

DEMANDE DE RECONNAISSANCE DE L'OBSERVATOIRE GÉODÉSIQUE DE TAHITI EN TANT QUE SITE INSTRUMENTÉ DE L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

1. INTRODUCTION

L'Observatoire Géodésique de Tahiti (OGT) est, avec l'Observatoire Géodésique du plateau de Calern (Grasse), l'un des deux observatoires géodésiques fondamentaux français. Si l'Observatoire de Grasse s'insère dans un laboratoire reconnu d'astrophysique, l'UMR Artémis de l'Observatoire de la Côte d'Azur, l'OGT est une structure isolée, lointaine (19 h de vol depuis Paris), avec peu de moyens humains, et non adossée à une structure locale plus large de type OSU (Observatoire des Sciences de l'Univers). Il est régi par un ensemble de Conventions plus ou moins disparates entre la NASA, le CNES et l'Université de la Polynésie française qui l'accueille, et ne dispose, d'un point de vue national, que d'une seule labellisation par le ministère de l'éducation et de la recherche comme « Fédération de Recherche » (FED), sans que cette labellisation ait d'ailleurs fait l'objet d'une quelconque évaluation (voir ci-après). L'objet de ce mémoire est de présenter les missions réalisées par l'OGT, en vue d'obtenir une labellisation par l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) en tant que site instrumenté, pour lui donner une meilleure visibilité à la fois nationale et internationale. Nous rappelons d'abord l'utilité des observatoires géodésiques fondamentaux et l'historique du site, qui a maintenant 17 ans, puis présentons le réseau marégraphique à caractère géodésique géré par l'OGT. Dans un deuxième temps, nous rappelons les spécificités fiscales et réglementaires du fonctionnement dans un territoire autonome d'outre-mer et les éléments financiers. Nous brosons ensuite une esquisse du futur de l'OGT, avec sa relocalisation sur un site plus large pouvons accueillir, outre les instruments actuels, une station VLBI.

2. OBJECTIFS ET MISSIONS DE L'OBSERVATOIRE GEODESIQUE DE TAHITI

2.1 ROLE DES OBSERVATOIRES GEODESIQUES FONDAMENTAUX

Comprendre les grandes évolutions climatiques et leurs conséquences sur notre environnement, rechercher de nouveaux équilibres pour la valorisation des terres et des océans... tous ces domaines de préoccupation sont désormais d'ampleur mondiale et exigent une gestion au niveau international. Le caractère global et continu de l'observation par satellite se prête particulièrement au suivi sur de longues durées de ces phénomènes, en complément des mesures ponctuelles de paramètres locaux, tels températures, vents ou acidité des océans.

Depuis le lancement du satellite Echo 2 en 1964, la géodésie spatiale a apporté une vision globale des transports de masses à la surface de la planète (atmosphère et hydrosphère) par l'étude des variations temporelles du champ de gravité et de l'orientation de la Terre par rapport aux étoiles, des variations du niveau des mers et du suivi des courants par altimétrie spatiale. Ces mesures par satellite ou par rapport aux étoiles nécessitent des Observatoires Géodésiques Fondamentaux qui doivent mailler la Terre de la façon la plus homogène possible pour assurer l'exactitude des systèmes de référence terrestres et célestes qui permettent ce suivi global de l'évolution climatique à travers les transports de masses.

Quatre techniques, dites fondamentales, sont utilisées à ces fins. La technique d'interférométrie à très longue base pour l'orientation par rapport aux étoiles lointaines (VLBI) qui permet de réaliser le système inertiel de base au sens newtonien, la technique de télémétrie laser (SLR/LLR) qui donne les distances absolues de satellites en orbite terrestre, et les techniques radioélectriques de poursuite Doppler (vitesses) DORIS et GNSS, dont l'énorme avantage est qu'elles sont peu chères, et qui permettent la densification des réseaux géodésiques. L'ensemble des phénomènes dont l'étude est atteignable par la géodésie spatiale est donné en Figure 1.

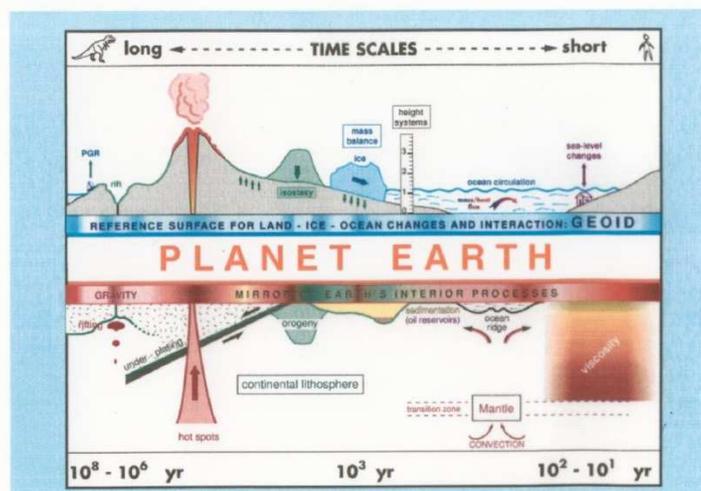


Figure 1 : La Terre est une planète vivante, dont tous les sous-systèmes, résumés sur la figure, « bougent » à des vitesses différentes, phénomènes que l'on peut modéliser par rapport à des systèmes de référence adéquats.

L'Association Internationale de Géodésie (AIG), par son Système d'Observation Géodésique Globale (GGOS) s'efforce de promouvoir un réseau d'observatoires géodésiques pérennes nécessaire à la stabilité des systèmes de référence pour la surveillance du système Terre et son évolution à long terme, par des missions spatiales dont les plus emblématiques sont sans conteste GOCE et GRACE. De nombreux pays participent à cet effort. Dans l'hémisphère Nord, les Etats-Unis, l'Allemagne, l'Espagne,

la République Populaire de Chine, la Corée du Sud et le Japon. Dans l'hémisphère Sud, l'Australie, la Nouvelle-Zélande, l'Afrique du Sud et l'Argentine. L'ambition est de couvrir la Terre par au moins une vingtaine d'Observatoires Géodésiques Fondamentaux (OGF) bien répartis. Il est de plus recommandé que les techniques spatiales soient associées à d'autres mesures géodésiques « sol » : nivellement, gravimétrie, marégraphie quand cela est possible, clinométrie, station de météorologie....). Il faut également y associer un réseau d'horloges précises et ultra-stables parfaitement synchronisées, toute mesure de propagation d'ondes radio ou laser étant en fait une mesure de temps ou de différence de temps. Il est nécessaire aussi d'y associer les interconnexions électroniques type Internet entre les stations et les centres mondiaux d'archivages et de mise à disposition des données, les liens avec les centres d'analyse et de calcul des produits géodésiques (repères de référence, échelles de temps, trajectoires, etc...). Il faut enfin assurer les liens locaux (les rattachements géodésiques) ultra-précis entre les points de référence des instruments de mesure co-localisés, liens indispensables pour la construction d'un repère de référence terrestre multi-techniques, tel que le Repère International de Référence Terrestre (ITRF). L'ensemble des techniques utilisées est résumé en Figure 2.

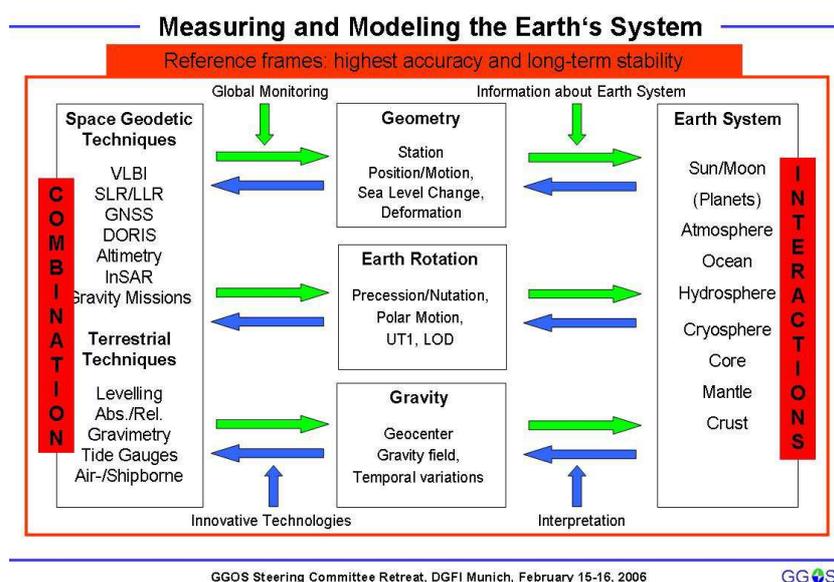


Figure 2 : L'ensemble des techniques de la géodésie (dont la géodésie spatiale) appliquées à la modélisation du système Terre (source : GGOS, www.ggos.org).

L'Europe abrite de nombreux sites géodésiques comprenant 15 stations laser, 8 antennes VLBI, 3 balises DORIS et des dizaines de récepteurs GNSS. La France possède deux OGF, l'un en métropole, rattaché à l'Observatoire de la côte d'azur, l'autre à Tahiti, en Polynésie française. L'ensemble des stations géodésiques fondamentales au niveau mondial est donné Figure 3. La Figure 4 illustre la meilleure réalisation actuelle du système de référence terrestre, l'ITRF 2008.

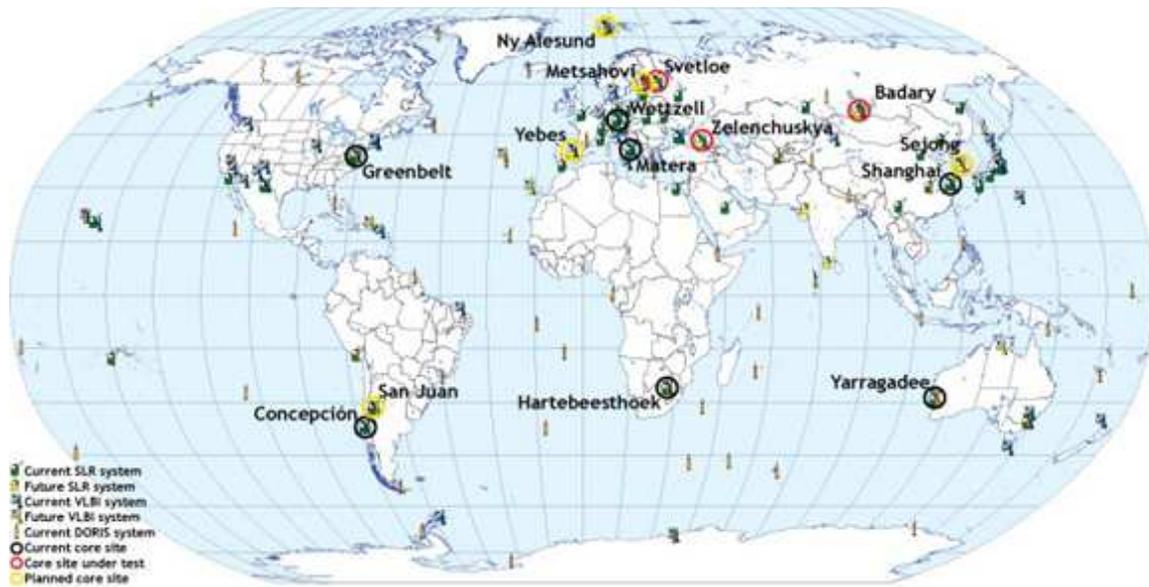


Figure 3 : Ensemble des stations géodésiques fondamentales à la surface de la Terre. L'objectif de précision du système de référence terrestre, pour la modélisation géodésique globale, est au niveau millimétrique avec une stabilité n'excédant pas le dixième de mm par an (Gross et al., 2009).

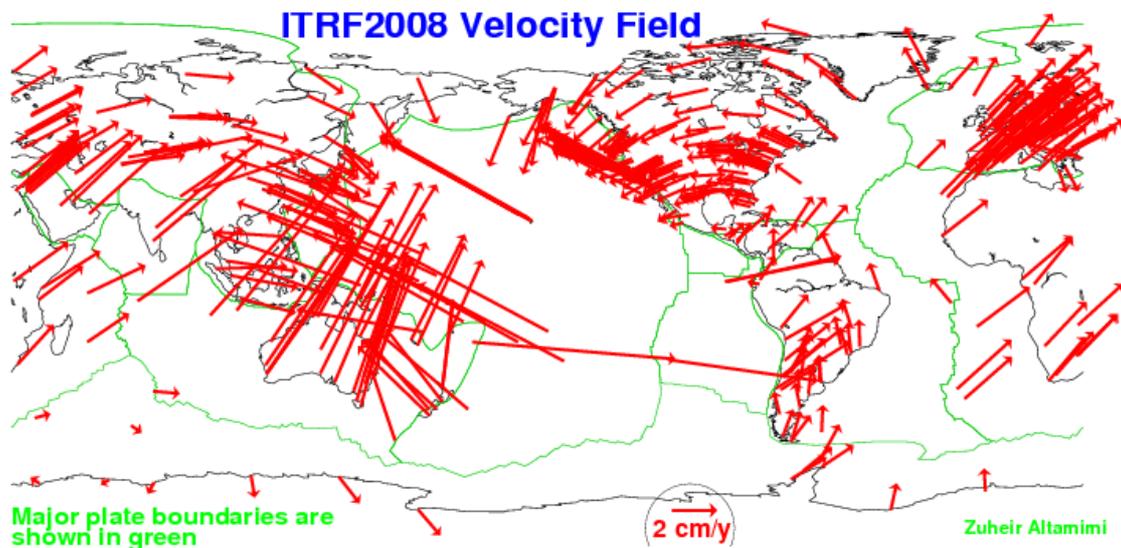


Figure 4 : Le champ horizontal de vitesses des stations géodésiques participant à la réalisation du système de référence terrestre (ici l'ITRF 2008). L'ITRF 2008 a été défini à partir de l'analyse de 29 ans de données VLBI, 26 ans de données SLR, 12.5 ans de données GPS et 16 ans de données DORIS. Le champ vertical de vitesse présente des valeurs d'un ordre de magnitude plus faible (quelques mm/an).

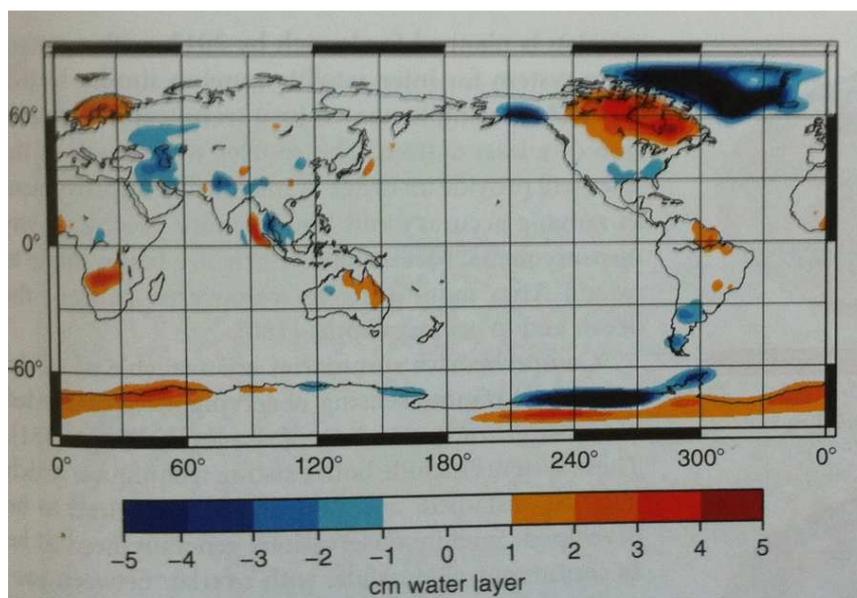


Figure 5 : Carte du transport de masses à la surface terrestre établie à partir des données du satellite GRACE, de mars 2003 à novembre 2012, donnée en équivalent cm d'eau/an. On distingue très nettement les effets du rebond post-glaciaire dans les zones boréales (en positif), la fonte des icebergs glaciaires sur le Groenland et la partie Ouest de l'Antarctique, l'Alaska, les Andes et l'Himalaya (en négatif). On distingue aussi deux signaux positifs, l'un au large de l'Indonésie (séisme de Sumatra en 2004), et l'autre, plus faible, au large du Japon (séisme de Tohoku en 2011). Ces signaux constituent sans aucun doute le plus bel aboutissement de la géodésie spatiale en ce début du XXI siècle. Source : Bonin and Chambers (2013).

2.2 CHANGEMENT CLIMATIQUE ET NIVEAU MOYEN DES MERS

La publication des trois volets du dernier rapport du GIEC, sept ans après le précédent, montre que les émissions de gaz à effet de serre, loin de ralentir, ont augmenté de 2.2% par an lors de la dernière décennie. A ce rythme, le seuil de 2°C de réchauffement sera franchi dès l'année 2030. D'ici 2100, la mer pourrait être plus haute de 26 à 82 centimètres en moyenne. Ce rapport apporte donc une confirmation, mais aussi un renforcement des précédents diagnostics. Le réchauffement climatique contribuera également à augmenter la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes. La géodésie spatiale apporte l'une des contraintes majeures à la modélisation de cette évolution par l'étude des transports de masse (Figure 5) à la surface terrestre (par exemple le satellite GRACE) et par la surveillance du niveau des mers par altimétrie océanique, dont le principe est rappelé en Figure 6.

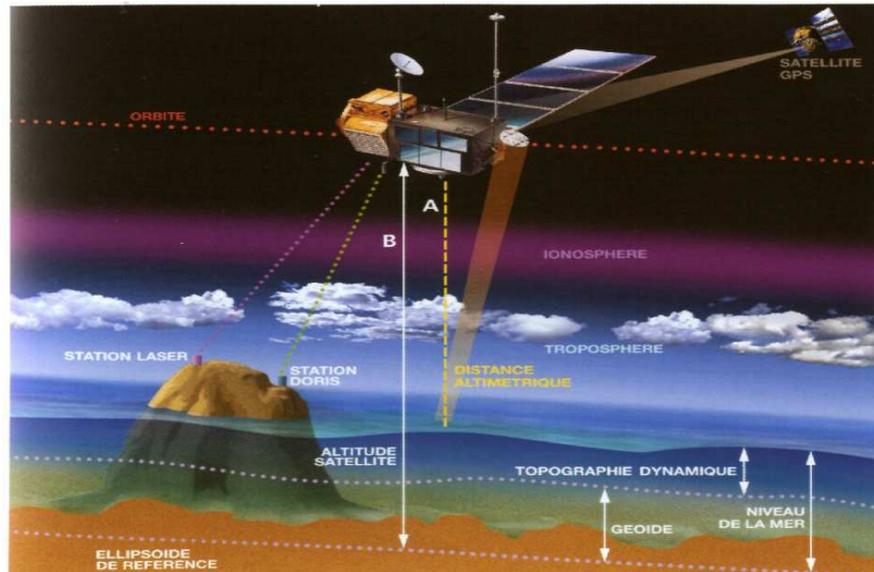


Figure 6 : L'altimétrie des océans par satellite. Le satellite mesure par radar sa distance à la surface de la mer. Le suivi de sa trajectoire (par exemple par des balises Doris ou du SLR) permet au même instant un positionnement par rapport à un référentiel lié au centre de la Terre, donc de connaître son altitude par rapport à un ellipsoïde. On en déduit la hauteur de la surface océanique par rapport à l'ellipsoïde, qui est en première approximation le géoïde. Au second ordre, des effets dynamiques sont présents, et en particulier ceux induits par les courants marins.

L'altimétrie océanique est une technique récente (années 1975-1980), et elle ne peut donner d'information trop près des côtes, du fait des limitations des techniques radars. Pour compléter l'altimétrie océanique, et donner le recul nécessaire, nous disposons heureusement d'observations marégraphiques qui pour certains sites en Europe remontent à plus de cent ans (voir Figure 7). Les marégraphes enregistrent les variations de la hauteur du niveau de la mer par rapport à une référence locale attachée au socle sur lequel ils reposent, et cela pour un spectre de fréquences allant de quelques secondes à plusieurs années. L'information contenue dans leurs enregistrements va donc bien au-delà du seul phénomène de la marée océanique, qui était leur objectif historique.

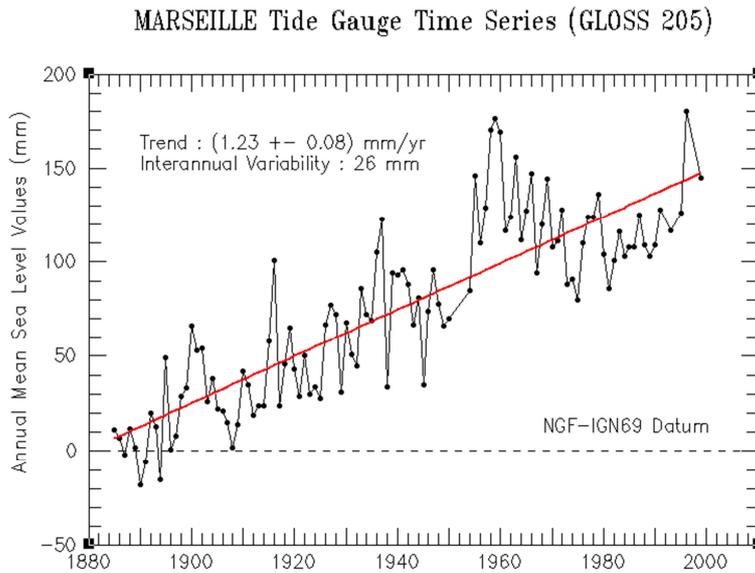


Figure 7 : évolution du niveau de la mer à Marseille, de 1880 à nos jours. Le niveau de la mer augmente à cet endroit de 1.23 mm/an. La difficulté, pour exploiter ces séries, réside dans l'inhomogénéité de la précision des moyens de mesure sur des durées très longues, avec le risque de biais systématiques. Source Woppelmann et al. (2011).

Alors que le GIEC a jusqu'à présent surtout porté son attention sur l'estimation d'indicateurs de changement climatique à l'échelle planétaire (température moyenne de l'atmosphère, taux de dioxyde de carbone atmosphérique, niveau moyen des océans...), l'intérêt scientifique, économique et social se trouve dans les variations locales du niveau marin, lesquelles peuvent s'écarter notablement de la moyenne globale. Les variations spatiales des tendances du niveau de la mer sont désormais reconnues. Les processus à l'origine de ces variations sont multiples : (i) dilatation thermique des couches superficielles des océans ; (ii) fonte des glaces continentales et effets gravitationnels associés à la redistribution des masses d'eau ; (iii) redistribution des champs de pression ; (iv) mouvements verticaux du sol. La Figure 8 résume ces variations à l'échelle globale.

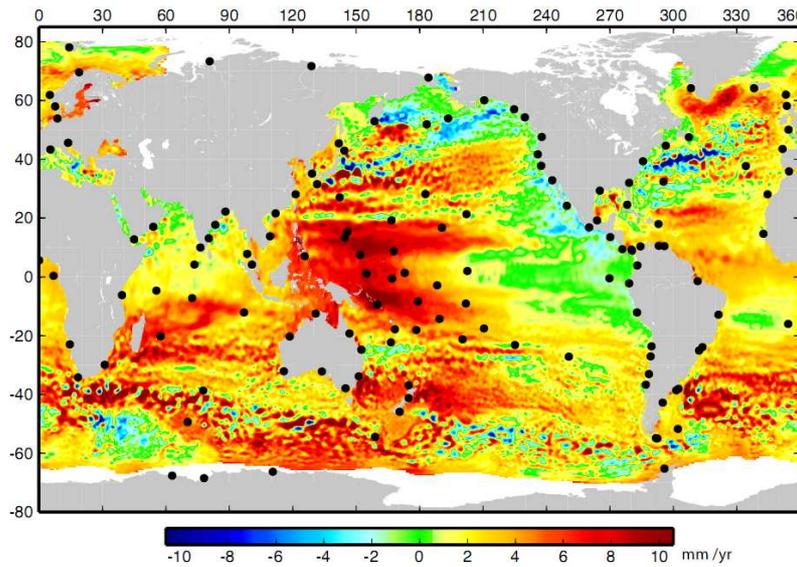


Figure 1: Location of tide gauges used in this study with sea level trends for 1993-2007 depicted based on Aviso multi-mission data.

Figure 8 : Variations du niveau de la mer sur la période 1993-2007. Les points noirs représentent des stations marégraphiques utilisées en «vérité-terrain». Si l'ensemble des calottes polaires fondait, l'élévation du niveau moyen de la mer serait d'environ 80 m. Les variations du niveau de la mer peuvent atteindre ou dépasser 200 m à l'échelle de plusieurs dizaines de millions d'années. Au plus fort de la dernière glaciation, le niveau de la mer a baissé de plus de 100 m par rapport à l'actuel. Source : Merrifield et al. (2008).

Si les marégraphes représentent le recul nécessaire (voir Figure 7), ils n'ont pas par essence la couverture globale de l'altimétrie océanique (voir Figure 8). Ceci est cruellement illustré par les deux figures suivantes (Figures 9 et 10), qui montrent le parcours restant à accomplir en termes de couverture géographique, en particulier dans l'hémisphère Sud.

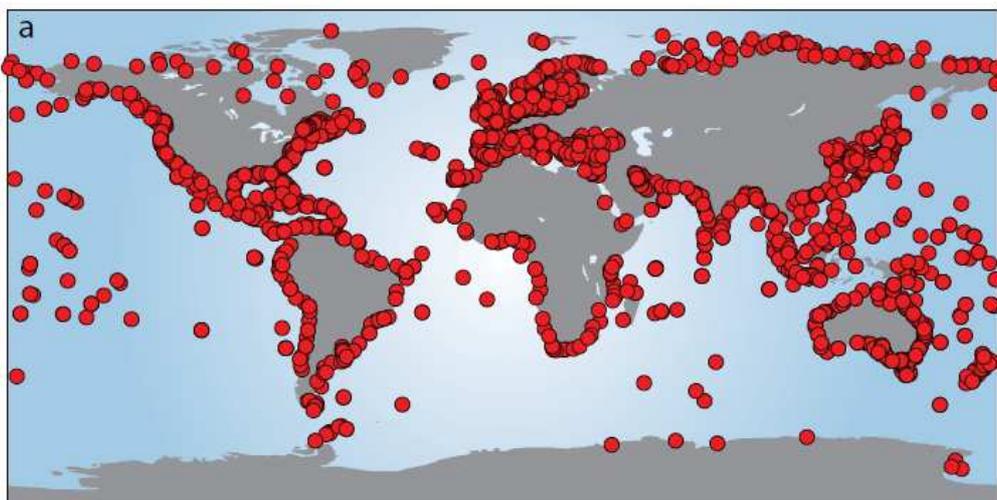


Figure 9 : Couverture actuelle des stations marégraphiques du PMSLS (Permanent Mean Sea Level Service de l'IAG), montrant la très grande hétérogénéité du réseau, essentiellement concentré sur les côtes continentales. Source: Woodworth, P.L., W.R. Gehrels, and R.S. Nerem (2011).



Figure 10 : Couverture actuelle des stations marégraphiques du PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level, Service de l'IG), offrant des enregistrements sur plus de soixante ans. Source : idem Figure 9.

3. L'OBSERVATOIRE GEODESIQUE DE TAHITI

3.1 L'OBSERVATOIRE GEODESIQUE FONDAMENTAL

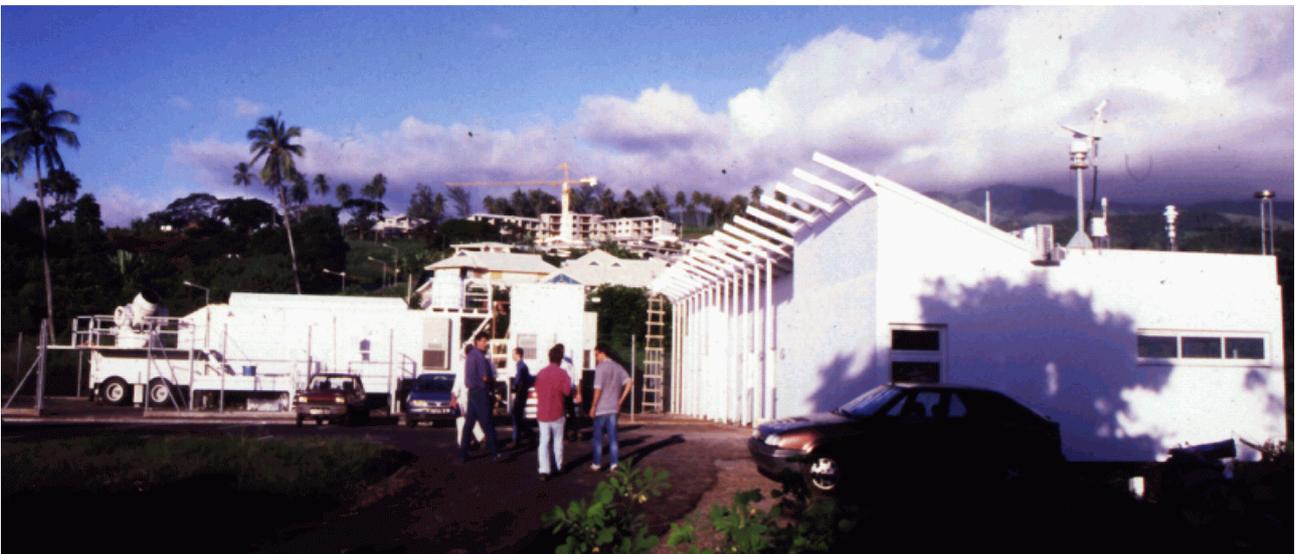


Figure 11 : L'observatoire Géodésique de Tahiti, à Punaauia, avec sa station laser SLR (au fond) et les antennes GPS, DORIS et PRARE (démantelée depuis 2003).

Tahiti est devenu en 1997 un site de référence géodésique fondamentale pour la poursuite des satellites d'étude de la Terre à des fins océanographiques, géodynamiques et géophysiques grâce à l'installation d'une station de poursuite de satellites par laser MOBLAS-8 de la NASA du réseau ILRS (Figures 11, 12, 13 et 14) sur le campus de l'Université de la Polynésie française (UPF) à Outumaoro (commune de Punaauia, près de la capitale Papeete).

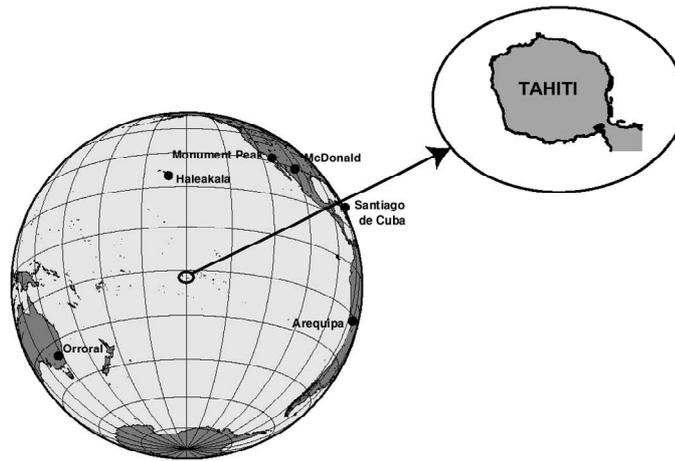


Figure 12 : Localisation de Tahiti, île principale de la Polynésie française (30 km de diamètre environ).

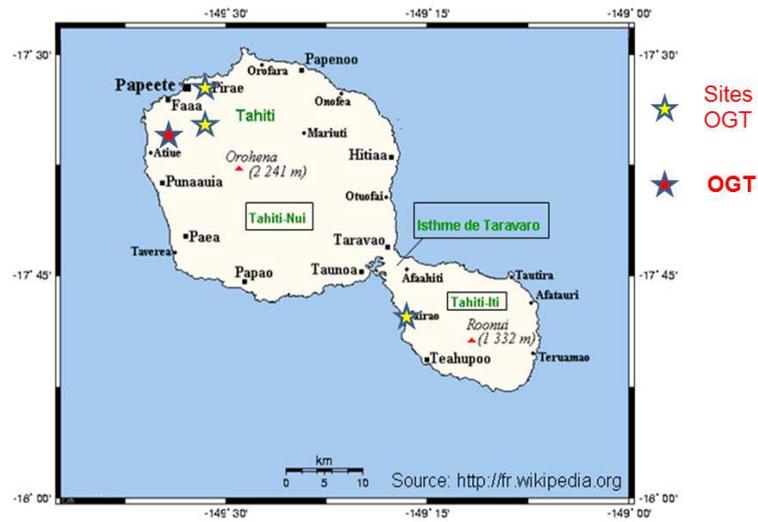


Figure 13 : Localisation de la station laser et du site principal de l'Observatoire Géodésique de Tahiti (étoile rouge, latitude $17^{\circ} 34' 36.84'' S$, longitude $210^{\circ} 23' 37.32'' W$, altitude 92 m) sur le campus de l'Université à Outumaoro. Les étoiles jaunes correspondent à des sites occupés par l'OGT (GPS permanent sur Pirae, marégraphe/GPS de Vairao, gravimètre GPhone sur Pamatai-Faaa).

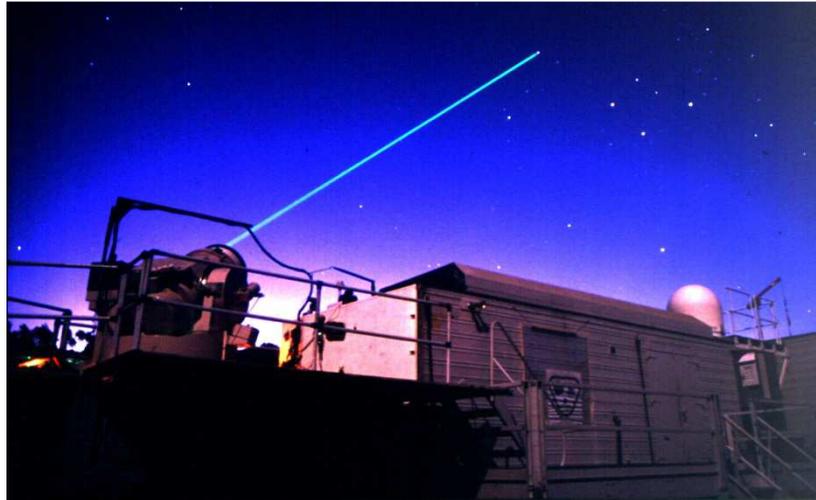


Figure 14 : La station laser SLR de l'Observatoire Géodésique de Tahiti, opérant de nuit sur un satellite altimétrique (voir explication de la mesure en Figure 6).

Cette station, fondée en 1997 avec l'aide du CNES et de l'INSU et le support du GRGS par le professeur Alain Bonneville, s'insère dans le réseau des stations géodésiques fondamentales donné en Figure 3, et a contribué à toutes les réalisations de l'ITRF. Son directeur actuel depuis 2006 est le professeur Jean-Pierre Barriot, ancien ingénieur du CNES. Elle est située sur le campus d'Outumaoro de l'Université de la Polynésie française (UPF), en banlieue de Papeete. Son cœur est la station laser SLR MOBILAS-8 de la NASA. La station laser a pu bénéficier de diverses cures de jouvence récentes (2011-2012), grâce à l'intérêt renouvelé de la NASA pour les observations laser, par la mise à niveau d'une grande partie de l'électronique d'acquisition, du support du télescope, des visites techniques plus fréquentes et au soutien à ce jour sans faille du CNES pour la logistique annexe (changement total du système de climatisation, dalle pour la station laser mobile française, mise aux normes des armoires électriques). Elle est actuellement, malgré son âge (une trentaine d'années), en parfait état de fonctionnement. Elle s'est enrichie au fil des ans de divers équipements annexes, dont une station permanente DORIS, diverses stations GPS permanentes dont une de la NGA américaine, et depuis 2006 d'un réseau de stations marégraphiques (cinq stations de qualité géodésique) et un gravimètre gPhone en 2007 sur financement UPF et CNES. A noter que nous hébergeons depuis 2011 une station GPS permanente du DLR et depuis 2009 deux stations GPS permanentes fournies gracieusement par la société TRIMBLE. Une station Beidou chinoise devrait venir enrichir le parc en 2014 (voir Figure 13 pour les sites OGT sur Tahiti Nui et Tahiti Iti). La Table 1 donne le nombre de points normaux (points de mesure) pour les stations du réseau ILRS pour Juillet 2012 à Juin 2013, dont la station laser de l'OGT (Papeete sur la table).

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

- ILRS (International Laser Ranging Service),
- IGS (International GNSS Service),
- IDS (International DORIS Service),
- PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level),
- ICET / GGP (International Center for Earth Tides).

L'OGT a aussi apporté au fil des ans son soutien logistique à plusieurs de mission de recherche étrangères ou métropolitaines :

- Campagne de sismologie de fond de mer de la JAMSTEC (Japon) en 2009,
- Campagne d'Observation CNES de l'éclipse solaire de 2010 aux Tuamotu en support de la mission PICARD en 2010,
- Campagne de colocalisation de la station MOBILAS-8 de l'OGT avec la station laser ultramobile de l'Observatoire de Nice en 2011.

Points normaux du 01 Juillet 2012 au 30 Juin 2013

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
Baseline		1000	400	100	1500								
Yaragadze	7090	11615	1938	4925	18478	192536	24522	28885	245943	254708	6.0	8.2	9.6
Chanachun	7237	6590	831	4156	11577	54017	4425	11947	70389	85515	8.2	11.7	15.0
Mount Stromlo 2	7825	6698	1196	782	8676	94009	9982	4070	108061	72447	4.1	7.2	9.7
Zimmerwald 532	7810	4609	891	2971	8471	72705	12062	12173	96940	107109	4.5	8.6	11.2
Wetzell	8834	4207	786	2344	7337	41551	5413	8464	55428	67614	7.1	11.0	13.6
Matera MLRO	7941	4328	1181	1309	6818	53561	13676	8917	76154	90583	1.0	3.3	4.6
Graz	7839	3521	545	2400	6466	63519	4487	14944	82950	104470	2.0	3.5	5.0
Greenbelt	7105	4625	673	478	5776	83365	7657	2888	93910	54661	4.7	8.9	10.4
Harstmoncaux	7840	2877	637	1484	4998	42803	6960	5306	55069	53518	5.3	9.3	9.4
San Juan	7406	2690	714	1137	4541	43416	8190	7291	58897	67952	5.9	11.9	7.9
Monument Peak	7110	3210	566	460	4236	58241	6042	2186	66469	40597	9.9	13.5	15.3
Hartebeesthoek	7501	2853	648	353	3854	43209	7284	3147	53640	44196	5.8	10.7	16.3
Potsdam 3	7841	2910	429	295	3634	50181	4611	2403	57195	36166	7.3	10.7	13.3
Arecuipa	7403	2840	333		3173	36057	2531		38588	17610	5.4	11.0	9.7
Grasse MEO	7845	1109	517	914	2540	38362	6015	3802	48179	40947	8.9	14.8	15.5
Concepcion 847	7405	1356	402	74	1832	13619	3815	466	17900	15426	7.2	15.6	20.3
San Fernando	7824	2357	95	3	2455	30064	392	8	30464	10421	5.8	12.9	63.9
Haleakala	7119	1912	480		2392	32564	5933		38497	22677	5.2	9.2	13.8
Katsivaly	1893	1651	212	194	2057	39690	3150	2696	45536	33500	29.6	47.8	30.9
Shanghai 2	7821	1027	186	805	2018	7842	764	2823	11429	18347	7.4	13.4	13.7
Simosato	7838	1292	469	124	1885	23999	8165	884	33048	30112	4.1	6.4	12.9
McDonald	7080	1178	410	232	1820	11626	3519	849	15994	15357	8.1	11.4	12.2
Simeiz	1873	1125	231	37	1393	13908	1719	244	15871	9408		17.1	26.0
Kiev	1824	1035	174	83	1292	8961	848	279	10088	6102	12.9	12.0	12.6
Baikomur	1887	280	414	512	1206	2828	4025	2702	9555	22974		15.4	16.2
Altay	1879	243	156	773	1172	3250	1128	3491	7869	20940		7.2	13.5
Beijing	7249	834	109	193	1136	10760	809	1085	12654	10637	6.9	11.8	16.1
Arkhvz	1886	461	155	392	1008	4518	1022	1845	7385	12959		13.7	19.9
Paraste	7124	565	126	199	890	9172	1378	1306	11856	12440	6.7	7.4	8.2
Badary	1890	660	114	49	823	8274	1010	328	9612	6248		17.4	17.1
Komsomolsk	1868	51	89	501	641	339	524	1655	2518	9479		4.7	16.1
Zelenchukyska	1889	143	113	379	635	1989	1097	1671	4757	11196		15.4	20.4
Kosanej	7308	290	93	139	522	3843	708	878	5429	7218	10.8	13.3	16.0
Riga	1884	475	15		490	7508	74		7582	2523	10.1	12.5	11.1
Svetloe	1888	153	64	22	239	1488	495	102	2085	2027		25.0	18.4

Table 1 : Nombre des séquences d'observation de la station SLR de l'OGT (Papeete) en 2012-2013. Le nombre de points normaux par station pour les stations MOBLAS dépend essentiellement de la qualité du ciel sur le site (un désert est meilleur qu'une zone côtière) et du nombre de quarts (au sens marin), c'est-à-dire du nombre de techniciens affectés à la station (trois pour l'OGT, ce qui est faible). L'OGT opère essentiellement la nuit, pour maximiser le rapport signal sur bruit du système de poursuite laser.

L'OGT a organisé en 2013, en collaboration avec le Service de l'Urbanisme de la Polynésie française, un levé couplé gravimétrie de surface / GPS (Figure 15, 475 points sur Tahiti et Moorea), avec un gravimètre du parc INSU, et un levé gravimétrique aérien conjoint (Figure 16) avec l'Université de Hsinchu (Taiwan). L'ensemble de ces mesures nous permettra, pour la première fois, de dériver un

modèle de géoïde de Tahiti / Moorea. Il a aussi épaulé la mise en place, au sein du laboratoire GEPASUD, d'un observatoire hydrologique (bassin versant de la Titaaviri près de la presqu'île Tahiti Iti) à travers l'expertise en acquisition en marégraphie. La Table 2 résume l'ensemble des équipements qui ont opéré et opèrent actuellement sous la houlette de l'OGT (18 instruments actifs au jour de la rédaction de ces lignes).



Figure 15 : Levé gravimétrique de Tahiti effectué au printemps-été 2013, en collaboration avec le Service de l'Urbanisme de Tahiti.

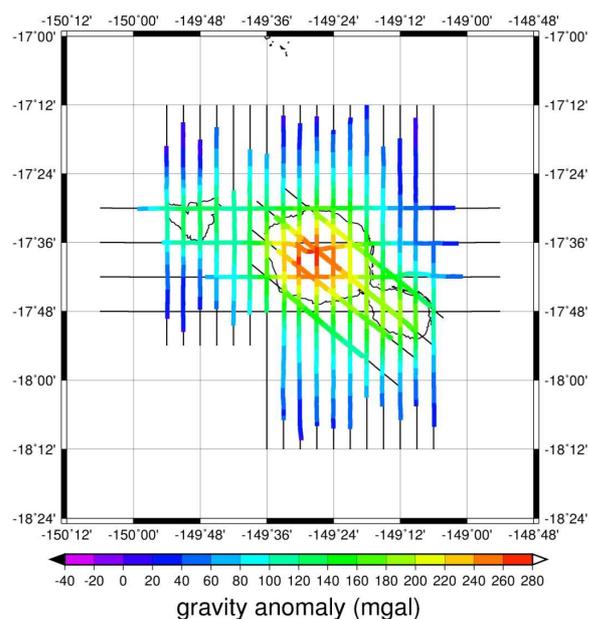


Figure 16 : Levé gravimétrique aérien de Tahiti effectué à l'été 2013, en collaboration avec l'Université de Hsinchu (NCTU, Taiwan).

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

Table 2 : Ensemble des instruments scientifiques (18 actifs) déployés par l'OGT. En noir gras les instruments relevant de l'observatoire géodésique fondamental, en bleu gras les marégraphes géodésiques). En grisé les instruments retirés. DégéOM : Délégation Générale à l'Outre-Mer, PF : Gouvernement de la Polynésie française. En colonne 6, les contributions financières reçues pour les instruments.

3.2 LE RESEAU MAREGRAPHIQUE GEODESIQUE

L'OGT, outre son caractère d'observatoire géodésique fondamental, pilote un réseau de marégraphes, dont cinq marégraphes à caractère géodésique qu'il a déployé récemment en Polynésie française sur des financements « Contrat Etat-PF » et AFD, avec l'aide technique du SHOM, sur les îles de Tubuai (2007, Figure 17), Rangiroa (2008), Tahiti Iti (2010), Mangareva (2011) et Makemo (2013), et qui répondent aux objectifs précités en 2.2 de densification et de « vérité terrain » pour l'altimétrie océanique et la surveillance locale du niveau des mers dans une zone équivalent en surface à l'Europe et non couverte avant 2006 pour cet objectif (voir Table 2 et Figure 18). Ils viennent aussi épauler dans cette zone les marégraphes dédiés uniquement à l'observation des tsunamis (i.e. qui n'ont pas de positionnement vertical ultra-précis par GPS). Ils ne donneront tout leur potentiel que s'ils peuvent observer, de manière continue et sans biais, le niveau des mers sur au moins les cinquante prochaines années. Ils ont été conçus dans cet objectif (celui de Tubuai a résisté à un cyclone de plein fouet avec des vagues de 8 m en 2010), mais demandent, comme tout outil météorologique, une maintenance pointue et sans faille.



Figure 17 : Le marégraphe de l'île de Tubuai (Australes), installé par l'OGT en 2008 (radar et GPS) avec l'aide du SHOM. Le radar altimétrique est sur le flanc du duc d'Albe, à côté de l'échelle de marées. L'antenne GPS (radôme) est visible sur l'arrière-plan, avec l'antenne de communication Yagi (râteau) visant le satellite GOES-West de la NOAA. La station a résisté en 2010 au cyclone Oli, qui a frappé directement l'île.

La mise en place de ce réseau marégraphique géodésique, qui vient en complément du réseau marégraphique historique de base mis en place par l'Université de Hawaii (trois stations) et le CEA (une station) s'est révélé un casse-tête, non au niveau du financement initial (quatre contrats successifs, voir Table 3), mais au niveau logistique et maintenance (la surface maritime de la Polynésie française représente dix fois la surface de la France métropolitaine). Rappelons que les données marégraphiques de l'OGT (et de la plupart des autres marégraphes en PF) sont transmises en temps réel au centre de la NOAA aux USA, conformément à l'accord qui a été signé avec cet organisme, et qui nous autorise à utiliser les moyens de transmission du satellite GOES-West. Ces données sont disponibles sur le site du PSMSL sans restriction pour toute la communauté scientifique, dont la communauté française, en complément des données des réseaux REFMAR, SONEL et ROSAME.

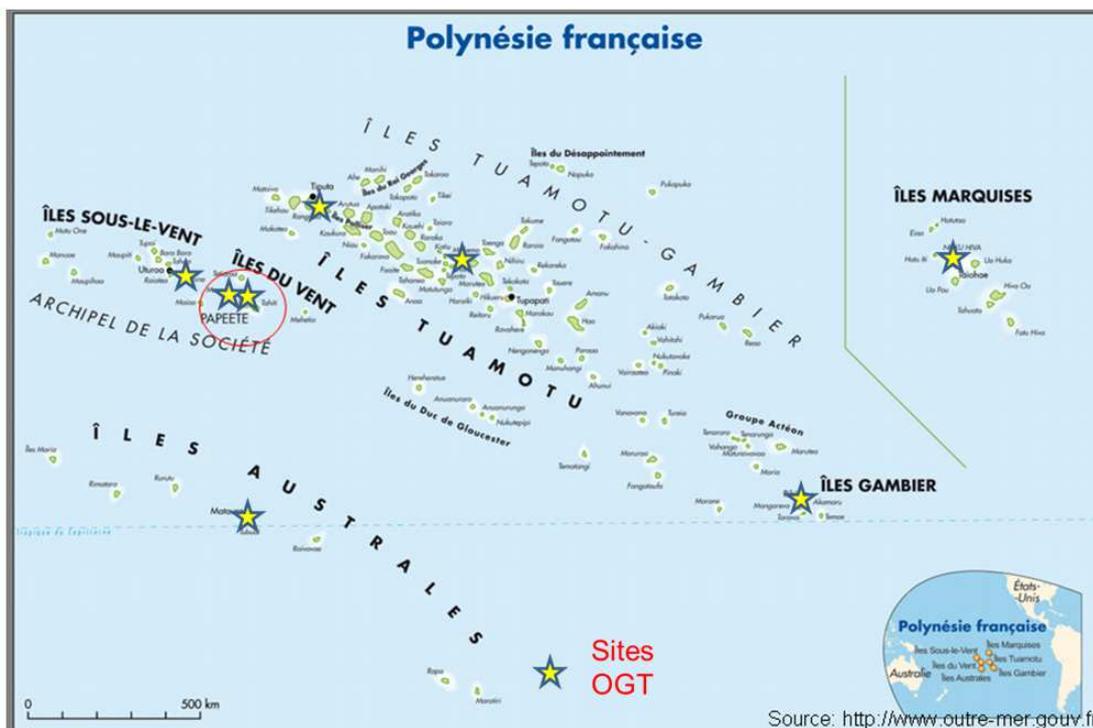


Figure 18 : Répartition (étoiles jaunes) en Polynésie française des sites marégraphiques gérés par l'OGT. Rappel : il faut environ 5 heures de vol pour aller de Papeete aux îles Gambier en ATR-72.

3.3 LE CENTRE INTERNATIONAL DES MAREES TERRESTRES

Depuis 2007 le Centre International des Marées Terrestres (ICET) a son siège à l'Université de Polynésie Française, en réponse à un appel d'offre de l'IAG. Les marées terrestres étudient les variations de la pesanteur, les inclinaisons de la verticale et les

déformations du globe terrestre liées aux forces de marée luni-solaires. Ces effets sont de l'ordre de $2,510^{-7}g$, 250 nrad ou 80 cm de déplacement radial.

On peut résumer le cahier des charges de l'ICET comme suit :

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

A cet effet ICET est un acteur majeur dans différents projets de coopération internationale et tout particulièrement depuis 1997 du « Global Geodynamics Project (GGP) », un réseau de gravimètres à supraconductivité capables d'enregistrer les variations de la pesanteur avec une précision de $10^{-11}g$ à court terme et $10^{-9}g$ à long terme. ICET gère la Banque de données GGP (www.bim-icet.org). Ce travail comporte la validation et l'analyse des données brutes décimées à raison d'une valeur par minute. Une première étape consiste à corriger les pics et les sauts et à interpoler les données manquantes pour des interruptions ne dépassant pas quelques heures. Les données corrigées sont archivées puis décimées à raison d'une valeur par heure afin de les soumettre à un programme d'analyse de marée. Dix-sept stations collaborent régulièrement au réseau GGP, regroupant plus de 20 gravimètres. Les résultats de l'analyse sont transmis au responsable de la station et des études d'ensemble sont publiées. A l'heure actuelle 19 stations atteignent une durée d'enregistrement de 8 ans (3000 jours), quinze 4000 jours et six 5000 jours. Seuls les enregistrements les plus longs permettent d'étudier la structure fine du spectre des ondes de marée. Une durée d'observation de 8 ans permet de séparer les ondes liées aux variations du périgée lunaire, tandis que les ondes nodales sont accessibles à partir de 5000 jours. La diffusion de l'information est assurée par la publication régulière du Bulletin d'Information des Marées Terrestres (BIM, aussi sur www.bim-icet.org). Depuis 2007 cinq numéros ont été publiés avec un total de 460 pages. Un sixième numéro en préparation

rassemblera une partie des communications présentées au 17^{ème} Symposium des Marées Terrestres (Varsovie, 2013).

4. STRUCTURE FORMELLE ET FONCTIONNEMENT AU JOUR-LE-JOUR

D'un point de vue formel, l'Observatoire Géodésique de Tahiti a d'abord été géré selon un protocole d'accord tripartite signé en 1997 pour 10 ans entre la NASA, le CNES et l'UPF qui prévoyait que la NASA fournissait la station MOBILAS (en opération depuis 1998) et en assurait la maintenance technique, que l'UPF fournissait le site et assurait le fonctionnement et que le CNES participait aux frais de personnel et de fonctionnement. Ce protocole a été renouvelé fin 2007, et les obligations réciproques des parties françaises (CNES-UPF) précisées dans une lettre du 17 octobre 2008. Il a été renouvelé en 2012 et 2013 pour une durée de un an, puis en 2014 pour une durée de 10 ans, avec maintenant une convention bipartite CNES-NASA et une convention bipartite CNES-UPF (en cours de signature). Du point de vue du ministère de l'éducation nationale et de la recherche (MENRT), l'OGT est une structure fédérative de recherche (FED) pour le quinquennal en cours (2012-2016), après avoir été un Plan-Pluri-Formation (PPF) depuis son origine. Il est à noter que ce statut, qui avait été demandé par l'université en 2010, avait été rejeté par l'instance d'évaluation (l'AERES), au motif qu'il ne correspondait pas à la structure, de type UMS « international ». Il a été accordé *in fine* par le MENRT. Ceci a entraîné, comme conséquence malheureuse la non-évaluation de l'OGT par l'AERES, alors qu'il l'était auparavant en tant PPF.

Une telle station, qui fonctionne de nuit 4 jours sur 7 sur toute l'année, nécessite un personnel permanent car un très grand nombre de tâches ne sont pas automatisées. Depuis son installation, neuf (!) équipes techniques se sont succédé, le coupable étant une réglementation inadaptée, qui oblige à une rotation fréquente (2 ans renouvelable une fois) des personnels de l'Etat n'ayant pas le centre de leurs intérêts moraux et matériels en Polynésie française (règle dite du CIMM). Cette règle ne s'applique pas aux enseignants-chercheurs, qui bénéficient d'un statut d'inamovibilité. L'effectif actuel de la station est composé de cinq personnes : Jean-Pierre Barriot (PR, directeur), Lydie Sichoix (MdC, co-directrice), Yannick Vota (technicien UPF), Youri Verschelle (technicien UPF), Jonathan Serafini (technicien CDD CNES). L'équipe formée par les deux techniciens permanents, payés

par l'UPF, a pu être stabilisée depuis deux ans, mais est encore sous la menace de la règle du CIMM pour l'un d'entre eux. Une visite d'évaluation par des experts du CNES et de la NASA a été effectuée en Octobre 2008. Elle a recommandé d'augmenter le rendement de la station par un passage à une équipe minimale d'observation de cinq personnes afin de garantir 80 h d'observations par semaine (contre environ 40 h actuellement), dont quatre techniciens et un ingénieur électronicien-opticien. Nous en sommes toujours au même point au jour de l'écriture de ces lignes, mais nous avons pu obtenir cette année (2014) la permission administrative par l'UPF d'utiliser un dispositif d'homme mort, qui devrait permettre aux techniciens d'opérer, au moins en partie, seuls la nuit (la réglementation impose sinon deux personnes). Augmenter l'effectif en techniciens semble irréaliste dans l'environnement économique actuel, et la solution viendra sans nul doute de la robotisation de la station.

5. ASPECTS FINANCIERS

Comme déjà indiqué au point précédent, l'OGT a fonctionné de 1997 à 2011 sous un double chapeau : celui de la Convention CNES-NASA-UPF de gestion de la station laser et celui d'un plan pluri-formation (PPF) reconnu par le MENRT. En janvier 2012, l'Université de la Polynésie française a redémarré pour un nouveau contrat quinquennal (2012-2016). D'autre part, l'autonomie financière de l'UPF (la dernière université française à passer à ce régime) a été effective au 1^{er} janvier 2013. Les deux techniciens de l'OGT ont désormais leurs salaires (120 137 euros en coût « chargé ») directement payés par l'UPF et non le Rectorat. L'université estime maintenant qu'elle contribue à hauteur de 60 % au fonctionnement de l'OGT (techniciens + fluides + support général), et souhaite voir sa quote-part réduite à 30 %. Il y a un risque très réel d'un redéploiement de ces deux postes en fonction des objectifs de recherche définis par les instances de l'université.

Le système de conditionnement d'air a été entièrement rénové en novembre 2009 grâce à un financement du CNES (64 000 euros). De gros travaux de rénovation de la monture du télescope ont eu lieu en avril 2011, avec une intervention lourde des ingénieurs NASA (10 000 USD de frais d'importation), et la rénovation des armoires électriques vient d'être faite sur financement CNES (12 000 euros). Le radar d'évitement des tirs laser lors des survols d'avion, a été remis en service en mars 2013 par la NASA.

Le Tableau 3 résume l'ensemble des dépenses et recettes de l'OGT pour une année « moyenne ». Il appelle plusieurs remarques et rappels. Le premier rappel est l'éloignement géographique de Tahiti, qui implique des frais de transport importants, que ce soit pour le matériel ou les personnes. Le coût moyen d'un billet d'avion aller-retour pour Paris est de l'ordre de 3000 euros. Le deuxième rappel est celui du statut douanier de Tahiti, complètement disjoint de celui de la métropole et de l'Europe. Nous payons à l'importation environ 30 % de frais de douanes sur la valeur CAF de ce que nous recevons, c'est à dire de la valeur HT des marchandises augmentées des frais de port et d'assurance. Pour donner un cas extrême, le radar d'évitement de la station laser, remplacé l'an dernier pour une valeur CAF de 60.000 USD, appelait une taxe de 20.000 USD. Nous pouvons éventuellement éviter une partie, de l'ordre de 10 %, mais cela est à la discrétion des autorités locales. Nous ne pouvons bénéficier d'une exemption totale au titre de la recherche, les textes réglementaires en vigueur en Polynésie française l'excluant formellement. D'une manière générale, le coût des services et de la vie en général est majoré par rapport à celui de la métropole par un facteur de 50 %, voire 75 % pour des services techniques « pointus ». La deuxième remarque générale est que le budget de fonctionnement est obéré par le coût de maintenance des marégraphes, de l'ordre de 26.000 euros / an pour l'OGT, alors que nous ne bénéficions d'un support de la Polynésie française qu'à hauteur de 13.500 euros. Ceci vient du fait que le dimensionnement de ce réseau de marégraphes, et donc de ses coûts de maintenance ont été définis en 2006-2008, sur la base des informations financières données à cette époque par le SHOM, prestataire de service pour la maintenance du réseau. Le SHOM a depuis lors changé de cadre juridique, devenant un Etablissement Public à caractère Administratif (EPA), répercutant la totalité de ses coûts, y compris salariaux. Cela a engendré un doublement de la facture de maintenance par rapport à ce qui avait été calculé au départ. Le coût total de la maintenance du réseau est de l'ordre de 44.000 euros / an, avec un budget additionnel d'environ 18.000 euros / an payé par la DÉGÉOM directement au SHOM (les chiffres exact varient légèrement par année). Il s'agit d'un coût très lourd, aggravé par les dégradations subies par le réseau, qu'elles soient d'origine humaine ou naturelle. Je rappelle également qu'aller réparer depuis Papeete le marégraphe de Rikitea (archipel des Gambier) est équivalent à aller réparer depuis Paris le marégraphe de Nicosi.

Recettes annuelles	Montants en euros
UPF salaires	120 000
UPF fluides	8 500
UPF support général	10 000
NASA (no-exchange-of-funds)	55 000
NGA	12 000
CNES salaire	39 000
CNES support général	36 000
PF support marégraphes	13 500
TOTAL	294 000

Dépenses annuelles	Montants en euros
Salaires	159 000
NASA (no-exchange-of-funds)	55 000
Maintenance	18 000
Douanes et transport	18 000
Missions et formation	14 000
Développement en acquisition	4 000
Marégraphes	26 000
TOTAL	294 000

Contrats Extérieurs	Montants en euros
Contrat de Projets (2006-2009)	118 000
ANR (2006-2008)	59 000
Contrat de Projets (2009-2011)	105 000
Fonds Pacifique (2009-2012)	101 350
Service de l'Urbanisme de Tahiti	33 500

Table 3 : Eléments financiers de l'OGT pour 2013.

D'autre part, la NGA, dont nous abritons la station GPS permanente, nous a informés de son souhait de trouver un site d'hébergement répondant à des normes militaires de sécurité, ce que nous ne pouvons bien sûr offrir. Outre la perte d'un instrument ayant fourni une très longue série temporelle, nous serons privés d'une source financière qui contribuait au fonctionnement de l'OGT. La réglementation concernant la maintenance a heureusement été assouplie l'année dernière, les ingénieurs américains assurant les visites annuelles n'ayant plus besoin d'un visa de travail. Rappelons qu'un de ces ingénieurs avait été expulsé par la police des frontières il y a quatre ans car il n'avait pas le bon tampon sur son passeport...

6. ASPECTS « RECHERCHE »

Pour terminer ce chapitre, l'OGT, en tant qu'observatoire, n'a pas *stricto sensu* vocation à faire de la recherche. Bien sûr nous essayons de valoriser en interne, au sein du laboratoire GEPASUD de l'UPF (Géopôle du Pacifique Sud), les données acquises, sans se mettre en compétition avec de très grands centres disposant de moyens sans commune mesure avec les nôtres, car la géodésie spatiale exige des ressources informatiques lourdes. Nous nous sommes focalisés sur le traitement des données GPS, avec des travaux publiés dans des revues de rang A sur la vitesse de subsidence de Tahiti (post-doc d'Abdelali Fadil) et la modélisation du contenu en vapeur d'eau de la troposphère en zone tropicale (thèse de Jonathan Serafini). Dans ce dernier cadre de la modélisation de la vapeur d'eau atmosphérique, l'OGT a aussi développé en interne des photomètres solaires « low-cost » en remplacement de la station CIMEL/AERONET retirée en fin de vie en 2010, pour permettre la continuité des comparaisons entre les estimations de l'eau précipitable dérivées de l'absorption en bande infra-rouge et des retards de propagation troposphérique pour le GPS.

7. LE FUTUR DE L'OBSERVATOIRE GEODESIQUE DE TAHITI

La communauté scientifique nationale et internationale soutient très activement l'Observatoire Géodésique de Tahiti qui est devenu une pièce importante du réseau géodésique mondial de par sa situation géographique et par le nombre et la qualité des instruments qui y sont installés (dix-huit actuellement). Mais il est clair que le costume de « PPT » puis de « FED » est devenu maintenant inadapté à l'ampleur qu'a prise le site. Il est

important que le soutien à l'OGT se concrétise par une labellisation par l'INSU, ce qui donnera à la structure une meilleure assise nationale et internationale et lui permettra de prétendre à un budget plus diversifié. Sur le plan purement technique, le site du campus d'Outumaoro est lui aussi devenu très étriqué. Il serait aussi normal, que le directeur du site, et une partie du personnel technique, relève d'un statut de physicien ou d'astronome, ou d'un statut CNRS. L'ensemble du personnel permanent est pour l'instant seulement sous statut MENRT.

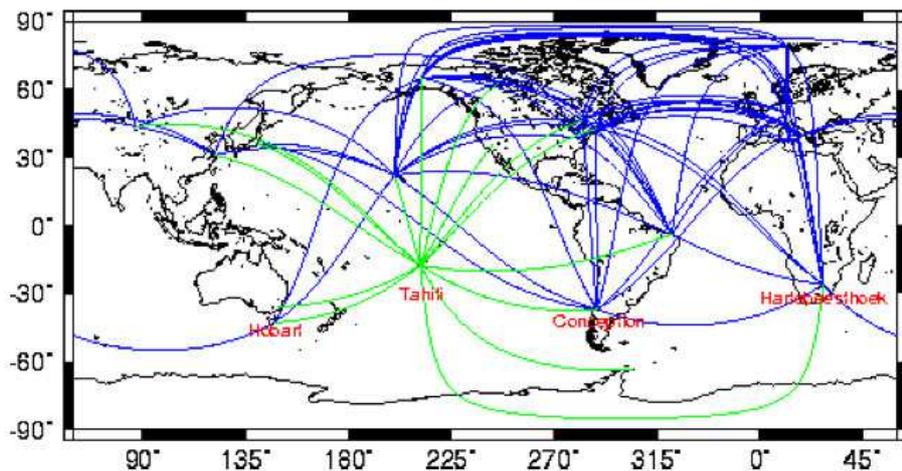


Figure 19 : l'OGT en tant que site VLBI, avec les bases (en vert) qui viendraient compléter le réseau VLBI existant.

La communauté nationale et internationale souhaite l'extension des techniques d'observation au VLBI (Figure 19), et le remplacement de la station laser s'avère nécessaire. Là aussi, la recherche d'un nouveau site pour l'OGT sera appuyée par la labellisation INSU qui fait l'objet de la présente demande. Nous espérons voir l'OGT, avec une station laser flamboyante et une antenne VLBI, sur un site plus adapté dans les cinq ans qui viennent, pour continuer au mieux sa mission dans l'hémisphère Sud.

Document rédigé le 13 mai 2014 par J.-P. Barriot

Transmis sous couvert du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (Comité Directeur du 16 mai 2014).

8. PUBLICATIONS RELIEES A L'OGT SUR 2010-2013 :

Toward a normalized XML schema for the GGP data archive, Alban Gabillon, Jean-Pierre Barriot, Youri Verschelle and Bernard Ducarme, Data Science Journal, Volume 12, 30 April 2013.

Analysis of 4-year observations of the gPhone#59 in Tahiti, O. Francis (U. Luxembourg), J.P. Barriot (U. French Polynesia) and D. Reymond (Atomic Energy Agency), Earth Tides Symposium, Warsaw 2013.

Estimating the 3D Time Variable Water Vapor Contents of the Troposphere from a Single GNSS Receiver, J-P Barriot, J Serafini, and L. Sichoix, Proceedings of ICEO&SI 2013 Conference, June 23-25, Tainan. Taiwan.

Evolution of precipitable water and precipitation over the Island of Tahiti from hourly to seasonal periods, J. Serafini, J.-P. Barriot and L. Sichoix, International Journal of Remote Sensing, accepted.

The Oli cyclone event on the South Pacific island of Tubuai on February 5, 2010, J. Serafini, J.-P. Barriot, and L. Sichoix, submitted to Nat. Hazards Earth Syst. Sci. (under review).

Modeling of tropospheric integrated water vapor content using GPS, radiosonde, radiometer, rain gauge and surface meteorological data in a tropical region (French Polynesia), J. Serafini, J.-P. Barriot, M. Hopuare, L. Sichoix, A. Fadil, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation IV, edited by Tadahiro Hayasaka, Kenji Nakamura, Eastwood Im, Proc. of SPIE Vol. 8523, 852313 (2012).

TIARES Project: -Tomographic investigation by seafloor array experiment for the Society hotspot, Daisuke Suetsugu, Hajime Shiobara, Hiroko Sugioka, Aki Ito, Takehi Isse, Takafumi Kasaya, Noriko Tada, Kiyoshi Baba², Natsue Abe, Yuzo Hamano, Pascal Tarits, Jean-Pierre Barriot and Dominique Reymond, Earth, Earth Planets Space, 64, i-iv, 2012.

The tsunami of March 11, 2011 as observed by the network of tide gauges of French Polynesia, Jean-Pierre Barriot, Jonathan Serafini, Lydie Sichoix, Dominique Reymond and Olivier Hyvernaud, Journal of Marine Science and Technology (TW), Vol 20, No 6, pp 639-646, 2012.

Evidence for a slow subsidence of the Tahiti Island from GPS, DORIS, and combined satellite altimetry and tide gauge sea level records, A. Fadil, L. Sichoix, J.-P. Barriot, P. Ortéga, P. Willis, Compte-rendus Geoscience, Volume 343, Issue 5, pp 331-341, May 2011.

Correlation between Lightning activity and Integrated Water Vapor from GPS signal in Tahiti, P. Ortega, A. Fadil, J. Serafini, J.-P. Barriot, Proceedings of the Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Rio 2011.

Correlation and causal relationship between GPS water vapor measurements and rainfall intensities in a tropical region (Tahiti-French Polynesia), J. Serafini, L. Sichoix, J.-P. Barriot and A. Fadil, Proceedings SPIE 8177, 81770U (2011).

9. REFERENCES GENERALES

- Livre Blanc du GRGS sur les Observatoires Géodésiques Fondamentaux : Enjeux, Contribution française et Avenir, Ed. Exertier et Biancale (2012).
- Global Geodetic Observing System: meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020, Ed. Plag and Pearlman, Springer 2009.
- National Report of France to the XIIIth GLOSS Group of Experts Meeting, Voineson, Pouvreau, Testut, Garayt, Coulomb, Barriot, Wöppelmann, held at PSMSL, Liverpool, 28th Oct.-1st Nov. 2013.
- La montée du niveau des océans par marégraphie et Géodésie Spatiale : Contributions françaises à une problématique mondiale, Wöppelmann, Testut et Créach, Annales Hydrographiques du SHOM, Vol 8, n° 777, 2011.
- ITRF, IERS and GGOS websites.