du BGI a été redéfini grâce à un soutien de l'IRD. La nouvelle maquette a été élaborée dans le but (i) d'harmoniser le site BGI avec ceux d'autres services rattachés à l'IGFS et à FAGS, (ii) de faciliter l'accès aux données et aux services du BGI (téléchargement de données et produits via Internet), et (iii) de faciliter l'implémentation future de fonctions d'interopérabilité avec d'autres bases de données gravimétriques mondiales ou régionales. Le nouveau site a été mis en service courant 2008 (<http://www.geodesie.ird.fr>). Il reprend les fonctionnalités du site précédent et inclut la mise en ligne des modèles de champ de gravité produit par l'équipe de géodésie spatiale du CNES/GRGS. Des améliorations sont prévues, notamment pour faciliter la diffusion des données et l'accès vers de nouveaux produits et services (ex : téléchargement automatique des données publiques par les utilisateurs à travers l'interface web). Une étape préliminaire à cette action est le regroupement de l'ensemble des bases de données du BGI sur un serveur de l'Observatoire Midi-Pyrénées, afin d'en faciliter l'accès à tout utilisateur. Cette action a été initiée en fin 2008.

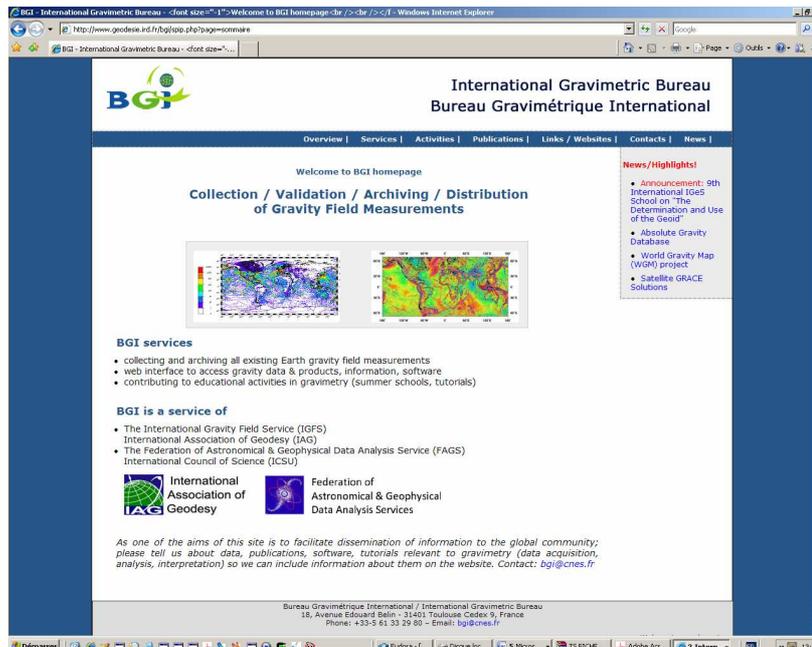


Fig 3 : Page d'accueil du site Internet du BGI (<http://www.geodesie.ird.fr>)

## 2.4 Projets de valorisation des données

### 2.4.1 Projet WGM (World Gravity Map)

À l'initiative du BGI et de la Commission de la Carte Géologique du Monde (CCGM), un projet de réalisation d'une carte globale des anomalies de pesanteur a été initié en 2007 avec le soutien de l'IAG, de l'IGFS et de l'UNESCO. Ce projet « WGM » (World Gravity Map) vise à mettre à disposition de la communauté internationale une carte des anomalies (ou perturbations) gravimétriques, corrigée de la topographie, et divers produits dérivés (grilles numériques d'anomalie, livret en différentes langues...), pour des applications de recherche et d'éducation. Ce projet doit venir compléter une série de carte géologique et géophysiques globales produites par la CCGM (<http://ccgm.free.fr>), à l'instar de la carte magnétique mondiale publiée en 2007 (et qui sera disponible sous forme numérique à une résolution spatiale de 3' x 3').

Le projet WGM prévoit d'intégrer l'ensemble des mesures à terre et en mer disponibles dans la base du BGI ou dans d'autres bases globales ou régionales. Un appel à contribution a été lancé en 2007 et 2008 auprès des services nationaux ou internationaux de divers pays du monde, pour collecter de nouveaux jeux de données. Il prévoit également d'intégrer des modèles globaux issues de données d'altimétrie ou de gravimétrie spatiale tels que les modèles EGM08 et DNSC08 produits dans le courant de l'année 2008 respectivement par le National Imagery and Geographic Agency (NGA) et le Danish National Space Center (DNSC), collaborateurs de ce projet. Comme les autres cartes produites par la CCGM, le projet WGM est prévu comme un projet itératif : les cartes et produits pouvant être réactualisés dans le temps en fonction de la disponibilité de nouveaux jeux de données. La première version devrait être directement issue du modèle EGM08. La Fig. 4 montre la carte globale des anomalies à l'air libre calculées au pas de 5' x 5' à partir du modèle EGM08. Les anomalies de Bouguer et les corrections topographiques sont en cours de calcul. Une adaptation du code QUASPH développé par G. Balmino a été faite en 2008 par G. Moreau (Noveltis) dans le cadre d'un contrat CNES, afin d'inclure le calcul des corrections topographiques en symétrie sphérique. L'application au projet WGM a été initiée en 2009.

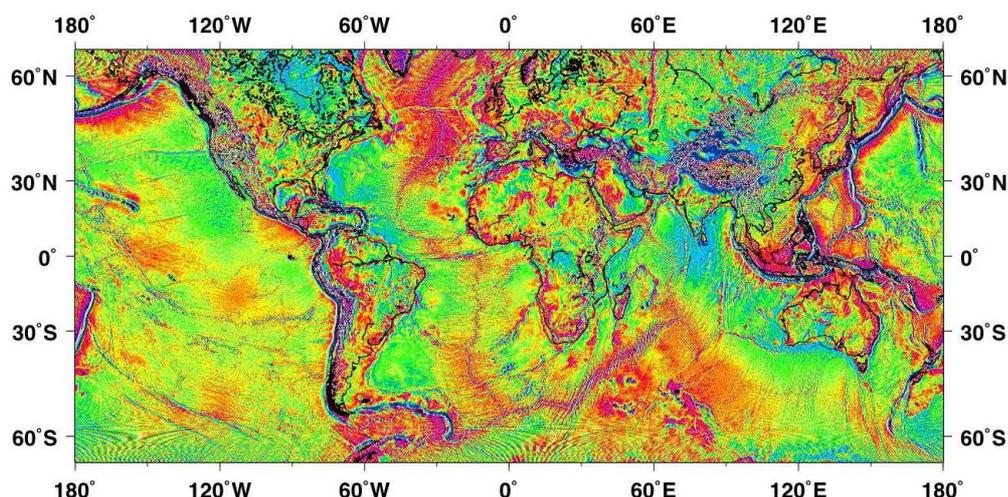


Fig 4 : Carte des anomalies à l'air libres calculées d'après le modèle EGM08

#### 2.4.2 Projet "Géοide Méditerranée Occidentale"

Un projet de calcul du géοide en mer Ligure avait été entrepris au BGI, plusieurs années auparavant, dans le cadre d'une collaboration avec l'IGN (H. Duquenne) et le SHOM (MF. Lalancette) et le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale (LEGOS). Ce projet a été relancé dans l'objectif de calculer un géοide intégrant l'ensemble des données disponibles sur la Méditerranée Occidentale. Il est réalisé en collaboration avec M. Abassi, chercheur Iranien qui avait effectué sa thèse au BGI sous la direction de J-P. Barriot, et qui a été accueilli à deux reprises en été 2007 et en été 2008 au BGI. Ce dernier séjour a permis à M. Abassi de poursuivre l'amélioration d'un script de calcul de géοide basé sur le logiciel Gravsoft qui est actuellement mis en œuvre sur les données de Méditerranée Occidentale. Cette action doit être achevée en 2009 pour en permettre une exploitation scientifique.

Ces deux projets ont bénéficié de l'accueil au BGI d'Aurélie Peyrefitte, Ingénieur d'Etude recrutée en CDD par le BRGM sur un financement CNES (TOSCA) - BRGM pour travailler à l'homogénéisation des jeux de données gravimétriques en vue de la validation et de l'exploitation des futures données GOCE. Elle a ainsi travaillé (i) à la validation des jeux de données pour le calcul de géοide sur la Méditerranée Occidentale et entrepris un premier calcul de géοide et (ii) aux calculs d'anomalie de Bouguer et de correction de terrain et à leur validation pour le projet WGM, avec une application particulière à l'Afrique. Ce projet a également bénéficié de l'expertise de G. Gabalda (Ing. IRD).

### 2.5 Autres activités

#### 2.5.1 Accueils

- Accueil de M. Abassi (chercheur Iranien) en 2008 (Poste rouge CNRS - 2 mois) : contribution au projet « géοide Méditerranée Occidentale » ;
- Accueil d'A. Peyrefitte (CDD Ingénieur CNES-BRGM) depuis Sept. 2008 : contribution aux projets de valorisation des données BGI et préparation à la valorisation/exploitation de données GOCE
- Accueil d'un stage Ingénieur de l'INSA (3 mois) : réalisation de l'interface graphique du programme Sea Gravi Adjust, développé au BGI.

#### 2.5.2 Développements logiciels

- Développement d'un code de calcul de correction de terrain gravimétrique en symétrie sphérique (G. Balmino, G. Moreau, M. Sarrailh)

- Amélioration d'un programme de validation de données de gravimétrie marine (Sea Gravi Adjust) et test sur des données de Méditerranée Occidentale (T. Fayard).

### **2.5.3 Représentation du BGI et participation aux congrès et réunions scientifiques**

- IGFS (International Gravity Field Service) / GGOS (Global Geodetic Observing System) Retreat (March 24-28, 2008. Bertinoro, Italy)
- FAGS (Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services) Annual Meeting (April 23-24, 2008. Paris, France)
- IAG International Symposium. Gravity, Geoid and Earth Observation - GGEO 2008 (23-27 June, 2008. Chania, Crete, Greece)
- 33th International Geological Congress / CCGM General Assembly (Oslo, Norway, 6-14 August 2008)

### **2.5.4 Participation du BGI à des projets scientifiques**

Deux projets initiés en 2007 impliquant des recherches sur l'exploitation de données spatiales GRACE ou GOCE:

- Projet ANR « Ghyraf / Gravimetry, Hydrology Africa » (Coord. J. Hinderer)
- Projet CNES/TOSCA « Solid Earth Exploration with GOCE (SeeGoce) » (Coord. M. Diament).

### **2.5.5 Participation du BGI à la formation**

- Participation du BGI à l'International Geoid School (Come, Italie, Sept. 2008) : Séminaires de M. Sarrailh

## **3. Participants au projet**

### **3.1 Organismes et membres associés au BGI (\* personnels affectés au siège du BGI)**

<b>BRGM</b>	G. Martelet
<b>CNES</b>	M. Sarrailh* (jusqu'au 12/08), R. Biancale*, T. Fayard*, A. Peyrefitte*
<b>CNRS</b>	A. Briaïs*, N. Lestieu*, S. Pecquerie* (jusqu'au 07/08)
<b>ESGT</b>	J. Cali
<b>EOST</b>	J. Hinderer, M. Amalvict
<b>Ifremer</b>	E. Moussat, L. Petit de la Villeon
<b>IGN</b>	O. Jamet, H. Duquenne, I. Panet
<b>IPGP</b>	M. Diament, S. Deroussi
<b>IRD</b>	S. Bonvalot*, G. Gabalda, C. Luro
<b>SHOM</b>	M.F. Lalancette
<b>U. Montpellier</b>	R. Bayer, N. Le Moigne

### **3.2 Autres collaborateurs du BGI**

- BKG (H. Wziontek, H. Wilmes)
- G. Balmino (Eméritat CNES), G. Moreau (Noveltis, CLS)

## 4. Remarques sur les moyens humains et les activités du BGI

Le BGI s'est ainsi engagé dans plusieurs actions destinées à moderniser ses bases de données et à faciliter l'accès auprès de la communauté scientifique internationale et à mieux valoriser ses bases de données en contribuant à des projets de compilation ou de validation des données de pesanteur (ex : pilotage du projet de carte gravimétrique mondiale, participation à la validation de données GRACE et GOCE par des données sol). Ces actions suivent les recommandations émises par le dernier comité d'audit du BGI (2004) et s'inscrivent dans les orientations préconisées par l'IAG en Mars 2008 (GGOS Retreat) pour ses services internationaux regroupés sous l'IGFS (International Gravity Field Service).

Dans sa nouvelle configuration, le siège du BGI à l'OMP Toulouse compte deux entrants en 2007 : S. Bonvalot (DR IRD) et A. Briais (CR CNRS). Le BGI a cependant subi entre 2007 et 2008 le départ de trois Ingénieurs fortement impliqués dans le fonctionnement opérationnel du BGI : M. Sarrailh (Ing. CNES, responsable de la base de données et du développement logiciel - départ Dec 2008), S. Pecquerie (Ing. CNRS, responsable de la base de données bibliographique - départ Juillet 2008) et M. Langellier (Ing. IGN, responsable de l'archivage et de la diffusion des données gravimétriques - départ Mars 2007).

Le programme proposé nécessite des moyens humains et des compétences qui ne sont désormais plus disponibles au BGI. Des solutions permettant de consolider des postes d'Ingénieur au BGI doivent être mises en oeuvre rapidement en concertation avec les différents organismes de soutien du BGI en France pour mener à bien les activités de service.

## 5. Références bibliographiques liées aux activités BGI

### 5.1 Publications

Hinderer, J., C. de Linage, J.-P. Boy, P. Gegout, F. Masson, Y. Rogister, M. Amalvict, J. Pfeffer, F. Littel, B. Luck, R. Bayer, C. Champollion, P. Collard, N. Le Moigne, M. Diament, S. Deroussi, O. de Viron, R. Biancale, J.-M. Lemoine, S. Bonvalot, G. Gabalda, O. Bock, P. Genthon, M. Boucher, G. Favreau, L. Séguis, M. Descloitres, S. Galle. The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment: description and first results. *Journal of Geodynamics* (accepted)

Wilmes, H., Wziontek, H., Falk R., Bonvalot, S. AGrav - the New International Absolute Gravity Database and a Proposed Cooperation with the Global Geodynamics Project (GGP). *Journal of Geodynamics* (accepted).

### 5.2 Communications

Bonvalot, S. and BGI team. Annual meeting of FAGS (Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services). April 23-24, 2008. Paris, France.

Bonvalot, S. and BGI team. IGFS (International Gravity Field Service) / GGOS (Global Geodetic Observing System) Retreat. March 24-28, 2008. Bertinoro, Italy.

Bonvalot, S., Hinderer, J., Gabalda, G., Luck, B., Remy, D., Bondoux, F. Absolute gravity measurements along the Andean margin: A contribution to earthquake and volcano geodesy. 33th International Geological Congress, Oslo, Norway, 6-14 August 2008

Bonvalot, S., J. Hinderer, G. Gabalda, B. Luck, D. Remy, F. Bondoux. Temporal gravity changes and crustal deformation along the Andean margin: results from combined Absolute gravity, GPS and InSAR observations. IAG International Symposium. Gravity, Geoid and Earth Observation (GGEO 2008). 23-27 June, 2008. Chania, Crete, Greece.

Bonvalot, S., M. Sarrailh, A. Briais, R. Biancale T. Fayard, G. Gabalda. The World Gravity Map (WGM) project: objectives and status. IAG International Symposium. Gravity, Geoid and Earth Observation (GGEO 2008). 23-27 June, 2008. Chania, Crete, Greece.

Bonvalot, S., Sarrailh, M., Briais, A., Biancale, R., Fayard, T., Gabalda G. and BGI, Team. The World Gravity Map (WGM) project: Objectives and status. 33th International Geological Congress, Oslo, Norway, 6-14 August 2008.

Briais, A., Bonvalot, S., Sarrailh, M., Biancale, R., Fayard, T., Gabalda G., and BGI, Team. The new world gravity map project: A tool for geodynamic studies. 33th International Geological Congress, Oslo, Norway, 6-14 August 2008

Briais, B., S. Bonvalot, M. Sarrailh, and the BGI Team. The new World Gravity Map project : a tool for geodynamic studies. IAG International Symposium. Gravity, Geoid and Earth Observation (GGEO 2008). 23-27 June, 2008. Chania, Crete, Greece.

Moreaux, G., G. Balmino, M. Sarrailh, S. Bonvalot, R. Biancale, A. Briais Computing gravity terrain corrections at global scale: An application for the World Gravity Map (WGM) project. IAG International Symposium. Gravity, Geoid and Earth Observation (GGEO 2008). 23-27 June, 2008. Chania, Crete, Greece.

Wziontek, H., H. Wilmes, J. Ihde, S. Bonvalot. AGrav: An international database for absolute gravity measurements. IAG International Symposium. Gravity, Geoid and Earth Observation (GGEO 2008). 23-27 June, 2008. Chania, Crete, Greece.

Wziontek, H., Falk, R., Wilmes, H., Bonvalot, S., 2008. AGrav - the New Absolute Gravity Database and a Proposed Cooperation with the GGP Project. *New Challenges in Earth's Dynamics - ETS2008*. Sept 1-5, 2008 - Jena, Germany.

Wziontek, H., Ihde, J., Wilmes, H., Bonvalot, S., An international database for absolute gravity measurements - a joint project of BKG and BGI. *EUG Meeting*, 13-18 April 2008, Vienna, Austria.

### 3. SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE

#### 3.1. Systèmes de référence et IERS

3.1.1. Système céleste

3.1.2. Rotation de la Terre

3.1.3. Repère international de référence terrestre (ITRF)

3.1.4 Centre de combinaison

3.1.5. Aspects théoriques

#### 3.2. Apport des mesures géodésiques

3.2.1. DORIS

3.2.2. Laser

3.2.3. GNSS

3.2.4. VLBI

3.2.5. Marégraphie



## 3.1. SYSTEMES DE REFERENCE ET ROTATION DE LA TERRE

### Introduction

Le présent rapport décrit brièvement les activités et les faits marquants concernant des principales composantes de l'IERS en France sur l'année 2008:

- le service du système céleste ICRS à l'Observatoire de Paris (responsable J. Souchay en coopération avec l'USNO/USA),
- le service de la rotation de la Terre à l'Observatoire de Paris (responsable D. Gambis),
- le service du Système Terrestre ITRS au LAREG / IGN (responsable Z. Altamimi).

La section 4 décrit les développements du programme « Centre de Recherche sur les Combinaisons du GRGS » fédérant plusieurs équipes du GRGS.

La section 5 décrit les développements concernant certains aspects théoriques de la rotation de la Terre et des systèmes de référence.

#### 3.1.1. Système céleste (ICRS)

Actuellement nos efforts sont activement portés sur deux thèmes, concernant l'astrométrie et le suivi au sol de satellites artificiels.

La mission GAIA est un des projets phares de l'agence spatiale européenne (ESA). Le satellite GAIA sera lancé en 2011-2012 ; il en est à la dernière phase de planning ("specific objects"). L'équipe « Systèmes Célestes » du SYRTE travaille dans la CU3 - GAIA/Coordination (Unit 3/ Core Processing), avec deux buts essentiels parmi d'autres: la construction de catalogues de quasars (1) et le suivi au sol de satellites artificiels (2). Nous explicitons dans la suite ces deux projets :

##### *1. Construction de catalogues de quasars*

Le Catalogue initial des quasars est développé au sein du GWP-S-335-13000 ("work package" CU3). Son but principal est de fournir un catalogue de quasars, à couverture maximale, et à zéro contaminant. Le catalogue doit avoir un minimum de 100.000 objets, avec des positions dans le système ICRS. Notre activité associée au GRGS a déjà permis de présenter deux versions du catalogue (LQAC, cf. Souchay et al. A&A 2009 ; LQRF, cf. Andrei et al., A&A 2009) avec 116.000 quasars et une séparation moyenne plus petite que 2 degrés. Un des objectifs est aussi la qualification des objets. En particulier il faut définir le redshift, les magnitudes en couleur, la morphologie et la variabilité. Le catalogue final doit être fourni au CU3/DPAC GAIA avant la fin de 2010. Il est important de remarquer que toute l'astrométrie de la mission GAIA, en sus des importants objectifs d'ordre astrophysique, est basée sur l'observation des quasars.

Un des objectifs les plus importants évidemment est d'assurer l'absence de tout contaminant (une étoile prise pour un quasar). Pour cela, après une recherche automatique déjà effectuée, chaque objet est vérifié individuellement pour déterminer son redshift de façon indépendante et redondante. Les autres objectifs ont pour objet des travaux théoriques, parfois sur des programmes spéciaux d'observation déjà entamés (avec succès) en 2008 (ESO 2.2m, SOAR, et CFHT).

##### *2. Suivi au sol de satellites artificiels (WMAP, GAIA)*

Le suivi au sol de satellites nous apparaît comme une thématique tout à fait en adéquation avec les activités du GRGS. Les observations depuis le sol du satellite GAIA sont développées dans

GAIA GBOT (CU3). Ce programme va s'étendre pendant toute la mission GAIA, pour fournir des éléments de position et vitesse du satellite avec la précision respectivement d'une centaine de mètres et quelques millimètres par seconde. Ce sont des objectifs difficiles à réaliser, qui doivent être maintenus pendant les cinq ans de la mission GAIA, et avec des observations effectuées dans différents observatoires. Il est impératif de conduire des campagnes avant la mission pour mettre au point les méthodes d'observation, réduction et normalisation des données. L'équipe « Systèmes Célestes » du SYRTE est plus particulièrement chargée du traitement des données. Pour cela des missions ont été effectuées avec succès sur le satellite WMAP actuellement en orbite et avec des spécificités quasi identiques à GAIA (point de Lagrange L2, magnitude équivalente) pendant 2008 ; elles continueront activement en 2009 et 2010. Des campagnes d'observations de WMAP sont en cours en France (OHP, Pic du Midi) et au Brésil. Le développement des algorithmes de réduction et de traitement des O-C est l'un des objectifs principaux des missions prévues.

### *Participants*

A. Andrei (assoc.), C. Barache, S. Bouquillon, J. Souchay, F. Taris.

### 3.1.2. Rotation de la Terre

Le Service de la rotation de la Terre de l'IERS à l'Observatoire a principalement pour tâche la collecte des données relatives aux paramètres définissant l'orientation de la Terre (Earth Orientation Parameters, EOP). Ces données sont archivées et analysées pour être combinées de manière optimale. C'est la solution de référence internationale (EOP IERS C04) mise à la disposition des utilisateurs par les moyens électroniques web/ftp. Il fonctionne sur deux rythmes distincts, opérationnels en temps quasi-réel et également annuel. Les traitements opérationnels ont notamment pour applications la navigation interplanétaire et l'orbitographie en temps réel des programmes GPS, JASON, ENVISAT. Les séries à long terme recouvrent la période de 1846 à maintenant pour les coordonnées du pôle, depuis 1900 pour UT1-UTC. Ces séries sont utilisées en particulier pour l'étude de phénomènes géophysiques liés aux variations atmosphériques, océaniques, aux interactions et couplages entre le noyau et le manteau de la Terre ainsi que pour la métrologie fine liée aux systèmes de référence. L'amélioration progressive dans les données et les modèles nous ont amenés à améliorer significativement l'algorithme de calcul de notre solution combinée IERS C04 en tenant compte des résolutions adoptées à l'UAI en 2000.

Depuis une dizaine d'années, grâce au développement des techniques d'observation mais aussi aux raffinements conceptuels sur les systèmes de référence géodynamiques et aux diverses modélisations, les problèmes d'exactitude sont devenus prépondérants. Ainsi on pense dans un proche avenir déterminer simultanément les paramètres liés à l'orientation de la Terre, les positions des stations d'observation et leur déplacement et les positions des sources extragalactiques qui définissent le système de référence international céleste ou ICRF en plus de la détermination des paramètres troposphériques.

Ces méthodes sont déjà en développement dans nos équipes dans le cadre d'un projet fédératif au GRGS et sont l'objet du chapitre 4.

#### *1. Amélioration de l'algorithme de combinaison*

L'algorithme de combinaison de la solution EOP conduisant à la série IERS de référence IERS C04 a été significativement amélioré au cours des années passées. Les améliorations concernent en premier lieu la précision et la capacité de traiter un nombre de données croissantes pour la construction de cette solution (Bizouard et Gambis, 2009). La solution ainsi obtenue est la série IERS 05 C04.

L'une des principales tâches est de produire un ensemble de Paramètre de l'Orientation de la

Terre (Earth orientation Parameters ou EOP), cohérent avec l'International Celestial Reference Frame (ICRF) et l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Les séries opérationnelles produites par les centres d'analyse des diverses techniques ne sont pas parfaitement alignées avec l'ITRF et l'ICRF. Elles se réfèrent parfois à d'autres systèmes de référence terrestre et céleste réalisés par les centres d'analyse. On peut montrer que l'incohérence des séries EOP par rapport à l'ITRF et l'ICRF produit des effets systématiques entre les séries. A la fin de l'année 2006, les incohérences ou défaut de fermeture atteignaient 200  $\mu$ s pour les coordonnées du pôle, 20  $\mu$ s pour UT1 et environ 50  $\mu$ s pour les offsets en nutation, grandeurs significatives au vu des précisions actuelles. Cela était préjudiciable par exemple dans le traitement en temps quasi-réel des données du système GPS. Pour la première fois la réalisation de l'ITRF, ITRF2005 comprend en dehors d'un jeu de positions vitesses de coordonnées terrestres, un ensemble de paramètres de la rotation de la terre, coordonnées du pôle et UT1-UTC dans le système ITRF et ce jusqu'à fin 2007. Ce sera également le cas pour l'ITRF2008 qui devrait être publié courant 2009.

## 2. Stratégie de la maintenance de la série 05 C04 dans le système ITRF2005

Cette stratégie a été utilisée à partir de 2006.0 par l'utilisation d'une extension de la série EOP(ITRF2005) obtenue par CATREF (IGN, Z. Altamimi). La série 05C04 EOP est de manière opérationnelle calculée à partir des Centres Techniques relatifs aux techniques VLBI, SLR et LLR, DORIS et GPS. Se pose le problème de la maintenance de sa cohérence avec l'ITRF2005 après la période sur laquelle celui-ci a été édifié, soit après 2006.0. Récemment des solutions reposant sur les fichiers SINEX des données des techniques GPS et VLBI ont été calculées par le centre ITRS par le logiciel CATREF. Ces solutions sont des extensions des séries EOP séries associées à l'ITRF2005 sur l'intervalle de 2006.0 à 2009.0 Nous comparons ces solutions à la 05C04 indépendamment calculée.

Il apparaît dans la figure ci-dessous que nous sommes capables d'assurer la maintenance de la cohérence entre la 05C04 et l'ITRF2005 au niveau de 30-50 micro secondes de degré ce qui est inférieur à leur incertitude. Notons, après 2007, un accroissement de cet écart que l'on peut aisément attribuer au fait qu'à partir de cette date les centres de phases absolus des antennes sont utilisés pour les traitements GPS dans le cadre de l'IGS.

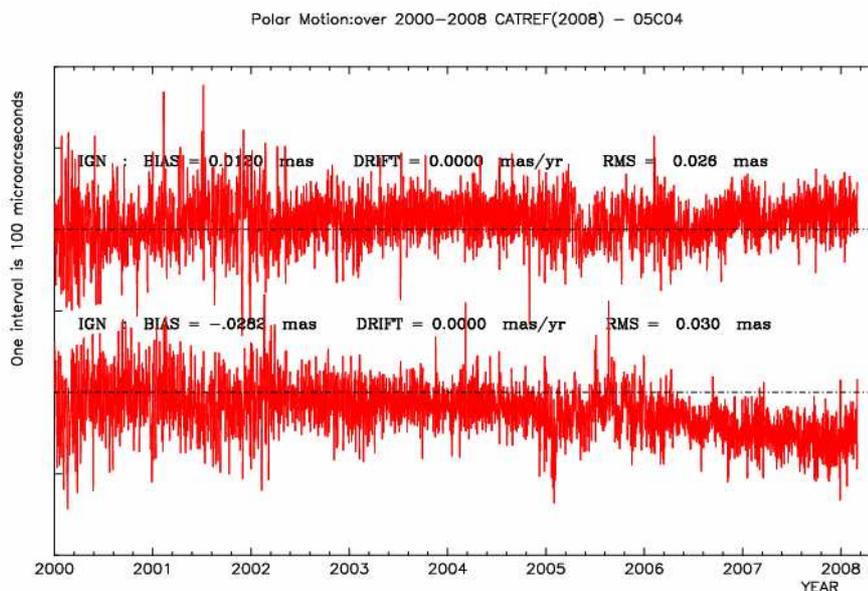


Fig. 1 – Ecart pour les coordonnées du pôle entre la série C04 et la série associée à l'ITRF2005. L'extrapolation de cette série après deux ans montre que la cohérence peut être assurée au niveau de 30-50 micro secondes de degré, de l'ordre de la précision actuelle sur les données.

### *Amélioration de la précision de la solution*

L'algorithme amélioré ainsi que l'adoption du nouveau modèle de nutation (MHB 2000) conduit à une amélioration significative de la solution combinée IERS C04. Ceci peut être illustré par un meilleur accord de la solution combinée avec les séries individuelles, soit 4 microsecondes pour UT1 et 40-50 micro secondes de degré pour la nutation. La cohérence et la stabilité à long terme sont également améliorées par la possibilité d'étendre le calcul de la solution sur 20 ans. Pour tenir compte de l'amélioration de la précision sur les différents paramètres EOP et de la diminution du bruit à court terme, on tient compte d'un filtrage évolutif. Notamment le filtrage actuel pour les coordonnées du pôle et UT1 retire le bruit en dessous de 2 jours. Par contre, la valeur de l'excès de la durée du jour provenant des techniques satellitaires, GPS et télémétrie laser reste biaisée à cause de la propagation d'erreurs orbitales dues à une mauvaise modélisation.

### **3. Maintenance et développement du site web / ftp**

Les améliorations avaient pour objectif de rendre le site web (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>) plus convivial et de mettre à la disposition des utilisateurs les routines nécessaires à leurs analyses selon les nouvelles résolutions. Cela concerne également la création et le développement d'outils interactifs sur la page WEB du service (PHP, programme Fortran et C interfacés) pour visualiser, analyser, sélectionner les données de la rotation de la Terre. Des nouvelles présentations des statistiques sous forme d'histogrammes sont désormais disponibles.

### **4. Participants au projet**

Daniel Gambis	Responsable, Astronome
Christian Bizouard	Astronome adjoint
Gérard Francou	Astronome adjoint
J.Y. Richard	IR CNRS
Teddy Carlucci	Assistant Ingénieur, développements statistiques et mathématiques
Olivier Becker	Technicien MEN, exploitation opérationnelle
Pascale Baudoin	Adjointe-administrative, Rectorat, secrétaire
Lucia Seoane	Doctorante

#### **3.1.3. Repère international de référence terrestre (ITRF)**

Le thème central des activités de recherche et de service scientifique liées à l'ITRF est l'amélioration de son exactitude en terme de définition du repère : origine, échelle, orientation et évolution temporelle. Ce chapitre résume les principales activités entreprises durant l'année 2008.

Les principaux travaux réalisés en 2008 sont en particulier :

- Valorisation de l'ITRF2005 et des analyses postérieures sur la stabilité des paramètres du repère terrestre pour des présentations à des congrès (EGU, AGU, IAG/FIG, IGS Workshop, COSPAR) et publication d'articles (voir rubrique publications).
- La comparaison des séries temporelles de positions issues de plusieurs techniques nécessite leurs expressions dans un même repère de référence. Malheureusement, du fait de la répartition hétérogène des stations sur la croûte terrestre, cette opération affecte les séries temporelles de positions des stations, par une erreur appelée effet de réseau. Des études approfondies, basées sur l'analyse de données synthétiques, ont été effectuées pour réduire cette source d'erreur. L'application des méthodes développées permet de mettre en évidence une meilleure adéquation des déplacements verticaux des stations VLBI, SLR et GPS [Thèse Xavier Collilieux].

- L'évaluation de la translation des coordonnées quasi-instantanées du réseau de télémétrie laser par rapport à leurs coordonnées ITRF permet d'évaluer l'écart entre l'origine de l'ITRF et une réalisation du centre des masses quasi-instantané. Une comparaison rigoureuse a été effectuée avec des modèles indépendants du mouvement du géocentre d'origine géophysique. Elle met en évidence une bonne adéquation à la fréquence annuelle. L'effet de réseau affecte toutefois la détermination de ce phénomène avec une erreur de l'ordre de 2 mm [Collilieux et al., 2008]. La figure 1 présente plusieurs estimations de la composante X du mouvement du géocentre.
- L'utilisation d'un modèle de déplacement des stations relié aux phénomènes de surcharge a été étudiée pour déterminer un champ de vitesses de stations à partir des données d'une seule technique de mesure. La diminution des termes annuels de certains paramètres de biais (échelle et translations) montre l'effet positif d'une telle correction. Les vitesses des stations sont modifiées d'au plus 0.5 mm/an. Nous n'avons pas pu jusqu'alors valider physiquement le champ des vitesses ainsi estimé.

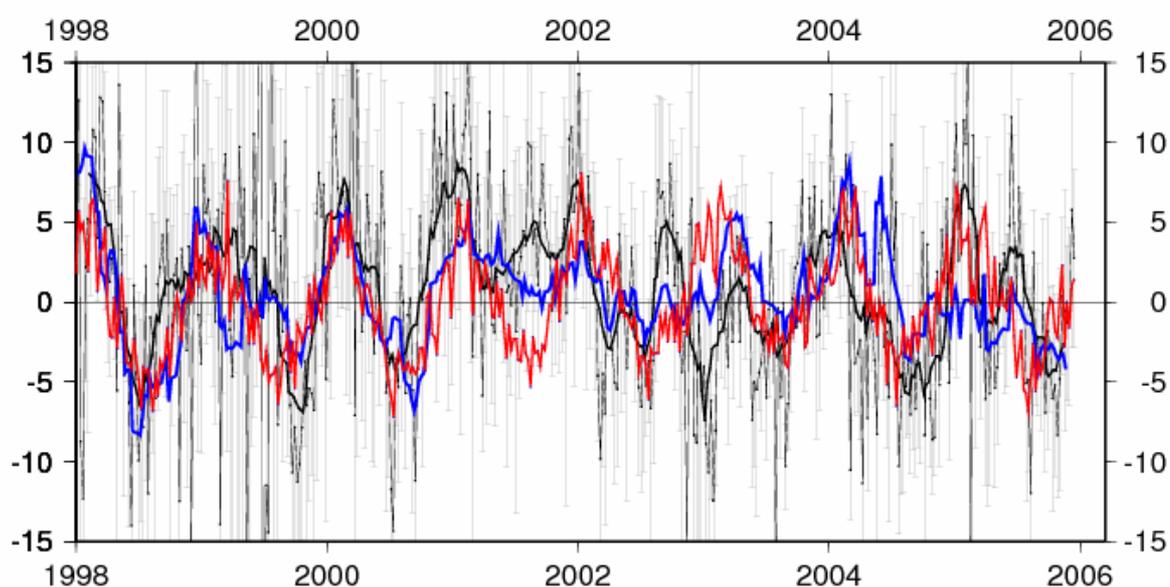


Fig. 1 : Composante X du mouvement du géocentre. Bleu : moyenne mobile (10 semaines) de l'estimation SLR seule, Gris : estimation combinée SLR et GPS. Noir : moyenne mobile (10 semaines) de l'estimation combinée SLR et GPS. Rouge : modèle géophysique fourni par Tonie van Dam (Université du Luxembourg)

- Participation aux travaux du comité National Research Council sur l'infrastructure géodésique de précision aux USA (Z. Altamimi)
- Animation des travaux de la Commission 1 de l'AIG (Z. Altamimi)

### ***Participants au projet :***

Zuheir Altamimi  
 Xavier Collilieux  
 Juliette Legrand  
 Bruno Garayt  
 Claude Boucher

### 3.1.4. Centre de combinaisons

#### **1. Centre de Recherche sur les Combinaisons du GRGS dans le cadre de l'IERS (CRC)**

Les paramètres de la rotation de la Terre et les systèmes de référence céleste et terrestre sont de manière courante déterminés indépendamment. L'inconvénient de cette méthode est que leur cohérence au sens géodésique n'est d'une part pas assurée avec exactitude et que d'autre part elle se dégrade avec le temps. Cela conduisait par le passé à un recalcul régulier de la série de paramètres de rotation de la Terre. La nouvelle philosophie est de déterminer en même temps systèmes de référence et rotation de la Terre (dans un premier temps le système céleste ICRF n'est pas concerné).

Dans le cadre du GRGS avec la coopération de divers instituts français, nous développons un grand projet (dit "CRC": Combination Research Center) fondé sur l'analyse des données spatiales par les logiciels "GINS/DYNAMO" développés au GRGS.

Dans le cadre des centres de recherches sur combinaison de l'IERS, le GRGS a proposé en 2000 d'étudier la combinaison des cinq techniques (SLR, LLR, VLBI, GPS et DORIS) au niveau du traitement des observations. Le but de ce projet est de traiter séparément les données des différentes techniques par le même logiciel "GINS" développé dès 1965 au GRGS (Chassaing) pour déterminer des solutions globales et homogènes comprenant les paramètres de la rotation terrestre (mouvement du pôle, temps universel, corrections de nutation) ainsi que les coordonnées de stations du réseau d'observation et dans le futur les coordonnées des radiosources extragalactiques. Les équations normales issues des traitements sont ensuite traitées par le logiciel "DYNAMO" pour dériver une solution combinée « référence terrestre et rotation de la terre ». Les pondérations des diverses techniques dans la solution finale sont obtenues par la méthode de variance covariance d'Helmert. Cette étude est la suite du travail de thèse de Philippe Yaya soutenue en 2002 (directeurs de thèse : N. Capitaine et D. Gambis) et faite dans le cadre d'une collaboration entre le SYRTE/ Observatoire de Paris et le CNES (R. Biancale). Dans ce travail, 3 mois de données sur une période test avaient été analysées. Les résultats s'étaient avérés suffisamment prometteurs pour nous inciter à poursuivre le projet dans le cadre tout d'abord de la thèse de D. Coulot, puis dans le service de la rotation de la terre au SYRTE. Depuis janvier 2008, J.Y. Richard, IR CNRS travaille à plein temps sur ce sujet à l'Observatoire de Paris.

#### **2. Analyses menées à l'Observatoire de Paris**

En 2004, nous avons installé à l'Observatoire de Paris un serveur dédié aux traitements de combinaison et implanté les procédures mises au point au département GEMINI de l'OCA par D. Coulot, P. Berio et O. Laurain. Par la suite nous avons réécrit la plupart de ces scripts afin d'acquies et de maintenir la maîtrise des modules DYNAMO. Grâce à notre coopération avec l'équipe GRGS/CNES (R. Biancale, J.M. Lemoine, J. Ch. Marty) nous avons adapté un nouvel ensemble de scripts identiques à ceux installés à Toulouse pour une validation plus aisée. Depuis le début de l'année 2005, les traitements des données des diverses techniques sont répartis au sein de plusieurs équipes: GPS à CLS/Toulouse (S. Loyer), Doris à CLS/Toulouse (L. Soudarin), la télémétrie laser sur satellite à l'OCA/Grasse (P. Berio, O. Laurain) et laser-Lune au CNES/Toulouse et à l'Observatoire de Paris (J. Ch. Marty et G. Francou), le VLBI, à l'Observatoire de Bordeaux (G. Bourda et P. Charlot).

A l'Observatoire de Paris (J.Y. Richard, D. Gambis), on effectue les analyses finales concernant le traitement opérationnel du cumul des matrices ainsi que les inversions des matrices par le logiciel DYNAMO en collaboration avec le CNES/Toulouse (J.M. Lemoine, R. Biancale). De nombreux tests sont faits pour mettre au point une procédure optimale pour fournir une solution globale "Paramètres de la rotation de la Terre et Système de Référence" avec la meilleure exactitude possible. Les paramètres critiques à prendre en compte englobent les contraintes

minimales sur les positions de stations, les rattachements locaux entre stations de techniques différentes et les contraintes de continuités sur les paramètres de la rotation de la Terre entre les matrices successives hebdomadaires. Grâce à la nouvelle chaîne installée début 2008, nous avons traité trois ans de mesures en nous concentrant tout d'abord sur la combinaison VLBI+GPS en appliquant les contraintes de continuités fortes de 1mm sur le pôle et UT1. Sur 11 semaines de 2008, pour les coordonnées du pôle, l'accord de la solution combinée VLBI+GPS+SLR+DORIS avec respectivement les poids 1.102, 5.212, 1.709, 1.927 couvrant la période du 30 décembre 2007 au 15 mars 2008 est de l'ordre de 150 $\mu$ s comme l'indique les figures 4.2.1 et 4.2.2, avec une contrainte de continuité sur les mesures à 6h de 3cm sur les coordonnées du pôle et de 64 $\mu$ s sur UT.

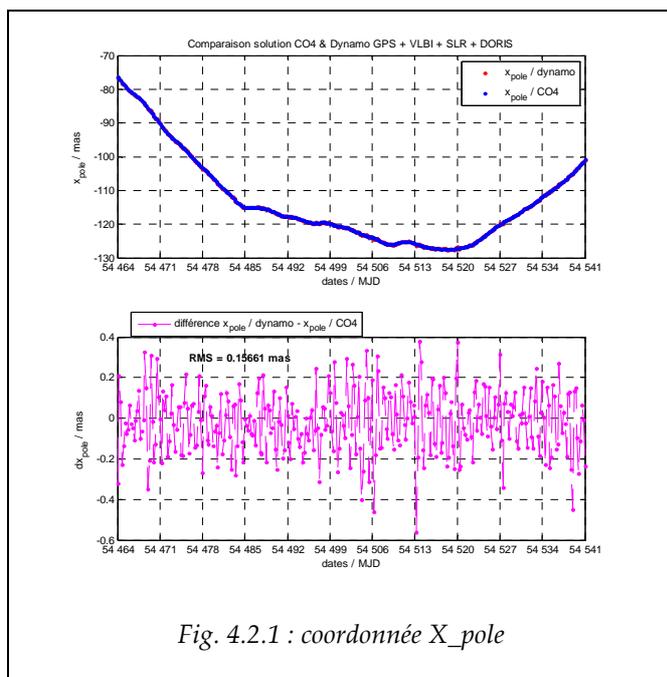


Fig. 4.2.1 : coordonnée  $X_{pole}$

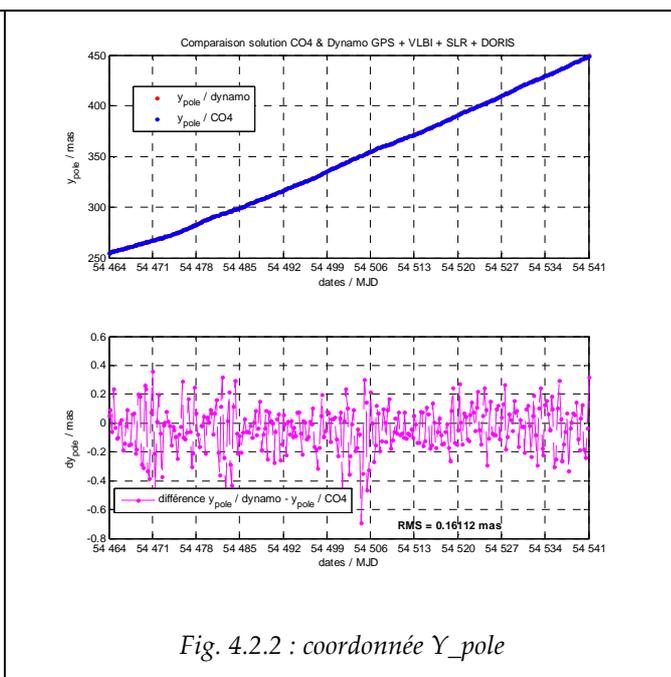


Fig. 4.2.2 : coordonnée  $Y_{pole}$

Une solution sur la nutation a été calculée par combinaison des observations du VLBI, GPS, SLR et DORIS avec respectivement les poids 1.102 et 5.212, 1.709 et 1.927 couvrant la période du 9 octobre 2005 au 23 décembre 2007 (120 semaines de chaque technique cumulées). On obtient les solutions des paramètres  $\epsilon$  et  $\psi \sin(\epsilon_0)$  sur les figures 4.2.3 et 4.2.4 en ayant au préalable fixé les coordonnées du pôle et UT, avec des contraintes minimales de 0.1mm.

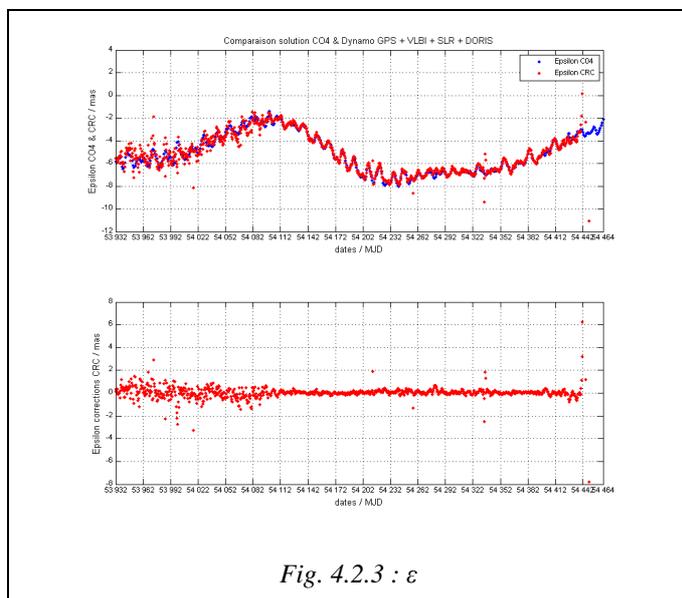


Fig. 4.2.3 :  $\epsilon$

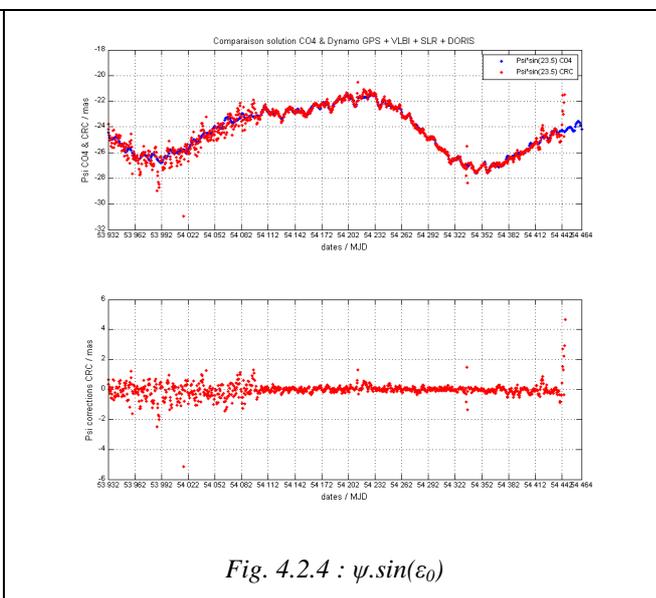


Fig. 4.2.4 :  $\psi \cdot \sin(\epsilon_0)$

De nombreux tests sur le logiciel DYNAMO sont en cours de développement à l'Observatoire en collaboration avec les différents centres d'analyse des techniques afin de fournir en opérationnel des solutions EOP+TRF. Par ailleurs, grâce au soutien du GRGS/CNES à Toulouse (J.C. Marty), nous avons pu installer la dernière version GINS-PC ainsi que l'accès à la base de données « Bérénice » du CNES. En particuliers, des solutions de coordonnées de stations par combinaison des observations ont été estimées, ainsi que des tests sur la contrainte de linéarité journalière pour l'estimation du pôle et de UT. Des solutions du pôle et de UT par cumul des observations mono technique (GPS, VLBI, SLR, DORIS) sont également en cours pour tester nos résultats avec ceux des centres de traitement associés.

Afin de participer à des campagnes de comparaisons de solutions des EOP et coordonnées de stations obtenues par combinaisons de techniques d'observations, l'exploitation de l'outil de conversion de format équations normales GINS en équations normales au format SINEX a été repris et développé. Le format standard SINEX permettra de comparer nos solutions de coordonnées de stations à celle estimées par l'IGN et de contribuer au futur ITRF.

Une nouvelle machine destinée aux logiciels de traitements de géodésie (GINS, DYNAMO, CATREF) a été mise en service fin 2007 dénommée « dynamo2 » et la migration de ces logiciels a été réalisée. Cette machine bénéficie d'une plus grande mémoire vive et d'une rapidité de calcul supérieure à l'ancienne machine « dynamo » en particulier cela permet de cumuler un grand nombre de paramètre (50000) comme les paramètres de troposphère et des études portant sur la troposphère pourront être développées.

La méthode courante de détermination des paramètres de la rotation de la Terre (EOP) devrait être dans l'avenir remplacée par une combinaison globale EOP+TRF. Le projet de combinaison des techniques au niveau observationnel est très ambitieux et fédère plusieurs équipes du GRGS. Nous avons une « avance » sur d'autres équipes internationales qui devrait nous permettre dans l'avenir de jouer un rôle prépondérant dans ce domaine. Lors d'une réunion de spécialistes qui a eu lieu à Monterey, USA en décembre 2007, il a été décidé de créer un groupe de travail sur les combinaisons au niveau des observations. Le Directing Board de l'IERS a proposé à R. Biancale et D. Gambis d'en être les responsables.

### ***3. Analyses menées au LAREG/IGN***

Les travaux de thèse d'Arnaud Pollet (co-encadrés par N. Capitaine et D. Coulot) ont donné lieu à un poster à l'EGU en avril 2008. Les résultats de l'année 2008 sont exposés dans la suite.

### ***4. Résultats***

Le logiciel LOCOMOTIV (Logiciel de COMbinaison des Observations des Techniques Individuelles et de Validation) a été enrichi pour permettre l'étude de la pondération des techniques de géodésie spatiale au sein d'une combinaison au niveau des observations. La méthode de repondération par moindres carrés, appelée « degré de liberté », a été implémentée et il a été montré que les poids utilisés à l'heure actuelle à l'Observatoire de Paris et obtenus il y a quelques années par méthode d'Helmert n'étaient plus valides (notamment en raison de changement dans la pondération de mesures dans GINS).

Le réseau de stations utilisé jusqu'à maintenant a montré ses limites quant au nombre de sites co-localisés disponibles, notamment en raison du réseau GPS. Un retraitement des données GPS est donc en cours. Environ 170 stations GPS ont été sélectionnées, recouvrant l'ensemble des « core » stations de l'IGS ainsi que l'ensemble des stations GPS co-localisées. L'estimation directe de ces 170 stations par le GINS-PC n'étant pas envisageable d'un point de vue pratique au LAREG, il a été décidé de pratiquer par calcul de sous-réseaux. La détermination de 4 sous-réseaux globaux a été réalisée avec des algorithmes génétiques pour obtenir les sous-réseaux les mieux répartis. Les

difficultés sous-jacentes à l'utilisation de sous-réseaux ont donné lieu à l'implémentation d'une méthode de combinaison d'orbites (dérivée de celle de l'IGS).

L'étude de l'utilisation des délais troposphériques zénithaux fournis par l'ECMWF pour la technique de télémétrie laser avec la paramétrisation recommandée par l'ILRS (notamment au niveau des orbites) nous a amenés à conclure que cette utilisation n'était pas possible pour le laser. En effet, l'utilisation directe, au travers du modèle de Mendès, des informations des capteurs météorologiques fournit de meilleurs résultats. La modélisation des paramètres orbitaux utilisée précédemment masquait ce phénomène par l'estimation d'un biais radial.

Dans l'optique d'utiliser les biais troposphériques zénithaux comme paramètres communs supplémentaires dans la combinaison, certains outils ont été modifiés afin d'égaliser les valeurs a priori de ces biais dans les fichiers de dérivées partielles en sortie de GINS pour toutes les techniques.

### 5. *Participants au projet:*

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

S. Loyer	CLS/Toulouse	(GPS)
L. Soudarin	CLS/Toulouse	(DORIS)
G. Bourda, P. Charlot	Observatoire de Bordeaux	(VLBI)
F. Deleflie, O. Laurain	OCA/Grasse	(SLR)
J. Ch. Marty	CNES/Toulouse	(LLR)
G. Francou	Observatoire de Paris	(LLR)

#### **Combinaisons finales et analyses :**

D. Gambis, J.Y Richard, C. Bizouard, T. Carlucci,	Observatoire de Paris
R. Biancale et J.M. Lemoine	CNES/Toulouse
A. Pollet, D. Coulot, S. Nahmani	IGN/LAREG

### 3.1.5 Aspects théoriques

Les expressions semi-analytiques des coordonnées du pôle céleste intermédiaire (CIP) et de l'origine céleste intermédiaire (CIO), qui traduisent la précession-nutation de l'axe de la Terre, ont été développées avec des exactitudes adaptées à différents types d'application (Capitaine & Wallace 2008). L'application au cas du GNSS a été étudiée. Les équations de la rotation de la Terre ont été développées en coordonnées cartésiennes pour une Terre non-rigide (Stefka et al. 2008). Des comparaisons du modèle IAU2006/IAU2000A de précession-nutation (précession P03 de Capitaine et al. 2003 et nutation MHB2000 de Mathews et al. 2002) avec les meilleures séries existantes d'observations VLBI (Capitaine et al. 2008b), ainsi que LLR (thèse de W. Zerhouni) ont montré l'excellent accord entre théorie analytique et observations. Ces comparaisons permettent de déduire une correction de l'ordre de 50  $\mu$ s sur l'amplitude de la nutation de période 18.6 ans qui pourrait être due à un léger défaut de modélisation MHB2000 du couplage géomagnétique entre les composantes internes de la Terre (noyau, manteau, graine).

### *Participants*

Nicole Capitaine	Astronome
Sébastien Lambert	Astronome-adjoint
Wassila Zerhouni	Doctorante 2007-2009
Marta Folgueira	Post-doc SYRTE (1 mois 2008), Université de Madrid
Vojtek Stefka	Post-doc SYRTE (1 mois 2008), Institut Astronomique de Prague

### 3.1.6. Références bibliographiques

#### Reuves et proceedings à comité de lecture

Altamimi Z., X. Collilieux, 2008, IGS contribution to ITRF, *Journal of Geodesy*, vol. 83, n. 3-4, pp. 375-383, doi:10.1007/s00190-008-0294-x

Bizouard C and D. Gambis, 2008, *The combined solution C04 for Earth Orientation Parameters, recent improvements*, Springer Verlag series, sous presse.

Capitaine, N., Wallace P.T., 2008, "Concise CIO based precession-nutation formulations, *Astron.Astrophys.* 478, 277-284 DOI:10.1051/0004-6361:20078811.

Souchay J., AH., Andrei, C.Barache, S.Bouquillon, A.M. Gontier, S.B. Lambert, C. Le Poncin-Lafitte, F. Taris, E.F. Arias, D. Suchet, M. Baudin, 2008, *The construction of the large Quasar Astrometric Catalogue*, *Astronomy and Astrophysics*, subm.

Souchay, S.B. Lambert, A.H. Andrei, S.Bouquillon, C.Barache, C. Le Poncin-Lafitte, 2008, "Astrometric comparisons of quasars catalogues, *Astronomy and Astrophysics*, 485,299-302

Wöppelmann G., Bouin, M.N., Altamimi, Z., 2008, *Terrestrial reference frame implementation in global GPS analysis at TIGA ULR consortium*, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33 (3-4): 217-224, doi:10.1016/j.pce.2006.11.001.

#### Autres publications

Altamimi Z., Collilieux X., Boucher C., 2008, *Accuracy assessment of the ITRF datum*, VI Hotine-Marussi Symposium on Theoretical and computational Geodesy, Wuhan, vol. 132, pp. 101-110. 10. doi: 1007/978-3-540-74584-6.

Altamimi Z, X. Collilieux, *Strengths and limitations of the ITRF: ITRF2005 and beyond*, 2008, Symposium GRF2006, Munich,

Altamimi Z., *Importance of local ties for the ITRF*, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbonne, Portugal, 12-15 May 2008.

Altamimi Z., Gambis D., Bizouard C., *Rigorous combination to ensure ITRF and EOP consistency*, actes des Journées Systèmes de Référence Spatio-Temporels 2007, 2008.

Altamimi Z., X. Collilieux, B. Garayt, ITRS Centre, Chapitre 3.5.5, IERS annual report

Altamimi Z., X. Collilieux, Institut Géographique National (IGN) Combination Centre, Chapitre 3.6.1.2, IERS annual report

Altamimi Z., Gambis D., Bizouard Ch, 2008, *Rigorous combination to ensure ITRF and EOP consistency*, Proc. Journées Systèmes de Référence 2007, N. Capitaine (ed.), pp 151-154.

Capitaine, N. 2008, *Recent progress in concepts, nomenclature and models in fundamental astronomy*, in Proc. Journées Systèmes de Référence 2007, N. Capitaine (ed.), pp 61-64

Capitaine, N., Wallace P.T., 2008, "The transformation between the Terrestrial and Celestial Reference Systems: Needs and potential of GPS and Galileo", in the Proceedings of the ESA 1st Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, ESA (ed).

Capitaine, J. Vondrak, and Hilton. J.L., 2008a, *Joint Discussion 16 Nomenclature, precession and new models in fundamental astronomy*. *Highlights of Astronomy*, 14:457-458.

Capitaine, N., Mathews, P.M., Dehant, V., Wallace, P.T., & Lambert, S.B. 2008b, *Comparisons of precession-nutation models*, In: D. Behrend and K.D. Baver (Eds.), in *Measuring the Future*, A.Finkelstein and D. Behrend (eds.), Saint Petersburg, Nauka, pp. 221-230 (2008).

- Dehant, V., de Viron, O. and Capitaine, N., 2008, "The 3D representation of the new transformation from the terrestrial to the celestial system", *Highlights of Astronomy*, 14:486–486.
- Folgueira, M., Capitaine, N., Souchay, J., 2008, New expressions for the celestial coordinates of the CIP, *Highlights of Astronomy*, 14, 49.
- Wallace P.T., Capitaine, N., 2008, Using the P03 precession model, *Highlights of Astronomy*, 14:466-466.
- Chapanov Y. and D. Gambis, 2008, Correlation between the solar activity cycles and the Earth rotation, *Proc. Journées Systèmes de Référence 2007*, N. Capitaine (ed.).
- Chapanov, Y. and D. Gambis, 2008, Influence of atmospheric and oceanic angular momentum excitation on the variations of Universal Time, *Exploring the solar system and Universe*, Mioc et al. (eds), American Institute of Physics, AIP Conference Proceedings, pp 218-219.
- Collilieux X., Altamimi Z., Impact of the network effect on the origin and scale: Case study of Satellite Laser Ranging., *actes de l'IAIG IUGG XXIV General Assembly*, Springer-Verlag, 2008.
- Collilieux X., Z. Altamimi, D. Coulot, A. Pollet, Institut Géographique National (IGN) Combination Research Centre, Chapitre 3.6.2.8, IERS annual report
- Gambis D., J.Y. Richard, D. Salstein, 2008, Use of Atmospheric Angular Momentum forecasts for UT1 prediction, *Proc. Journées Systèmes de Référence 2007*, N. Capitaine (ed.), pp 210-212.
- Gambis D.; Richard, J.Y.; Salstein, D., 2008, Using various sets of Atmospheric Angular Momentum forecasts for UT1 predictions, *Series of the Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography*, Volume 54, 45, Zdiby, Prague East, P. Holota (ed.).
- Seoane L., J. Nastula, C. Bizouard, D. Gambis, 2008, Effets hydrologiques sur la rotation terrestre, *proc. SF2A*, Paris, juillet 2008
- Pollet A., D. Coulot, N. Capitaine & S. Nahmani, Combination of Space Geodetic Techniques at the Measurement Level, poster EGU n° EGU2008-A-06237
- Richard J.Y., Gambis D., Lemoine J.M. and R. Biancale, 2008, Global combination of station coordinates and Earth rotation parameters, *pres. EGU 2008*, Vienne, Austria.
- Richard J.Y. , D. Gambis, J.M. Lemoine, C. Bizouard, R. Biancale, 2008, Global combination of station coordinates and Earth rotation parameters, *Series of the Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography*, Volume 54, 45, Zdiby, Prague East, P. Holota (ed.).
- Seoane L., C. Bizouard, D. Gambis, 2008, Polar motion interpretation using gravimetric data, *Proc. Journées Systèmes de Référence 2007*, N. Capitaine (ed.), pp 196-200.
- Stefka, V., Folgueira, M., Lambert, S., Capitaine, N., 2008, The Descartes project: "Solving the rotational Earth's equations in rectangular coordinates for a non-rigid Earth", *sous presse dans les Actes des Journées Systèmes de Référence 2008*, M. Soffel and N. Capitaine (eds.)
- Zerhouni, W., Capitaine, N., Francou, G., 2008, The use of LLR observations (1969-2006) for the determination of the celestial coordinates of the pole, in *Proc. Journées Systèmes de Référence 2007*, N. Capitaine (ed.), Observatoire de Paris, pp 123-124.
- Zerhouni, W., Capitaine, N., Francou, G., 2008, Determination of the corrections to the IAU 2000A-2006 X, Y coordinates using LLR observations, in *Proc. Semaine de l'Astrophysique Française - Journées SF2A 2008*.



mesures : coordonnées hebdomadaires des stations DORIS, série temporelle des variations du géocentre, paramètres de la rotation terrestre.

En 2008, une nouvelle série complète de résultats DORIS (ignwd08) a été soumise pour préparer l'ITRF2008 en utilisant les développements méthodologiques précédents : fixation des paramètres de pression de radiation solaire à des valeurs moyennes empiriques, estimation plus fréquente (toutes les heures) du coefficient de frottement atmosphérique, introduction de discontinuités en position et/ou en vitesses conformément aux recommandations du DPOD2005 :

(<http://www.ipgp.jussieu.fr/~willis/DPOD2005>)

## **2.2. Recherches DORIS à l'IGN**

Une première étude a montré que des erreurs systématiques dans la composante Z du géocentre pouvaient être attribuées à une mauvaise modélisation de la pression de radiation solaire. Ces erreurs importantes aux périodes de 118 jours et de 1 an n'apparaissent maintenant plus dans la nouvelle solution ignwd08.

Une deuxième étude a confirmé que les orages géomagnétiques dégradent la localisation géodésique DORIS. Une nouvelle méthode d'estimation a été proposée (estimation d'un coefficient de frottement toutes les heures pour les satellites à 800 Km) et permet de traiter la totalité des mesures de manière identique, y compris durant les orages géomagnétiques.

## **2.3. Applications géophysiques du système DORIS à l'IGN**

Plusieurs stations DORIS ont été étudiées en détail en coopération avec des géophysiciens et ont fait l'objet de publications dans des journaux internationaux à comité de lecture :

- Socorro (Mexico)
- Terre Adélie (Antarctique)
- Ny-Alesund (Norway)

## **3. GRGS/CNES-CLS**

Les activités du centre d'analyse CNES-CLS consistent, sous l'acronyme LCA (L'autre Centre d'Analyse), d'une part à assurer le traitement routinier des données DORIS en vue d'une fourniture à l'IDS et à l'Observatoire de Paris dans le cadre des travaux sur la combinaison des techniques (CRC, Combination Research Center) pour le système de référence ITRF2008 ; d'autre part à maintenir le modèle de correction de la fréquence de l'oscillateur DORIS à bord de Jason-1 au passage de la SAA (South Atlantic Anomaly) ; enfin à réaliser des actions de support et de promotion du système DORIS du CNES.

Les produits livrés par le centre d'analyse à l'IDS sont des solutions d'orbite, de coordonnées de stations et de paramètres de rotation de la Terre mais aussi les séries temporelles de coordonnées des 57 stations du réseau. Des fichiers d'équations normales sont délivrés à la fois à l'IDS, sous forme de SINEX, et à l'Observatoire de Paris, pour la réalisation de l'ITRF2008. Le deuxième semestre 2008 a été consacré prioritairement à la préparation de solutions hebdomadaires dans le cadre de la contribution de l'IDS à l'ITRF2008. De ce fait, les traitements et les livraisons de routine ont été suspendus.

Pour les besoins de l'ITRF2008, un traitement homogène de la période 1993-2008 est demandé.

Nous avons d'abord fait évoluer notre configuration de traitement, puis nous avons effectué le traitement des données 1993-2001 de toutes les missions avec une configuration homogène sur toute la période. Sur 2002-2007, nous n'avons rejoué pour l'instant que la mission ENVISAT. Un problème sur la loi d'attitude du satellite impactant fortement l'orbite avait été identifié et résolu au cours du 1er semestre. Pour les autres satellites, nous utilisons les matrices déjà existantes du traitement réalisé jusqu'à présent. Un retraitement devra être envisagé en 2009 pour assurer l'homogénéité de toute la série.

En ce qui concerne le modèle SAA, les paramètres d'évolution (amplitude et effet mémoire) du modèle SAA sont réévalués une fois par an pour la chaîne 1 de DORIS actuellement en route. Si nécessaire, les mises à jour sont diffusées à l'ensemble de la communauté DORIS via le site ftp de l'IDS.

D'après des tests récents, le modèle reste toujours valable : l'amplitude évolue de façon linéaire dans le temps et l'effet mémoire reste constant.

Outre la livraison des solutions hebdomadaires de coordonnées de stations, les séries temporelles de coordonnées sont fournies à l'IDS et visualisables via le site du bureau central de l'IDS. Sur une base régulière, ces séries temporelles de coordonnées dans le format STCD et les tracés graphiques sont élaborés à partir d'une chaîne de traitement spécifique.

A l'heure actuelle, l'IDS compte plusieurs centres d'analyse, le centre d'analyse CNES-CLS en étant une composante importante. A ce titre et également pour promouvoir le système DORIS du CNES, le centre d'analyse CNES-CLS est amené aux activités suivantes :

- support technique auprès d'organismes qui s'initient au traitement des données DORIS
- réalisation de comparaison de résultats entre les différents centres d'analyse
- participation aux campagnes d'analyse définies par la Coordination des Analyses (FG. Lemoine du GSFC)
- préparation d'articles scientifiques, de présentations orales et/ou de posters dans le but de promouvoir les activités et les résultats du centre
- développement des collaborations avec des scientifiques susceptibles d'intégrer DORIS dans leurs études.

A la suite du lancement de Jason-2 le 20 juin 2008, des évolutions ont été apportées pour prendre en compte ce satellite dans le logiciel GINS et introduire la lecture et la gestion du nouveau format de mesures DORIS, le RINEX/DORIS. Du point de vue des traitements nous avons réalisé des tests sur les premiers cycles Jason-2 et comparé les résultats obtenus en traitant le format standard et le format RINEX.

CLS a par ailleurs effectué en 2008, dans le cadre d'un stage de fin d'études de six mois, des études sur l'amélioration de la correction troposphérique par l'ajustement des paramètres de la fonction d'élévation de Guo & Langley à partir des sorties de modèle ECMWF

#### 4. Participants au projet

Hervé Fagard	IGN
Bruno Garayt	IGN
Marie-Line Gobinddass	IGN (étudiante en thèse 2007-2010)
Pascal Willis	IGN (mis à disposition auprès de l'IPGP)
Jean-François Crétaux	CNES/LG
Jean-Michel Lemoine	CNES/GS
Jean-Charles Marty	CNES/GS

#### 5. Références bibliographiques

M. Amalvict, P. Willis, G. Woppelmann, E.R. Ivins, L. Testud, J. Hinderer, M.N. Bouin, Stability of the East Antarctic station Dumont d'Urville from long-term geodetic and geophysical observations, *Polar Res.*, sous press, DOI: 10.1111/j.1751-8369.2008.00091.x

F. Barlier (Ed.), Académie de marine, Bureau des longitudes, Académie nationale de l'air et de l'espace, ouvrage collectif, Galileo. Un enjeu stratégique, scientifique, technique. Fondation pour la Recherche Scientifique, l'Harmattan, février 2008, 255 pages

M. Rothacher, G. Beutler, W. Bosch, A. Donnellan, R. Gross, J. Hinderer, C. Ma, M. Pearlman, H.-P. Plag, B. Richter, J. Ries, H. Schuh, F. Seitz, C.K. Shum, D. Smith, M. Thomas, I. Velicogna, J.

Wah, P. Willis, P. Woodworth, The future Global Geodetic Observing System (GGOS), in GGOS 2020, Chapter 9, pp. 142-159, 2008

P. Willis, Book review, Statistical orbit determination, B.D. Tapley, B.E. Schutz, G.H. Born, Adv. Space Res, 41(10), 1710-1711, 2008, DOI: 10.1016/j.asr.2007.08.036

P. Willis, Book review, Modern astrodynamics, P. Gurfil, Adv. Space Res, 41(1), 230-231, 2008, DOI: 10.1016/j.asr.2007.07.047

P. Willis, Y.E. Bar-Sever, M.L. Gobinddass, B. Garayt, Report of the IGN/JPL Analysis Center 2006-2008, in International DORIS Service Annual Report 2006-2008, 3 pages

### 3.2.2. APPORT DES MESURES GEODESIQUES : Laser

#### 1. Introduction

Depuis la fin du mois de septembre 2007, le GRGS (plus particulièrement, l'équipe GMC de l'ancien département GEMINI de l'OCA (P. Berio – parti en 2008, O. Laurain, D. Féraud, P. Bonnefond, P. Exertier et F. Deleflie) et le LAREG (D. Coulot)) est officiellement centre d'analyse de l'ILRS sur la base des logiciels GINS et MATLO.

#### 2. Travaux 2008

Les travaux 2008 ont principalement consisté à mener les études suivantes :

Prise en compte d'un modèle exhaustif d'effets de charge (modèle de T. van Dam, Université du Luxembourg) dans la modélisation a priori des positions de stations dans les traitements des données SLR. La prise en compte de ce modèle permet de réduire le signal annuel détectable dans les séries temporelles résiduelles de positions de stations pour une majorité de stations et suivant les trois composantes Est, Nord et Verticale. De plus, l'utilisation du modèle exprimé dans le Centre des Masses de la Terre permet également une réduction de l'amplitude des signaux (attribués aux mouvements du géocentre) visibles dans les séries temporelles de translations.

Utilisation d'Algorithmes Génétiques pour déterminer des sous-réseaux de stations sur lesquels appliquer les contraintes minimales pour optimiser le référencement des séries temporelles de Paramètres d'Orientement de la Terre (EOP). Ces algorithmes ont ainsi permis de diminuer de 10 % le WRMS des différences entre les séries temporelles d'EOPs ainsi obtenues et la série IERS 05 C04 par rapport à un référencement effectué avec le sous-réseau recommandé par l'Analysis Working Group de l'ILRS.

*Activités du centre d'analyse GRGS de l'ILRS :*

- calculs opérationnels récents : participation au calcul de l'ITRF08, solutions hebdomadaires (EOP, positions de stations)
- travaux de recherche récents : séries temporelles de coefficients du champ de gravité terrestre, prise en compte de modèles d'effets de charge

#### 3. Contributions à Galileo

Le programme européen Galileo ne pourra malheureusement pas être opérationnel avant 2013. Il faut donc aller de l'avant aujourd'hui sans plus aucun retard. Le deuxième satellite expérimental de la constellation Galileo, GIOVE B, a été lancé avec succès le 28 avril 2008. Rappelons que le 12 Janvier 2006, GIOVE A, mis en orbite le 28 décembre 2005 par un lanceur Soyouz depuis Baikonur, a diffusé pour la première fois dans l'espace des signaux Galileo sur les fréquences réservées au programme au sein de l'Union internationale des télécommunications. Galileo est alors devenu une réalité dans l'espace. Rappelons aussi que le 21 Janvier 2006, à Berlin, un contrat a été signé officiellement d'une valeur de 950 millions d'Euros, entre l'Agence spatiale européenne et Galileo Industries pour le développement et la construction de 4 satellites avec l'infrastructure-sol associée, dans le cadre de la phase de validation en orbite du système Galileo. Les 4 premiers satellites de la constellation sont aujourd'hui en cours de réalisation. Ces satellites peuvent être suivis par télémétrie laser pour la calibration et la validation des orbites et l'OCA va y contribuer activement.

L'équipe de Grasse et en particulier François Barlier et Florent Deleflie, avec d'autres collègues du GRGS, ont contribué à l'ouvrage « Galileo, un enjeu stratégique, scientifique et technique » du

Bureau des longitudes, de l'Académie de l'air et de l'espace, de l'Académie de marine, édité par la Fondation pour la recherche stratégique - L'Harmattan, avril 2008. François Barlier avec de nombreux collègues du GRGS ont participé aussi au récent colloque européen sur Galileo tenu à Toulouse en octobre 2007, qui était d'initiative française (Académie de l'air et de l'espace pour beaucoup mais aussi le Bureau des longitudes) avec celle de l'ESA ; ce colloque avait bien mis en évidence les aspects scientifiques et fondamentaux de ce programme spatial avec un certain nombre d'actions à mener sans retard. Ainsi la rédaction d'un « Scientific Opportunity Document » a été recommandée avec l'idée de contribuer à un appel à projets par des scientifiques, à sélectionner, pour constituer une équipe de « principal investigators » directement liée à l'équipe du projet Galileo proprement dit. Les domaines concernés sont :

- Géodésie et géodynamique
- Horloge et temps
- Effets ionosphériques
- Physique fondamentale
- Téledétection depuis le GNSS
- Systèmes de références
- Troposphère.

Notre collègue polonais Janusz Zielinsky a proposé que ce livre sur Galileo auquel nous avons contribué soit la base pour ce « Scientific Opportunity Document ou le SOD » (Preparing to the meeting in Padova on october 20, 2008 I started to think again about the SOD. It came to my mind that probably we could use the book on Galileo, prepared by the same three institutions that initiated our conference). François Barlier et Claude Boucher font partie de ce Scientific Committee pour préparer le colloque de Padoue en octobre 2009 sur les enjeux scientifiques fondamentaux de Galileo, colloque qui sera le successeur de celui de Toulouse et auquel nous participerons de manière active.

#### 4. Participants au projet

Personnels permanents :

Scientifique :

P. Bonnefond (AA), F. Deleflie (AA), P. Exertier (DR), O. Laurain (IE), D. Féraudy (IE)

D. Coulot, LAREG/IGN

Départ 2008 : Ph Berio (IR)

#### 5. Références bibliographiques

Andres, L., Géoïde marin et système d'altitude – d'altimétrie côtière, Thèse Univers. de Nice Sophia Antipolis, Nice, Oct. 2008

B. Gourine, S. Kahlouche, P. Exertier, P. Berio, D. Coulot & P. Bonnefond, Corsica SLR Positioning Campaigns (2002 and 2005) for Satellite Altimeter Calibration Missions, *Marine Geodesy*, 31 : 103-116, 2008.

D. Coulot, P. Berio, P. Bonnefond, P. Exertier; D. Féraudy, O. Laurain & F. Deleflie, Satellite Laser Ranging biases and Terrestrial Reference Frame scale factor, *Observing our Changing Earth, International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 133, Part 1, pp. 39-46, M. G. Sideris (Ed.), Springer Verlag Berlin Heidelberg, doi : 10.1007/978-3-540-85426-5, 2008.

Communications :

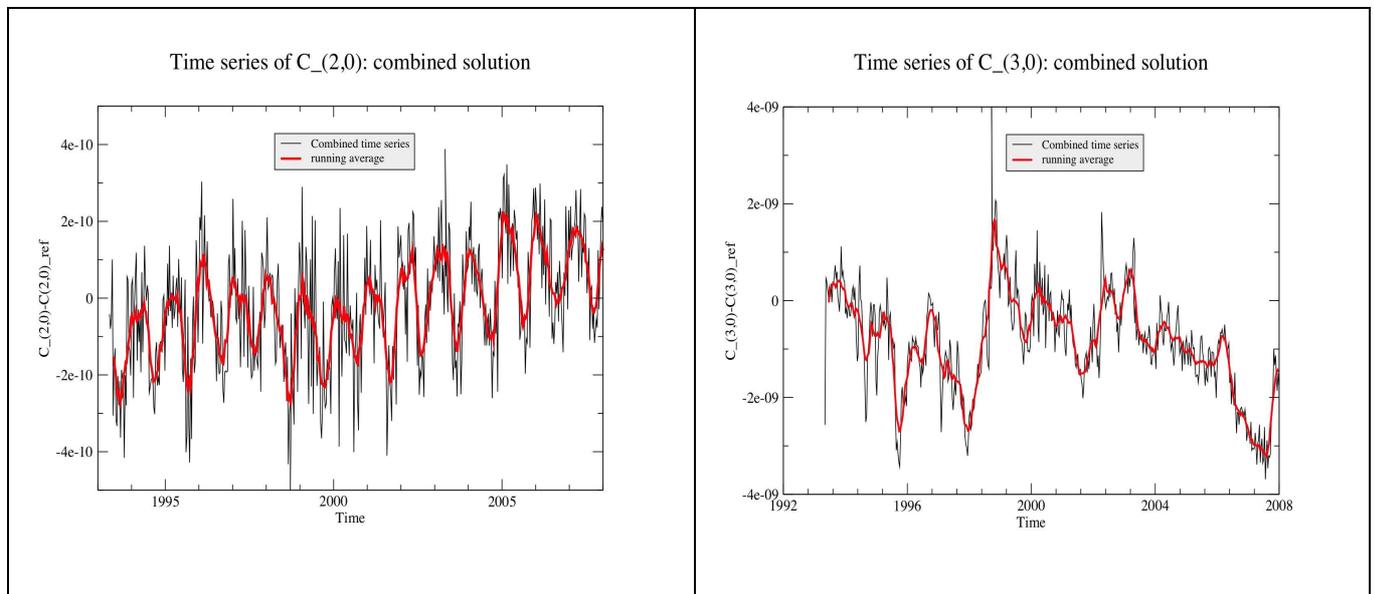
Z. Altamimi, X. Collilieux, D. Coulot, Status of ITRF Development and SLR Contribution, 16th International Laser Ranging Workshop, Poznan, Poland, 13-17 October 2008.

D. Coulot, X. Collilieux, T. van Dam, P. Berio, Z. Altamimi, Impact of loading effects on positioning provided by SLR data processing, COSPAR 2008, Montréal, Canada, 13-20 July 2008.

D. Coulot, P. Berio, A. Pollet, Réseaux Génétiquement Modifiés (RGM) : quel apport aux Systèmes de Référence ?, Journées de la recherche de l'IGN 2008, Saint-Mandé, France, 11- 13 mars 2008.

D. Coulot, X. Collilieux, T. van Dam & P. Berio, Use of loading effect models and GPS station position time series for SLR data processing, EGU2008, Vienna, Austria, 13-18 April 2008 (poster).

F. Deleflie et al., Temporal variations of the Earth gravity field derived from SLR data over a long period of time, 16th International Laser Ranging Workshop, Poznan, Poland, 13-17 October 2008.



### 3.2.3. APPORT DES MESURES GEODESIQUES : GNSS

#### 1. Introduction

Les activités GNSS du GRGS s'intègrent désormais dans le cadre du projet « outils et traitements des données GNSS pour les géosciences » dont les objectifs scientifiques sont de :

- Participer au service international IGS en tant que Centre d'Analyse (CA)
- Contribuer à des projets scientifiques mettant en œuvre des données de campagnes GNSS au travers de collaborations avec d'autres laboratoires et en proposant le logiciel GINS à de nouveaux utilisateurs
- Se préparer au traitement des données hybrides GPS-Galileo en exploitant les données hybrides GPS-GLONASS pour valider les capacités multi-GNSS de GINS

Les activités réalisées en 2008 dans ce cadre sont synthétisées ci-après.

#### 2. Traitements pour l'IGS et l'expérience COL/IERS

Dans le cadre de ses activités de centre d'analyse de l'IGS, le CNES en partenariat avec CLS fournit les produits hebdomadaires « finaux » (J+11) incluant les fichiers « orbite » et « horloge » de la constellation GPS ainsi que les fichiers SINEX (coordonnées des stations, EOP). Ces équations normales sont aussi transmises à l'Observatoire de Paris pour combinaison dans le cadre de l'expérience COL de l'IERS. Les principales évolutions dans ces traitements ont été :

- Un gain sensible de la qualité des produits du fait : d'une meilleure pondération relative de la qualité individuelle des orbites, de l'amélioration de la modélisation de la dynamique des satellites passant dans l'ombre de la Terre, de la densification du réseau de stations de poursuite (de 60 à 100 puis à 140)
- la fourniture et la mise à disposition des utilisateurs de GINS de fichiers d'horloges à 30s et l'implémentation d'une fonction d'interpolation pour des échantillonnages inférieurs à 30s
- une réduction très sensible des temps de calcul grâce à une optimisation des opérations lors de la constitution de la matrice normale
- la réalisation du site web : <http://igsac-cnes.cls.fr>

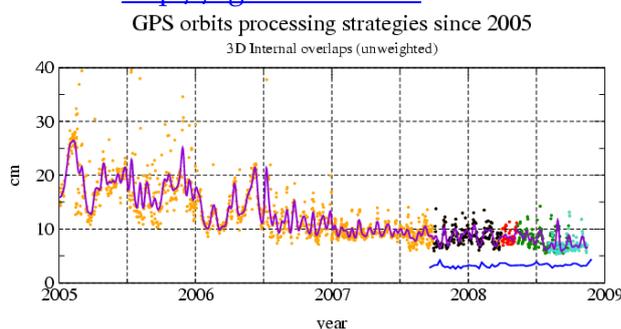


Fig 1 : Cohérence interne des produits d'orbites de la constellation GPS depuis 2005. La livraison à l'IGS a débuté en septembre 2007. Les produits actuels montrent des recouvrements internes 3D non pondérés de 6cm (RMS). L'évaluation par l'IGS donne 3.5 cm WRMS (courbe lisse en bleu).

#### 3. Projets et collaborations scientifiques

Le logiciel GINS est aujourd'hui aussi performant pour le traitement de données GPS que ses « concurrents » internationaux. Le GRGS encourage la collaborations scientifiques autour de projets basés sur l'exploitation de données GPS afin de :

- Promouvoir l'utilisation du logiciel GINS
- Proposer un soutien au travers d'une expertise dans les traitements
- améliorer le logiciel GINS par des comparaisons à d'autres outils et par des développements pour répondre à des besoins spécifiques
- Etre associé aux résultats scientifiques au travers notamment des publications.

### 3.1 Projet DRAKE (Stavros Melachroinos, CNES/LEGOS)

Une collaboration entre le CNES et le LEGOS avait été initiée en 2007 dans le cadre de la thèse de Stavros Melachroinos ; elle s'est poursuivie en 2008 au travers de ses travaux de post-doctorat (CNES) au LEGOS. Au delà de la contribution à l'exploitation des données de ces campagnes, le logiciel GINS bénéficie de la nouvelle capacité de traitement en mode cinématique ce qui représente pour la campagne DRAKE un besoin et pour GINS une évolution stratégique (Melachroinos et al., 2008). Ces travaux algorithmiques et de développement informatiques ont été en 2008 réalisés en partie et constituent un support à ce projet qui fait l'objet d'une proposition TOSCA à part entière.

### 3.2 Projet CRACICE et NIVMER (Benoit Legresy, Laurent Testut, CNRS/LEGOS)

Ce sont 2 programmes de travail en Antarctique et subantarctique de l'année polaire utilisant activement le système GPS pour les objectifs de mesure des mouvements crustaux verticaux, de bilan de masse de la calotte polaire antarctique et d'étude des interactions ocean-glace. Ces programmes utilisent le système GPS au travers de balises sur le glacier Mertz qui avancent d'environ 3m/jour, de stations fixes sur le socle rocheux qui se déplacent avec le mouvement crustal de vitesses sub-centimétriques par an, de bouées GPS de calibration des marégraphes qui suivent le mouvement des vagues, de la houle et de la marée. L'objet de cette collaboration avec le LEGOS est de comparer au moins 4 stratégies (dont celle du CNES/GRGS) et logiciels de traitement (dont GINS) des données GPS. Lydie Lescarmontier a réalisé un stage (CNES/LEGOS) sur ce sujet. Elle a suivi la formation « GINS-PC » et débuté une thèse (CNRS) afin de poursuivre ces travaux.

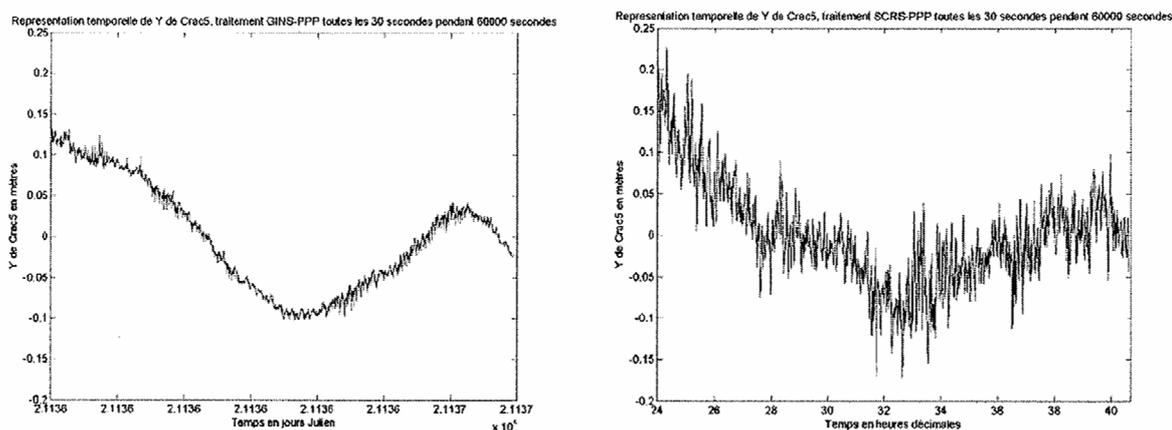


Fig 2 : Evolution temporelle de la composante Y de la station CRAC5 sur le glacier Mertz. Comparaison des séries issues de traitements en mode PPP à 30 secondes obtenues avec GINS (à gauche) et le logiciel en ligne SCRS (à droite). La série GINS est sensiblement moins bruitée. La vitesse de la station est de l'ordre de 3 mètres par jour.

### 3.3 Projet CAL/VAL altimétrie/GPS : (Jean-François Cretaux CNES/LEGOS)

Le suivi de récepteurs GPS sur des bateaux peut permettre d'une part de réaliser des opérations de CAL/VAL d'altimètres spatiaux et d'autre part d'observer les variations de hauteur de la

surface des lacs spatialement (équipotentielle du champ de gravité en première approximation) et temporellement (bilan hydrologique). Dans ce cadre, différentes campagnes d'observations ont été et seront réalisées par le LEGOS sur des lacs et mers intérieures (mer d'Aral, mer Caspienne, lac Issykkul, lacs Andins, ...). Ces projets LEGOS font l'objet de propositions TOSCA à part entière mais en matière de traitement de données GPS, l'expertise du GRGS et les capacités actuelles et futures (cinématique absolue) du logiciel GINS peuvent être là encore d'un grand intérêt. Un premier article incluant des traitements de données GPS du lac Issikkul (Kirguizstan) avec GINS a été publié (Cretaux et al. 2008).

### ***3.4 Projet Bassin hydrographique de l'Amazone (Stéphane Calmant LEGOS/IRD)***

L'objectif de ce projet est de contribuer à l'étude du bassin hydrologique Amazonien au travers de deux sous projets basés sur l'utilisation de récepteurs GPS :

- le LEGOS/IRD et le LMTG/IRD ont été installées respectivement 2 et 3 nouvelles stations GPS permanentes dans cette zone en complément du réseau mis en place par les équipes Brésiliennes. Le traitement de ces données permettra d'accéder à la mesure des déformations crustales de charge hydrologique. Cette étude est très complémentaire des activités de calibration/validation des modèles de champ de gravité variables proposées dans le projet « champ de gravite » du GRGS.
- des récepteurs GPS pourront être installés sur les bateaux Brésiliens sillonnant le réseau hydrographique Amazonien. Ces trajectoires permettront d'effectuer un relevé topographique des cours d'eau, de niveler les règles limnométriques (essentiel pour la modélisation hydrodynamique) et d'étendre à l'ensemble du bassin les points de comparaison pour l'altimétrie satellitaire.

Les nouvelles capacités de traitement cinématique non différentiel des mesures de phase GPS de GINS ont été cependant nécessaires (positionnement centimétrique d'un récepteur mobile isolé). Daniel Moreira (CPRM, Brésil) encadré par Stéphane Calmant (IRD/LEGOS) a débuté une thèse et tous deux ont suivi une formation « GINS-PC ». L'équipe CNES du GRGS a apporté son soutien pour l'analyse méthodologique et les premiers traitements des données de ces projets.

### ***3.5 Effets de charge Etude des effets de surcharge crustale***

Les travaux initiés en 2006 ont été poursuivis en 2008 autour, notamment, des études sur les surcharges océaniques d'ondes diurnes et des effets des surcharges atmosphériques dans le cadre des réflexions sur les standards de l'IERS (R. Biancale et al. 2008, F. Perosanz et al., 2008). Une collaboration avec Pascal Gégout (EOST/GRGS) spécialiste de cette thématique a été mise en place.

## **4. Participants au projet**

Richard Biancale (CNES/GRGS)

Hugues Capdeville (CLS)

Lydie Lescarmontier (Stage CNES/LEGOS)

Sylvain Loyer (CLS)

Jean-Charles Marty (CNES/GRGS)

Satvros Melachroinos (post-doc CNES/LEGOS)

Daniel Moreira (thèse CPRM, Brésil)

Félix Perosanz (CNES/GRGS)

Laurent Soudarin (CLS)

## 5. Communications et références bibliographiques

- R. Biancale, Marty, J-C.; Perosanz, F.; Loyer, S.; Melachroinos, S., Surface load models and validation by space geodesy techniques, EGU General Assembly 2008, Vienne, Autriche, 13-18 avril 2008 (Oral)
- CLS-DT-08-422, Applications Cinématique Terrestre et Thermosphère. Rapport décembre 2008.
- J.F. Cretaux, S. Calmant, V. Romanovski, Pr; A. Shabunin, F. Lyard, M. Bergé-Nguyen, A. Cazenave, F. Perosanz, An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkul in Central Asia, *Journal of Geodesy*, 2008
- L. Lescarmontier, Analyse de données GPS en mouvements rapides en Antarctique, rapport de stage Master 2 Océan Atmosphère et surfaces continentales, UPS, Toulouse.
- Loyer, S; Perosanz, F; Capdeville, H; Soudarin, L, GRGS-CLS GNSS precise orbit determination, EGU General Assembly 2008, Vienne, Autriche, 13-18 avril 2008 (Poster)
- Loyer, S; Perosanz, F; Capdeville, H ;CNES-CLS Dynamical modelling of GPS orbits and SLR Residuals, IGS Analysis Center Workshop, 2-6 June, Miami Beach, Florida, USA
- Loyer, S; Perosanz, F; Capdeville, H ; L. Soudarin; CNES-CLS IGS Analysis Center Activities, AGU Fall Meeting 2008, San Francisco, 15-19 December
- S. Melachroinos, R. Biancale F. Perosanz, M. Sarrailh, High rate GPS positioning, JASON altimetry and marine gravimetry: monitoring the Antarctic Circumpolar Current (ACC) through the DRAKE campaigns
- F. Perosanz,; Biancale , R.; Melachroinos , S.; Loyer, S.; Marty , J.C., Investigation of vertical displacements due to loading effects with the GINS CNES/GRGS, EGU General Assembly 2008, Vienne, Autriche, 13-18 avril 2008 (Poster)
- F. Perosanz, S. Melachroinos, S. Loyer, R. Biancale, GPS measurement of crustal loading deformations, Toulouse Space Show 2008 - April 22-25, 2008
- F. Perosanz , R. Biancale, J.C. Marty, S. Melachroinos, S. Loyer , Surface Load Models and Validation by GPS, IGS Analysis Center Workshop, 2-6 June, Miami Beach, Florida, USA

### 3.2.4 APPORT DES MESURES GEODESIQUES : VLBI

#### 1. Introduction

Les activités du groupe d'analyse VLBI astro-géodésique se sont poursuivies dans le domaine de l'analyse opérationnelle et de la diffusion des résultats notamment dans le cadre de l'Observatoire Virtuel. Par ailleurs, plusieurs résultats scientifiques ont été obtenus et publiés, concernant notamment les tests de relativité, la stabilisation du repère de référence interne et l'estimation de paramètres géophysiques.

#### 2. Analyse des observations et diffusion des résultats

##### *2.1 Solutions opérationnelles*

L'analyse opérationnelle des observations VLBI pour la détermination des paramètres d'orientation terrestre, les positions et vitesses des stations et les coordonnées des radiosources s'est poursuivie en 2008. Les résultats sont régulièrement soumis à l'IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) (solutions trimestrielles et SINEX journaliers) et à l'IERS EOP-PC (solutions trimestrielles).

La solution 2008d, du dernier trimestre, comprend 4 358 851 observations réparties en 3869 sessions. Elle a un résidu quadratique moyen (rms) de 26 ps, sa particularité est d'utiliser les 247 sources stables de Martine Feissel-Vernier et al. (A&A 452, 2006) pour définir le système, à la place des 212 sources de définition de l'ICRF.

Les séries temporelles de coordonnées de radiosources et de stations sont mises à jour tous les trois mois et sont disponibles sur le site web du centre d'analyse IVS OPAR (<http://ivsopar.obspm.fr>).

##### *2.2 Contribution à l'Observatoire Virtuel*

L'intérêt de notre participation ainsi que l'objet de l'Observatoire Virtuel (OV) sont discutés dans le chapitre 7.1 du présent ouvrage. Sur le site web d'OPAR, les résultats d'analyse VLBI sont maintenant disponibles sous différents formats (ASCII, VOTable, graphique) à partir d'un unique formulaire (Fig. 1). La mise à disposition de nos données sous ce format permet, en quelques clics et grâce à des outils OV comme Aladin (Centre de données astronomiques de Strasbourg) la superposition de clichés optiques et la cross-identification avec d'autres catalogues, ou encore la visualisation des antennes dans Google Earth.

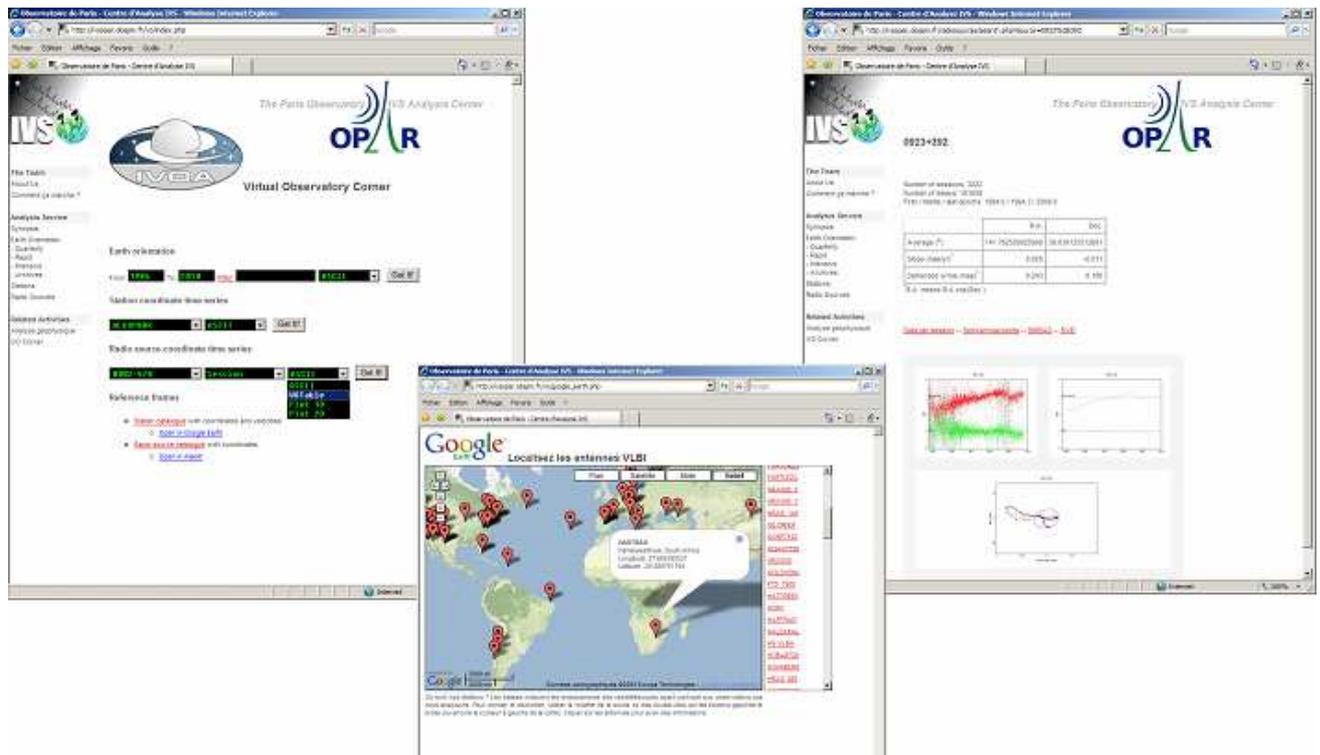


Fig 1 : Formulaire d'accès aux analyse de VLBI (à gauche) avec un exemple de localisation d'antenne VLBI (au centre) et de visualisation des résultats pour une radiosource (à droite).

### 3. Les repères de référence céleste

Dans le cadre de l'élaboration de la seconde génération de l'ICRF, nous avons développé de nouveaux outils comme la comparaison de catalogue par la décomposition en harmoniques vectorielles. Ces outils ont été testés sur les catalogues et les séries temporelles de coordonnées de radiosources élaborés dans le cadre du groupe de travail de l'IVS pour l'ICRF2.

Dans le but d'établir la liste des sources les plus appropriées pour définir les axes stables du futur ICRF, nous avons poursuivi l'élaboration d'un algorithme de sélection. Il a été appliqué aux séries temporelles de coordonnées de sources obtenues à partir de l'analyse des 26 ans d'observations VLBI. Les critères de sélection retenus sont le rms, la pente et l'historique observationnel. Grâce à cette sélection nous avons obtenu plusieurs repères potentiels stables dont la population de sources varie entre 200 et 270 sources et ayant une distribution uniforme sur tout le ciel (Lambert & Gontier, A&A 193, 2009).

Notre sélection montre une amélioration de la stabilité du repère de 40% par rapport à l'ICRF et de 20% par rapport à Feissel-Vernier et al. (2006). L'alignement des axes du catalogue, élaboré en utilisant une contrainte de non-rotation par rapport à notre sélection de sources, sur ceux de l'ICRF-Ext.2 est réalisé avec une précision inférieure à 20  $\mu$ as.

Une étude de l'effet des instabilités du repère céleste sur les estimations des paramètres d'orientation terrestre  $a$ , par ailleurs, été publiée dans Lambert et al. (2008).

### 4. Intérieur terrestre par VLBI et gravimétrie

La réponse de la Terre non-rigide aux forces de marées est observée notamment grâce au VLBI (via la mesure des nutations) et aux gravimètres à supraconducteurs (SG). L'analyse de cette réponse dans la bande de fréquence rétrograde diurne permet de contraindre les valeurs de la fréquence de résonance du noyau liquide, de son facteur de qualité Q (quantifiant la dissipation à l'interface noyau-manteau), du nombre de Love exprimant la réponse de l'interface noyau-manteau à la pression interne, et dans une moindre mesure, d'autres paramètres associés à la graine ou au manteau. Dans la littérature, la valeur de Q montrait des différences importantes

selon qu'elle était estimée par VLBI ou par SG, la dernière valeur étant environ 40% plus basse que la première. Dans Rosat & Lambert (A&A, 2009), nous avons utilisé les données les plus récentes de nutation et de gravité avec des méthodes d'estimation optimisées et un traitement spécifique pour la correction océanique aux sites des SG. Nous avons montré que  $Q$  convergerait vers des valeurs identiques pour les deux techniques.

## 5. Test de relativité

La déviation relativiste des rayons en présence d'un corps massif est caractérisée, dans le formalisme post-newtonien, par le paramètre  $\gamma$ , égal à l'unité en relativité générale. Nous avons déterminé  $\gamma$  à partir des observations VLBI acquises depuis 1979. En faisant varier les périodes d'observation, le critère de rejet des observations en fonction de l'angle d'élongation solaire, nous avons estimé différentes valeurs de  $\gamma$  et de son erreur à partir de l'analyse des séries temporelles de coordonnées ainsi obtenues. La comparaison de ces différentes estimations a montré qu'à l'heure actuelle  $\gamma$  ne peut pas être estimé par VLBI à mieux que  $2.10^{-4}$ , le principal facteur de limitation étant l'incertitude dans la détermination des coordonnées des radiosources. La forte corrélation des erreurs instrumentales, de modélisation et de stratégie d'analyse est à l'origine du bruit qui limite cette détermination (Lambert & Le Poncin-Lafitte, A&A, sous presse, 2009).

## 6. Participants au projet

C. Barache	OP/SYRTE
A.-M. Gontier	OP/SYRTE
S. Lambert	OP/SYRTE

## 7. Références bibliographiques

Gontier A.-M. et al., 2008, Paris Observatory Analysis Center OPAR: Report on Activities, January - December 2008, in: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2008 Annual Report, edited by D. Behrend and K. D. Baver, NASA/TP-2009-, sous presse.

Lambert S. et al., 2008: Celestial frame instability in VLBI analysis and impact on geophysics, A&A, 481, 535.

Gontier, A.-M., & Lambert, S.B. 2008, Stable radio sources and reference frame, In: N. Capitaine (Ed.), Proc. Journées 2007 systèmes de référence spatio-temporels, Observatoire de Paris, ISBN 978-2-901057-59-8, 42

Lambert, S.B., Dehant, V., & Gontier, A.-M. 2008, Earth's interior with VLBI... and the celestial reference frame? In: N. Capitaine (Ed.), Proc Journées 2007 systèmes de référence spatio-temporels, Observatoire de Paris, ISBN 978-2-901057-59-8, 103

Lambert, S.B., & Gontier, A.-M. 2008, Earth's interior with VLBI: pushing the limits, In: C. Charbonnel et al. (Eds.), Proc. Semaine de l'Astrophysique Française - Journées SF2A 2008, 123

Lambert, S.B., & Le Poncin-Lafitte, C. 2008, An estimate of the relativistic parameter using VLBI, In: C. Charbonnel et al. (Eds.), Proc. Semaine de l'Astrophysique Française - Journées SF2A 2008, 127

Lambert, S.B., & Le Poncin-Lafitte, C. 2008, Measuring the relativistic parameter using the current geodetic VLBI data set, In: A. Finkelstein and D. Behrend (Eds.), International VLBI

Service for Geodesy and Astrometry (IVS) 2008 General Meeting Proceedings, ISBN 978-5-02-025332-2, 341

Rosat, S., & Lambert, S.B. 2008, Outer and inner core parameters from joint analysis of superconducting gravimeter and VLBI data, In: A. Finkelstein and D. Behrend (Eds.), International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) 2008 General Meeting Proceedings, ISBN 978-5-02-025332-2, 246

### 3.2.5 APPORT DES MESURES GEODESIQUES : Marégraphie

#### 1. Courte synthèse introductive

Les activités de recherche sont de plus en plus jugées à l'aulne des publications de rang A et des communications dans les congrès internationaux. Nous en dénombrons six et dix respectivement, pour la seule année 2008, dans le cadre des actions menées par les participants soutenus par le GRGS (cf. détails sections 6 et 7). Leur nombre progresse notablement. L'investissement dans les activités d'observation en marégraphie (stations, systèmes et services d'observation) commence à porter ses fruits, d'autant qu'elles s'accompagnent de ressources dédiées pour exploiter les résultats de ces activités, en particulier de doctorants (cf. section 6). Les activités de recherche se jugent aussi par la participation dans les structures internationales, en particulier dans l'organisation de réunions. C'était le cas en 2008 : dans le Workshop de l'IGS qui s'est tenu à Miami (Wöppelmann et Schöne 2008), ou encore dans le grand congrès annuel de l'EGU, à Vienne, où la tenue d'un '*splinter meeting*' a conduit à l'organisation prochaine d'un workshop sur les co-localisations GPS / Marégraphes, à la COI/Unesco, du 11 au 12 mai 2009, en préambule à la réunion du groupe d'experts du programme mondial GLOSS (13-15 mai 2009). Enfin, la richesse d'un domaine de recherches peut aussi se juger au nombre de questions ouvertes et des perspectives. La thèse de doctorat de N. Pouvreau (2008) ouvre des perspectives très enthousiasmantes dans l'exploitation des mesures historiques du niveau de la mer. Elle montre qu'un patrimoine historique à fort potentiel scientifique reste à exploiter en France, alors que nos collègues anglais valorisent leur propre filon depuis plus de trente ans sans qu'il ne se soit encore tari dans la recherche d'une connaissance détaillée des variations du niveau de la mer le long des côtes.

#### 2. Développement des réseaux de marégraphes français

Les marégraphes radar continuent de remplacer progressivement les technologies mécaniques, acoustiques, et à pression, dans les réseaux de marégraphes côtiers français ROSAME (LEGOS) et RONIM (SHOM). Des capteurs radar ont ainsi été installés à Saint-Paul (GLOSS n°24) en nov. 2008 ; à Arcachon en fév. 2008 ; à Nice et à Toulon en mai 2008 ; pour la nouvelle installation à Dieppe en mars 2009; et pour le nouveau marégraphe de Mayotte (Dzaoudzi), installé en déc. 2008 par le SHOM. Ce dernier répond ainsi à l'engagement pris par la communauté scientifique française dans les années 80 auprès du programme mondial GLOSS (station GLOSS n° 96). Les marégraphes radar offrent des atouts opérationnels intéressants, *a priori* en accord avec les spécifications météorologiques du programme GLOSS. Cependant, les premières études réalisées dans le cadre de l'action 'NMER' du GRGS montrent que les performances remarquables des marégraphes radar sont atteintes à condition que l'installation soit appropriée (Martin Miguez et al. 2008a). Les installations des marégraphes radar des Sables d'Olonne (mars 2008), de Cherbourg (avril 2008), et de La-Rochelle (octobre 2008), ont été revues.

Les expériences réalisées en laboratoire ne rendent pas compte des conditions de mesure et des réalités du terrain, très variables d'un site à l'autre. Or, l'installation du marégraphe et l'environnement dans lequel il va se trouver 'in fine' peuvent influencer 'notablement' les caractéristiques déterminées en laboratoire, 'notamment' lorsqu'on s'intéresse à des phénomènes aussi ténus (1-2 mm/an) que la calibration ou la dérive des altimètres radar embarqués sur satellite, ou encore les variations climatiques du niveau marin. Dans ces conditions, des étalonnages réguliers à la sonde à ruban et à l'échelle de marée s'avèrent précieux. A titre d'illustration, depuis la fin de l'année 2003 des lectures mensuelles à l'échelle de marée sont effectuées à Kerguelen pour l'étalonnage « en continue » de la référence instrumentale du capteur de pression. Depuis quelques semaines le suivi des dérives instrumentales de ce

marégraphe est accessible à chaque nouvel étalonnage sur le site web du réseau ROSAME (<http://www.legos.obs-mip.fr/fr/soa/rosame/distribution/>). La figure ci-dessous illustre clairement l'intérêt de suivre ces dérives.

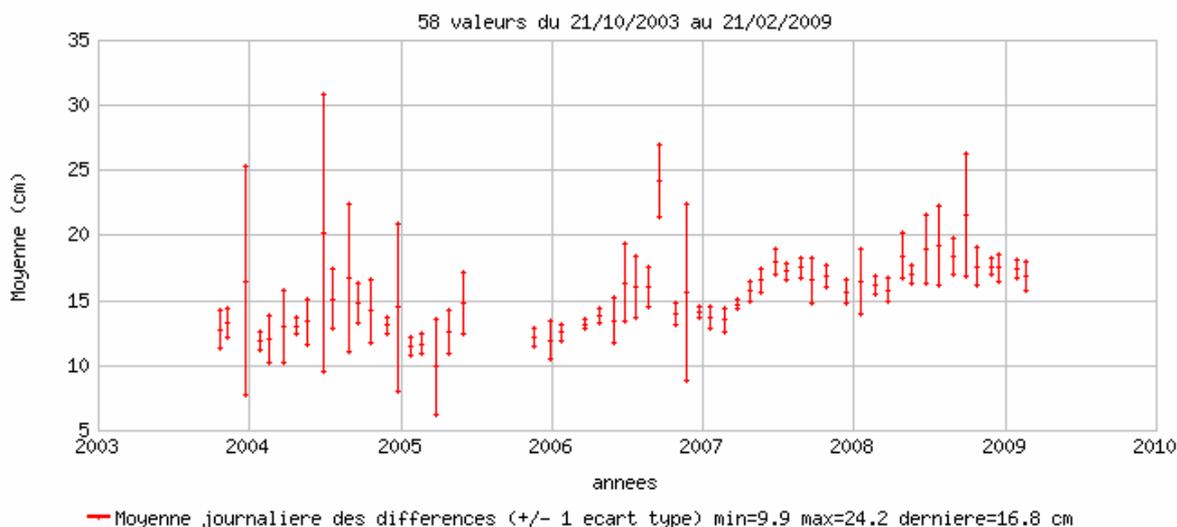


Fig 1 : Hauteur de la référence instrumentale du capteur de pression de la station marégraphe de Kerguelen (le capteur n'a pas été déplacé de son tube depuis 2003).

### 3. Caractérisation des erreurs dans les mesures des marégraphes

Les résultats méthodologiques obtenus par Martin Miguez et al. (2008b) montrent l'intérêt des opérations régulières d'étalonnage sur le terrain. Ils indiquent que le test de Van de Casteele, mis au point dans les années 1960 pour les marégraphes mécaniques, et relégué aux oubliettes avec les nouvelles technologies de marégraphie, se révèle une méthode efficace pour détecter les principaux défauts des installations et apprécier la qualité des observations, quelque soient ces technologies. Afin de poursuivre les résultats de cette recherche dans un contexte plus favorable, la demande de soutien 2008 pour 2009 au GRGS propose de mettre en place une station pilote dans laquelle les différentes technologies de marégraphie se retrouveront en co-localisation. L'idée n'est pas originale, mais à notre connaissance elle n'a jamais pu être menée à bien sur une période supérieure à l'année pour des raisons diverses d'ordre technique, politique et de soutien financier. Une telle station pilote oeuvrant pendant plusieurs années apporterait des éléments de réponse très instructifs dans l'étude des comportements 'in situ' des différentes technologies, à l'image des sites de géodésie spatiale en co-localisation. Le site de Brest se prête particulièrement bien à ce type d'expérience de par la proximité (Brest, SHOM), de par les dimensions de l'infrastructure de l'observatoire, et de par la sécurité qu'il garantit au matériel, sans mentionner la qualité exceptionnelle de sa série temporelle séculaire. Il convient aussi de mentionner les expériences de mesures à la bouée GPS réalisées à Kerguelen (Loyer et Guillot, 2008) et à Dumont d'Urville (Testut et Calzas, 2008). Les traitements GPS sont en cours en mode cinématique, mais les premiers résultats de comparaison avec les marégraphes semblent encourageants (Testut et Loyer, 2008).

### 4. Rattachements géodésiques des marégraphes

#### 4.1. Continuité de la référence locale et approche GPS en mode continu

Les rattachements géodésiques des marégraphes sont un aspect essentiel dans la construction des séries temporelles du niveau de la mer. Ils garantissent localement la continuité de la référence

d'une série marégraphique. C'est aspect est illustré dans Wöppelmann et al. (2008a) qui répond à Douglas (2001, 2008) sur la continuité de la référence de la série de Brest suite à la destruction de l'observatoire lors des bombardements de 1944. Par ailleurs, si l'un des repères est observé par géodésie spatiale, le rattachement permet d'exprimer la série de mesures dans une référence géocentrique, et donc de surveiller ces mouvements dans un tel repère. Considérant les résultats obtenus sur la caractérisation du bruit dans les séries temporelles de positions GPS et la diminution des coûts d'acquisition de matériel GPS de type géodésique, les campagnes de mesures GPS limitées dans le temps (quelques jours à semaines) ne se justifient guère. Les crédits GRGS de 2008 ont permis l'achat de quatre stations GPS. Leur installation est prévue au printemps 2009. Les sites retenus, suite aux résultats des reconnaissances géodésiques et aux discussions entre le SHOM, le LEGOS et l'ULR, sont : Sète (altimétrie), Roscoff (altimétrie), Saint-Malo (long terme), et Fort-de-France (GLOSS n°204). La recette technique du matériel et les autorisations d'installation sont en cours (hiver 2009).

#### ***4.2 Analyse des mesures GPS et application des résultats aux marégraphes***

Les activités du centre d'analyses ULR du projet TIGA de l'IGS se sont concentrées dans le portage des logiciels GAMIT et CATREF sur le cluster de 128 cœurs de calcul acquis à l'université de La Rochelle. Les tests effectués ont montré que dix ans d'observation GPS d'un réseau global de 220 stations pouvaient être recalculées en une semaine (contre un an auparavant), récompensant ainsi les mois de travail de l'équipe ULR en 2008, qui a reçu un soutien précieux du centre de ressources informatique de l'université. Des difficultés techniques restent néanmoins à résoudre, mais ces nouvelles capacités de calcul redonnent à l'ULR une place concurrente avec les autres centres d'analyses de l'IGS, aussi bien dans le cadre du projet TIGA que dans celui de la campagne '*reprocessing*' en cours (2009) des grands centres d'analyses de l'IGS. En effet, nos résultats ont été remarqués, en 2007 déjà mais aussi en 2008 (Santamaria et al. 2008 ; Letetrel et al. 2008 ; Wöppelmann et al. 2008d).

### **5. Perspectives**

L'ensemble des activités décrites ici ont des perspectives très enthousiasmantes qu'il n'est pas possible de développer dans ce court rapport. Mentionnons le système SONEL qui n'a justement pas trouvé de place, mais qui a fait l'objet de nombreux développements de fond, dont le nouveau serveur web (<http://www.sonel.org>) et ses multiples fonctionnalités de visualisation et d'accès aux données sont les témoins (base de données, meta-données, collectes, mises en forme, etc.). Le rôle de fédération de réseaux de stations devrait se renforcer avec l'extension des réseaux marégraphiques dans le Pacifique. Le développement de réseaux marégraphiques dans le cadre de la problématique tsunami est envisagé en Nouvelle-Calédonie et déjà initié en 2008 en Polynésie Française (Dupont 2008).

### **6. Participants au projet**

Guy WOPPELMANN, Coordinateur rédaction du chapitre (Université La Rochelle)

Marie-Noëlle BOUIN, Responsable expérience GRGS 'TIGA' (IGN)

Lucia PINEAU-GUILLOU, Responsable expérience GRGS 'NMER' (SHOM)

Laurent TESTUT, Physicien adjoint (LEGOS)

Ronan CREACH, Ingénieur (SHOM)

Hervé FAGARD, Ingénieur (IGN)

Philippe TECHINE, Ingénieur (LEGOS)

Mikael GUICHARD, Ingénieur (Université La Rochelle)

Pascal TIPHANEAU, Technicien (Université La Rochelle)  
Thomas GOURIOU, Doctorant à l'université de La Rochelle  
Camille LETETREL, Doctorante à l'Université de la Rochelle  
Nicolas POUVREAU, Post-doctorant au LEGOS  
Alvaro SANTAMARIA, Doctorant au LAREG (IGN)

## 7. Références bibliographiques

- E. Chaumillon, X. Bertin, H. Falchetto, J. Allard, N. Weber, P. Walker, N. Pouvreau, G. Wöppelmann, 2008, Multi-time scale evolution of a wide estuary linear sandbank, the Longe de Boyard, Atlantic coast of France, *Marine Geology*, 251, 209-223.
- R. Créach, G. Goasguen, Réseau de mesure du niveau des mers RONIM et réseau de mesure de houle CANDHIS, 7ème Journées scientifiques et techniques du CETMEF, Paris, 8, 9 et 10 décembre 2008.
- Y. Dupont, 2008, Intégration de la station de surveillance du niveau de la mer à Tubuai (Les Australes), *Compte-Rendu N° 134 SHOM/GOP/BHPF/NP*, 23 décembre 2008, 23 pp.
- H. Fagard, J-C. Poyard, 2008, Installation de la station DORIS de Rikitea (Polynésie Française), *Rapport interne IGN/SGN CR/G Nr. 230*.
- T. Gouriou, N. Pouvreau, G. Wöppelmann, 2008, Mesures du niveau de la mer en France : un patrimoine historique à fort potentiel scientifique. L'exemple du littoral charentais, *Géologues*, 158, Spécial Littoral, pp. 83-88.
- C. Letetrel, G. Wöppelmann, G. Valladeau, F. Lefèvre, 2008, An improved absolute calibration of satellite altimeters using a globally distributed network of GPS-corrected tide gauges, *European Geosciences Union, Vienna, Austria, 13-18 April 2008, EGU2008-A-10091*.
- M. Llubes, N. Florsch, J-P. Boy, M. Amalvic, P. Bonnefond, M.N. Bouin, S. Durand, M.F. Esnault, P. Exertier, J. Hinderer, M.F. Lalancette, F. Masson, L. Morel, J. Nicolas, M. Vergnolle, G. Wöppelmann, 2008, Multi-technique monitoring of ocean tide loading in northern France, *C. R. Geoscience*, 340, 379-389.
- S. Loyer, A. Guillot, 2008, *Mission NIVMER08, Rapport de mission*, 74 pp.
- B. Martin Miguez, R. Le Roy, G. Wöppelmann, 2008a, The use of radar gauges to measure variations in sea level along the French coast, *Journal of Coastal Research*, 24, pp. 61-68.
- B. Martin Miguez, L. Testut, G. Wöppelmann, 2008b, The van de Casteele test revisited: an efficient approach to tide gauge error characterization, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, Vol. 25, Nr. 7, pp. 1238-1244.
- N. Pouvreau, 2008, *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*, Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle, disponible au format PDF dans <http://www.sonel.org/>
- A. Santamaria, M-N. Bouin, G. Wöppelmann, 2008, New strategy for reprocessing a global GPS network at the ULR TIGA analysis centre. *European Geosciences Union, Vienna, Austria, 13-18 April 2008, EGU2008-A-01852*.
- L. Testut, M. Calzas, 2008, *Mission NIVMER08-DDU (Décembre 2007 - Janvier 2008)*. 29 pp.

- L. Testut, R. Coleman, H. Broksma, C. Watson, R. Handsworth, M. Calzas, 2008, Estimating long term sea level trends in East Antarctica, Joint SCAR-IASC Open Science Conference, 8-11 July 2008.
- L. Testut , R. Coleman, N. Pouvreau , C. Watson, G. Wöppelmann, J. Hunter, 2008, Historical sea level trends in the Southern Ocean from tide gauges, William Smith Meeting : Observations and Causes of Sea-Level Changes on Millennial to Decadal Timescales, 1-2 Sept. 2008, London.
- L. Testut, N. Pouvreau, G. Wöppelmann, F. Birol, M. Karpytchev, 2008, Long Term Trend Components in Sea Level from Tide Gauge and Satellite Altimetry Records, Observing and Forecasting the Ocean, 10-15 November 2008, Nice.
- L. Testut, S. Loyer, A. Maillard, 2008, Marégraphie par bouée GPS, Poster présenté au Colloque de l'Année Internationale de la Planète Terre « L'eau dans tous ses Etats, visions spatiales », 17-19 Novembre 2008, Paris.
- G. Wöppelmann and T. Schöne, 2008, Reprocessing GPS data at the observation level for tide gauge monitoring: Main "raison d'être" of TIGA, IGS 2008 Analysis Center Workshop, Miami Beach, Florida, USA, 2-6 June 2008.
- G. Wöppelmann, N. Pouvreau, A. Coulomb, B. Simon, P.L. Woodworth, 2008a, Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record, *Geophysical Research Letters*, 35, L22605, doi:10.1029/2008GL035783.
- G. Wöppelmann, B. Martin Miguez, R. Créach, 2008b, Tide gauge records at Dakar, Senegal (Africa): towards a consistent sea-level time series spanning more than 100 years?, *European Geosciences Union*, Vienna, Austria, 13-18 April 2008, EGU2008-A-10530.
- G. Wöppelmann, M-N. Bouin, Z. Altamimi, 2008c, Terrestrial reference frame implementation in global GPS analysis at TIGA ULR consortium, *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 217-224
- G. Wöppelmann, M-N. Bouin, Z. Altamimi, C. Letetrel, A. Santamaria, X. Collilieux, 2008d, Vertical velocities at tide gauges from a completely reprocessed global GPS network of stations: How well do they work? IGS 2008 Analysis Center Workshop, Miami Beach, Florida, USA, 2-6 June 2008.
- G. Wöppelmann G., M. Marcos, C. Letetrel, A. Coulomb, 2008e, Marseille tide gauge: review and rescue of its historical data (1885-1988), 3rd ESF MedCLIVAR Workshop on Understanding the mechanism responsible for the changes in the Mediterranean Sea circulation and sea level trends, Rhodes, Greece, 29 September - 1st October 2008.



## 4. OCÉANS, HYDROLOGIE GLOBALE

### 4.1. Altimétrie spatiale

#### 4.1.1. Variations du niveau des océans

#### 4.1.2. Etalonnages

#### 4.1.3. Hydrologie spatiale

### 4.2. Phénomènes côtiers

### 4.3. Glaces



## 4.1.1. ALTIMETRIE SPATIALE : Variations du niveau des océans

### 1. Introduction

Le niveau de la mer et son évolution en réponse au réchauffement climatique est l'objet d'études menées depuis plusieurs années dans l'équipe GOHS du LEGOS. Les travaux menés en 2008 sur ce thème s'articulent autour de 3 axes majeurs (mais d'autres études ont été aussi menées ; voir ci-dessous) :

1. Mesure par altimétrie spatiale des variations actuelles du niveau de la mer à l'échelle globale et régionale (collaboration avec CLS) ; Validation des résultats ; Etude du bilan d'erreur ; comparaison avec les données marégraphiques
2. Etude des causes de l'évolution actuelle du niveau moyen global de la mer (contributions stériques, fonte des glaces et échanges de masse d'eaux continentales) à partir de différentes sources de données in situ et spatiales
3. Reconstruction des variations régionales passées (1950-2000) du niveau de la mer par combinaison des données marégraphiques, altimétriques et de sorties d'un modèle de circulation générale océanique ; Etude de la variabilité interannuelle à multi décennale

### 2. Mesures des variations actuelles du niveau de la mer par altimétrie spatiale Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2, et marégraphie

#### 2.1 Bilan d'erreur

Dans le cadre d'une collaboration avec CLS, une étude récente a été menée sur les différentes sources d'erreur (dérives et biais instrumentaux, erreur des corrections géophysiques, etc.) affectant la mesure de la hausse du niveau moyen global de la mer par altimétrie Topex/Poseidon et Jason-1 (Fig.1). Une nouvelle estimation réaliste du bilan d'erreur est proposée. Un article est en révision à *Ocean Sciences* (Ablain et al., 2009).

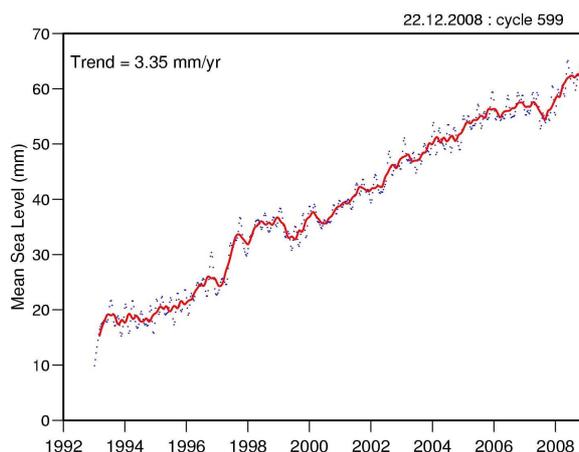


Fig.1 : Evolution du niveau moyen global de la mer entre janvier 1993 et décembre 2008. En tenant compte de la correction de rebond post glaciaire, la hausse des 16 dernières années est de  $3.35 \pm 0.1$  mm/an.

#### 2.2 Comparaison avec la marégraphie

Les données marégraphiques sont considérées comme essentielles pour calibrer les systèmes altimétriques et détecter d'éventuelles dérives instrumentales. Mais une étude de Holgate&

Woodworth (GRL, 2004) a suggéré que le niveau moyen de la mer aux côtes (tel que mesuré par les marégraphes) monte plus vite que le niveau moyen global déduit de l'altimétrie. Dans une étude menée en 2008, nous avons étudié cette question. En se basant sur un jeu d'une centaine de marégraphes de haute qualité, sélectionnés de façon sévère (séries continues ; pas de mouvement crustaux significatifs, etc.), nous avons montré que la longueur de la série marégraphique est critique pour déterminer une tendance fiable du niveau de la mer. Avec seulement 10 ans de données (comme Holgate&Woodworth), on trouve en effet une hausse du niveau moyen à la côte supérieur au niveau moyen altimétrique. Mais en allongeant la série marégraphique, cet écart s'estompe et la tendance marégraphique tend vers la tendance altimétrique (Fig.2 gauche). Cela résulte de l'importante variabilité interannuelle de la courbe marégraphique (Fig.2 droite). Cette variabilité interannuelle est reliée à la variabilité régionale mise en évidence par la couverture globale de l'altimétrie. En moyennant globalement, celle-ci s'élimine dans le niveau moyen altimétrique mais pas dans la courbe marégraphique. Ce travail a fait l'objet d'un article publié à *Geophys. Res. Lett.* (Prandi et al., 2009).

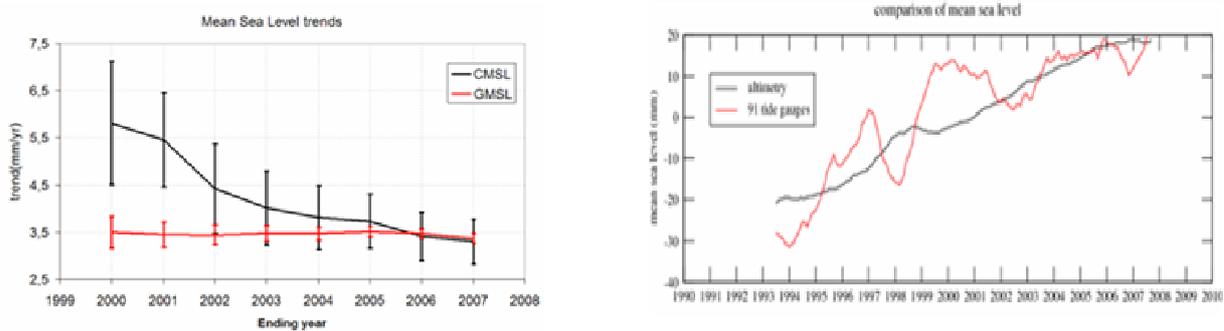


Fig.2 : Gauche : tendances marégraphiques (noir) et altimétriques (rouge) en fonction de la longueur des données (toutes les séries commencent en 1993 et s'arrêtent l'année indiquée sur l'axe des abscisses) ; Droite : niveau moyen marégraphique (rouge) et altimétrique (noir).

### 3. Etude des causes de l'évolution actuelle du niveau moyen global de la mer à partir de différentes sources de données in situ et spatiales

Dans une étude récente publiée dans *Global and Planetary Change* (Cazenave et al., 2008), nous avons estimé les contributions stériques (température et salinité), des glaces et des eaux continentales à la hausse du niveau de la mer entre 2003 et 2008. L'analyse récente des données de température in situ (avec une contribution très forte des données du réseau Argo) fait état d'une pause dans le réchauffement de l'océan depuis 2003. Alors qu'au cours de la période 1993-2003, l'expansion thermique de l'océan a contribué pour 1.5 mm/an à la hausse du niveau de la mer mesurée par altimétrie (estimée à 3.3+/- 0.1 mm/an ; voir fig.3 gauche), notre estimation basée sur Argo indique une contribution de seulement 0.3 mm/an entre 2003-2008. Mais pendant cette période, le niveau de la mer a continué à monter (à une vitesse toutefois un peu réduite, de 2.5 mm/an, en comparaison de la décennie antérieure). Nous avons alors cherché à estimer la contribution de la masse de l'océan (apports d'eau et de glace à l'océan) en utilisant les données de gravimétrie spatiale GRACE. En moyennant les données sur le domaine océanique, nous avons estimé à 1.9 mm/an la contribution des apports d'eau douce à l'océan en 2003 et 2008. Si on ajoute la petite contribution stérique, on voit qu'on peut expliquer la hausse observée. En vue de comprendre l'origine de ces apports d'eau, nous avons en parallèle analysé les données GRACE sur les calottes polaires. D'après GRACE, on observe une perte de masse de glace du Groenland de l'ordre de -150 milliards de tonnes par an. Un résultat analogue est obtenu pour l'Antarctique de l'ouest. En terme de contribution au niveau de la mer, cette perte de masse de glace (qui résulte pour l'essentiel d'instabilités dynamiques des glaciers côtiers) correspond à une hausse de 1 mm/an. La contribution des glaciers de montagne (de 1 mm/an) est obtenue à partir de résultats publiés. Ceux-ci contribuent aussi à 1 mm/an au niveau de la mer. Enfin la

contribution des stocks d'eaux continentales est estimée à partir des données GRACE (voir section 5 ci-dessous). Elle est faible, de l'ordre de 0.2 mm/an. La somme des effets des glaces et des eaux continentales est de 2.2 mm/an, en très bon accord avec la détermination directe par GRACE de l'augmentation de la masse d'eau de l'océan. Ces résultats nous permettent de 'fermer' le bilan du niveau de la mer sur les 5 dernières années (Fig.3 droite). La conclusion est que malgré la pause –sans doute temporaire- du réchauffement de l'océan, le niveau de la mer a continué à monter en raison de l'accélération de la fonte des glaces continentales.

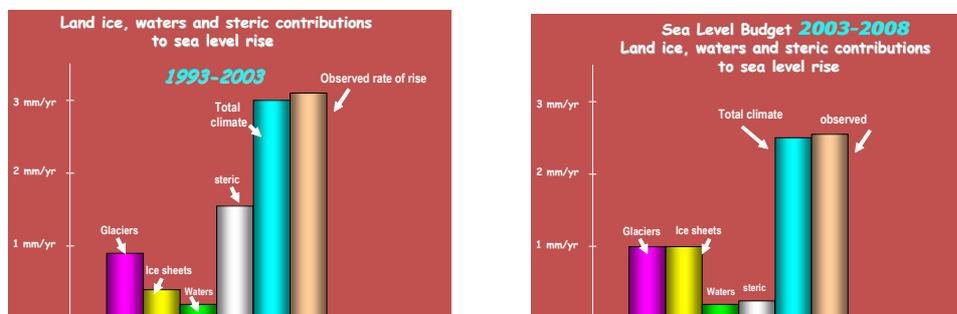


Fig.3 : Comparaison entre niveau de la mer observé et contributions climatiques ; A gauche 1993-2003 ; A droite : 2003-2008.

#### 4. Variabilité régionale des vitesses d'évolution du niveau de la mer au cours des dernières décennies ; collaboration avec le CERFAGS

Nous avons développé un code de calcul permettant de reconstruire le niveau de la mer en 2 dimensions au cours des 50 dernières années (période 1950-2003) en combinant l'information spatiale offerte par l'altimétrie (grilles globales mais de courte durée) ou les hauteurs de mer stériques (via l'utilisation des covariances spatiales issues de l'analyse en EOF des grilles altimétriques) et l'information temporelle des données marégraphiques in situ (séries longues mais de distribution limitée et hétérogène). Une telle approche a déjà été développée par J. Church (CSIRO) pour reconstruire des grilles globales de niveau de la mer sur 1950-2000 avec 9 années de données Topex. Un premier objectif de cette étude a été de tester l'hypothèse de stationnarité des covariances spatiales basées sur des données 2-D globales mais de courtes durées (ex. les grilles Topex). Cette hypothèse de stationnarité est en effet nécessaire pour la reconstruction dans le passé. Pour cela une simulation a été menée sur des données de hauteur stériques disponibles sous forme de grille globales pour 1950-2003. Les résultats ont montré que la période de temps couverte par les covariances spatiales est un facteur critique pour la qualité de la reconstruction. Grâce aux conclusions des tests de la simulation, nous avons reconstruit le niveau de la mer en 2-D pour la période historique (1950-2003) en utilisant les covariances spatiales de l'expansion thermique sur 1955-2003 au lieu des covariances spatiales de l'altimétrie sur 1993-2003. Un article a été publié à *Global and Planetary Change* (Berge-Nguyen et al., 2008). La méthode est à présent étendue à l'utilisation de grilles 2-D de hauteurs dynamiques issues des sorties du modèle de circulation générale océanique avec assimilation OPA/NEMO développé par P. Rogel au CERFACS. Ce travail est réalisé par W. Llovel, étudiant en thèse au LEGOS. L'avantage d'utiliser les grilles de sorties des modèles est double : l'information n'est pas limitée à l'expansion thermique mais contient aussi l'effet de la salinité ; la durée couverte par les grilles est de plus de 46 ans (1960-2005), ce qui résout la question de la non stationnarité des structures 2-D issues de Topex. Les résultats montrent que le niveau de la mer reconstruit sur les 50 dernières années contient à la fois le signal de variabilité interannuelle (principalement liée à ENSO) et un signal à plus long terme (variabilité multidecennale), non 'capturé' avec des EOFs basés sur 10 ou 15 ans de données (Fig.4). Un article a été soumis à *Climate of the Past* (Llovel, et al., 2009).

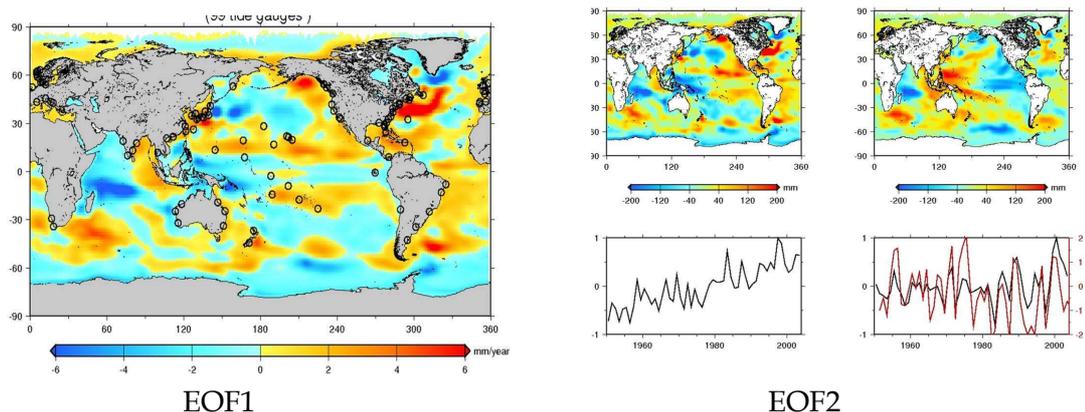


Fig4 : Gauche : carte des vitesses de variations du niveau de la mer sur 1950-2003, d'après la reconstruction de Llovel et al. (2009) ; Droite : Mode 1 et mode 2 de l'analyse en EOF sur 1950-2003 des grilles de niveau de la mer issues de la reconstruction. Le mode 1 indique l'existence d'un signal multidécennal alors que le mode 2 traduit la variabilité interannuelle liée à ENSO (SOI : courbe en rouge superposée la courbe temporelle de l'EOF2)

Une autre étude a été menée sur la variabilité interannuelle et multidécennale du niveau de la mer utilisant des séries marégraphiques de qualité entre 1950 et 2005. L'analyse spectrale des vitesses de variation du niveau de la mer aux sites marégraphiques montre deux bandes de fréquence très énergétiques : 3-8 ans et 18-20 ans. La première est très certainement liée à ENSO (la corrélation des fluctuations interannuelles du niveau de la mer observé avec celles de l'indice SOI -Southern Oscillation Index- est très grande). L'origine de l'autre pic d'énergie est moins évident. Dans une étude récente, nous montrons que la marée océanique lunaire de 18.6 ans est probablement la source de ce signal (article en préparation, Llovel et al., 2009).

## 5. Etude des variations du niveau de la mer Méditerranée

Le niveau de la mer en Méditerranée a un comportement très différent du niveau moyen global. Il est en particulier dominé par de la variabilité basse fréquence. Dans une étude en cours, on étudie la contribution des variations de masse d'eau du bassin à partir des mesures de GRACE et la contribution stérique (mesures hydrographiques in situ). Celles-ci sont comparées aux variations du niveau de la mer basées sur l'altimétrie spatiale en vue d'une étude de bilan. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un partenariat européen (programme TOPOEUROPE de l'European Science Foundation ; accepté).

## 6. Variations globales des stocks d'eaux continentales d'après GRACE

Les données de la mission de gravimétrie spatiale GRACE permettent de quantifier les variations des stocks d'eau sur les continents et leur effet sur le niveau de la mer. L'analyse des données GRACE entre 2002 et 2007 a permis d'estimer les tendances de variations des stocks d'eau dans les grands bassins fluviaux. On observe que certains bassins ont perdu de l'eau sur cette période (Congo, Zambeze, Mississippi) alors que d'autres bassins ont 'gagné' de l'eau (Lena, Yenissev, MacKenzie). Il est intéressant de noter que ce gain d'eau affecte les bassins des hautes latitudes de l'hémisphère nord, régions où les modèles de climats prédisent un accroissement des précipitations. Au total le bilan d'eau est négatif,  $\sim -60 \text{ km}^3/\text{an}$  sur 2003-2006, ce qui correspond à une petite hausse du niveau de la mer de  $0.2 \text{ mm}/\text{an}$ . Un article a été publié à *Global and Planetary Change* (Ramillien et al., 2008). Cette étude est actuellement mise à jour avec 2 années de données GRACE supplémentaires. Les résultats indiquent que sur la période 2002-2008, les eaux continentales ont une contribution négative de l'ordre de  $-0.25 \text{ mm}/\text{yr}$ , suggérant que l'effet dominant est de fréquence interannuelle (et non séculaire). Cette étude tient compte aussi de l'effet des grands lacs (Caspienne, Aral, etc.) (Cazenave et al., en préparation, 2009).

## 7. Causes de la variabilité régionale des vitesses de variation du niveau de la mer ; collaboration avec MERCATOR

Les études menées par A. Lombard lors de son post-doctorat au LEGOS ont montré que le réchauffement non uniforme de l'océan et donc la distribution non uniforme de l'expansion thermique est responsable en grande partie de la variabilité régionale des vitesses de variations observées par altimétrie. Néanmoins pour comprendre mieux la relation entre les deux phénomènes, il faut utiliser des modèles de circulation générale. Dans le cadre d'une collaboration menée par A. Lombard avec MERCATOR-Ocean, elle a analysé les sorties du modèle global MERCATOR à haute résolution pour tenter d'expliquer l'origine des structures géographiques observées. L'analyse a porté sur les sorties du modèle océanique global ORCA025 ( $\frac{1}{4}^\circ$  « eddy permitting ») développé par MERCATOR-Océan. Les simulations concernent la période 1993-2001 avec forçage ERA40.

L'analyse des sorties de hauteur de mer (SSH), température et salinité du modèle montre des résultats très intéressants : la distribution régionale de l'expansion thermique des 700 premiers mètres de l'océan semblable à celle déduite des bases de température in situ de l'océan sur la même période 1993-2001. Dans certaines régions, des compensations existent entre les effets de la température et de la salinité. Le signal stérique total (température + salinité) explique la quasi-totalité de la variabilité régionale des vitesses de variation du niveau de la mer observées par altimétrie. Un article est sous presse à *Ocean Dynamics* (Lombard et al., 2009).

## 8. Autres études

Une collaboration a démarré récemment avec le CNRM sur la validation des 'prédictions' d'évolution du niveau de la mer basées sur le modèle de climat du CNRM dans le cadre des travaux du GIEC. Des runs en 'rétrospectif' du modèle du CNRM ont été réalisés depuis 1900 en vue d'une comparaison avec les observations du niveau de la mer. Les travaux sont en cours. L'objectif est de valider le modèle de climat en vue de calcul de l'évolution du niveau de la mer sur les prochaines décennies.

## 9. Participants au projet

M. Berge-Nguyen (CNES)

A. Cazenave (CNES)

J.F. Cretaux (CNES)

K. DoMinh (CNES)

A. Lombard (CNES)

W. Llovel (étudiant en thèse)

G. Ramillien (CNRS)

Collaborations avec CLS, CERFACS et CNRM

## 10 Références bibliographiques

Berge-Nguyen M., Cazenave A., Lombard A., Llovel W. and Cretaux J.F., Reconstruction of past decades sea level using tide gauge, altimetry and in situ hydrographic data, *Global and Planetary Change*, 62, 1-13, 2008.

Cazenave A., A. Lombard and W. Llovel., Present-day sea level rise: a synthesis, *C.R. Geosciences*, doi:10.1016/j-crte-2008.07.008, 2008.

Cazenave A., Guinehut S., Ramillien G., Llovel W., DoMinh K., Ablain M., Larnicol G. and Lombard A., Sea level budget over 2003-2008; a reevaluation from satellite altimetry, GRACE and Argo data, *Global and Planetary Change*, doi:10.1016/j/gloplacha.2008.10.004, 2008.

Ramillien G., Bouhours S., Lombard A., Cazenave A., Flechtner F. and Schmidt R., Land water contributions from GRACE to sea level rise over 2002-2006, *Global and Planetary Change*, 60, 381-392, 2008.

## 4.1.2. ALTIMETRIE SPATIALE : Etalonnages

### 1. Introduction

L'année 2008 a vu naître le projet FOAM (From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring) qui réunit les collègues impliqués dans les activités de Calibration/Validation sur les océans et les eaux continentales et est financé par le CNES via l'appel à proposition Jason-2. Cette année est, bien entendu, placée sous le signe du lancement de Jason-2 et de la phase de Calibration/Validation qui a débuté dès juillet. Elle a aussi malheureusement été assombrie par le décès de notre collègue et ami Yves Ménard qui a beaucoup œuvré pour ces activités d'étalonnage et notamment la mise en place du site de Corse.

La dotation 2008 est arrivée tardivement dans les laboratoires (fin 2008) mais nous avons pu malgré tout commencer nos activités qui seront décrites succinctement dans les paragraphes suivants.

Les résultats préliminaires ont été présentés dans 2 réunions de travail :

- « In Flight Assesment meeting » à Toulouse (11 et 12 septembre)
- OSTST meeting à Nice (10 au 12 novembre)

### 2. Campagne FTLRS en Corse

La station laser FTLRS a été mise en place début juillet à Ajaccio (Corse) avec l'observation du premier passage de calibration (cycle 1, le 15/07). La station a ensuite continué ses observations en plaçant Jason-1&2 en priorité 1, et est retournée sur le plateau de Calern à partir de mi-décembre marquant ainsi la fin de la période CALVAL intensive prévu dans le projet FOAM. Les résultats seront analysés courant 2009. Plus de détails sur la campagne sont donnés dans le chapitre « 1.1. Station laser ultra mobile ».

### 3. Calibration Jason-2 en mode « vol en formation »

La calibration de Jason-2 sur le site de Corse en parallèle à celle de Jason-1 dans le mode « vol en formation » a permis une inter comparaison très précise des différentes corrections et biais instrumentaux. En supposant les corrections comme équivalentes du fait du faible intervalle de temps entre les survols de Jason-1 et Jason-2 (58 s), il est alors possible de comparer directement les quantités « orbite - mesure » (noté  $\Delta OMR$  dans le tableau suivant). Cette différence donne (aux erreurs d'orbite près) le biais relatif entre les 2 altimètres (sans les corrections). Les résultats des trois principaux sites d'étalonnage sont résumés en Table 1. Les biais relatifs issus respectivement des « orbite - mesure » ( $\Delta OMR$ ), différences de hauteur de mer ( $\Delta SSH$  biases) et différences de biais absolus ( $\Delta absolute$  biases) sont très cohérents autour d'une valeur moyenne de 80 mm. Le bilan des différences de corrections est proche de zéro car les deux sources de différences principales qui viennent de la correction troposphérique humide et de la correction ionosphérique se compensent. Pour la correction ionosphérique, la différence de correction vient du fait que le biais instrumental de Jason-2 est différent entre la bande C et la bande Ku. En ce qui concerne la correction troposphérique, nos résultats (et ceux d'Harvest) issus des comparaisons avec le GPS (Table 2) montrent que cela provient du radiomètre de Jason-1 (JMR) qui est plus sensible à la contamination côtière que celui de Jason-2 (AMR).

**Table 1** Différences des corrections en mm (Jason-1 - Jason-2)

Correction	Corsica	Harvest	Bass Strait
Dry Tropo.	0	+1	0
AMR-JMR (wet tropo)	-10	-5	-9
Iono.	+12	+10	+9

<b>SSB</b>	-4	-6	-3
<b>Δ MSS Grad</b>	Corrected for*	-2	-3
<b>Total</b>	-2	-2	-6
<b>ΔOMR</b>	+70	+95	+77
<b>ΔSSH biases</b>	+72	+97	+71
<b>Δabsolute biases</b>	+73	+90	+77

Résultats basés sur les 4 premiers mois, juillet à octobre 2008 (cycle 0 à 12)

**Table 2** Différences moyennes entre la correction troposphérique humide issue des radiomètres et celle issue des données GPS (en mm)

	<b>Harvest</b>	<b>Corsica</b>
<b>AMR - GPS*</b>	+1 ± 4 (9)	-0.5 ± 4 (10)
<b>JMR - GPS*</b>	+7 ± 1 (234)	+12 ± 3 (60)

Les nombres entre parenthèse correspondent aux nombres de cycle utilisés.

Basées sur les futurs produits TOPEX/Poseidon (en cours de retraitement) les différences (Jason-1 - T/P) pendant la phase de vol en formation de T/P et Jason-1 (2002) ont été recalculées :

- Bass Strait: +87 mm (17 survols communs)
- Corsica: +85 mm (11 survols communs)
- Harvest: +78 mm (16 survols communs)

Le biais relatif entre les missions T/P & Jason-1 puis Jason-1 & Jason-2 est donc à chaque fois augmenté d'environ 8 cm : pure coïncidence ? L'avenir nous le dira peut-être...

#### 4. Calibration en eaux continentales

Une mission de terrain sur le lac Issyk-Kul a été effectuée en août (Kirghizstan). Nous avons densifié la cartographie de la surface du lac mais aussi observé le passage quasi simultané (1 minute) des satellites Jason-1 et Jason-2 et comparé les mesures altimétriques à celles effectuées par GPS. Une autre campagne a eu lieu en février 2009, les résultats sont en cours d'analyse.

#### 5. Conclusion

L'altimétrie de haute précision est un apport considérable à l'étude de l'évolution du niveau des mers.

Pourtant au niveau de précision atteint et pour être capable de suivre des phénomènes de faibles amplitudes (mm/an) elle doit s'appuyer sur un système de référence vertical lui aussi de haute précision depuis l'espace jusqu'à la mer :

- L'orbite du satellite (champ de gravité, mesures de poursuites, ...)
- La mesure de distance elle-même (tracking et retracking, stabilité, ...)
- L'ensemble des corrections (troposphère, ionosphère, état de la mer, ...)
- La comparaison avec des données externes (marégraphes, bouées, ...)

Mais cette surveillance 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.

#### 6. Participants au projet

**P. Bonnefond<sup>1</sup> (site de Corse), P. Exertier<sup>1</sup>, O. Laurain<sup>1</sup>, F. Pierron<sup>1</sup>, Y. Ménard<sup>2</sup>, F. Lyard<sup>3</sup>, S. Calmant<sup>3</sup> (Bassin amazonien), J.-F. Crétaux<sup>3</sup> (Lac Issyk-Kul), L. Testut<sup>3</sup> (Kerguelen), G. Jan<sup>4</sup> et V. Ballu<sup>5</sup> (Vanuatu)**

Organismes concernés par le projet FOAM :

<sup>1</sup>OCA/Géoazur, Grasse, France

<sup>2</sup>CNES, Toulouse, France

<sup>3</sup>LEGOS, Toulouse, France

<sup>4</sup>NOVELTIS, Ramonville, France

<sup>5</sup>IPGP, Paris, France

## 7. Références bibliographiques

Un chapitre d'un livre sur l'altimétrie côtière a été rédigé fin 2008 en collaboration avec mes collègues B. Haines (JPL) et C. Watson (Université de Tasmanie). Il devrait être publié en 2009 : <http://www.alticore.eu/book>

### 4.1.3. ALTIMETRIE SPATIALE : Hydrologie spatiale

#### 1. Introduction

Aujourd'hui notre connaissance des variations spatiales et temporelles des flux et stocks d'eau continentales, des échanges d'énergie et de masse d'eau entre la basse atmosphère et les sols, des phénomènes hydrodynamiques à l'échelle des bassins versants, etc. est encore limitée. Des réseaux d'observations in situ (niveaux d'eau, débits, humidité des sols) ont été mis en place au cours des dernières décennies dans de nombreux bassins hydrographiques mais leur distribution reste très hétérogène et l'accessibilité aux données devient de plus en plus problématique. Depuis quelques années, les techniques spatiales de télédétection (imagerie visible et radar, radiométrie, altimétrie, gravimétrie, etc.) apportent des informations précieuses sur l'humidité des sols, l'extension et l'épaisseur du manteau neigeux, la distribution des plaines inondées, les variations des masses d'eau dans les grands bassins fluviaux, les niveaux d'eau des fleuves, lacs et plaines inondées, etc. mais pour l'essentiel les missions spatiales concernées ont été développées pour d'autres objectifs et ne sont pas optimisées pour les applications hydrologiques. En parallèle, des modèles hydrologiques régionaux et globaux ont été développés pour étudier, à l'échelle des bassins versants, les échanges de masse et d'énergie à l'interface sol atmosphère, les flux et stocks d'eau dans les différents réservoirs des sols et le ruissellement dans le réseau hydrographique.

Le suivi des eaux continentales par altimétrie satellitaire a commencé il y a une quinzaine d'années avec la réalisation de séries temporelles de hauteur d'eau d'une précision de quelques décimètres sur les fleuves majeurs et les grands lacs avec les GDR Topex/Poseidon (T/P). Grâce à ENVISAT, des séries temporelles sur les fleuves d'une précision décimétrique sont maintenant réalisées sur des cours d'eau et des lacs de dimension beaucoup plus réduite (jusqu'à quelques centaines de mètres de large) et des zones d'inondation. Sur les cours d'eau, des paramètres hydrologiques tels que courbes de tarage, pentes de fond et de ligne d'eau, coefficients de Manning peuvent aussi être dérivés de ces séries temporelles. Sur les lacs, la multiplication des missions altimétriques a permis le suivi ininterrompu de plusieurs centaines d'objets avec un échantillonnage temporel inférieur à la semaine.

L'utilisation en synergie d'observations in situ et spatiales d'un certain nombre de paramètres hydrologiques et la modélisation (modélisation des bilans d'eau à l'échelle des bassins, prédiction des crues, etc.) doit permettre d'aborder plusieurs questions fondamentales liées au cycle de l'eau continental, à la physique des processus de petite échelle, aux problèmes spécifiques à l'hydrodynamique des bassins fluviaux, et aux questions relatives aux impacts des changements climatiques sur les ressources en eaux.

L'objectif de ce travail est de renforcer le rôle de la télédétection spatiale, autour de différents senseurs (altimétrie, gravimétrie, imagerie) pour le suivi et l'étude des eaux de surface, et de développer des méthodes d'analyses orientées pour des objectifs d'hydrologie et de climatologie. Un autre objectif est de mettre en place des bases de données de niveau élevé et homogène (niveau d'eau de fleuves et de lacs, variations de stocks d'eau, volumes, surface, etc.)

Nous avons distingués trois aspects principaux dans cette étude :

Un aspect purement technique, un aspect scientifique, et un aspect base de données.

- Tout d'abord nous nous proposons d'étudier toutes les voies d'amélioration méthodologiques dans le traitement des données altimétriques des différentes missions pour les objectifs scientifiques liés à l'hydrologie continentale (analyse des modes de « retracking » des formes d'ondes, méthodes de calcul adaptés aux lacs aux rivières et aux zones d'inondation tenant compte des spécificités physiques de ces objets et des

contraintes qui leur sont liées quant à la mesure altimétrique, combinaison avec d'autres capteurs pour produire des paramètres inaccessible par l'altimétrie seule (en particulier les stocks d'eau, et leur variations).

- En second lieu nous avons choisi un certain nombre de lacs, de grands fleuves, ou de zones d'inondations qui nous ont servis de cas tests avec chacun des spécificités que nous espérons pouvoir retrouver sur d'autres objets de même type et donc tenter de généraliser les méthodes de traitement et d'analyse des données. Nous nous sommes appuyés et nous continuerons de le faire sur ces cas d'études pour tenter de mieux quantifier les interactions des cycles de l'eau dans les grands bassins (qu'ils soient fluviaux ou lacustres) avec les changements climatiques.
- Un dernier aspect concerne la continuation et l'amélioration de la base de données Hydroweb qui a été développée au Legos il y a environ 4 ans. En particulier nous comptons opérer un rapprochement avec la base de données du CTOH (tant au niveau des modes opératoires -saisie de données, choix des corrections - que des sorties- niveau d'eau des différents objets traités). Dans le même temps il est prévu de procéder à une mise à jour plus rapide des produits dans Hydroweb, via l'utilisation de produits altimétriques temps quasi réel disponibles dans les centres de données comme Aviso.

## 2. Résumé de l'activité menée en 2008

### 2.1 Lacs et réservoirs

Les lacs naturels et artificiels sont des réservoirs d'eau essentiels dans l'industrie, l'agriculture, la pêche, l'hydro-électricité et pour la consommation domestique. Ils sont les plus grands réservoirs d'eau douce utilisables sur les continents. Par ailleurs l'évolution temporelle des stocks d'eau contenus dans ces bassins et des conditions hydro physiques, est symptomatique d'une conjonction de forçages extérieurs, climatiques et anthropiques. Selon l'UNEP (United Nation Environment Programme) un des plus sérieux problèmes concerne l'assèchement général des réserves d'eau dans les grands lacs (Tchad, Victoria, Aral), la contamination par des produits chimiques, et l'appauvrissement de l'écosystème et du biotope. Il est donc essentiel de pouvoir suivre ces évolutions: à l'échelon régional il faut pouvoir gérer, planifier et prendre des mesures conservatoires des stocks d'eau disponibles. A l'échelon global, il faut quantifier et analyser les impacts des changements climatiques sur ces stocks d'eau, et inversement utiliser la surveillance des grands lacs pour mieux comprendre et modéliser les interactions avec les changements climatiques. Il est de ce fait indispensable de mettre en place des outils d'observations globaux, accessibles et pérennes. Or la situation dans ce domaine est encore très inégale et incomplète : des régions comme les grands lacs d'Amérique du nord par exemple sont abondamment pourvus en système de mesures in situ accessibles et souvent gratuits, tant pour les conditions morpho métriques (niveau, étendue, volume) physico-chimiques (température, salinité, etc. ...), dynamiques (vent, vagues) que biologiques (suivi des espèces lacustres). Des commissions d'experts siègent régulièrement pour faire état de l'évolution de ces écosystèmes. De nombreuses autres régions du monde sont peu ou pas du tout pourvues de ces systèmes d'observations et de cette fédération d'efforts pour les maintenir vivants. Lorsque malgré tout, il existe des stations de mesures, les données ne sont pas diffusées. Ainsi à l'échelle globale, il n'existe pour le moment aucun système d'observation centralisé et ouvert pour la surveillance des grands lacs et réservoirs artificiels.

En 2008 nous avons travaillé dans la continuité des activités des années précédentes sur ces sujets, en tentant d'approfondir nos méthodes de traitements et d'analyses des données spatiales en nous focalisant sur un certain nombre d'objets que nous détaillerons plus loin.

3 cas d'études ont été annoncés dans la proposition initiale :

les lacs andins, les lacs d’Afrique de l’Est, et les lacs d’Asie centrale.

Durant l’année 2008 nous avons avancé sur chacune de ces régions.

### 2.1.1 Les lacs Andins

L’objectif principal était d’étudier la variabilité des lacs de deux zones de l’ouest et du sud de l’Amérique du sud grâce aux méthodes satellitaires : les lacs de l’Altiplano (Titicaca, Poopo, Salars), et ceux de la Patagonie a cheval sur le Chili et l’Argentine.

Ce travail se déroule en coopération avec l’université de Concepcion au Chili.

Pour les lacs de l’Altiplano nous cherchons à comprendre qu’elle est la cause de la variabilité saisonnière et interannuelle du niveau de ces lacs en nous appuyant sur les données altimétriques que nous avons couplées avec des données d’imagerie ainsi que sur des données in-situ et des sorties de modèle. Nous tentons de mettre en évidence des corrélations avec des phénomènes tel que El Nino ou encore les oscillations décennales dans le Pacifique. Dans un premier temps nous avons pu valider les variations de niveau du lac Titicaca grâce à quelques données in situ qui nous ont été fournies par l’IRD au Pérou, et nous avons pu constater que les séries temporelles calculées étaient de grande précisions (quelques centimètres).

Puis nous avons analyse une quinzaine d’images Landsat et CBERS (satellite sino-brésilien) à différentes époques afin d’établir une courbe de tarage du lac Titicaca, ce qui nous permet grâce à la combinaison avec l’altimétrie d’en déduire les variations de volume du lac et donc de pouvoir les utiliser pour affiner le bilan hydrologique et tenter de le comprendre sous le prisme des oscillations sus citées (ENSO, PDO, NAO). Ce travail est en cours. (cf figure 1).

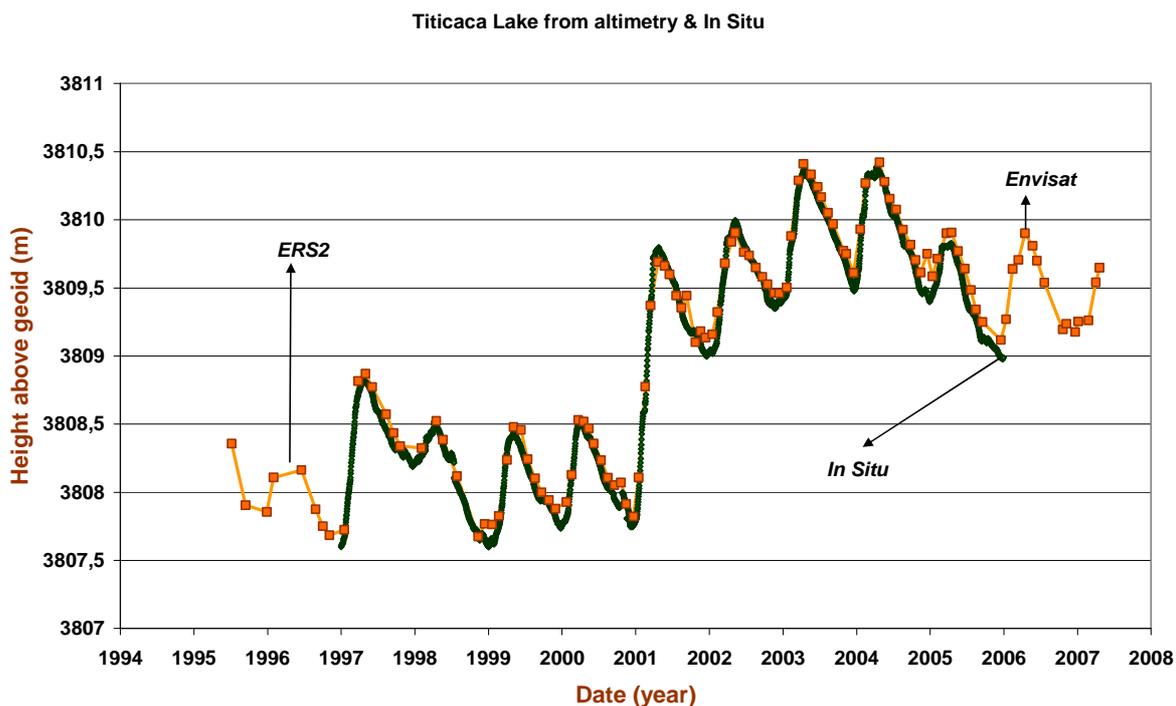


Fig. 1 : Lac Titicaca : comparaison de données In Situ avec des mesures de niveau d’eau mesurées par altimétrie radar

Pour le lac Poopo et les Salars, nous avons développé une méthode de classification des surfaces vues par l’instrument Modis (sur le satellite américain Terra) qui nous a permis de calculer tous les 8 jours la surface totale recouverte d’eau sur l’ensemble de ces lacs, qui sont hautement variable en superficie (cf figure 3). On a ainsi pu observer de fortes variations tant saisonnières qu’interannuelles avec une corrélation évidente avec les taux de précipitations. Il reste que pour ces lacs les données altimétriques ne sont pas très précises, et nous tentons actuellement d’utiliser préférentiellement les données d’altimétrie laser (satellite Icesat) qui si elles n’ont pas la

répétitivité temporelle de l'altimétrie radar, ont par ailleurs une très grande précision en vertical (quelques centimètres) et elles peuvent être facilement couplées avec les données Modis pour de la même façon en déduire des variations de stocks d'eau.

Il restera ensuite à analyser les données de la mission gravimétrique GRACE sur la région.

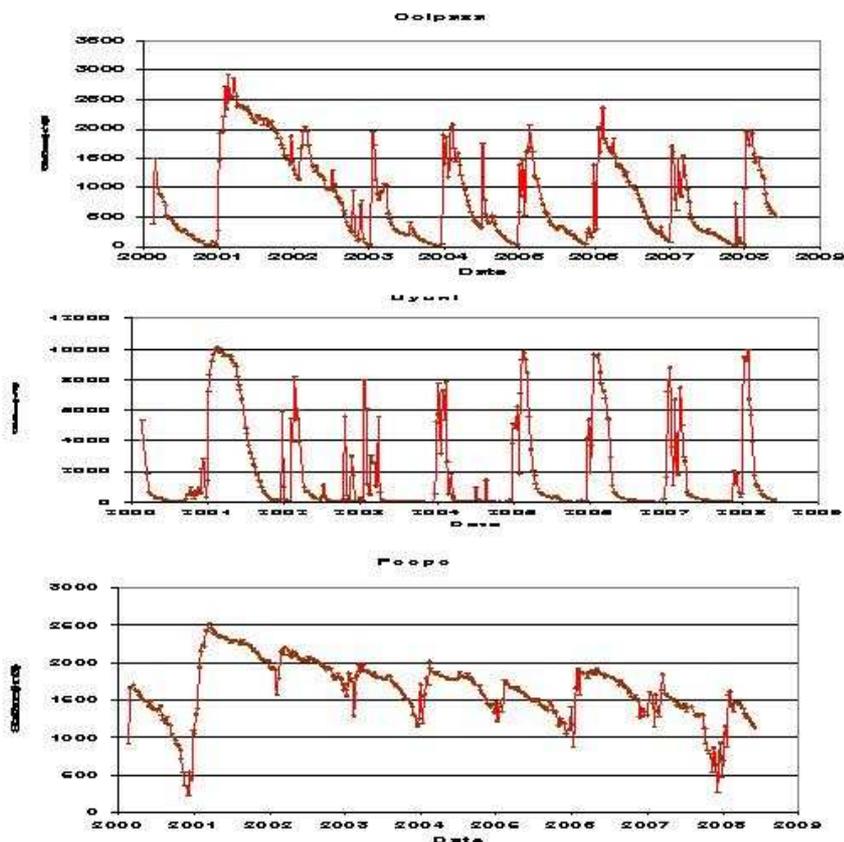


Fig. 2 : variations de surface des Salars de Coipasa et d'Uyuni et du lac Poopo dans l'altiplano andin par classification des images Modis.

Lacs patagoniens : Il s'agit des grands lacs au Sud de la chaîne andine (Argentino, Viedma, Sam Martin, General de Carrera). Dans le cadre de la coopération avec l'université de Concepcion nous cherchons à établir les bilans hydrologiques de ces lacs qui subissent diverses influences extérieures pouvant expliquer les variations de niveau (ENSO et PDO comme pour les lacs plus au nord, mais aussi fonte des glaciers andins, oscillation sud Atlantique). Une thèse a débuté au Chili en 2008 sur le sujet (co-direction R. Abarca Del Rio, JF Crétaux).

### 2.1.2 Les lacs d'Afrique de l'Est

Les lacs d'Afrique de l'Est sont abondamment suivis par altimétrie et plusieurs études ont été publiées dans le passé sur ce sujet. Les études actuelles concernent l'analyse conjointe des mesures de hauteurs d'eau par altimétrie et de variations de volumes par gravimétrie (mission GRACE), et par modèle de surface (LSM). Plusieurs études sont en cours, dont une qui a fait l'objet d'une publication soumise à GRL en Décembre. Nous avons pu corrélérer les variations de niveau du lac Victoria qui a enregistré une forte baisse dans les années 2000, visible également avec les données de GRACE (fig 3), et qui nous ont permis de corriger certains paramètres de modèle (précipitation, évapotranspiration et ruissellement de surface). Ce travail est en collaboration avec l'IPGP et l'observatoire de Bruxelles. Une autre analyse est en cours sur l'ensemble des lacs de la zone, par corrélation également entre les données altimétriques, les données GRACE, un modèle de surface et des champs de précipitations mensuelles. Ce travail fait l'objet d'une présentation à l'AGU.

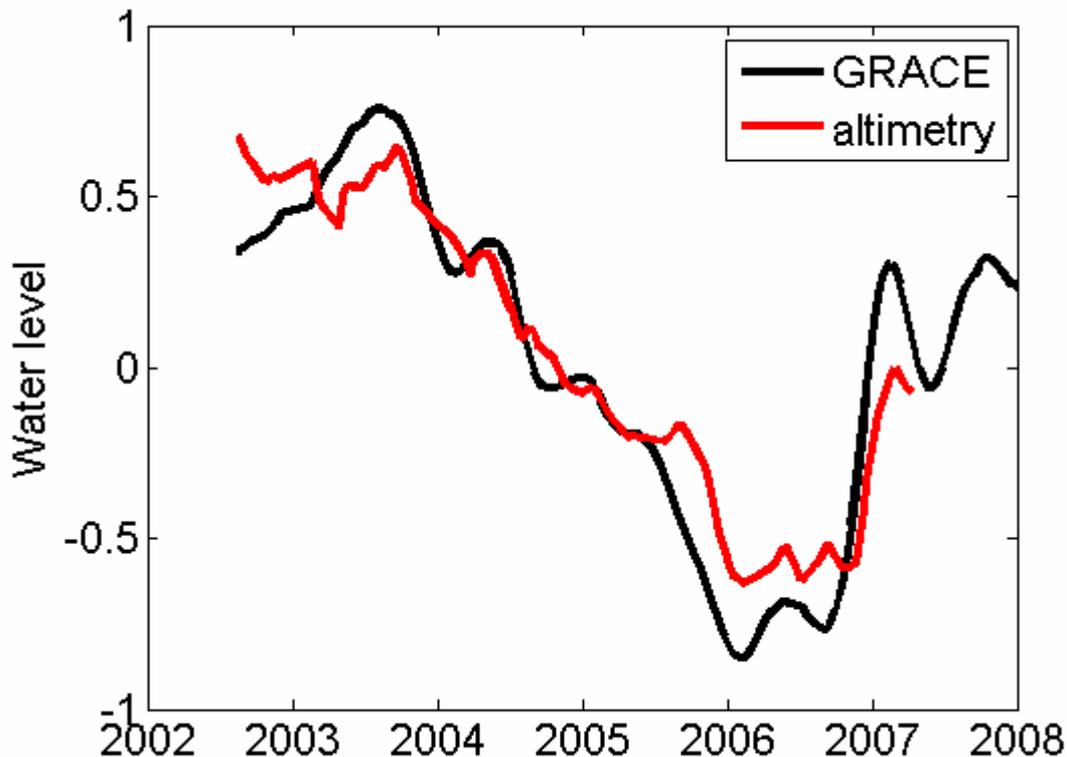


Fig. 3: comparaison GRACE/Altimétrie sur le lac Victoria

### 2.1.3 les lacs d'Asie Centrale

la plupart des lacs d'Asie Centrale sont situés dans le bassin de drainage des deux grands fleuves qui traversent cette région (Amou Darya et Syr Darya) qui tout deux se jettent dans ce qu'il reste de la mer d'Aral. L'irrigation et la rétention d'eau dans les grands réservoirs est une donnée locale primordiale. Partagés entre plusieurs pays ces bassins d'irrigation sont l'objet d'âpre négociations sur l'utilisation de leur ressource en eau, et des informations de base comme les débits d'eau ou les niveaux dans les réservoirs peinent à franchir les frontières. Par l'intermédiaire de l'altimétrie les niveaux des lacs et réservoirs sont désormais accessibles (disponible sur Hydroweb) pour l'ensemble de la région. Nous avons développé une coopération depuis quelques années avec un institut d'Hydrologie au Kirgizstan pour étudier le lac Issykkul et les réservoirs le long du Syr Darya. Cette coopération nous permet d'obtenir des données in situ de comparaison et de tenter de comprendre les impact de la fonte des glaciers du Pamir et du Tian Chan sur les ressources en eau « à la source ». Ce travail est en cours. Par ailleurs nous avons utilisé les données altimétriques et des données Modis pour établir un bilan hydrologique de la mer d'Aral qui a été publié (Crétaux et al., 2008). Nous continuerons ce travail par l'utilisation des données GRACE, de l'imagerie haute résolution et des sorties de modèles climatique en particulier pour tenter de comprendre l'évolution future des ressources en eau de la région sous divers scénarios à partir des GCM (Global Climate Model).

### 2.1.4 Projet SOLS (Service d'Observation des Lacs par Satellite)

Un des objectifs qui n'était pas expressément indiqué dans la proposition initiale mais qui est faisait déjà l'objet d'étude préliminaire va être de créer dans le cadre d'Hydroweb un centre de données dédiés aux lacs pour répondre aux besoins exprimé par la communauté scientifique internationale via le GEO et le GCOS. Un prototype de ce centre de données lacs est en cours de mise en place.

Nous proposons donc de créer un centre d'observation basé sur un couplage entre l'altimétrie radar et l'imagerie optique et micro-ondes. L'altimétrie spatiale (Topex/Poseidon, Jason, GFO, Envisat) permet un suivi régulier (10 à 35 jours) avec une grande précision (quelques centimètres)

du niveau des plus grands lacs terrestres. L'imagerie optique (SPOT-LANDSAT-MODIS) permet de détecter la présence d'eau sur Terre avec une résolution spatio-temporelle variable (quelques mètres à centaines de mètres et quelques jours). On peut donc établir assez facilement des courbes de tarage (niveau/surface) en sélectionnant quelques images satellites à des périodes où le niveau des lacs étudié est très différents, puis d'utiliser ces courbes de tarages en combinaison avec les séries de niveau d'eau produits classiquement dans Hydroweb pour également produire les variations de surface de ces lacs.

Dans un premier temps, durant une partie de l'année 2008 nous avons sélectionné une vingtaine de lacs et réservoirs, de taille et de variabilité spatiale différentes. Pour ces lacs nous avons extraits un certain nombre d'image satellites (radar ou optique) de provenance diverses (Modis, Landsat 1-7, CBERS, ASAR) et avons calculé les courbes de tarages. Nous avons également utilisé des données in situ de variations de niveau pour certains d'entre eux afin de calculer la précision de l'altimétrie dans différentes configuration. Les premiers résultats sont prometteurs, car il montrent que 4-5 images à des dates bien réparties dans l'historique de variation de niveau des lacs suffisent à établir une courbe de tarage précise utilisable par la suite (cf fig 4).

Pour ce projet il reste à automatiser les chaînes de traitement et à calculer les courbes de tarages d'environ 130 lacs qui sont dans la liste prioritaire fournies par le GCOS (il y en a 150 dont les 20 qui ont servi pour le prototype en cours).

Ce projet est en coopération également avec l'institut d'Hydrologie de St Petersburg en Russie, qui a en charge, au nom de l'OMM, la mise en place d'un centre de données lacs à partir de données in situ et télédétection. Les collègues russes prennent en charge la collecte et la mise en forme des données in situ, la télédétection pour le Legos.

Nous fournissons également des données d'étendue de glace sur les lacs pour les zones boréales (grand lacs en Russie et au Canada) ou quelques lacs d'Asie centrale recouvert de glace l'hiver (mer d'Aral, mer Caspienne, lac Balkhash, Baikal etc.) à partir de méthode de détection de ces paramètres développées au Legos ces dernières années.

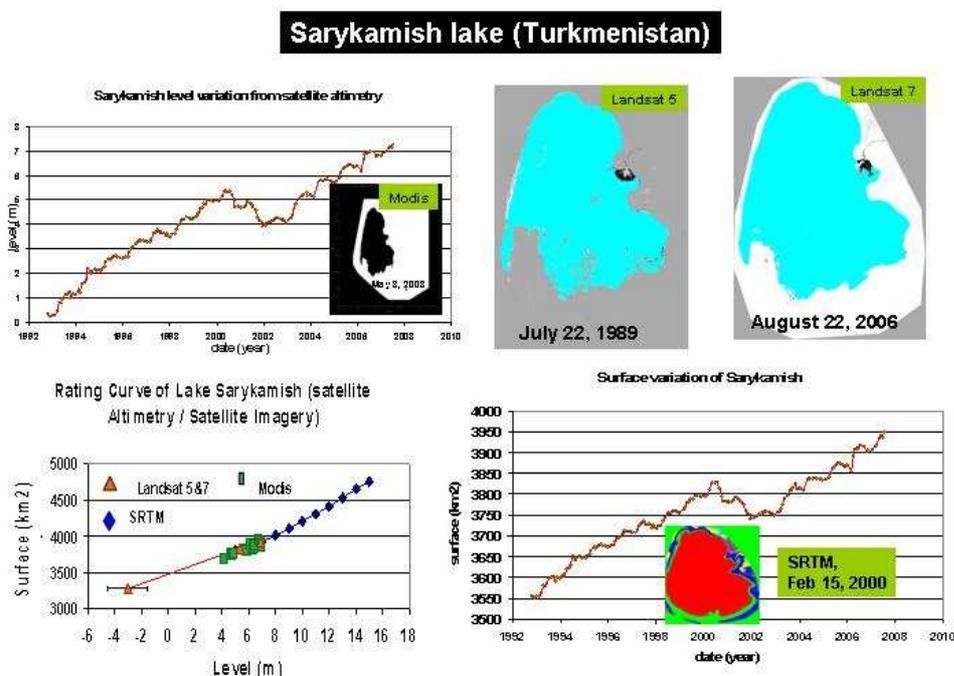


Fig. 4 : page web type pour chaque lac de la future base de données SOLS (Ici le lac Sarykamish qui fait partie des 20 lacs du prototype). La courbe de niveau par altimétrie, la courbe de tarage, et la courbe de surface et les données correspondantes seront délivrées. Des images satellites classifiées (classification binaire, Eau / autre) ayant servies au calcul de la courbe de tarage seront également en ligne.

## **2.2 Fleuves**

2 grandes régions avaient été choisies pour l'étude des fleuves par altimétrie satellitaire. La Sibérie (Ob - Irtysh) et le Moyen Orient (Tigre - Euphrate). Un troisième bassin fluvial a continué de faire l'objet d'étude prononcé, l'Amazone.

### **2.2.1 Ob**

Nous avons calculés par altimétrie satellitaire (T/P et Envisat principalement) les séries temporelles de variations de niveau aux « stations virtuelles » (intersection entre la trace du satellite et le fleuve). Ces études bénéficient en outre d'efforts complémentaires dans le cadre d'un GDRI (Groupement de Recherche International) CNRS-Russie CAR-WET-SIB (Etude du cycle bio-géochimique du carbone en Sibérie) en coopération avec des instituts de recherche à Tomsk, Krasnoyarsk, Novosibirsk et Khanty-Mansiysk en Sibérie. Les applications sont ciblées sur deux sous régions ; les zones marécageuses inondables dans le Haut Ob (Vasyugan : Sud Sibérie) et les régions les plus au nord du bassin (Pur-Taz), recouvertes de permafrost. Dans cette région, une campagne a été menée en Août 2008 par un membre du laboratoire. Des mesures de terrains ont été collectées (géomorphologie, classification des sols, et topographie) et sont en cours d'analyse.

Une étude de la variabilité des stocks d'eau et des types de surface (par GRACE et Envisat), et des débits en aval du fleuve (Salekhard) par mesures in situ est également en cours dans plusieurs sous régions du bassin de l'Ob. Cela nous a entre autre servi à établir des courbes de correspondance niveau/débits.

Enfin nous étudions les phases de gel/dégel et les étendues sous glace, dans le bassin de l'Ob à partir d'une méthode utilisant les données altimétriques qui a été développée au Legos ces dernières années pour certains lacs Eurasiens (Baikal, Caspienne, Aral, Onega, Ladoga).

### **2.2.2 Euphrate-Tigre**

Une analyse du régime hydrologique de ces rivières est en cours à partir des données altimétriques, ainsi que de la variabilité des nombreux réservoirs présents dans la région. Nous prévoyons également d'utiliser les données GRACE et des images satellites pour estimer les variations de stocks d'eau, en particulier dans le delta du Tigre recouvert de zones d'inondations.

### **2.2.3 Amazone**

Les activités en hydrologie spatiale en Amazonie ont été partagées entre acquisition de données de terrain et traitement-interprétation de données satellitaire.

#### **- Campagnes de terrain**

Les campagnes de terrain ont eu pour objectif premier d'acquérir des données pour des travaux d'étudiants (mestrado et thèse). Ces données sont : des profils hydrologiques par GPS, le nivellement de règles, des sections ADCP. Les zones couvertes ont été le Rio Madeira, Le Rio Negro, la confluence entre les Rio Solimoes et Negro, Le Rio Tapajos, les zones d'inondation de Janauaca (rive Sud du Solimoes) et Curuai (Rive sud de l'Amazone), la zone humide de Caapiranga (Nord du bassin du Rio Negro). Le traitement des données est actuellement réalisés par les étudiants brésiliens.

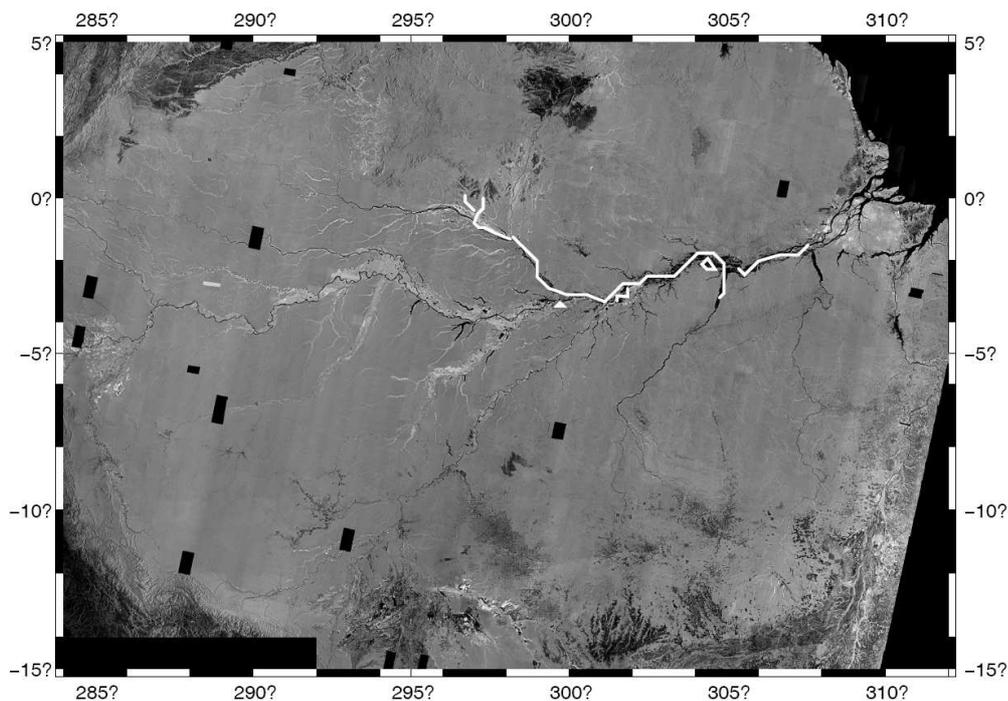


Fig. 4 : trajets GPS cinématiques dans le bassin du Amazonien dans l'année 2008 (en blanc sur l'image). Ces trajets sont en cours de traitement, avec les objectifs scientifiques suivant (outre l'enseignement) : le nivellement des rivières, des données pour la cal/val d'ENVISAT, des profils de pente pour tester l'applicabilité de la relation entre pente et vitesse pour des calculs de débits (les vitesses du flux étant mesurées par ailleurs lors de transects ADCP)

#### **-Traitement des données.**

Nous avons travaillé dans les directions suivantes :

- le problème de l'accrochage (hooking) des radars aux transition terre-eau,
- la comparaison entre les séries temporelles in situ et altimétriques pour les satellites ERS 2 et ENVISAT,
- la classification d'images MODIS à 500 et 250 m de résolution pour extraire les surfaces inondées (cf partie sur l'étude des zones d'inondations de ce rapport).

### **2.3 Etude et suivi par satellite de zones d'inondation**

La quantification des variations de volumes d'eau dans les zones d'inondation a été investiguée par différentes méthodes dans la littérature. Les satellites fournissent un outil irremplaçable dans ce domaine car ils offrent une vision spatialisée à des résolutions temporelles inaccessibles autrement. Nous avons commencé un travail qui permet de tirer profit à la fois d'images satellites de moyenne résolution spatiale (250-500m) et temporelle (semaine), mais sur de grandes étendues (200000 km<sup>2</sup>), et de l'altimétrie satellitaire. L'objectif étant de suivre les inondations à grande échelle comme elles peuvent se produire régulièrement dans un certain nombre de régions. L'imagerie Modis permet de détecter les surfaces inondées (donc de calculer les variations de surfaces d'eau) et de sélectionner correctement les données altimétriques en rajoutant un critère de prise en compte d'une mesure à un instant et à un endroit donné. Nous avons fait ce travail sur les régions suivantes :

Bassin de la Diamantina en Australie, delta intérieur du Niger, zone d'inondations du lac Poyang en Chine, et zones d'inondation de la Caapiranga dans le bassin amazonien.

Pour chacune de ces régions nous avons pu établir des séries temporelles de hauteurs d'eau et des cartes pour les zones inondées (avec distinguo entre eau libre, eau sur sol nu, végétation aquatique et végétation sur sol nu). Nous travaillons à des méthodes d'interprétation de ces

résultats (par l'apport de données de type GRACE, de champs globaux de précipitation, de comparaison avec d'autres méthodologies, ou encore de sortie de modèles). Ces zones d'inondations seront aussi prochainement incluses dans la base de données Hydroweb.

Aucune de ces études n'a encore fait l'objet de publications, mais un article va être soumis courant janvier 2009 pour la description de la méthodologie à partir des résultats sur le bassin de la Diamantina, et une autre publication est en cours de rédaction sur le delta intérieur du Niger pour lequel nous sommes parvenus à bien quantifier les apports d'eau par précipitations directes sur le delta, et ceux par transport de surface via le fleuve Niger et la rivière Bani. Pour le bassin de la Caapiranga (zone d'inondation entre le Rio Branco et le Rio Negro dans le bassin amazonien) la forte présence de végétation et le couvert nuageux assez dense une bonne partie de l'année a fortement limité la qualité des résultats mais nous avons ainsi pu montrer justement les limites d'utilisation d'imagerie optique et infra rouge dans ce genre de cas. Cependant nous avons pu montrer que les données Modis et les données de niveau calculées par Envisat sur ce bassin sont parfaitement en phase.

Notre méthode fonctionne par contre très bien en zones aride ou semi aride. A noter que pour la zone humide de Caapiranga, deux campagnes ont été entreprises, une en basses eaux et une en hautes eaux, et que les deux se sont soldées par un échec, il n'a pas été possible d'entrer dans la zone humide proprement dite. En basses eaux, le bateau a été arrêté par des bancs de sables qui coupaient le lit du fleuve et empêchaient de remonter le fleuve d'accès. En hautes eaux, le bateau a pu remonter jusqu'à proximité de la zone mais il a été impossible de pénétrer dans la forêt, le niveau d'eau ayant atteint la canopée et les branches empêchaient tout passage en pirogue. L'objectif de ces missions était de valider par GPS le contour de la zone en eau pour vérifier l'extension de l'inondation donnée par les images MODIS.

Nous continuerons en 2009 ces travaux axés sur la caractérisation des inondations à grande échelle par combinaison entre différents capteurs spatiaux en y rajoutant d'autres instruments tels que GRACE ou SRTM. Nous développons également des coopérations avec d'autres laboratoires sur ces sujets (Projet DRAGON-II en cours pour le lac Poyang, coopération avec la NASA et la maison de la télédétection à Montpellier sur le Niger, coopération avec l'agence brésilienne de l'eau pour le bassin amazonien).

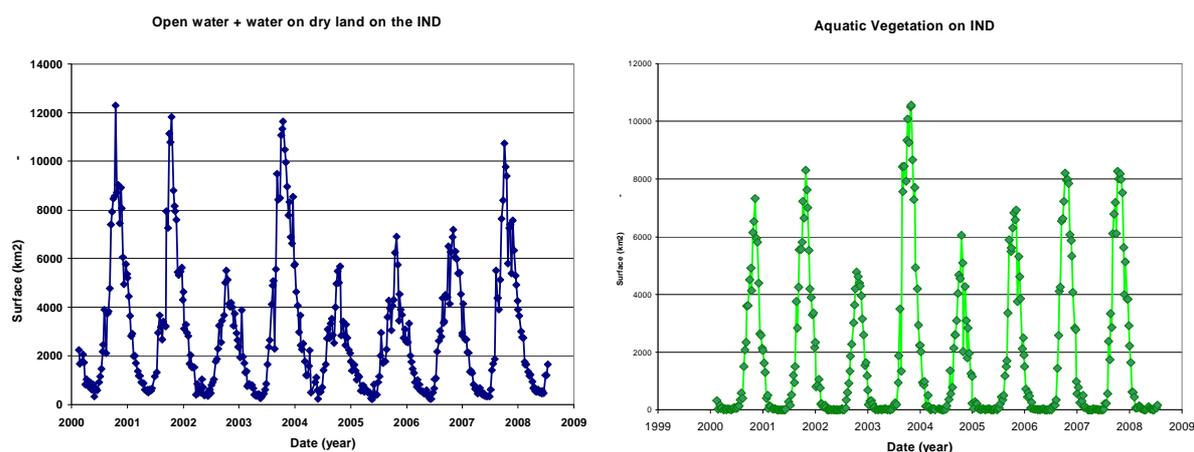


Fig. 5 : inondations sur le delta intérieur du Niger: séries temporelles de surface d'eau issue de Modis.

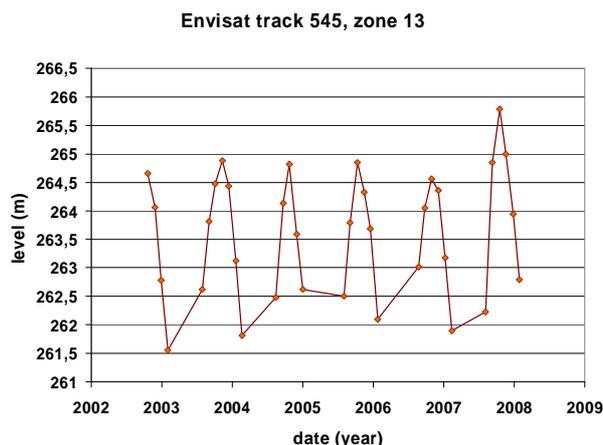


Fig. 6 : inondations sur le delta intérieur du Niger : séries temporelles de niveau par altimétrie (les classifications par Modis ont servies à la sélection des données altimétriques pour la trace choisie)

### 3. Base de données Hydroweb

La base de données Hydroweb a été développée il y a environ 5 ans dans l'idée de fournir des séries temporelles de niveaux d'eau sur les lacs et les grands fleuves du monde à partir de l'altimétrie satellitaire. Nous cherchons en permanence à améliorer la qualité et la quantité des produits fournis sur cette base. En particulier de nombreuses comparaisons avec des données in situ de niveau d'eau sont régulièrement effectuées pour vérifier la précision des produits délivrés. Nous augmentons aussi en permanence le nombre de stations virtuelles sur les fleuves en rajoutant les données Envisat qui n'étaient pas initialement prises en compte pour ces objets. Cette mise à jour est en cours, et en 2008 4 grands fleuves d'Afrique (Nil, Niger, Congo et Zambeze) et 3 d'Amérique du Sud (Amazone, Parana et Orénoque) ont été rajoutés sur la base de données. En 2009 suivront les fleuves d'Asie (Gange, Indus, Bramhapoutre, Yangtse, Ob) d'Europe (Rhin, Danube, Dniepr) et d'Amérique du Nord (Mississippi).

Nous pensons également rajouter des données de validations lorsque cela est possible (données de niveau in situ par exemple sur certains grands lacs ou certains fleuves). Nous compléterons par la même occasion la longueur des séries temporelles lorsque les données in situ le permettent.

Par ailleurs nous allons perfectionner la procédure de mise à jour des résultats sur la base en travaillant sur les données IGDRs (délivrés avec un délai de 3 jours) et par le développement d'une extraction et d'un traitement automatique des données altimétriques. Ce travail a démarré en 2008 et se poursuivra en 2009.

### 4. Participants au projet

Jean-Francois Crétaux (CNES/Legos), Stephane Calmant (IRD/Legos), Anny Cazenave (CNES/Legos), Marie-Claude Gennero (CNES/Legos), Nelly Mognard (CNES/Legos), Muriel Bergé-Nguyen (CNES/Legos), Sylviane Daillet-Rochette (CNES/Legos), Alexei Kouraev (CNES/Legos).

## 5. Références bibliographiques

- Biancamaria S., P. Bates, A. Boone., N.M. Mognard, J.-F. Crétaux, Modelling the Ob River in Western Siberia, using Remotely Sensed Digital Elevation Models"  
*Proceedings of the "2<sup>nd</sup> Space for Hydrology Workshop" WMO, Geneva, November 11-14, 2007, ESA Special Publication SP-xxx*, 2008.
- Bonnet M.P, G. Barroux, J-M Martinez, F. Seyler, P. Moreira-Turcq, G. Cochonneau, J.-M. Melack, G. Boaventura, L. Maurice-Bourgoin, J.-G. León, E. Roux, S. Calmant, P. Kosuth, J-L. Guyot, P. Seyler, Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí), in press, *Journal of Hydrology*, 2008.
- Calmant S., Seyler F. and Cretaux J.F., Monitoring Continental Surface Waters by Satellite Altimetry, *Survey in Geophysics*, special issue on 'Hydrology from Space', in press, 2008.
- Cretaux J.F., Calmant S., Romanovski V., Shibuyin A., Lyard F., Berge-Nguyen M., Cazenave A. Hernandez F., and F Perosanz Implementation of a new absolute calibration site for radar altimeter in the continental area: lake Issykkul in Central Asia, *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-008-0289-7, 2008.
- Cretaux J-F, R. Letolle, and S. Calmant, Investigations on Aral Sea regressions from Mirabilite deposits and remote sensing, *aquatic geochemistry*, DOI: 10.1007/s10498-008-9051-2, 2008
- Kouraev A.V., M.N.Shimaraev, P.I. Buharizin, M.A.Naumenko, J-F Crétaux, N.M. Mognard, B. Legrésy, F. Rémy. Ice and snow cover of continental water bodies from simultaneous radar altimetry and radiometry observations. *Survey in Geophysics - Thematic issue "Hydrology from space"*, 2008, in press
- Kouraev A.V., Kostianoy A.G., Lebedev S.A. Recent changes of sea level and ice cover in the Aral Sea derived from satellite data (1992-2006). *Journal of Marine Systems*, 2008, in press.
- Leon, J-G, M-P Bonnet, F. Seyler et S. Calmant, Rating curve in the Amazon Basin combining Altimetry-derived water stages and discharge propagated from remote stations, *Proceeding of 2<sup>nd</sup> Hydrospace Workshop, Geneva, Nov 2007, ESA*, in press, 2008.
- Roux E, M. Cauhopé, M-P. Bonnet, S. Calmant, F. Seyler, Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring, *Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol 53-1, 81-99, 2008
- Roux, E., J. Santos da Silva, A. Cesar Vieira Getirana, M-P Bonnet, S. Calmant et F. Seyler, Producing time-series of river water height by means of satellite radar altimetry – Comparison of methods; Produire des séries temporelles de hauteur d'eau grâce à l'altimétrie radar satellitaire – Comparaison de méthodes, *Hydrological sciences Journal*, in revision, 2008
- Santos da Silva, J., E. Roux, O. Correa Rotunno Filho, M-P Bonnet, F. Seyler. et S. Calmant, 3D selection of ENVISAT Data for Improved Water Stage Times series on the Rio Negro and Adjacent Wetlands (Amazon basin), *Proceeding of 2<sup>nd</sup> Hydrospace Workshop, Geneva, Nov 2007, ESA*, in press, 2008.

## 4.2. PHENOMENES COTIERS

### 1. Introduction

L'intérêt du SHOM pour les phénomènes côtiers se manifeste essentiellement dans le domaine de la marégraphie, la modélisation hydrodynamique et l'harmonisation des références verticales pour l'hydrographie et les altitudes terrestres.

Les travaux relatifs à la marégraphie sont traités séparément.

### 2. Modèles de marée

Le SHOM utilise la modélisation numérique à l'aide du système TELEMAC (EDF/LNHE, SOGREAH) pour améliorer ses modèles de marée. Ainsi, ses modèles de marée sont mis en place à partir de l'interpolation des données issues de la modélisation et des résultats issus de l'analyse des mesures marégraphiques.

Malgré la réactualisation du modèle de marée des côtes métropolitaines en 2007 grâce à l'acquisition et l'exploitation de nouvelles mesures marégraphiques, dans quelques zones, le modèle de marée n'est pas toujours d'une précision suffisante pour la réduction des sondages (passage de la mesure de hauteur d'eau à la profondeur par rapport au zéro hydrographique). Le modèle TELEMAC a été réalisé en 2000 ; la densification de la base de données bathymétriques du SHOM ainsi que la possibilité de réaliser des maillages côtiers plus fins devraient permettre d'améliorer sensiblement la qualité du modèle numérique.

En 2008, les actions relatives à la modélisation ont porté sur la rédaction de spécifications et la passation d'un marché permettant d'améliorer le modèle de marée du SHOM. Ce modèle de marée sera mis à jour en 2009 à partir d'un nouveau modèle numérique (collaboration avec la société SOGREAH, Grenoble). Il est prévu de réaliser des simulations numériques sur un an, de les analyser puis d'ajuster les constantes harmoniques obtenues aux constantes harmoniques mesurées.

### 3. Références verticales, projet BATHYELLI

Le projet BATHYELLI a pour but de coter le zéro hydrographique sur l'ensemble des côtes métropolitaines dans un repère stable, précis et accessible. Ce projet, initié en 2005, se poursuit ; il devrait s'achever en 2009.

#### 3.1 Levés GPS réalisés en 2008

Les levés de la campagne GPS non exploitables ont été programmés à nouveau. En 2008, 2 levés ont été réalisés :

- Cap Ferret (le marégraphe avait été perdu lors du premier levé),
- Pointe de Grave (seul 10% du levé avait été réalisé en 2007).

#### 3.2 Levés GPS traités en 2008

Pour chaque zone, les levés GPS ont été traités pour en déduire le niveau moyen :

- correction des données d'attitude si nécessaire,
- filtrage des données,
- correction de la marée et des effets météorologiques,
- retranchement de la hauteur de l'antenne GPS par rapport au niveau de la mer.

Un levé avait été traité en 2007, 14 levés ont été traités en 2008. Il reste encore 4 levés à traiter (Cherbourg, Nice, Roscoff et Le Conquet).

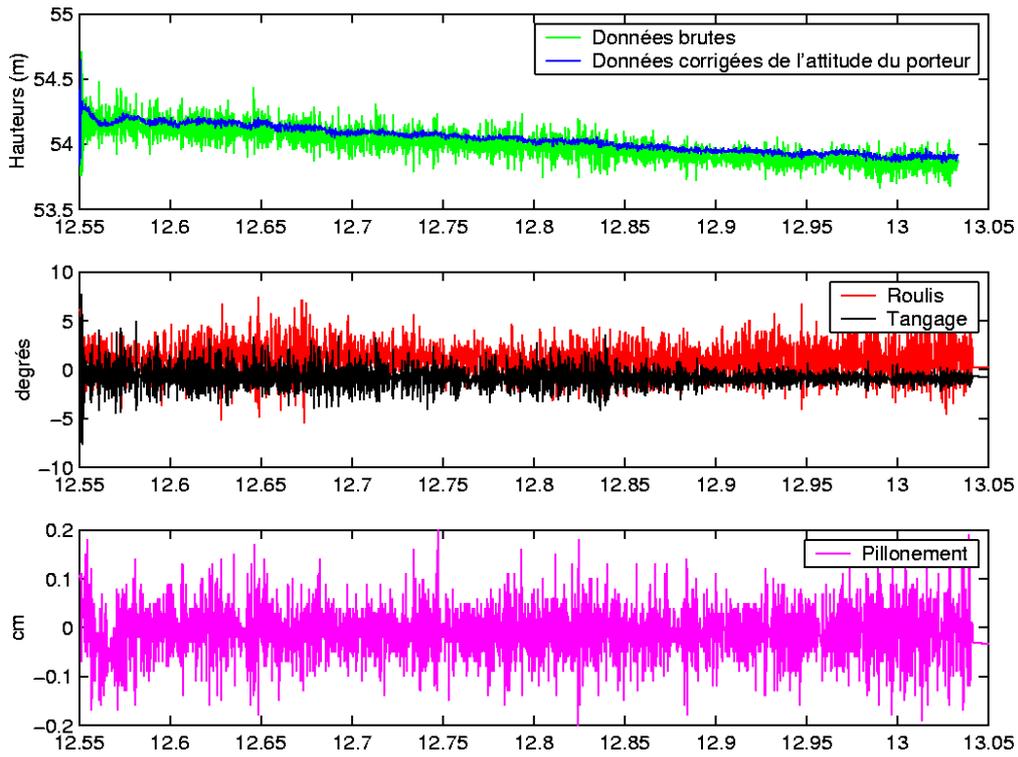


Fig. 1 : Correction des données d'attitude (chaîne de traitement BATHYELLI)

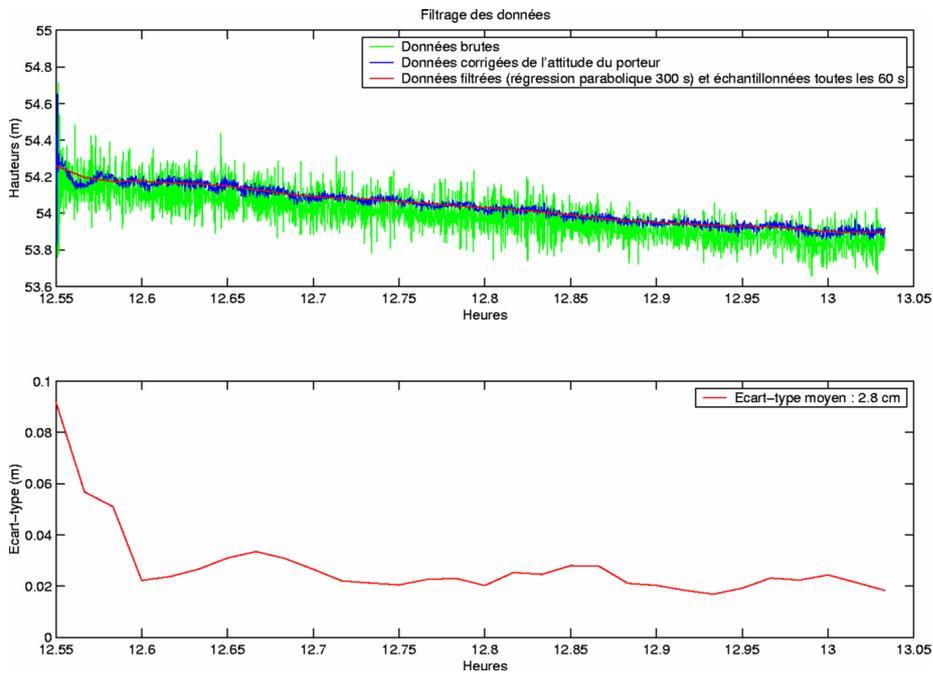


Fig. 2 : Correction et filtrage des données d'attitude (chaîne de traitement BATHYELLI)

## Calcul des surfaces de référence en hydrographie

Le marché de calcul des surfaces de référence avec Noveltis a démarré en février 2008. Un premier rapport d'avancement a été fourni en octobre 2008.

Le calcul de la Surface Moyenne Hydrographique (SMH) est basé sur l'interpolation de la SMH issue de l'altimétrie spatiale (calculée en 2007), des données marégraphiques et des levés GPS du niveau moyen de la mer.

Les tâches réalisées consistent en :

- un prétraitement des mesures GPS avant leur utilisation pour l'estimation d'une SMH par moindres carrés,
- l'interpolation des profils GPS pour préparer la SMH côtière (Fig. 3),
- la production des grilles de projections des surfaces de référence (Fig. 4).

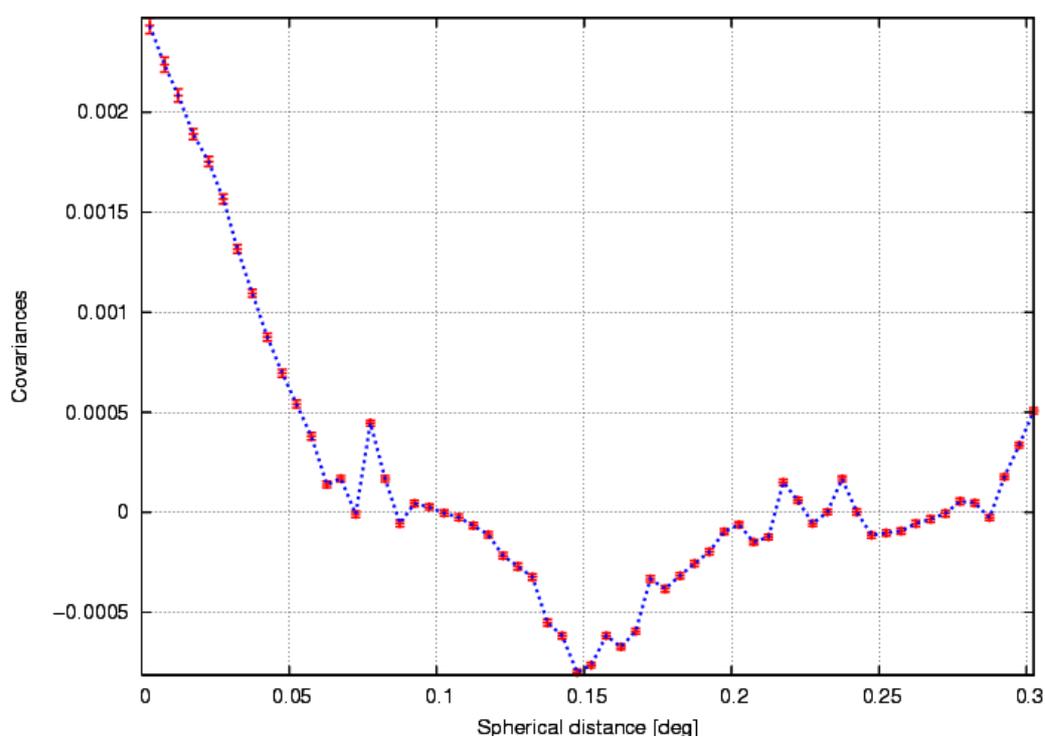
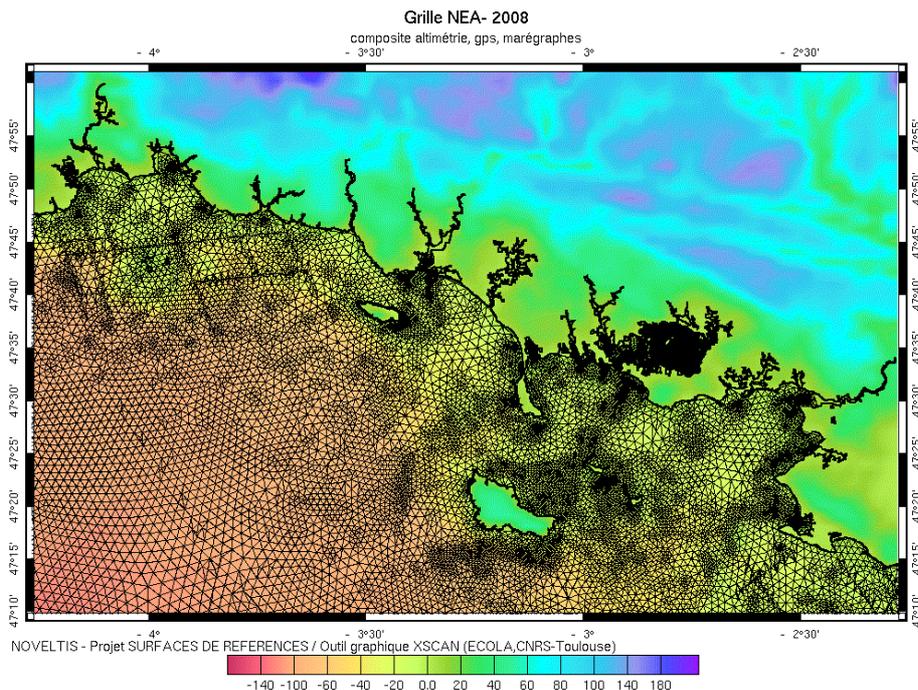


Fig. 3 : Covariances empiriques sur la zone GPS de Marseille, à partir des résidus d'observations GPS.



*Fig. 4 : Grille aux éléments finis des surfaces de référence en hydrographie*

#### 4. Participants au projet

Yann Dupont (IETA), SHOM

Marie Protat (IETA), SHOM

Marie-Françoise Lequentrec-Lalancette (ISC), SHOM

Didier Rouxel (ISC), SHOM

Lucia Pineau (ISC), SHOM

Guy Wöppelman, Université de la Rochelle

Fabien Lefèvre, CLS

Philippe Schaeffer, CLS

Gwenaëlle Jan, Noveltis

Guilhem Moreaux, Noveltis

## 5. Références bibliographiques

L.Pineau-Guillou, 2008, « BATHYELLI Project: Set-up of Chart Datum (CD) using altimetry and GPS », European Navigation Conference/GNSS 2008, 23-25 avril 2008, Toulouse

L. Pineau-Guillou, 2008 « BATHYELLI Project : set-up of Chart Datum using spatial altimetry and kinematic GPS », NSHC TWG (North Sea Hydrographic Commission Tidal Working Group), 29-30 octobre 2008, La Haye, Pays-Bas

L. Pineau-Guillou, MF Le Quentrec-Lalancette, 2008 « Détermination des surfaces de références en hydrographie à partir du GPS et de l'altimétrie spatiale », Colloque du CNFG2 (Comité National Français de Géodésie et Géophysique), « L'eau dans tous ses états, visions spatiales », Session Références Géodésiques, 17-19 novembre 2008, Paris

G. Moreaux, G. Jan, 2008, « Surfaces de référence - Rapport d'avancement », Rapport pour le SHOM

## 4.3. GLACES

### 1. Introduction

L'équipe Glace et Neige du GRGS s'intéresse aux calottes polaires et aux glaciers continentaux. Ces éléments sont à la fois acteurs et témoins des variations climatiques, et contiennent aussi la mémoire climatique de la terre. Un de nos objectifs est l'estimation de leur équilibre, ainsi que leur contribution potentielle aux variations du niveau de la mer. Nous développons aussi dans l'équipe des modèles et des techniques d'observations permettant de comprendre les processus qui régissent ces différentes composantes.

Cette année est bien évidemment marquée par l'Année Polaire Internationale. L'équipe est responsable de deux projets. Le projet CRAC-ICE (responsable B. Legrésy, actuellement en détachement pour un an en Australie) de suivi de l'évolution de la langue glaciaire du glacier Mertz, en Antarctique et le projet SPIRIT (responsable E. Berthier) de cartographie des zones glaciaires par le capteur HRS à bord de SPOT-5. L'année dernière nous avons particulièrement insisté sur le projet CRAC-ICE, cette année nous proposons un compte-rendu de SPIRIT.

En parallèle, l'activité de l'équipe se concentre autour de la télédétection des calottes polaires ou des glaciers. L'année dernière nous avons détaillé des travaux sur les Kerguelen, cette année nous proposons un compte-rendu sur les activités du projet Oscar (Observations des Surfaces Continentales par Altimétrie Radar).

### 2. Le projet SPIRIT

Les glaciers arctiques et les régions bordières des calottes polaires (Antarctique et Groenlandaise) constituent aujourd'hui le relief le moins bien connu de notre globe. A l'heure de l'année polaire internationale, obtenir une topographie homogène et précise de ces régions était donc un enjeu de premier ordre afin de mieux caractériser leurs évolutions récentes et, surtout, de disposer d'une donnée de référence pour étudier leurs réponses futures aux changements climatiques...

Le projet SPIRIT (*Spot5 stereoscopic survey of Polar Ice: Reference Images & Topographies*) est une des contributions françaises à l'année polaire internationale. SPIRIT est aussi l'un des maillons de l'ambitieux projet international GIIPSY qui vise à coordonner l'action des différentes agences spatiales (ESA, NASA, CNES, DLR...) pendant la durée de l'année polaire. GIIPSY permettra des observations satellitaires multiples et complémentaires (grande diversité de capteurs mais aussi des orbites, de la répétitivité et de la largeur du champs) afin de mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique de la cryosphère polaire.

Grâce à SPIRIT, les scientifiques reçoivent gratuitement des modèles numériques de terrain (MNT = représentation numérique de la topographie) et des images haute résolution pour connaître avec précision la topographie des glaciers et du bord des calottes polaires et pour étudier leurs évolutions passées et futures. Ce projet est réalisé en partenariat avec Spot Image qui met à disposition son capteur HRS (à bord de SPOT5) pendant les deux années de l'année polaire internationale (de mars 2007 à mars 2009). Les couples d'images stéréoscopiques HRS sont ensuite traités à IGN Espace pour en déduire des MNT et des images ortho-rectifiées. Le financement de SPIRIT est assuré par le CNES.

L'équipe cryosphère satellitaire du LEGOS est responsable scientifique de ce projet. A ce titre, nous avons donc :

- déterminé les zones d'intérêts et leurs priorités
- réalisé les premières validations des produits SPIRIT
- démontré les intérêts glaciologiques de ces données en cartographiant l'amincissement récent d'un des glaciers émissaires de la calotte Groenlandaise (le Jakobshavn Isbrae).

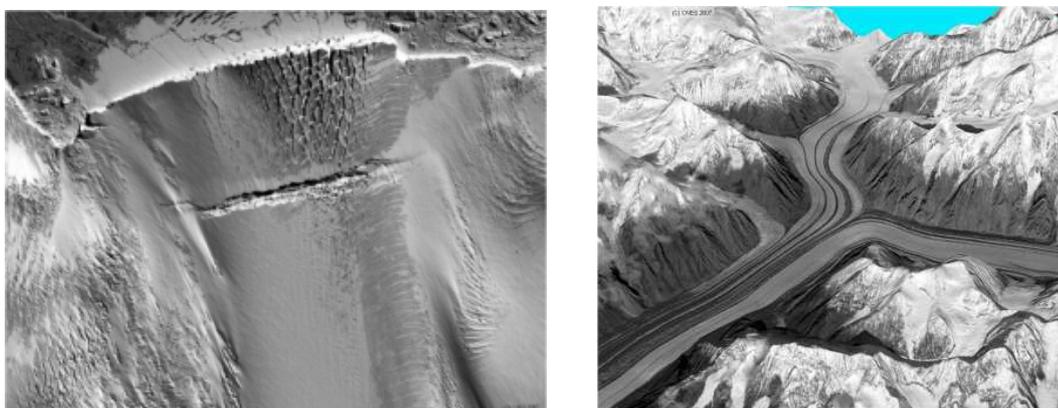
L'architecture de SPIRIT et les premiers résultats scientifiques font l'objet d'un article paru début 2009 dans la revue *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [Korona et al., 2009].

Alors que la quatrième année polaire touche à sa fin, les campagnes d'acquisition sont un succès. Deux tiers des zones d'intérêts ont pu être observées par SPOT5 dans l'Arctique et 85% dans la région Antarctique. Déjà près de 100 scientifiques, répartis dans une vingtaine de pays, utilisent les données SPIRIT.

Les prochains mois nous permettront de poursuivre la validation des topographies satellitaires (notamment à partir des campagnes de terrain menées dans le cadre des programmes CRAC-ICE sur le glacier Mertz et DACOTA sur le glacier de l'Astrolabe). Les données SPIRIT seront également utilisées pour estimer la perte de volume et la contribution à la montée du niveau marin des glaciers d'Alaska, d'Islande et de la Péninsule Antarctique.

En savoir plus : <http://www.spotimage.fr/web/1585-annee-polaire-internationale.php>

Quelques belles images SPIRIT : <http://etienne.berthier.free.fr/api/gallery/index.html>



*A gauche, un glacier émissaire de la calotte Antarctique sur le point de vèler un iceberg, à droite vue 3D du glacier Barnard (St Elias Mountains, Alaska)*

### 3. Oscar (Observations des Surfaces Continentales par Altimétrie Radar).

Le projet se concentre sur l'expertise altimétrique, l'exploitation scientifique de l'instrument, la recherche d'objectifs nouveaux, et la préparation à la définition ou exploitation des altimètres du futur (Cryosat, Altika, CFSat, radar bande P).

Il s'agit, de façon générale, d'exploiter toutes nouvelles caractéristiques actuelles ou futures de l'altimétrie au sens large (de la haute fréquence d'Altika à la basse fréquence des radar bande P), d'exploiter les caractéristiques des nouveaux concepts (du laser d'Icesat à la synthèse de Cryosat-2 ou des "bursts" d'Envisat) ou les nouvelles perspectives offertes par exemple par l'altimétrie bi-fréquence ou des nouvelles méthodes de retraitement des échos altimétriques. Enfin, il s'agit toujours d'améliorer au maximum la mesure altimétrique continentale et polaire.

Depuis quelques semaines, la validation des cycles d'ERS-2 et d'ENVISAT sur l'Antarctique est disponible et accessible à la communauté scientifique sur le site : <http://www.legos.obs-mip.fr/fr/equipes/glacio/oscar/projetoscar.html>.

Tout utilisateur peut avoir connaissance de la qualité des données altimétriques sur l'Antarctique, cycle par cycle. La chaîne de traitement qui comprend différentes corrections en particulier celle due à la mauvaise répétitivité de l'altimétrie ou celle due à la variation de la mesure causée par les changements des caractéristiques du manteau neigeux est appliquée à chaque orbite. Le résidu de tous les paramètres par rapport à leur valeur nominal donne un critère de confiance sur la donnée.

Cette validation nous a ainsi permis de mettre en évidence des dérives importantes dans l'orbite

d'Envisat (jusqu'à 4 km d'écart entre une trace et sa position nominale) ce qui entraîne une erreur très forte sur la hauteur mesurée lorsque l'on observe des surfaces continentales.

Des produits de haut niveau sont aussi disponibles, comme la topographie de l'Antarctique. Par ailleurs, l'utilisateur potentiel aura aussi accès sur ce site à un manuel d'utilisation de l'altimétrie continentale, ses caractéristiques, ses limites et ses possibilités.

Différentes études sont menées à partir des séries temporelles de l'altimètre. Martin Horwath, en post-doc dans l'équipe montre que les variations de volume de l'Antarctique déduite de l'altimétrie et celles de la masse déduite de GRACE sont cohérentes. Soazig Parouty montre que les paramètres de formes d'onde altimétriques sont fortement liés aux paramètres météorologiques issus des différentes réanalyses, ce qui permet espérer améliorer la restitution de ces derniers.

#### 4. Participants au projet

Permanents: E. Berthier, F. Blarel, B. Legrésy, M. Llubes, F. Rémy,

Thésards : G. Autret (2006-), S. Parouty (2006-), G. Navas (2007-) L. Lescarmontier (2008-)

Contractuel et post-doc : Martin Horwath (2008-2010)

## 5. GEODESIE PLANETAIRE

5.1. Champ de Gravité Martien

5.2. Missions Système Solaire



## 5.1. CHAMP DE GRAVITE MARTIEN

### Activités 2008

L'objectif est de calculer un nouveau modèle de champ de gravité de Mars, comprenant à la fois la partie statique (harmoniques sphériques "moyens", plus le nombre de Love  $k_2$ ) et les variations temporelles à très grande longueur d'onde (zonaux de bas degrés, principalement le degré 3) dues aux transferts saisonniers de masse (sublimation/condensation du  $\text{CO}_2$ ) entre les calottes polaires et l'atmosphère. Le but est de contribuer à l'étude de la lithosphère martienne en relation avec la topographie (et donc d'avoir la meilleure résolution possible sur certaines structures), de quantifier les transferts de masse (à travers les variations de  $C_{20}$  et  $C_{30}$ ) et de caractériser la nature, solide ou liquide, du noyau (par la valeur de  $k_2$ ). Des travaux importants ont déjà été effectués, et publiés, par les équipes américaines du JPL et du GSFC ; cependant la contribution du GRGS, qui s'appuie sur des développements et des outils indépendants, doit permettre d'apporter un nouveau regard sur les variations temporelles et  $k_2$ .

Cette activité est conduite en coopération entre l'équipe du GRGS-Toulouse (G. Balmino, J.-C. Marty, N. Valès) et l'Observatoire Royal de Bruxelles, ORB (P. Rosenblatt et S. Lemaistre).

Les travaux utilisent les observations de trajectographie des missions américaines Mars Global Surveyor (MGS) et Mars Odyssey (MODY), collectées par les stations du réseau DSN de NASA-JPL.

Toutes les données Doppler et de distance ont été traitées pour MGS (1998–2007) et MODY (2002–2008), regroupées en 772 arcs de 4 jours, et ont conduit à la détermination d'un modèle moyen (MGM 08A) complet jusqu'aux degrés et ordres 95 (mais "régularisé" à partir du degré 50), des variations temporelles de  $C_{20}$  et  $C_{30}$  et de  $k_2$ .

La figure 1 montre les variations temporelles de  $C_{30}$  sur la période traitée. L'ajustement a posteriori de termes périodiques fournit des amplitudes des termes annuels et semi-annuels du même ordre de grandeur que celles publiées par nos collègues américains.

Enfin, les valeurs du nombre de Love  $k_2$  que nous avons trouvées varient entre 0,110 et 0,130 suivant les lots de mesures utilisés.

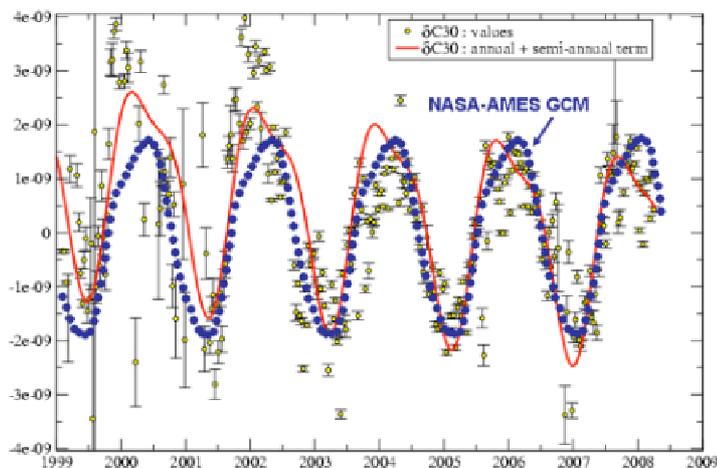


Fig. 1. Variation temporelles du  $C_{30}$  par rapport à la valeur du champ MGM08A value, calculée avec la totalité des données MGS et ODY. En rouge on voit les termes annuels et semi annuels ajustés et en bleu le signal dérivé du NASA-AMES Global Circulation Model.

## 5.2. MISSIONS SYSTEME SOLAIRE

### Champ de gravité de Churyumov-Gerasimenko (mission ROSETTA)

L'objectif de nos études est d'analyser les possibilités de calcul du champ de gravité de Churyumov-Gerasimenko (67P) par l'analyse des perturbations d'orbite de Rosetta. Ce travail est fait grâce aux données de radio-science collectées par l'expérience RSI à bord du satellite. Pour toutes ces études on utilise le logiciel GINS.

Une première étude a été menée cette année avec l'aide d'un stage de 4 mois qui a permis de réaliser les premières simulations de restitution du champ de gravité de 67P en fonction de différentes caractéristiques d'orbite (altitude, inclinaison...). Ce travail a été basé sur le modèle de forme de la comète fourni par le LAM à Marseille. Une première étape a consisté à transformer cette forme en champ de gravité avec une hypothèse de densité constante. Ensuite on essaye de retrouver ce champ de gravité avec des mesures simulées de radio-science. Pour l'instant nous n'avons pas de modélisation de la force de dégazage et les premiers résultats obtenus sont optimistes et montrent une restitution du champ de gravité possible jusqu'au degré 3 ou 4 (c'est-à-dire une résolution de 2 ou 1,5 km). Ce champ de gravité estimé a été fourni au CNES pour faire des simulations des trajectoires de descente de Philae sur la comète.

Ce travail a donné lieu à une présentation lors du SWT Rosetta à l'ESRIN en Novembre 2008 et aussi à une présentation lors du « Workshop on trajectories around small bodies » organisé par le CCT ORB du CNES en décembre.

## 6. PHYSIQUE FONDAMENTALE / ETUDE DE L'UNIVERS

- 6.1. Test du principe d'équivalence
- 6.2. Transfert de temps par lien laser
- 6.3. Effet Pioneer



## 6.1. TEST DU PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

### 1. Statut de la mission MICROSCOPE

La mission spatiale MICROSCOPE a pour objectif le test du principe d'équivalence à mieux que  $10^{-15}$  (plus de 100 fois mieux que les expériences au sol) 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.

La charge utile de MICROSCOPE (constituée de deux accéléromètres différentiels) développée par l'ONERA est en phase C.

En ce qui concerne le satellite, la propulsion par Gaz froids (comme envisagée pour GAIA) est à l'étude comme alternative possible à la propulsion électrique (comme envisagée sur LISA Pathfinder).

### 2. Travaux sur l'analyse des performances

Dans le cadre du groupe « performances » nous avons continué à étudier l'impact de différentes perturbations.

#### 2.1 Erreurs dues à la pixellisation des senseurs stellaires

Pour la correction et l'analyse du signal (mesure de la différence d'accélération subie par deux masses d'épreuve) observé par MICROSCOPE, nous avons besoin de connaître l'attitude avec une très bonne précision (typiquement 1 mrad au continu et 10  $\mu$ rad à la fréquence « Fep »). L'attitude est mesurée essentiellement par des senseurs stellaires dont l'une des sources principales d'erreur est liée à la pixellisation des capteurs). L'amplitude de l'erreur induite peut être supérieure à la tolérance ci-dessus, mais à des fréquences a priori non critiques. Cependant, comme nous travaillons avec des séries de données à temps fini, des signaux à des fréquences différentes sont légèrement corrélés ; la question était donc de savoir si dans notre cas précis, la corrélation entre les erreurs de pixellisation et le signal que nous cherchons à détecter est suffisante pour induire une perturbation non négligeable. Nous avons montré à l'aide de simulations que ce n'était pas le cas.

#### 2.2 Effet des impacts des micro-météorites

Lors d'un impact de microdébris ou de micrométéorites sur le satellite, il y a un échange d'impulsion et donc un signal mesuré par les accéléromètres. D'après les statistiques connues et les calculs faits par le CNES, on peut enregistrer par exemple quelques chocs par an au niveau de  $10^{-3}$  Ns. Il s'agit d'un signal « mode commun », c'est-à-dire qu'il n'induit pas de différence d'accélération entre deux accéléromètres à bord du satellite et qu'il est très amorti par le système drag-free. Cependant certains impacts (assez rares) peuvent induire une saturation des accéléromètres et donc une perte de mesure. Le risque des trous de mesure, s'ils sont répartis de façon défavorable, est de contribuer à projeter (lors de l'analyse à durée finie) à la fréquence Fep des perturbations qui sont normalement à des fréquences différentes. Nous avons vérifié, en utilisant différentes hypothèses proposées par le CNES, que les effets induits étaient acceptables dans l'analyse des données MICROSCOPE.

#### 2.3 Effets radiatifs sur les masses d'épreuve

Les masses d'épreuve sont soumises à la pression des radiations émises par leurs cages. Malgré les efforts développés pour obtenir une température très stable au niveau des accéléromètres, il existe de très faibles fluctuations à la fréquence Fep (de l'ordre du mK) qui peuvent induire une

force variable sur les masses d'épreuve. Ces effets ont été modélisés et évalués et restent inférieurs au signal que nous cherchons à détecter.

### 3. Logiciels d'analyse

L'OCA est chargé de développer les logiciels d'analyse qui seront intégrés au centre de mission scientifique de MICROSCOPE qui aura pour rôle d'étalonner et de valider les mesures, puis de les distribuer à la communauté dans un second temps.

Les principales fonctions à fournir sont :

1. L'analyse des sessions d'étalonnage pour en déduire les paramètres utiles à la correction des mesures (décentrages des masses d'épreuve, alignement et couplages entre axes des instruments).
2. Le calcul, le long de l'orbite de MICROSCOPE, de l'accélération et du gradient de gravité.
3. La correction des effets du mode commun, dans les accélérations différentielles.
4. La correction des effets du gradient de gravité dans les mesures d'accélération différentielles.

Les trois dernières fonctions ont été développées en 2008. La première fonction est en cours de développement.

### 4. Participants au projet

P. Berio        IR  
M. Lapie       IR (CDD CNES)  
G. Métris      Chercheur

### 5. Références bibliographiques

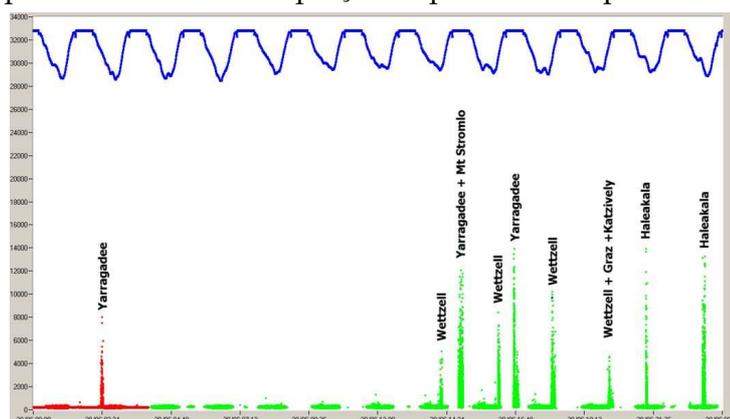
G. Metris, 2008, Pression de radiation thermique sur les masses d'épreuve de MICROSCOPE, Note technique MIC-OCA-024.

G. Metris, P. Berio et P. Touboul, 2008, Modelling and analysis of MICROSCOPE data, conférence « Satellite dynamics Modelling, In-Orbit Calibration and Data Processing », University of Bremen, Germany

## 6.2. TRANSFERT DE TEMPS PAR LIEN LASER

### 1. Lancement – premières acquisitions

L'instrument de Transfert de Temps par Lien Laser, T2L2, a été embarqué sur la mission Jason-2 lancée le 20 juin 2008. L'instrument T2L2 a été mis sous tension 5 jours après le lancement. A démarré ensuite la phase de recette en vol, basée sur des essais de bonne santé et des caractérisations instrumentales simples. L'acquisition des premières datations laser a été obtenue le 29 juin. Après optimisation du seuil de détection, l'instrument a été déclaré opérationnel le 30 juin 2008. Le graphique ci-dessous est un aperçu des premières acquisitions obtenues.



*La trace haute représente le flux solaire mesuré avec des périodes jours et des périodes nuits. La trace du bas est l'énergie laser mesurée. On distingue des acquisitions de bruit solaire et des acquisitions de tirs laser. (Graphique Centre de Mission Instrument T2L2)*

### 2. Caractérisation instrumentale

#### 2.1 Résolution des dates

Les données principales enregistrées à bord sont des dates d'arrivée des impulsions laser dans le référentiel de l'horloge satellite (DORIS) associées à la mesure de l'énergie reçue. Les données sont sous une forme brute qu'il convient de résoudre après acquisition au sol. Un logiciel a été mis au point pour effectuer la réduction de ces données en mode automatique et pour superviser un certain nombre de paramètres. Ce logiciel est opéré par le CNES.

#### 2.2 Bilan de liaison

Le bilan de liaison permet de valider le lien optique en terme d'énergie. Deux calculs ont été menés : l'un basé sur les énergie laser pulsé reçue à bord du satellite et l'autre basé sur la mesure du flux solaire rétrodiffusée par l'atmosphère terrestre. Bien que préliminaire, les deux calculs donnent des résultats compatibles avec les modèles. L'intégration du flux solaire permet notamment de déduire un albédo terrestre de 0.2 relativement proche de l'albédo communément admis pour la terre.

#### 2.3 Calibration Datation

L'instrument T2L2 effectue de façon régulière des datations d'événements de référence. Ces mesures permettent de suivre l'évolution de certains paramètres en fonction du temps. La distribution de ces calibrations est conforme aux mesures réalisées aux cours des essais métrologiques avec une précision en datation de 1.2 ps.

### 3. Groupe de travail T2L2

Le groupe de travail T2L2 comporte 4 thèmes :

- Centre de mission scientifique (CMS) (OCA)
- DORIS (CNES)
- Comparaison micro onde - Echelle de temps (OP)
- Validation (OCA)

Il y a également le centre de mission instrument (CMI) basé au CNES au sein de la direction Exploitation

Le rôle du groupe de travail T2L2 est d'organiser les activités d'exploitation du projet. Il doit permettre de réaliser les expériences avec les laboratoires de télémétrie laser et de temps fréquence. Le groupe se réunit de façon régulière.

### 4. Expériences

#### *4.1 Transfert de Temps OCA-OP*

Le projet consiste à réaliser la meilleure expérience de synchronisation d'horloges jamais réalisée à ce jour. L'expérience est basée sur un transfert T2L2 entre horloges à atomes froids : l'une des fontaines fixes de l'observatoire de Paris et la fontaine mobile installée à l'observatoire de la Côte d'Azur. Le transfert est réalisé via la station laser mobile FTLRS mise en œuvre à l'Observatoire de Paris et connectée à la fontaine fixe, et la station laser MeO de l'OCA connectée à la fontaine mobile.

#### *4.2 DORIS*

Une balise DORIS a été installée sur le site de Calern à une distance de 30 m de la station laser MeO. La balise est connectée sur la même source de fréquence que la chronométrie de la station MeO de sorte que l'inter comparaison DORIS-T2L2 puisse être réalisée sans introduction de bruit d'horloge.

#### *4.3 Comparaison Micro Onde*

T2L2 pourra comparer les meilleurs techniques de transfert de temps micro onde : Two Way et GPS phase. Un groupe de travail, comportant aujourd'hui une dizaine de laboratoire (Temps et laser), a été constitué.

#### *4.4 Validation*

L'objectif est de mesurer les performances du transfert de temps T2L2. La détermination des performances est réalisée avec trois scénarii d'expériences : colocalisation, vue commune et vue non commune. La première de ces expériences est la colocalisation entre les 2 stations OCA : MeO et FTLRS

### 5. Centre de Mission Scientifique

Pour l'acheminement, le traitement, l'analyse des performances et la valorisation des données, l'OCA et le CNES ont mis sur pieds deux Centres de Mission : côté Instrument à Toulouse (le CMI) et côté scientifique à l'OCA (le CMS).

Après plusieurs mois de simulations et d'analyses, entre janvier et mai, le CMS a démarré son activité de niveau I (mise en forme des données et identification des enregistrements bord), fin juin 2008.

La prise en compte des données, à la fois bord et sol (provenant des stations laser du réseau international contrôlé par l'ILRS, l'International Laser Ranging Service), par le CMS est construite sur 3 niveaux :

1. la mise en forme des données bord et sol, pour la recherche des Triplets (date sol, date bord, temps de vol de l'impulsion laser mesuré au sol, par réflexion sur le rétro-réflecteur laser placé à bord).
2. le calcul des corrections d'orbite (effet Sagnac lié à la rotation de la Terre pendant le temps de vol (aller-retour) de chaque impulsion laser) et d'attitude (les détecteurs linéaire et non-linéaire de T2L2 sont placés à proximité du réflecteur laser ; l'ensemble est positionné par rapport au point de référence du satellite)
3. les parties scientifiques :
  - suivi de l'OUS DORIS et corrélation avec les données DORIS utiles à l'orbitographie de Jason-2,
  - transferts de temps sol-sol dans différentes situations (vues communes ou pas),
  - physique fondamentale,
  - contribution à la télémétrie laser, en utilisant une seule voix et la « modélisation » de l'horloge bord (OUS à Quartz)
  - analyse des bilans de liaison énergétique par station laser et par passage

Au cours de 2008, plusieurs stations laser ont été contactées afin de fournir au CMS (via le CDDIS aux Etats-unis et l'EDC en Allemagne) des données brutes (dites Full Rate) dans le nouveau format CRD prévu par l'ILRS pour 2010, ce afin d'obtenir les dates des tirs avec une résolution de 1 picoseconde. Les stations laser suivantes ont joué le jeu :

- Stations françaises (fixe MeO située sur le plateau de Calern, Grasse, et mobile FTLRS en Corse entre juin et décembre 2008),
- Herstmonceux, UK
- Zimmerwald, CH
- ChangChun, Chine
- Matera, I (quelques passages fin 2008)
- Wetzell, A (arrivée en nov 2008)
- Mt Stromlo, AUS

Nous attendons encore des données venant de :

- San Fernando, E
- Borowitz, P
- Matera, I (plus régulièrement)
- Graz, Autriche

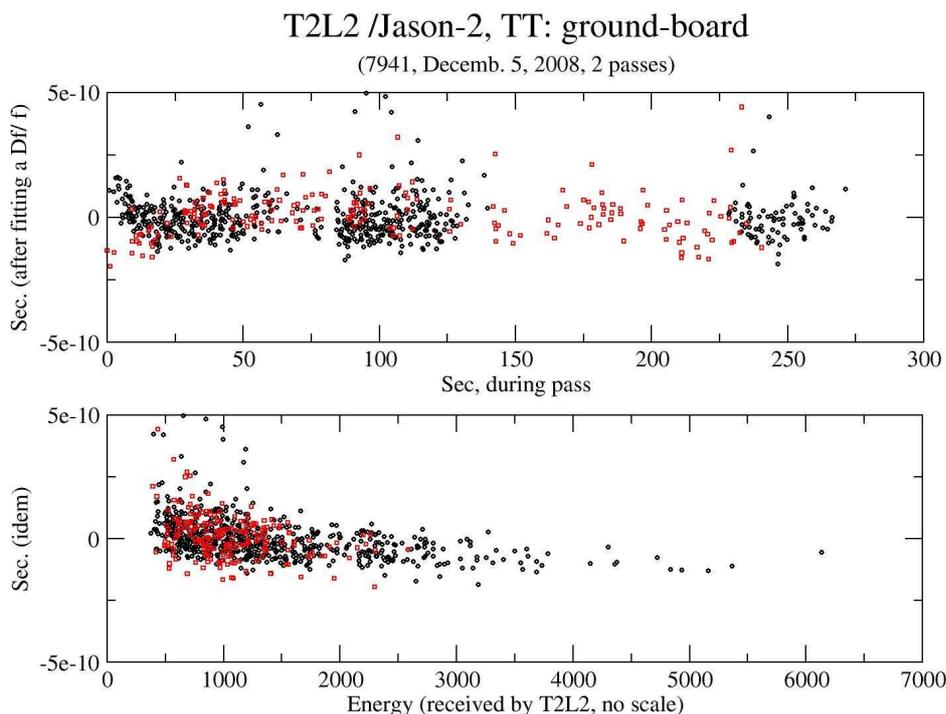
Pour les stations laser fournissant des données certes brutes, mais dans le format actuel (MERIT-II) avec une précision de 100 nanosecondes sur les dates, les stations suivantes participent régulièrement à la mission :

- Yarragadee, AUS
- Mc Donald, US
- Arequipa, Chili
- Mt Peak, US
- Hartebeeshoek, SA
- Greenbelt, US
- Hawaii

Le CMS reçoit donc des données laser dans des formats différents, pour environ 100 à 250 passages par mois, de 1000 points en moyenne. L'identification des mesures à bord, par corrélation des mesures bord et sol et par re-datation des mesures bord via des PPS venant du GPS bord, permet d'extraire entre 99,9% des données d'un passage et 1%. Cette différence importante vient essentiellement du niveau d'énergie utilisé par chaque station laser. Pour un faible niveau d'énergie d'émission du laser, la chance d'enregistrer des tirs laser par les détecteurs de T2L2 est donc très faible, ce malgré le fait que la station concernée peut dans le même temps enregistrer des échos laser retour.

L'ensemble données laser, entre juin 2008 et fév. 2009 ont été traitées par le niv. I et le niv. II du CMS. Le niveau II est essentiellement construit sur la base des informations venant du projet Jason, à savoir l'orbite dite MOE (intermédiaire mais disponible très rapidement), et les lois d'attitude décrites par le fichier SAEI. Nous envisageons la prise en compte de l'orbite précise

POE ainsi que la prise en compte des quaternions caractérisant l'attitude mesurée dans le courant de 2009. Le niveau III, dit scientifique, est en cours de développement.



*Exemple de Transfert de Temps corrigé, sol-bord, pour Matera, I*

## 6. Références bibliographiques

PTTI, fin 2008, Présentation et Proceeding

OSTST Meeting, Nov 2008, Nice, Présentation

IDS, DORIS meeting, Nov 2008, Nice, id

ILRS General Assembly, Oct. 2008, Poznan, Poland, Présentations

## 7. Participants au projet

### **OCA**

- F. Baumont
- O. Laurain
- F. Pierron
- J.M Torre
- P. Exertier
- J.L Oneto
- E. Samain

### **CNES**

- P. Guillemot
- I. Petitbon
- C. Jayles

### **OP**

- Joseph Achkar
- Daniele Rovera
- Philippe Laurent

## 6.3. ANOMALIE PIONEER

### 1. Introduction

L'anomalie Pioneer est un décalage Doppler anormal observé dans les signaux radios des deux sondes Pioneer 10 & 11 lancées par la NASA en 1972 et 1973. Les signaux Doppler permettant de suivre la navigation de ces sondes depuis des stations terrestres montrent une déviation par rapport aux calculs fondés sur la relativité générale qui peut être décrite comme une accélération anormale dirigée vers le Soleil et de l'ordre du  $\text{nm s}^{-2}$ . Les études consacrées à ce sujet n'ont pas permis jusqu'à présent d'en donner une interprétation dans le cadre de la physique conventionnelle. Ces études continuent avec le but d'expliquer l'anomalie comme une erreur systématique dans le suivi de navigation (en particulier, contribution de la force de radiation thermique liée à l'évacuation de l'énergie produite à bord) ou a contrario de confirmer une déviation inattendue qui aurait des conséquences importantes pour la théorie de la gravitation.

La mesure étant un décalage Doppler, on peut l'interpréter soit directement comme une perturbation sur le signal de l'ordre de  $0.2 \text{ Hz/an}$ , soit comme une accélération de la sonde de l'ordre de  $8 \cdot 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$  en direction du Soleil (mais ce pourrait aussi être en direction de la Terre ou de l'axe de rotation de la sonde car l'information actuelle ne permet pas de discriminer entre ces directions très proches). Dans les deux cas, la cause de l'anomalie pourrait être soit conventionnelle (mais subtile...), soit liée à une physique inconnue dans ces zones de l'espace comme par exemple une modification de la gravitation.

Depuis plus de 20 ans, les équipes du JPL passent en revue toutes les explications possibles de cette force résiduelle : fuite de gaz, rayonnement thermique, traînée due à l'environnement spatial, défaut dans le système de suivi des sondes, etc. Depuis la publication d'une lettre en 1998 annonçant le résultat, puis d'un long article en 2002 donnant une grande quantité d'informations sur les observations et leur interprétation, de nombreux autres physiciens se sont évertués à rechercher des solutions qui resteraient dans le cadre de la physique conventionnelle mais auraient pu échapper aux équipes du JPL. Le rayonnement thermique de la sonde, longtemps exclu par les équipes du JPL, pourrait être responsable d'une partie de cette accélération.

La communauté française a entrepris un effort pour contribuer à l'étude de ce problème. Plusieurs laboratoires (LKB, ONERA, IOTA, OCA) ont uni leurs efforts, avec le soutien du CNES, dans le but de :

Reprendre l'analyse des données pour confirmer les calculs du JPL et être en mesure de tester des explications possibles,

Proposer des concepts de mission pour tester la gravitation dans le système Solaire et au-delà.

### 2. Analyse des données Pioneer 10

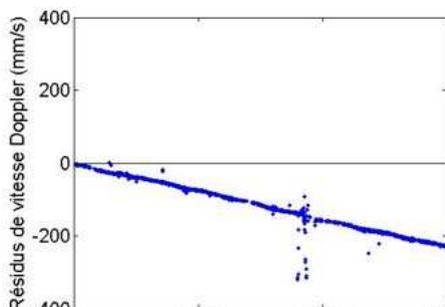
Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'ONERA et le LKB.

Les données de poursuite par la technique Doppler sont accessibles à la communauté sur la période 1986-1998 pour Pioneer 10 et sur la période 1986-1990 pour Pioneer 11. Les informations sont disponibles sous formes de ODF (Orbit Data File) dans un format classique (mais complexe !) pour ce type de données. Le temps de vol aller-retour pouvant dépasser 10 heures, les données sont 3 voies ; c'est-à-dire qu'une première station émet le signal qui est reçu puis réémis par la sonde par l'intermédiaire d'un transpondeur, et qu'une deuxième station reçoit ce signal. Durant la période étudiée, Pioneer 10 était entre environ 40 et 70 UA du Soleil. A ces distances, la dynamique proprement dite est relativement simple si on exclut les forces dues au rayonnement thermique de la sonde (ces effets ne sont pas inclus dans notre modèle faute d'informations suffisantes mais sont analysés par ailleurs). La sonde est stabilisée en attitude par

une rotation autour de l'axe radial, avec une manœuvre environ tous les 6 mois ; ces manœuvres en attitude ont inmanquablement un léger effet en translation : nous avons estimé les amplitudes correspondantes (les dates étant connues), de façon complètement libre dans la direction radiale et avec des contraintes selon les 2 autres directions. Les questions relatives aux systèmes de référence (d'espace et de temps) et aux corrections des mesures (effet Shapiro, perturbation de la couronne solaire, effets ionosphériques et troposphériques, correction de spin) doivent être traités avec le plus grand soin. La précision des corrections de trajet dans l'atmosphère est limitée car nous ne disposons pas des données météo pour la troposphère et nous ne disposons que d'une seule fréquence pour la ionosphère. Mais cela ne peut induire une accélération apparente continue telle que l'anomalie Pioneer.

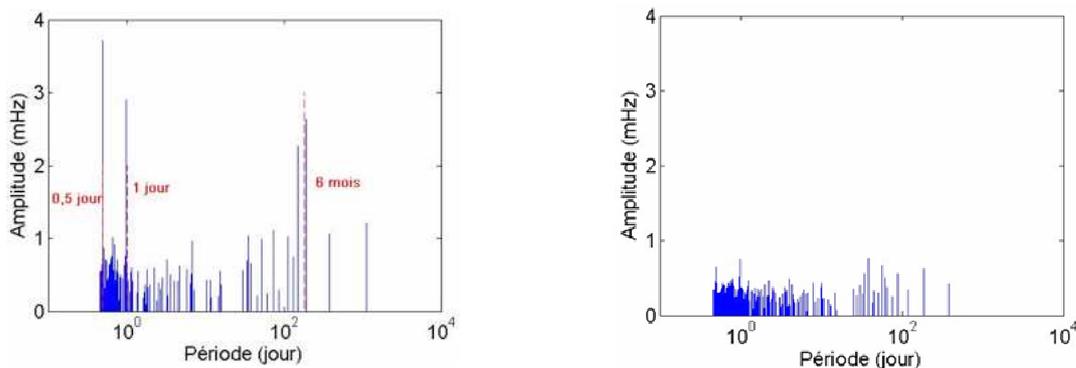
Les deux principaux résultats obtenus sont les suivants :

Nous avons confirmé, avec un logiciel indépendant, le résultat du JPL selon lequel les observations sur Pioneer 10 ne peuvent être expliquées sans la prise en compte d'une accélération empirique d'environ  $8.4 \cdot 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$ , équivalente à une augmentation séculaire de la vitesse radiale de environ 27 (mm/s)/an. La robustesse de ce résultat a été vérifiée en faisant varier les modèles (modèles de troposphère et de ionosphère) et les critères d'élimination des mesures (pas d'élimination, résidus au dessus d'un certain écart-type, hauteur au-dessus de l'horizon de la ligne de visée).



**Fig. 1 : Résidus de vitesse radiale sans anomalie constante**

Nous avons mis en évidence la présence supplémentaire d'effets périodiques dans les résidus Doppler. Les principales périodes sont 0.5 jour sidéral, 1 jour sidéral et 6 mois. Des tests ont montré qu'ils pouvaient difficilement être imputables aux effets atmosphériques. Les amplitudes peuvent varier avec la station utilisée. Une façon économique (mais empirique) de les modéliser est de faire intervenir dans le signal (et non dans le mouvement de la sonde) un effet variant périodiquement avec l'angle Soleil-Station-Sonde. L'inclusion de ces effets périodiques empiriques permet de diminuer l'écart type des résidus d'observations qui passent de 9.8 à 5.5 mHz.



## 7. DIFFUSION DE L'INFORMATION

7.1. Observatoire virtuel

7.2. Services scientifiques internationaux



## 7.1. OBSERVATOIRE VIRTUEL

### 1. Introduction

Le groupe que l'on peut qualifier « OV-GAFF », pour « Observatoire Virtuel en Géodésie et Astronomie Fondamentale, groupe France », est structuré depuis environ 4 années, et c'est la première fois que ses activités apparaissent en tant que telles dans le rapport d'activités GRGS. Le suffixe « groupe France » rappelle que les activités de ce groupe de travail sont financées, outre le GRGS à travers des projets non étiquetés « OV », par l'Action Spécifique ASOV (pilotée notamment par Françoise Génova, Observatoire astronomique de Strasbourg), qui est la composante française de l'IVOA, International Virtual Observatory Alliance.

La base du succès de l'Observatoire Virtuel au niveau international est l'interopérabilité des outils développés, qui repose sur un format standardisé, dérivé du XML. Le stockage des métadonnées est réalisé dans des fichiers autonomes, qui contiennent à la fois les données et toutes les informations nécessaires à leur description et leur utilisation.

Le groupe OV-GAFF a concentré son activité sur la construction de fichiers répondant aux normes de l'Observatoire Virtuel, étape préalable à la réalisation de « webservices » qui permettront une plus-value scientifique incontestable. Le travail a plus spécifiquement porté sur les données transmises régulièrement et d'un point de vue opérationnel aux organisations internationales de géodésie spatiale (IERS, IVS, ILRS, notamment). Le concept de l'Observatoire Virtuel permet de construire facilement une vitrine « Web » des produits opérationnels et de recherche construits par le GRGS.

L'ensemble des travaux ont été synthétisés sur des pages Web dédiées, qui comportent à la fois des liens vers les webservices, les informations techniques dont nous avons eu besoin, et des liens vers les sites de l'IVOA.

Voir : <http://grg2.fr> rubrique « OV-GAFF ».

### 2. Phase de travail amont : la documentation des fichiers VO-Table

Le but à atteindre d'ici quelques temps est de systématiquement produire et stocker les données diffusées vers les services internationaux sous forme de fichiers VO-Table, en plus des formats spécifiques à chaque technique.

#### 2.1 *Le format et la documentation des fichiers*

##### 2.1.1 **Format VO-Table et définition d'UCD**

L'avantage du VO-Table est qu'il permet une description « universelle des données » à l'aide d'UCD (Unified Content Descriptors) qui décrivent la nature de tous les champs possibles potentiellement insérables dans un format VO-Table.

Le groupe a recensé les UCD déjà proposés au sein de la communauté astronomique (voir : <http://www.ivoa.net/Documents/WD/UCD/UCDlist-20060906.html>, lien via [grg2.fr](http://grg2.fr)), et a proposé des modifications de la liste pour la rendre adaptée à la description des produits de géodésie spatiale.

Voir : <http://www-g.oica.eu/heberges/pnaf/OV-GAFF/Asov/doc-travail.html>

##### 2.1.2 **Le STC : « Space Time Coordinate »**

Lorsque cela est nécessaire, un modèle de données externe peut être utilisé pour élargir les possibilités offertes par le VO-Table et ainsi décrire plus précisément les données : c'est le cas du STC (Space-Time Coordinate Metadata for the Virtual Observatory) qui permet de définir de façon complète des coordonnées. Le STC n'est pas totalement adapté à la diffusion de données terrestres, car ce ne sont pas des géodésiens qui l'ont écrit. Nous avons commencé à travailler sur

les points de confusion, comme par exemple remplacer ICRS par ICRF, ou trouver le moyen de préciser la réalisation d'un ITRF.

Voir : <http://www.ivoa.net/Documents/PR/STC/STC-20050315.pdf>

### 3. La réalisation de webservices dédiés

Outre la visibilité des produits construits par le GRGS, le groupe a en tête des objectifs scientifiques spécifiques, facilités par le concept OV, qui concernent essentiellement la recherche d'exactitude, la combinaison des données, et surtout la prise en compte des modèles géophysiques dans les traitements de données astronomiques, et inversement, pour organiser une interface disciplinaire entre les communautés « géodynamique globale » et « géophysique ».

Tous ces services sont accessible depuis :

[http://www-g.oca.eu/heberges/pnaf/OV-GAFF/Webservices/webservices\\_group.html](http://www-g.oca.eu/heberges/pnaf/OV-GAFF/Webservices/webservices_group.html)

#### ***3.1 Webservices et accès aux données mises en ligne par le GRGS-Grasse***

L'équipe GRGS/Grasse fournit

- les séries temporelles de position de stations d'observations, et de paramètres d'orientation de la Terre, venant de ses propres valorisations de données, et celles d'autres groupes liés aux services internationaux (IDS, IGS, ILRS, IVS),
- les biais des stations laser, établis par l'équipe, entre deux évolutions technologiques successives,

et pilote le centre français d'analyse de l'ILRS.

#### ***3.2 Webservices et accès aux données mises en ligne par le GRGS-Paris***

L'équipe GRGS/Paris fournit

- les séries temporelles d'EOP de l'IERS,
- un WEB service comportant deux exécutables (Linux/DOS), qui peuvent être appelés depuis n'importe quelle procédure Fortran / C-C++ / php / Perl et qui permettent
  - le téléchargement des EOP C04 à toute date,
  - le calcul de la matrice entre l'ICRF et l'ITRF à tout instant avec une précision confinant 50 micro-arc-secondes pour notre époque,
- l'ICRF (coordonnées des radio-sources extragalactiques) et ses extensions,

et pilote le centre français d'Analyse de l'IVS, fournissant les produits VLBI opérationnels et une interface vers les outils VO du centre de données astronomiques de Strasbourg (CDS).

Voir : <http://ivsopar.obspm.fr>

#### ***3.3 Webservices et accès aux données mises en ligne par le GRGS-LAREG***

Le site de l'ITRF propose un serveur cartographique qui permet de visualiser les différents réseaux ITRF, les réseaux de points de chaque technique, les champs de vitesses ITRF depuis l'ITRF94 ainsi que les limites de plaques tectoniques selon 2 modèles. Il permet également la sélection de points dans le but d'obtenir les coordonnées ITRF d'un sous-réseau à l'époque de son choix. Les solutions ITRF seront prochainement proposées au format VO-Table.

Voir : <http://itrf.ensg.ign.fr>



Fig 1 : Capture d'écran du site de l'ITRF, zoomé sur l'Europe

#### 4. Travail d'information vers les services internationaux et les instances nationales

Les participants au groupe de travail profitent de leur participation aux colloques des services internationaux de géodésie spatiale pour promouvoir le format VO-Table et le concept OV. A noter en 2008 des communications spécifiques OV aux colloques de l'IVS et de l'ILRS.

#### 5. Participants au projet

Les participants cités ci-dessous sont ceux qui ont été particulièrement actifs au cours de l'année 2008. On peut rajouter à cette liste l'ensemble des inscrits à la liste OV-GAFF, qui rassemble une trentaine de personnes.

GRGS-Grasse : Florent Deleflie, Pierre Exertier, Olivier Laurain

GRGS-LAREG : Xavier Collilieux, David Coulot, Anne Duret (Service de géodésie et de Nivellement de l'IGN)

GRGS-SYRTE : Sébastien Lambert, Christophe Barache, Anne-Marie-Gontier

(GRGS)-IMCCE : Jérôme Berthier

#### 6. Références bibliographiques

F. Deleflie, S. Lambert, P. Exertier, A.-M. Gontier, C. Barache, *The Virtual Observatory in Geodesy and Earth's Sciences: The French Activities*, 16<sup>th</sup> International Laser Ranging Workshop, Poznan, Poland, 13-17 October 2008.

S. Lambert, F. Deleflie, A.-M. Gontier, P. Bério, C. Barache, *The astronomical Virtual Observatory and application to Earth's sciences*, In: A. Finkelstein and D. Behrend (Eds.), *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) 2008 General Meeting Proceedings*, ISBN 978-5-02-025332-2, 203, 2008.

## 7.2. SERVICES SCIENTIFIQUES INTERNATIONAUX

### 1. Introduction

Les divers organismes constituant le GRGS abritent plusieurs composantes de services internationaux, IERS et également IVS, ILRS, IGS et IDS, ainsi que le Bureau Gravimétrique International.

### 2. IERS International Earth rotation and Reference system Service

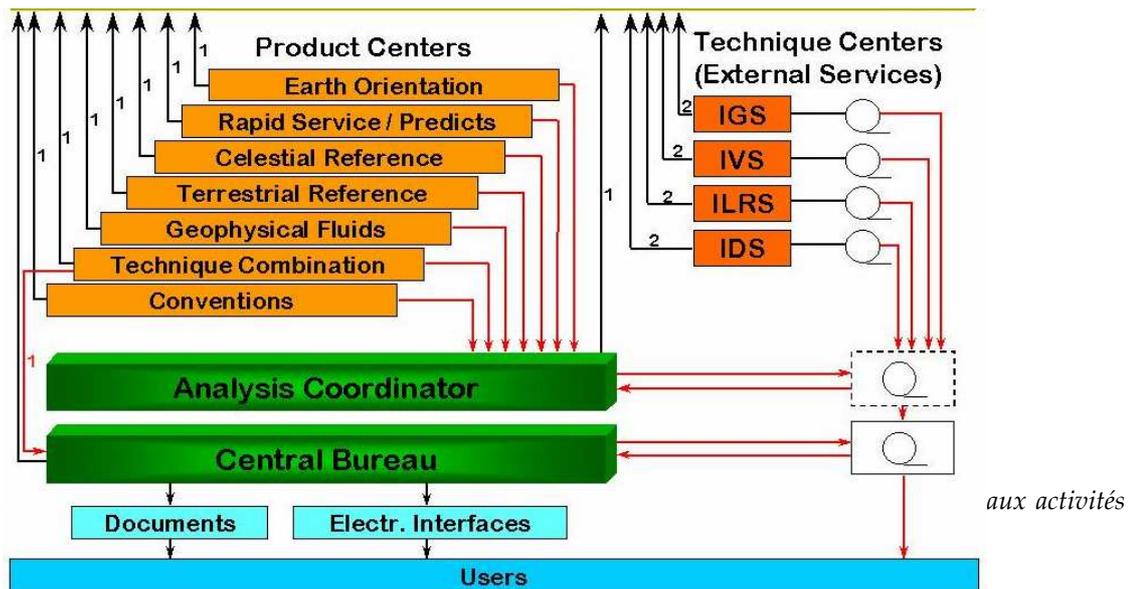
Ce service a été créé en 1988 sur les cendres du Bureau International de l'Heure et du Service International du Mouvement du Pole (IPMS). Il a principalement pour missions de fournir :

- Le Système de Référence Céleste International (ICRS) et sa réalisation, le Repère de Référence Céleste International (ICRF).
- Le Système de Référence Terrestre International (ITRS) et sa réalisation, le Repère de Référence Terrestre International (ITRF).
- Les paramètres d'orientation terrestre (EOP) pour:
  - La transformation entre les repères
  - Les études des variations de la Rotation terrestre
- Les données géophysiques pour interpréter les variations des paramètres des ICRF, ITRF ou EOP et les modéliser.
- Standards, constantes et modèles (i.e., conventions) en encourageant leur adhésion par la communauté scientifique internationale.

L'Observatoire de Paris héberge :

- Le Centre de l'Orientation Terrestre, responsable de l'évaluation des paramètres à long terme de l'orientation terrestre, des publications de DTU1 et du saut de seconde. (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>)
- Le Centre ICRS, responsable de la maintenance de l'ICRS et l'ICRF (<http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/>)
- Le LAREG/IGN héberge le centre de Produit ITRS, (<http://itrf.ensg.ign.fr>) responsable de la maintenance de l'ITRF, y compris la coordination des réseaux (« colocations », rattachements locaux et qualité des sites)

Un autre Centre fonctionnant dans le cadre de l'IERS concerne le programme de combinaison des techniques spatiale (Voir chapitre 3.4). Ce programme fédère plusieurs équipes du GRGS : au CNES, aux Observatoires de Paris, de la Côte d'Azur et de Bordeaux et à l'IGN. Le but est l'estimation simultanée des paramètres de la rotation de la Terre et du système de référence terrestre dans un premier temps. Par la suite nous incluons les paramètres troposphériques communs aux diverses techniques. Dans le futur, la perspective est l'ajout des premiers termes du champ de gravité terrestre et les coordonnées de radio-sources extragalactiques (ICRF).



### 3. Contributions aux services internationaux IVS (VLBI), ILRS (Télémétrie laser-Lune et satellites), IGS (constellations GNSS) et IDS (DORIS)

Les diverses équipes du GRGS sont fortement impliquées dans divers services internationaux concernant les techniques astro-géodésiques. Citons :

#### 3.1 Observatoire de Paris

IVS : Centre d'analyse VLBI et centre de données (<http://ivsopar.obspm.fr>)

ILRS : Centre d'analyse de données laser-Lune (<http://syrtel.obspm.fr/polac/>)

#### 3.2 CNES/ CLES

IGS : Centre d'analyse de données GPS

IDS : Centre d'analyse de données DORIS

#### 3.3 OCA

ILRS : Centre d'analyse de données de télémétrie laser sur satellites artificiels.

## 4. Le Bureau Gravimétrique international

Le Bureau Gravimétrique International (BGI) est installé depuis sa création (1951) en France. Il est hébergé par l'OMP depuis 1981 et a été labellisé par l'INSU en 1997. Il est rattaché à l'UGGI/ AIG (Union Internationale de Géodésie et Géophysique - Association Internationale de Géodésie), et est un sous bureau de l'International Gravity Field Service.

Le BGI est un service de la Fédération des Services d'Astronomie et de Géophysique (FAGS) dépendant directement de l'ICSU (International Council of Scientific Unions). Il gère et développe une base de données gravimétriques comportant à ce jour plus de 12 millions de points, et traite plus de 200 demandes d'extraction par an, en constante augmentation.

( <http://www.geodesie.ird.fr/bgi/> )

Le BGI offre de plus toute une palette de services annexes, couvrant la valorisation des données et l'expertise au sens large en gravimétrie. Les activités du BGI en France sont soutenues par une dizaine d'organismes nationaux qui contribuent à son fonctionnement par des moyens matériels ou humains et qui participent directement aux activités de service, de recherche et développement et de formation menées au sein du BGI. La contribution de chacune des parties est définie par une convention cadre réactualisée tous les 4 ans.

**C - AUTRES ACTIVITES GRGS**



## Réunion ouverte du conseil scientifique du GRGS

La charte d'organisation du Groupe de Recherches de Géodésie spatiale stipule que le Conseil Scientifique du GRGS doit procéder à l'examen scientifique des travaux, des expériences en cours et des nouvelles propositions de recherche ; il peut en outre organiser des réunions scientifiques permettant d'approfondir le contenu de certaines expériences en cours ou projetées ou de discuter de la prospective et des avancées scientifiques pouvant concerner directement ou indirectement le GRGS.

Suivant cette charte et selon la tradition établie depuis 2004, une réunion ouverte du Conseil Scientifique a été organisée le Mercredi 11 avril 2007 à l'Observatoire de Paris à la suite de sa réunion annuelle. Le thème retenu était « Prospective scientifique sur les thématiques du GRGS ». L'objectif de cette réunion était de favoriser une réflexion et une discussion sur les projets des équipes du GRGS dans le cadre de la prospective du CNES prévue en 2009. L'objectif était également d'encourager dans ce domaine des coopérations scientifiques inter équipes, raison fondamentale de l'existence du GRGS. Cette réunion était ouverte à l'ensemble du personnel du GRGS. La réunion a comporté un certain nombre de présentations relatives à la prospective sur les différents thèmes du GRGS, dont le programme est donné ci-dessous.

### **Présentations relatives à la prospective en géodésie spatiale**

#### ***Télemétrie laser***

Pierre Exertier et al. (GRGS/OCA)

#### ***Outils et traitements GNSS pour les géosciences***

Felix Perosanz (GRGS/CNES)

#### ***Champ de gravité de la Terre***

Richard Biancale (GRGS/CNES)

#### ***VLBI, prospective***

A.-M. Gontier, S. Lambert, Ch. Barache (GRGS/OP)

#### ***Le laboratoire de l'ESGT : compétences et perspectives en géodésie spatiale***

Joelle Nicolas (GRGS/ESGT)

#### ***Perspectives de recherche en vue de l'amélioration de l'ITRF***

Zuheir Altamimi (GRGS/IGN)

#### ***Combinaisons de mesures géodésiques***

David Coulot (GRGS/IGN)

#### ***Perspectives de recherche en géodésie spatiale pour l'hydrographie et la gravimétrie au SHOM***

L. Pineau-Guillou et M.-F Lalancette (GRGS/SHOM)

Ces présentations ont été suivies par une discussion générale ayant pour but de définir les implications des équipes du GRGS dans le cadre de la prospective en géodésie spatiale.

Une réunion exceptionnelle du Conseil scientifique a ensuite été organisée le 6 novembre 2008 afin de discuter plus en détail les propositions faites à l'occasion de l'appel à idées 2008 du CNES émanant des équipes du GRGS et de la proposition VLBI 2010. Ces propositions ont été suivies d'une discussion sur la position du GRGS en préparation de la prospective du CNES et sur le document de prospective émanant de la Commission spécialisée des Sciences de la Terre (CSST) de l'INSU. La préparation d'un document de proposition du GRGS sur les infrastructures géodésiques-sol a été décidée en vue de la prospective 2009. Une discussion a également porté sur une réponse possible des équipes du GRGS à l'appel à proposition émanant de GGOS (The Global Geodetic Observing System) pour son futur Bureau des standards et des conventions.

Les recommandations du GRGS figurant dans le document « Prospective sur l'instrumentation de géodésie spatiale » finalisé en mars 2009, sont les suivantes :

- **Maintenir les techniques VLBI et SLR (qui sont deux techniques fondamentales pour la détermination de l'ITRF), au niveau de la précision requise pour les applications scientifiques en science de la Terre.** Dans le contexte d'un réseau géodésique global, il faut, au minimum déployer des stations nouvelle génération SLR et VLBI sur les sites existants afin de préserver leur valeur et leur continuité, conditions essentielles au maintien à long terme de l'ITRF.
- **Remédier à la situation médiocre des co-localisations VLBI-SLR en participant à un effort international.** La contribution française dans ce domaine consisterait à déployer des stations SLR ou VLBI dans les sites de l'une ou l'autre technique. Une antenne VLBI nouvelle génération (VLBI 2010) à Tahiti, co-localisée avec les stations SLR, GPS et DORIS existant dans ce site, renforcerait de manière significative le manque des co-localisations dans l'hémisphère sud et améliorerait leur géométrie.

**Par ailleurs, dans un contexte plus large :**

- Déployer des récepteurs DORIS à bord de satellites d'orbite basse pour améliorer la performance de DORIS en positionnement et sa contribution à l'ITRF. Si cela est possible, ces satellites doivent aussi comporter des réflecteurs SLR et une antenne GPS pour assurer l'inter calibration des trois systèmes et la validation des orbites précises.
- Déployer des balises DORIS dans les sites SLR et VLBI afin d'améliorer les co-localisations.
- Équiper les sites DORIS et les satellites comportant des récepteurs DORIS par des oscillateurs plus stables (osillateurs à quartz Ultra-Stables ou horloge atomique) pour renforcer la mesure de pseudo distance intégrée.

## Ecole d'été du GRGS

La quatrième école d'été du GRGS « *interactions en Géodésie Spatiale : vers une compréhension globale de la Terre* » s'est déroulée du 1 au 5 septembre 2008 à Forcalquier dans les locaux et avec le soutien matériel de l'ENSG. Cette école était fortement soutenue financièrement par le CNES et la région PACA.

### 1. Motivations

La géodésie spatiale a pour but la mesure de la Terre à partir de diverses techniques s'appuyant principalement sur des observations de satellites artificiels. On peut identifier trois domaines essentiels que la géodésie spatiale a fait progresser de manière spectaculaire :

- La détermination des positions et des déplacements relatifs de stations terrestres repérées dans des réseaux globaux et plus généralement les déformations terrestres.
- L'étude du mouvement d'ensemble de ces points terrestres par rapport à un repère céleste extérieur.
- L'étude du champ de gravité terrestre d'abord sous l'aspect statique mais de plus en plus sous l'aspect dynamique.

Ces trois « piliers » de la géodésie spatiale ont considérablement évolué depuis les débuts de cette jeune science qui vient de fêter ses 50 ans. Comme presque toujours, les progrès ont été accomplis de façon parallèle et assez cohérente, d'une part sur la compréhension et la modélisation des différents phénomènes, et d'autre part sur nos capacités à les observer et à les modéliser. Une partie de l'école était dédiée à la présentation de l'état de l'art dans les trois domaines cités ci-dessus.

Les progrès accomplis concernant ces trois piliers révèlent cependant de façon de plus en plus évidente les limites des études plus ou moins séparées. On prend en compte depuis longtemps le fait que plusieurs sources puissent influencer une observable. Mais le fait qu'une seule source puisse affecter différentes observables, bien que connu, a encore été peu pris en compte dans la façon d'appréhender les problèmes ; par exemple, des déformations (piliers 1) peuvent s'accompagner de mouvements de masses qui vont à leur tour influencer sur la rotation de la Terre (pilier 2) et sur les variations de la gravité (pilier 3). Idéalement les différents domaines et les observations qui les accompagnent devraient être étudiés de façon très interactive. C'est l'un des prochains défis de la géodésie. La dernière partie de l'école était dédiée à une sensibilisation sur cette approche.

A titre d'illustration, une session était consacrée à des observations GPS et à leur traitement : mise en station d'antennes GPS, puis analyse des résultats à l'aide du logiciel GINS.

### 2. Comité scientifique et organisation :

**Comité scientifique** : R. Biancale, N. Capitaine, F. Deleflie, P. Exertier, M. Kasser, G. Métris.

**Organisation** : Cl. Foussard, Ch. Julienne, G. Métris, Ph. Nicolon.

### 3. Contenu

**Introduction** : G. Métris, R. Biancale

#### 1. La Terre : ses composantes, sa mesure

- a. La Terre et les planètes telluriques : leurs composantes, leurs mesures : V. Dehant
- b. Histoire de la géodésie spatiale et enjeux des GNSS : F. Barlier

## **2. Géométrie et déformations**

- a. Systèmes de coordonnées - Systèmes de référence : C. Boucher
- b. Déformations élastiques et viscoélastiques de la Terre : Y. Rogister
- c. Tectonique et déformations : J.M. Nocquet

## **3. Orientation et rotation de la Terre**

- a. Modélisation astronomique : N. Capitaine
- b. Modélisation géophysique : C. Bizouard
- c. Bases de données géophysiques, modèles et conventions : S. Lambert
- d. Techniques d'observation de la rotation de la Terre : C. Bizouard

## **4. Transferts de masses et gravité : Interactions Terre, océans, atmosphère**

- a. Masses et moments d'inertie : R. Biancale
- b. Les causes et les effets : R. Biancale
- c. Observations et modélisations : R. Biancale

## **5. Vers une modélisation globale de la Terre et des planètes**

- a. Interactions enveloppe fluide - Terre solide : O. de Viron
- b. Relation entre forme, topographie et densité des planètes : G. Balmino

## **6. Observations et traitement GPS**

- a. Mise en station des récepteurs GPS : R. Biancale, Félix Pérosanz
- b. Traitement des observations GPS : R. Biancale, Félix Pérosanz

**Conclusion : N. Capitaine, R. Biancale, G. Métris**

Les exposés sont accessibles sur le site

[http://www.oca.eu/heberges/grgs/ecoles/grgs\\_08/index.html](http://www.oca.eu/heberges/grgs/ecoles/grgs_08/index.html)

## **4. Participation**

L'école a accueilli environ 35 participants avec une forte composante GRGS mais aussi un nombre non négligeable de chercheurs étrangers. Notons également la présence de nombreux étudiants doctorants ou post-doctorants qui ont pu avoir des fructueux échanges entre eux ou avec des collègues plus expérimentés.

Le contexte propre à une école d'été avec un hébergement sur place a permis de prolonger les discussions et les contacts bien au-delà des heures de cours. Ceci permet indubitablement d'améliorer l'efficacité des interactions entre les divers acteurs de la géodésie spatiale en France et dans d'autres pays francophone.

**D - ANNEXE**



# Personnel GRGS : liste et coordonnées (au 1er Janvier 2009)

Directeur Exécutif : Richard Biancale (CNES, Tél. : 05 61 33 29 78)

## 1. Équipe GRGS, Centre National d'Etudes Spatiales

18, Avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9

Fax LG : 05 61 33

Fax GS : 05 61 25 30 98

### Géodésie Spatiale (GS)

#### Personnel Permanent

BALMINO Georges	balmino@ntp.obs-mip.fr	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
GRATTON Serge	Serge.Gratton@cnes.fr	05 61 33 29 40
LEMOINE Jean-Michel	Jean-Michel.Lemoine@cnes.fr	05 61 33 28 94
MARTY Jean-Charles	Jean-Charles.Marty@cnes.fr	05 61 33 28 96
PEROSANZ Félix	Felix.Perosanz@cnes.fr	05 61 33 28 96
VALES Nicole	Nicole.Vales@cnes.fr	05 61 33 28 92

\* affecté au BGI à temps complet

### LEGOS (LG)

#### Personnel permanent

BERGE-NGUYEN Muriel	Muriel.Berge@cnes.fr	05 61 33 29 75
CAZENAVE Anny	Anny.Cazenave@cnes.fr	05 61 33 29 22
CRETAUX Jean-François	Jean-Francois.Cretaux@cnes.fr	05 61 33 29 89
DAILLET Sylviane	Sylviane.Daillet-rochette@cnes.fr	05 61 33 29 25
DO MINH Kien	Kien.Dominh@cnes.fr	05 61 33 29 38
GENNERO Marie-Claude	Marie-Claude.Gennero@cnes.fr	05 61 33 29 35
MAISONGRANDE Philippe	Philippe.Maisongrande@cnes.fr	05 61 33 28 76
MENA Martine	Martine.Mena@cnes.fr	05 61 33 29 02
MOGNARD Nelly	Nelly.Mognard@cnes.fr	05 61 33 29 23

#### Doctorants et Post-Doc

MELACHROINOS Stavros	stavros.melachroinos@cnes.fr	05 61 33 28 30
----------------------	------------------------------	----------------

## 2. Équipe GRGS, Institut Géographique National

ENSG/LAREG - 6-8, Avenue Blaise Pascal - Cité Descartes - Champs s/Marne - 77455 Marne La Vallée Cedex 2

Fax : 01 64 15 32 53

### *Personnel permanent*

ALTAMIMI Zuheir	zuheir.altamimi@ensg.eu	01 64 15 32 55
BOCK Olivier	Olivier.Bock@ensg.eu	01 64 15 32 56
COLLILIEUX Xavier	xavier.collilieux@ensg.eu	01 64 15 31 38
COULOT David	david.coulot@ensg.eu	01 64 15 32 63
DUQUENNE Henri	henri.duquenne@ensg.eu	01 64 15 32 54
GUERIN Christiane	christiane.guerin@ensg.eu	01 64 15 32 52
JAMET Olivier	olivier.jamet@ensg.eu	01 64 15 32 50
METIVIER Laurent	Laurent.Metivier@ensg.eu	01 64 15 32 61
PANET-STORINO Isabelle	isabelle.panet@ensg.eu	01 64 15 32 58
VALTY Pierre	pierre.valty@ensg.eu	01 64 15 32 60
VERDUN Jérôme	verdun.jerome@gmail.com	01 64 15 31 09

### *Personnel rattaché*

BOUCHER Claude	cboucher@mail.club-internet.fr	01 43 98 83 27
BOUIN Marie-Noelle	Marie-Noelle.Bouin@meteo.fr	01 64 15 32 61
LE BAIL Karine	karinelebaill@gmail.com	01 64 15 32 63
WILLIS Pascal	pascal.willis@ipgp.jussieu.fr	01 57 27 84 81

### *Doctorants et Post-Doc*

GOBBINDASS Marie-Line	gobinddass@ipgp.jussieu.fr	01 57 27 84 77
EISSA Leila	leilaeissa@hotmail.fr	01 64 15 32 60
LI QI	Qi.Li@ensg.eu	01 64 15 32 93
NAHMANY Samuel	samuel.nahmani@ensg.eu	01 64 15 32 83
SANTAMARIA Alvaro	alvaro.santamaria@ensg.eu	01 64 15 32 60

SGN - 73, Avenue de Paris - 94165 Saint Mandé Cedex

Fax : 01 43 98 84 50

### *Personnel permanent*

DUQUENNE Françoise	francoise.duquenne@ign.fr	01 43 98 83 31
DUQUESNOY Thierry	thierry.duquesnoy@ign.fr	01 43 98 83 27
FAGARD Hervé	herve.fagard@ign.fr	01 43 98 81 48
GARAYT Bruno	bruno.garayt@ign.fr	01 43 98 81 97
HARMEAL Alain	Alain.Harmel@ign.fr	01 43 98 85 58
REBISCHUNG Paul	Paul.Rebischung@ign.fr	01 43 98 83 36

### 3. Équipe 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
BOUGEARD Mireille	mireille.bougeard@obspm.fr	01 40 51 20 15
BOUQUILLON Sébastien	sebastien.bouquillon@obspm.fr	01 40 51 20 03
CAPITAINE Nicole	Nicole.Capitaine@obspm.fr	01 40 51 22 31
CARLUCCI Teddy	Teddy.Carlucci@obspm.fr	01 40 51 22 28
CHAPRONT Jean	Jean.Chapront@obspm.fr	01 40 51 22 27
FRANCOU Gérard	gerard.Francou@obspm.fr	01 40 51 22 30
GAMBIS Daniel	Daniel.Gambis@obspm.fr	01 40 51 22 29
GONTIER Anne-Marie	Anne-Marie.Gontier@obspm.fr	01 40 51 22 30
SOUCHAY Jean	Jean.Souchay@obspm.fr	01 40 51 23 22
TEYSSANDIER Pierre	Pierre.Teyssandier@obspm.fr	01 40 51 23 41

#### *Doctorants et Post-Doc*

COTTEREAU Laure	laure.cottreau@obspm.fr	01 40 51 22 28
LE PONCIN LAFFITTE Christophe	christophe.leponcin-lafitte@obspm.fr	01 40 51 20 20
SEOANE Lucia	lucia.seoane@obspm.fr	01 40 51 22 11
ZERHOUNI Wassila	wassila.zerhouni@obspm.fr	01 40 51 22 11

### 4. Équipe GRGS, Observatoire de la Côte d'Azur, Géosciences Azur

Avenue Nicolas Copernic, 06130 Grasse

Fax : 04 93 40 53 33

#### *Personnel permanent*

BONNEFOND Pascal	pascal.bonnefond@obs-azur.fr	04 93 40 53 63
DELEFLIE Florent	florent.deleflie@obs-azur.fr	04 93 40 53 81
EXERTIER Pierre	pierre.exertier@obs-azur.fr	04 93 40 53 86
FERAUDY Dominique	dominique.feraudy@obs-azur.fr	04 93 40 53 66
FURIA Maurice	maurice.furia@obs-azur.fr	04 93 40 53 50
JULIENNE Christine	christine.julienne@obs-azur.fr	04 93 40 53 89
LAURAIN Olivier	olivier.laurain@obs-azur.fr	04 93 40 53 45
METRIS Gilles	gilles.metris@obs-azur.fr	04 93 40 53 56
PARIS Jocelyn	jocelyn.paris@obs-azur.fr	04 93 40 54 20
PIERRON Francis	francis.pierron@obs-azur.fr	04 93 40 54 20
PIERRON Monique	monique.pierron@obs-azur.fr	
SAMAIN Etienne	etienne.samain@obs-azur.fr	04 93 40 54 29
TORRE Jean-Marie	jean-marie.torre@obs-azur.fr	04 93 40 53 51

## 5. Équipe GRGS, Service Hydrographique de la Marine

13, Rue du Chatellier - CS 92803 - 29228 Brest Cedex 2

Fax : 02 98 22 17 45

### *Personnel permanent*

BATANY Christian	christian.batany@shom.fr	02 98 22 17 37
CREACH Ronan	ronan.creach@shom.fr	02 98 22 15 89
GUIRAND Virginie	virginie.goirand@shom.fr	02 98 22 17 55
LALANCETTE Marie-Françoise	Marie-Francoise.lalancette@shom.fr	02 98 22 15 87
LE DU Pascal	ledu@shom.fr	02 98 22 17 29
LEROY Ronan	rleroy@shom.fr	02 98 22 15 89
MOYSAN Yann	yann.moysan@shom.fr	02 98 22 17 74
PINEAU-GUILLOU Lucia	lucia.pineau-guillou@shom.fr	02 98 22 12 74
ROUXEL Didier	didier.rouxel@shom.fr	02 98 37 78 09

### *Personnel rattaché et Doctorant*

WOPPELMANN Guy	guy.woppelmann@univ-lr.fr	05 46 45 86 13
POUVREAU Nicolas	nicole.pouvreau@univ-lr.fr	

## 6. Équipe GRGS, Observatoire Midi-Pyrénées

14, Avenue Edouard Belin - 31400 TOULOUSE

(a) LEGOS (UMR 5566) (Fax : 05 61 25 32 05)

### *Personnel permanent*

CALMANT Stéphane	Stephane.Calmant@cnes.fr	05 61 33 29 37
LEGRESY Benoit	benoit.legresy@legos.obs-mip.fr	
REMY Frédérique	frederique.remy@legos.obs-mip.fr	05 61 33 29 58
TESTUT Laurent	laurent.testut@legos.obs-mip.fr	05 61 33 27 85

(b) DTP (UMR 5562) (Fax : 05 61 33 29 00)

### *Personnel permanent*

BRIAIS Anne	anne.briais@ntp.obs-mip.fr	05 6133 29 07
GARCIA Raphael	raphael.garcia@ntp.obs-mip.fr	05 61 33 30 45
GEGOUT Pascal	pascal.gegout@ntp.obs-mip.fr	05 61 33 28 93
LESTIEU Nicole	Nicole.Lestieu@cnes.fr	05 61 33 29 80
MONNEREAU Marc	marc.monnerneau@ntp.obs-mip.fr	05 61 33 29 68
RAMILLIEN Guillaume	Guillaume.Ramillien@ntp.obs-mip.fr	05 61 33 29 30
RIGO Alexis	Alexis.Rigo@ntp.obs-mip.fr	05 61 33 29 69

## 7. Équipe GRGS, Université de Polynésie Française, Observatoire Géodésique de Tahiti (OGT)

Fax : 00 689 803 842

BP 6570 - 98702 FAA'A Tahiti, Polynésie Française

### *Personnel permanent*

BARRIOT Jean-Pierre	barriot@upf.fr	00 689 803 884
---------------------	----------------	----------------

## 8. Équipe GRGS, CNAM/Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT)

Laboratoire de Géodésie et Géomatique (JE 2508) - 1, Boulevard Pythagore - Campus Universitaire du Maine - 72000 Le Mans

Fax : 02 43 43 31 02

### *Personnel permanent*

CALI José	jose.cali@esgt.cnam.fr	02 43 43 31 38
DURAND Stéphane	stephane.durand@esgt.cnam.fr	02 43 43 31 58
MICOULAUT Sandrine	sandrine.micoulaut@esgt.cnam.fr	
MOREL Laurent	laurent.morel@esgt.cnam.fr	02 43 43 31 40
NICOLAS-DUROY Joelle	joelle.nicolas@esgt.cnam.fr	02 43 43 31 59
SIMONETTO Elisabeth	elisabeth.simonetto@esgt.cnam.fr	02 43 43 31 37

### *Doctorants*

FUND Françoise	francois.fund@esgt.cnam.fr	02 43 43 31 00
LEGRU Benoit	benoit.legru@esgt.cnam.fr	02 43 43 31 10