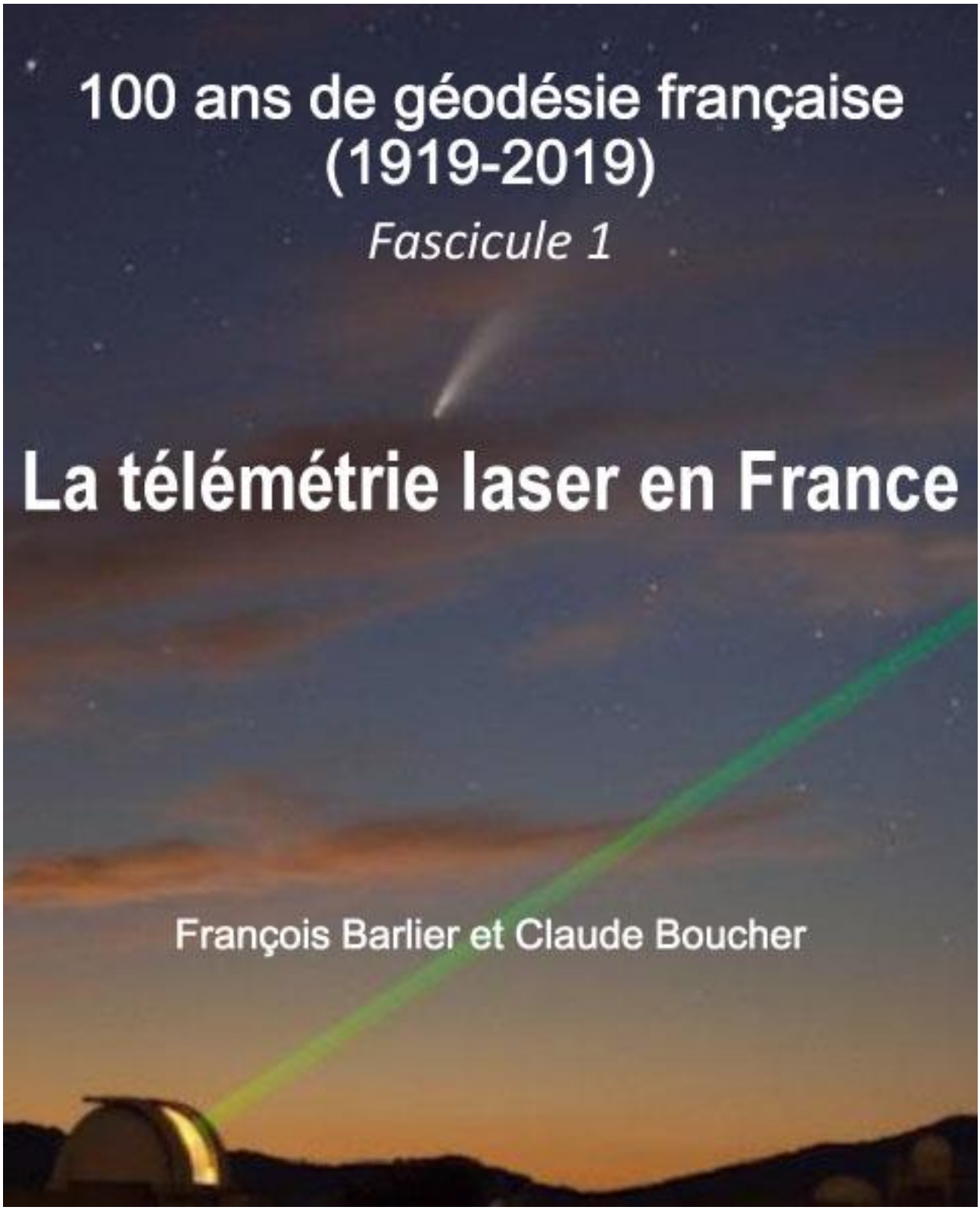
Bureau des Longitudes

Collection du Bureau des longitudes

Volume 9



Collection du Bureau des longitudes - Volume 9

100 ans de géodésie française (1919-2019)

Fascicule 1

La télémétrie laser en France depuis 1964

François Barlier et Claude Boucher

Bureau des longitudes

Photo de couverture © Observatoire de la Côte d'Azur/ Observatoire de Calern, Juillet 2020

© Bureau des longitudes, 2022

ISBN : 978-2-491688-12-7
ISSN : 2724-8372

Préface

2019 a été l'année du centenaire de la création de plusieurs organisations scientifiques internationales dans le domaine de l'astronomie, de la géodésie, de la géophysique et des radiosciences. La France y participa activement dans le cadre d'un groupe de travail du Comité français pour les unions scientifiques internationales (COFUSI) de l'Académie des sciences.

Ces travaux ont permis de souligner le rôle très important des Français dans ces activités, depuis 1919 jusqu'à présent, et notamment les membres du Bureau des longitudes. Ils ont aussi rappelé l'importance de l'activité dans le domaine spécifique de la géodésie.

Dans ce contexte, nous avons souhaité publier dans la Collection du Bureau des longitudes un ensemble de fascicules illustrant le thème

100 ans de géodésie française (1919-2019)

Ce document est le premier fascicule, consacré à la télémétrie laser sur satellite, son début en 1964 et son évolution jusqu'en 2022.

François Barlier	Claude Boucher
Président (2014-2015)	Président (2016-2019)

Table des matières

p. 5 Introduction - Les débuts de la géodésie spatiale

p. 6 Le principe de la technologie laser, l'origine de l'acronyme laser

p. 8 Les premières mesures de télémétrie laser sur satellite artificiel, aux USA et en France

p. 10 Les premiers satellites géodésiques français équipés de réflecteurs laser, les premières campagnes d'observation

p. 12 La première grande campagne géodésique internationale d'observation avec le laser : ISAGEX

p. 14 L'organisation de la géodésie spatiale en France, le GRGS

p. 16 La télémétrie laser en France au CERGA à l'observatoire de Calern

p. 21 La télémétrie laser en France, son futur et ses aspects nouveaux ; le télescope Laser-Lune rénové et devenu Méo (Géoazur /Observatoire de la Côte d'Azur/Université de la Côte d'azur depuis 2020)

p. 23 La station américaine Moblas 8 et son remplacement, pour faire de Tahiti une station géodésique fondamentale pour les réseaux de référence internationaux

p. 26 Le transfert de temps par lien laser

p. 28 L'international « Satellite Laser Ranging, l'ILRS » ou la coopération internationale en matière de télémétrie laser

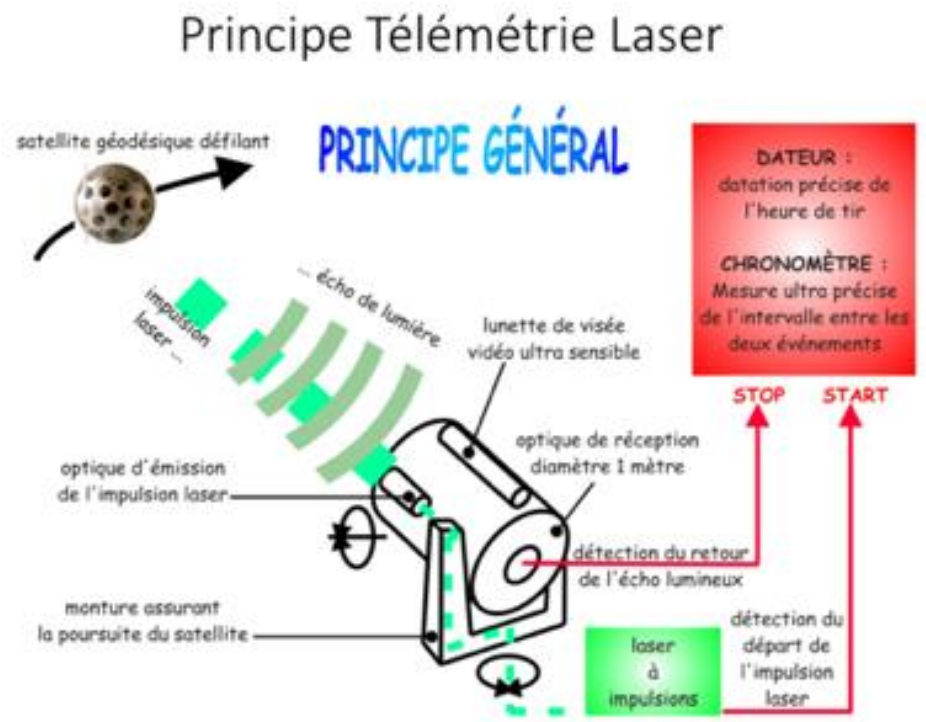
Introduction
Les débuts de la géodésie spatiale

Le lancement du premier satellite artificiel, Spoutnik 1 par l'URSS le 4 octobre 1957 fut un grand choc et une grande émotion tant dans le monde aéronautique, scientifique que dans le grand public. Certes, il avait été annoncé lors de réunions internationales qu'un tel lancement était programmé mais sans aucune date précise; ainsi les Américains avaient bien commencé à préparer le développement d'un réseau de chambres photographiques Baker Nunn pour l'observer et le positionner par rapport aux étoiles mais le lancement d'un satellite artificiel apparaissait encore assez lointain. Ce lancement russe fut donc un moment de surprise et d'émotion. Dès le début on chercha à repérer le satellite artificiel, sorte d'une nouvelle Lune dans le ciel, soit par des observations visuelles par rapport aux étoiles à l'aide de jumelles, soit à l'œil nu, soit en utilisant un théodolite utilisé par des géomètres, soit enfin par des caméras photographiques adaptés pour suivre le mouvement des satellites. Ces dernières apparurent comme susceptibles d'obtenir la position du satellite de la manière la plus précise, en se référant aux catalogues existants d'étoiles, quitte à les compléter ou à les améliorer. On pouvait ainsi déterminer la direction dans laquelle se trouvait le satellite à un instant donné et connaître les coordonnées équatoriales du satellite, coordonnées couramment en usage en astronomie et en mécanique céleste. La précision de la direction restait limitée par un certain nombre de facteurs comme la précision du catalogue d'étoile, la vitesse relativement grande du satellite dans le ciel, la turbulence atmosphérique, la difficulté d'enregistrer les temps de la mesure avec une précision suffisante et cohérente avec la précision des coordonnées angulaires. On chercha alors à déterminer en plus par d'autres moyens de mesure de type radar la troisième coordonnée de la position du satellite, à savoir la distance Terre-satellite; on pouvait espérer obtenir la position satellite dans ses trois dimensions entre quelques mètres et quelques décamètres, selon les protocoles utilisés; cependant les premiers résultats ne furent pas très convaincants sur le plan de la précision et de l'exactitude. L'arrivée de la technologie laser pour déterminer les distances de manière beaucoup plus précise allait bouleverser et changer profondément la situation du repérage du satellite et aussi de la Lune dans l'Espace.

Le principe de la technologie laser, l'origine de l'acronyme laser

La technologie laser (*light amplifier by stimulated emission by radiation*) dont l'acronyme va être expliqué est fondée sur les lois et le formalisme de la physique quantique qui gouvernent l'infiniment petit. Au 17ème siècle, à la suite des grands travaux fondateurs de Newton en mécanique céleste on penchait avec lui pour une théorie corpusculaire de la Lumière sauf cependant Christian Huygens, mais qui ne fut pas très écouté à l'époque. En 1800, donc plus tard, l'expérience célèbre et très connue des fentes de Young, mis à l'honneur la valeur explicative et prédictive d'une théorie ondulatoire de la Lumière. Les travaux d'Arago, Fresnel, Fizeau en France, puis ceux de Maxwell en Angleterre et d'autres chercheurs confirmèrent la valeur et l'intérêt explicatif fondamental de l'utilisation de cette théorie dans de nombreuses études. Cependant les travaux en Allemagne de Planck en 1900 puis ceux d'Einstein en 1905 remirent à nouveau en cause la valeur totalement explicative de cette théorie ondulatoire dans un certain nombre d'expériences connues et qui devinrent célèbres, ainsi celles concernant l'émission du corps noir, celle concernant l'effet photoélectrique; il fallait se rendre à l'évidence : l'aspect corpusculaire était une réalité à prendre impérativement en compte, en complément de son aspect ondulatoire, et cela aboutit au concept purement quantique de la dualité « ondes particules » dont l'interprétation en terme de réalité physique a fait l'objet de nombreux débats et études. Pour Planck, l'énergie lumineuse s'échange non de manière continue mais par paquet d'énergie qu'il appellera quanta. Einstein montra ensuite que chaque quanta de lumière a une énergie bien déterminée égale au produit de la fréquence de l'onde lumineuse associée par une constante qui fut appelée précisément la constante de Planck. D'abord en 1913, puis encore en 1922 dans le cadre des études sur l'interaction matière-rayonnement, Niels Bohr présenta un modèle d'atome comprenant un noyau autour duquel gravitent sous l'effet des forces électriques des électrons sur des orbites bien définies correspondant à des niveaux très précis d'énergie. Dans ce schéma les électrons ont la possibilité de passer d'une orbite d'énergie supérieure à une orbite d'énergie inférieure en émettant un photon et inversement un atome peut absorber un photon d'une certaine énergie précise, faisant passer un électron sur une orbite d'énergie supérieure. Tout cela est aujourd'hui bien compris, développé et pris en compte. Dans les années qui ont suivi de nombreux travaux ont en outre précisé le formalisme et les lois de la physique quantique profondément différente de la physique classique (de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Dirac et bien d'autres). Pour comprendre et en revenir à la technologie du laser, Il faut ajouter un troisième processus d'échange matière-rayonnement, il s'agit de l'émission stimulée prédite par Einstein en 1917. En règle générale, les électrons ont tendance spontanément à redescendre au niveau fondamental d'énergie inférieure de l'atome qui se trouve ainsi le plus peuplé et cela en émettant un photon. En revanche et de manière inverse si on arrive à établir ne fusse que temporairement une inversion de population c'est à dire arriver à un état où le plus grand nombre d'électrons se trouve dans des orbites d'énergie supérieure, l'absorption d'un photon peut alors déclencher dans le processus de re-descente spontanée d'un électron à un niveau d'énergie inférieure l'émission d'un second photon amplifiant ainsi l'émission de rayonnement de l'atome, d'où vient la signification de l'acronyme. Cela fut réalisé par ce qu'on appelle le pompage optique; il fut découvert et développé en France par Alfred Kastler (prix Nobel de physique 1966) et il permit de générer une telle inversion de population des électrons dans les différents niveaux d'énergie supérieure. Les travaux fondateurs aux Etats-Unis de Charles Townes dans ce domaine de l'optique (prix Nobel de physique 1964) permirent alors de mettre au point les différents aspects de la technologie laser qu'on ne peut détailler ici dans cette note très brève. C'est sur ces bases que fonctionna le premier laser, créé en 1960 par Theodore Maiman (1927-2007) : le laser à rubis. Le résultat est une impulsion lumineuse de puissance extrêmement élevée mais extrêmement brève et une divergence du faisceau lumineux

extrêmement petite (voir plus loin les caractéristiques du premier télémètre laser en France). Ainsi finalement fut réussie la mise au point de la technologie laser à des fins de télémétrie.

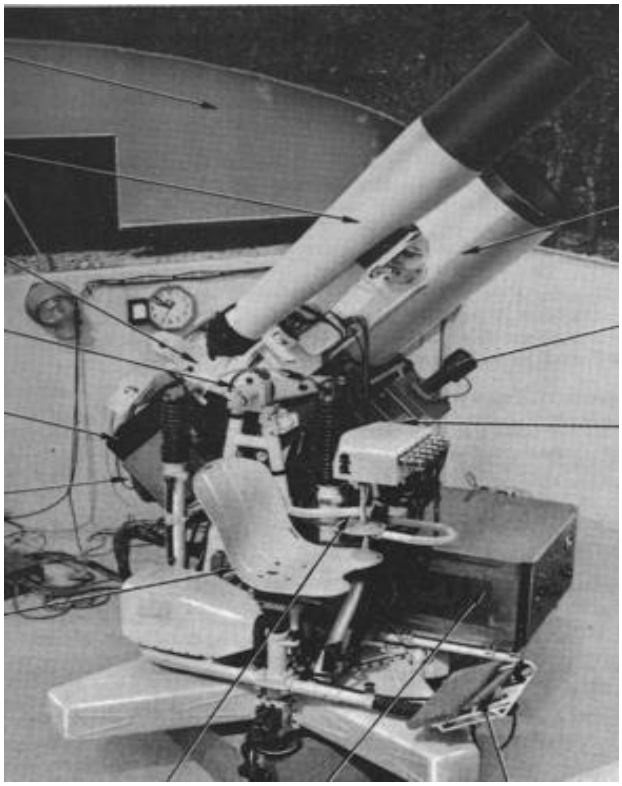


Crédit observatoire de la côte d'Azur – Alain Spang

Les premières mesures de télémétrie laser sur satellite artificiel, aux USA et en France

En France, le premier laboratoire qui détermina la distance par mesure du temps d'aller-retour d'une impulsion laser fut le service d'Aéronomie du CNRS à l'Observatoire de Haute Provence; le satellite américain BEB, premier satellite équipé de trièdres réfléchissant le faisceau laser dans la direction incidente, avait été lancé en 1964 et offrait une première et unique opportunité pour réaliser ces mesures de distances par télémétrie laser à partir de stations au sol, technique appelée en anglais SLR (*Satellite Laser Ranging*).

Première station de télémétrie laser à l'observatoire de Haute Provence, montée sur un affut de matériel militaire



Crédit observatoire de Haute Provence

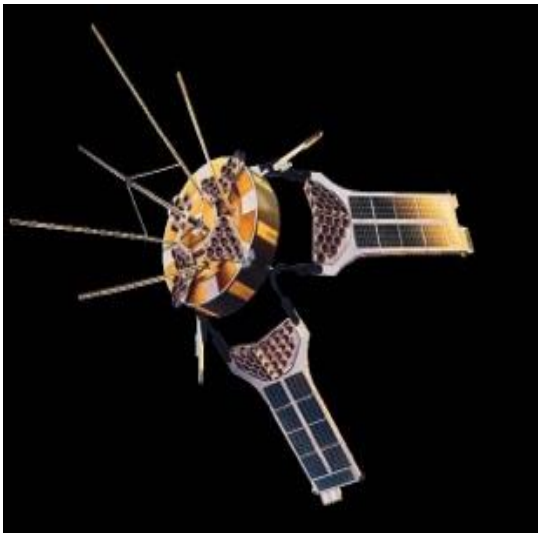
R. et M. Bivas à l'Observatoire de Haute Provence installèrent leur équipement sur une ancienne tourelle militaire de tir d'où ils pouvaient poursuivre visuellement le déplacement du satellite par un simple système optique. Le 25 janvier 1965, peu de temps après le succès d'une équipe du Goddard Space Flight Center aux Etats-Unis qui fut la première dans le monde à réussir des tirs laser en octobre 1964, ils obtinrent à leur tour les premiers échos de retour d'impulsions laser et ainsi les premières mesures de distance en mesurant avec grande précision les instants de départ et de retour des impulsions laser. L'énergie de l'impulsion laser était alors d'un joule pour une durée de 10 nanoseconde, et une fréquence de répétition au mieux d'une impulsion par seconde avec une divergence angulaire du faisceau lumineux de quelques 10-4 radians. La précision de la mesure de distance était de l'ordre de 1,20 mètre.

On donne ici une référence sur les débuts du laser et de la coopération franco-américaine qui fut essentielle pour les premières applications géodésiques.
« *The Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) and the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) contributions to the International Laser Ranging Network,*
Michael Pearlman, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
Gérard Brachet, Ancien chef de projet ISAGEX (1971-1972), CNES
Michel Lefebvre, Ancien chef du département de géodésie spatiale, 1971-1978, CNES
François Barlier, Co-I of Diademe satellites experiment, 1967-1970, Astrogeo/GEOAZUR
Pierre Exertier, Astrogeo/GEOAZUR ».

Au mois de mai suivant, en 1965, à l'Assemblée du Cospar à Buenos Aires (*Cospar ou Commitee on Space Resarch*, Comité scientifique international sur la recherche spatiale, sous l'égide du Comité international pour la Science ou ICSU), l'équipe française avec les ingénieurs du CNES présenta la première orbite calculée en utilisant les mesures de distances obtenues par laser sur plusieurs passages successifs du satellite. Ce fut un succès. En parallèle et immédiatement après ces résultats, le CNES fit développer ses propres trièdres réflecteurs laser qui seront placés sur les satellites Diadèmes 1 et 2 et lancés depuis Hammaguir en Algérie en février 1967. D'autres stations laser seront alors construites pour réaliser des mesures de distance Sol-Satellite à partir de plusieurs points du contour méditerranéen et aussi en Afrique en observant les satellites Diadème et les nouveaux satellites américains équipés de réflecteurs laser. Elles seront installées sur des grandes remorques pour être plus facilement transportables outre-mer.

Les premiers satellites géodésiques français équipés de réflecteurs laser - Les premières campagnes d'observation

Satellite Diadéme lancé depuis Hammaguir en Algérie en février 1967



Crédit CNES

En parallèle à ces recherches techniques sur une instrumentation sol, le CNES développa aussi la construction de satellites à vocation de géodésie spatiale. Le satellite Diapason fut ainsi construit et lancé en mars 1966 et permettra d'abord de tester l'utilisation des techniques de mesures Doppler en géodésie spatiale: deux fréquences pilotées par un OUS « Oscillateur Ultra Stable » seront embarquées dans ce but à bord du satellite Diapason et seront reçues à Nice et à Beyrouth par des stations au sol, (fournies par la Société française de télécommunication la SAT) ; ces stations-sol seront également équipées de « OUS ». Les mesures Doppler recueillies et faites au niveau du sol à l'aide des récepteurs seront ensuite analysées, la précision sera évaluée, et notamment la stabilité des oscillateurs. Dans un deuxième temps, l'ensemble des mesures sera utilisé pour le calcul des positions relatives des deux stations avec une précision de l'ordre du décamètre voire seulement de quelques décamètres. On était encore loin de la précision métrique mais c'était un début et un apprentissage pour une expérience limitée dans le temps et avec seulement deux stations réceptrices.

Diadème 1 et 2, seront ensuite lancés les 8 et 17 février 1967 ; ils auront alors la même instrumentation type Doppler que Diapason, mais en plus des réflecteurs lasers seront implantés sur toutes les surfaces disponibles. Cette fois, ce seront les mesures Doppler et laser qui sont utilisées conjointement et ce dans une campagne géodésique à plus grande échelle pour assurer la liaison Europe -Afrique, avec la participation de la communauté scientifique nationale et internationale, dans le cadre de la "RCP 133" (Recherche coopérative sur programme " du CNRS) dirigée par Jean-Jacques Levallois, ingénieur général de l'IGN (Institut Géographique National). Les résultats seront beaucoup plus satisfaisants avec une précision comprise entre quelques mètres et un décamètre et constitueront un progrès sur le plan des liaisons géodésiques alors existantes.

Trois sites seront équipés de stations laser et Doppler à partir de 1967: à l'Observatoire de Haute Provence, en France, à Stéphanion en Grèce et à Colomb Bechar en Algérie (cette dernière station sera mise en œuvre par l'ONERA, l'Office national d'études et recherches aérospatiales). Il faut ajouter dans cette campagne les contributions de la station laser de la NASA à Greenbelt (Maryland) et celle de la station du Smithsonian Astrophysical Observatory- le SAO - à Organ Pass (Washington D.C.) sans oublier les contributions photographiques du réseau américain SAO de Baker Nunn.

Un deuxième programme international de géodésie après le programme Diadème suivit immédiatement avec le lancement de Geos 2 par la NASA en 1968. Les systèmes SLR du CNES utilisés furent alors situés à l'Observatoire de Haute Provence et sur le site militaire de la Marine de San Fernando en Espagne où était déjà installée une station photographique Baker Nunn du SAO. Ceci amorcera une longue et fructueuse coopération entre la France et l'Espagne. Les systèmes SLR de la NASA fonctionnèrent alors à Greenbelt (Maryland) à Rosmund (Caroline du Nord), celui du SAO à Organ Pass (Washington D.C.).

Avec les progrès réalisés en télémétrie laser, l'idée vint de photographier les échos laser de retour en prenant avantage de l'existence d'un grand télescope de Schmitt à l'observatoire de Meudon à côté d'une station laser émettrice installée par l'Onera ; ce fut un succès , on avait ainsi la possibilité de déterminer les coordonnées angulaires du satellite sur le fond des étoiles en même temps que la distance sol- satellites, soit les trois coordonnées du satellite dans une même référence terrestre. C'était l'aboutissement d'une recherche et d'un espoir. Cependant ce succès fut sans lendemain tant les progrès continus dans la précision de la mesure de distance finit rendre caduque l'intérêt de les mélanger avec les coordonnées angulaires qui elles avaient atteint en revanche leur limite très tôt suite à la difficulté de les positionner avec une grande exactitude par rapport aux étoiles, technique aussi très lourde pour sa mise en œuvre, faut-il le souligner.

Méthode mixte photo-laser à l'ONERA

Station mixte de l'ONERA permettant simultanément des tirs laser sur sarellite et leur photographie sur fond d'étoiles

Photographie des tirs laser par la caméra du dispositif de l'ONERA

Crédit ONERA

La première grande campagne géodésique internationale d'observation avec le laser : ISAGEX

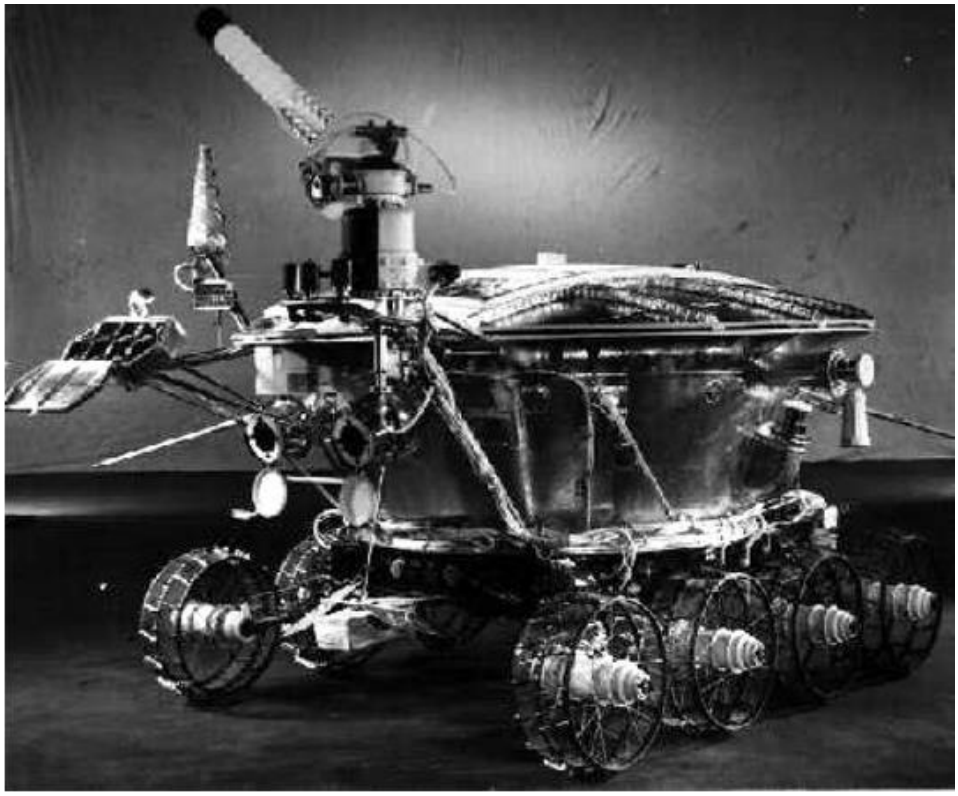
En ce qui concerne les mesures par laser, il faut noter qu'en seulement quelques mois, les trois stations laser françaises impliquées dans les campagnes d'observation auront effectué plus de 70 000 mesures de distance. L'impact de cette performance sera considérable, en France, où elle contribuera à la décision de construire une nouvelle station laser de performance très améliorée qui sera développée un peu plus tard au CERGA à Grasse (Centre d'études et de recherches géodynamiques et astronomiques); notons ici que ce centre entièrement nouveau en construction débuta de manière opérationnelle en octobre 1974. Les résultats des premières campagnes d'observation par laser incitèrent alors à multiplier les contacts multilatéraux en vue de l'organisation d'une campagne de mesures de distances par télémétrie laser mais cette fois à l'échelle mondiale, et notamment en collaboration avec les Etats-Unis (campagne ISAGEX-voir plus loin-). Ces contacts seront bien facilités par le crédit obtenu pour les équipes françaises par ces 70 000 mesures laser, mesures qui seront montrées et distribuées avec largesse. Pour résumer, les Français impliqués furent alors appelés « *The French Laser Men* ». Ces succès leur valurent une invitation (J.C. Husson et F.Barlier) au premier grand colloque sur les applications géophysiques et océanographiques de la géodésie spatiale à Williamstown en juillet 1969, colloque présidé par William Kaula; les collègues du Pic du Midi qui travaillaient alors dans leur domaine sur des tirs laser sur la Lune seront aussi invités (A. Orsag et O. Calame). Rapellons que la première mission Apollo, ayant déposé les premiers réflecteurs laser sur la Lune alunit le 20 juillet 1969 ; ce colloque de Williamstown fut vraiment un premier colloque fondateur et visionnaire des applications de la géodésie spatiale aux géosciences et au système Terre-Lune.

Le "leadership "des "*French Laser Men*" placera donc de fait la France en position très favorable pour coordonner une expérience intensive de poursuite de satellites équipés de réflecteurs laser par l'ensemble des stations existantes. Le projet ISAGEX (*International Satellite Geodetic Experiment 1970-1972*- coordonné par G. Brachet-) a conforté la place occupée par la Communauté française sur le plan international. ; il a aussi fourni pour la première fois un jeu important de mesures de distance par laser. Le CNES ne s'est alors pas seulement contenté de coordonner l'expérience: il a ajouté une cible satellite laser supplémentaire en équipant le satellite Peole de réflecteurs laser. Peole était un satellite préparatoire à la mission spatiale Eole d'études des vents atmosphériques. Ce satellite lancé depuis Kourou le 24/12/1970 fut placé sur une orbite d'inclinaison 15 degrés. Peole demeura alors le seul satellite laser circulant dans cette zone équatoriale et tropicale de basses latitudes! Afin d'accroitre la couverture des observations à ces latitudes proches de l'Equateur, une caméra Baker Nunn du SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory) et une station laser mobile française seront alors installés pendant environ un an à Dakar en 1971. Ces différentes campagnes hors de métropole et toutes celles qui suivront, seront menées par une équipe laser animé par J. Gaignebet, avec notamment P. Caumette, J.L Hatat, et beaucoup d'autres ; cette équipe sera ultérieurement rattachée au GRGS et au CERGA, (voir plus loin). Deux systèmes français de télémétrie laser demeureront en fonctionnement permanent en 1972, un fixe à l'Observatoire de Haute Provence en France et un autre mobile à l'Observatoire Royal de la Marine à San Fernando en Espagne. L'expérience ISAGEX avait été recommandée lors de la XIIIe réunion du COSPAR à Leningrad en 1970. Cette expérience utilisant la poursuite des satellites par télémétrie laser et par des ces cameras photographiques aura finalement été fondée sur une coopération entre 15 pays participants. Les systèmes de télémétrie auront poursuivi huit satellites munis de rétro réflecteur laser. La campagne fonctionnera toute l'année 1972 ; une station laser mobile française sera encore exploitée en complément à la fin de la campagne pendant plusieurs mois à Oujgorod en Ukraine,

Oujgorod faisant alors partie de l'URSS. Les résultats scientifiques sur l'amélioration de nos connaissances sur le champ de gravité terrestre et sur l'établissement d'un système de référence terrestre international furent à la hauteur des investissements consentis.
A noter qu'au milieu des années 1970, un système laser français mobile a aussi été mis en service sur le site de Debre Zeit en Ethiopie pour aider à assurer la couverture d'une campagne de suivi par technique laser aux basses latitudes mais a dû être abandonné pour des raisons de situation politique locale dégradée ; en 1973 une autre campagne aura encore lieu en Mauritanie à Nouakchott.

Mesures de distance Terre-Lune par télémétrie laser- coopération avec l'URSS

Rover soviétique sur la Lune sur lequel étaient installés les panneaux de réflecteurs laser construits en France



Crédit inter cosmos – URSS –

Dans ce contexte positif pour la communauté laser française et en parallèle avec les mesures laser sur satellites, le CNES à la demande des Soviétiques conclut alors un accord pour que deux panneaux de rétro réflecteurs laser français réalisés par la société Aérospatiale de Cannes soient déposés sur la Lune dans le cadre de leur programme Lunokhod, ce qui fut fait avec succès en 1970 (mission Luna 17, alunissage le17 novembre 1970) et en 1973 (mission Luna 21, alunissage le 15 janvier 1973). Sur chaque panneau il y avait 14 coins de cube de 11 cm de côté- voir la photo dans le paragraphe suivant. Les panneaux étaient installés sur des mobiles télécommandés ou rovers d'une masse de près de une tonne, rovers pouvant se déplacer sur plusieurs km ce qui constituait alors une grande Première dans le cadre des missions spatiales de l'époque; notons que les deux panneaux sont aujourd'hui toujours et encore très positivement utilisés, 50 ans plus tard. Cette activité a fait à l'époque la promotion de l'industrie française, que ce soit pour les réflecteurs (Société Aérospatiale à Cannes), ou pour les lasers (laser Quantel).

L'organisation de la géodésie spatiale en France, le GRGS

Plusieurs propositions de missions spatiales vont alors être soumises par une communauté française qui se trouva légitimement réunie suite au succès de la RCP du CNRS; les instituts participant à cette RCP prirent en effet la décision de fonder en 1971 un groupement de recherche coopérative avec une structure la plus légère possible renouvelable d'année en année, le GRGS (Groupe de recherches de géodésie spatiale); il fonctionne encore ainsi près de 50 ans plus tard. Le Groupe de recherche de géodésie spatiale (GRGS) est aujourd'hui un regroupement de 11 organismes publics (CNES, IGN, INSU, SHOM, Bureau des longitudes, Observatoire de Paris, Observatoire Midi-Pyrénées, Observatoire de la Côte d'Azur, Université de la Polynésie française, ESGT du CNAM, EOST ou Ecole et observatoire des Sciences de la Terre à Strasbourg) fournissant leurs chercheurs, leurs ingénieurs, leur techniciens, leurs personnels administratifs (plus de 100 personnes), chaque organisme continuant de gérer de manière autonome son personnel.

Le GRGS (Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale) fut officiellement créé le 17 février 1971 à 16h au Bureau des Longitudes, lors d'une réunion regroupant :

le président du Bureau des longitudes (BdL ; A. Gougenheim),
le président du Centre national d'études spatiales (CNES ; J-F. Denisse),
le directeur de l'Institut géographique national (IGN ; G. Laclavère),
le directeur de l'Observatoire de Paris (OP ; J. Delhaye).
Ces quatre directeurs signataires se constituèrent ce même jour en Comité directeur du GRGS et adoptèrent le principe de base : une simple lettre co-signée donnant les éléments constitutifs du GRGS et les règles de fonctionnement soit :

un Comité directeur,
un Conseil scientifique (liste désignée ce jour),
un Directeur exécutif désigné pour trois ans renouvelables (J. Kovalevsky au départ), assisté d'un secrétaire administratif de l'IGN J. Villecrose.

Parmi les premières propositions acceptées il est intéressant de noter et de décrire les missions Castor et Starlette qui seront lancées en 1975 et qui illustrent la diversité des objectifs que l'on a pu atteindre dans ce cadre du GRGS et aussi les coopérations qui en résulteront sur le plan européen et mondial.

Le satellite Castor et l'accéléromètre Cactus à bord

Le satellite Castor fut lancé en vue de tester en orbite l'accéléromètre spatial différentiel Cactus (Capteur accéléromètrique capacitif à trois axes ultra sensibles) développé par l'ONERA. Après un premier lancement infructueux, il sera lancé avec succès depuis Kourou le 15 mai 1975. Cette mission constitue le point de départ d'une nouvelle filière d'équipement "accéléromètres spatiaux ultrasensibles", permettant notamment la mesure des forces non gravitationnelles agissant sur un satellite. Cela permettra de developper des modèles de densité, de température et de composition chimique de l'atmosphère supérieure de la Terre (la thermosphère); cela permettra aussi plus tard de mesurer les variations temporelles du champ de pesanteur dans le cadre des missions américano-allemandes Grace en 2002 (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) puis Grace Follow-On en 2018 ou encore les mesures du gradient de gravité le long de la trajectoire du satellite pour déterminer le champ de gravité terrestre avec une très haute résolution spatiale, mission Goce de l'ESA en 2009 (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)* ou enfin finalement de s'assurer de la vérification avec une très haute précision encore jamais atteinte du principe d'Equivalence de

la Relativité Générale (à environ 2 10-14 en précision relative dès le début de la mission et finalement à quelques 10-15 après le traitement de toutes les données, soit un gain d'un facteur 100 par rapport aux mesures faites depuis le sol), c'est la mission Microscope lancée en 2016 (Microsatellite à traînée compensée pour l'observation du principe d'équivalence). Toutes ces missions généreront de très nombreuses coopérations internationales (ONERA, Géoazur/Observatoire de la Côte d'Azur, CNES, ESA, DLR).

Satellite géodésique Starlette lancé depuis la base spatiale de Kourou en Guyane en 1975 et recouvert de rétro réflecteurs laser

Crédit CNES

Starlette est un satellite optimisé pour tirer le meilleur parti des observations de distance par technique laser (Satellite de taille adaptée avec réflecteurs lasers pour les études de la Terre). Ce satellite de 24 cm de diamètre, d'un poids de 48 kg est recouvert de 60 rétroréflecteurs coin de cube. Mis sur orbite le 6 février 1975 par un tir d'essai d'une nouvelle version du lanceur Diamant, version BP4, (altitudes de la trajectoire variant entre 812 et 1114 km avec une inclinaison sur l'équateur de 49°82) ; les mesures sur Starlette faites depuis plus de 40 ans ont toujours eu un poids important dans les déterminations des paramètres du champ de gravité de la Terre, notamment dans la détermination de l'effet quantitatif des marées terrestres et océaniques sur la trajectoire des satellites artificiels. Starlette est et restera dans le livre des records comme le champion toutes catégories du concept: "*Faster, Better, Cheaper, et ... Longe*r" ! En effet: « *Faster* »: décision en 6 mois; « *Better* »: 40 ans de mesures déjà utilisées; « *Cheaper*: » 300 000 $, hors prix du lanceur; et « *Longer* »: durée de vie 10 000 ans environ ! Les mesures laser sur Starlette font toujours partie des programmes internationaux de géodésie de l'ILRS (voir plus loin). Il sera suivi le 26 septembre 1993 par le lancement d'un frère jumeau le satellite Stella mais dont l'inclinaison de la trajectoire sur l'équateur sera de 98°68 et dont les altitudes varieront entre 804 et 812 km.

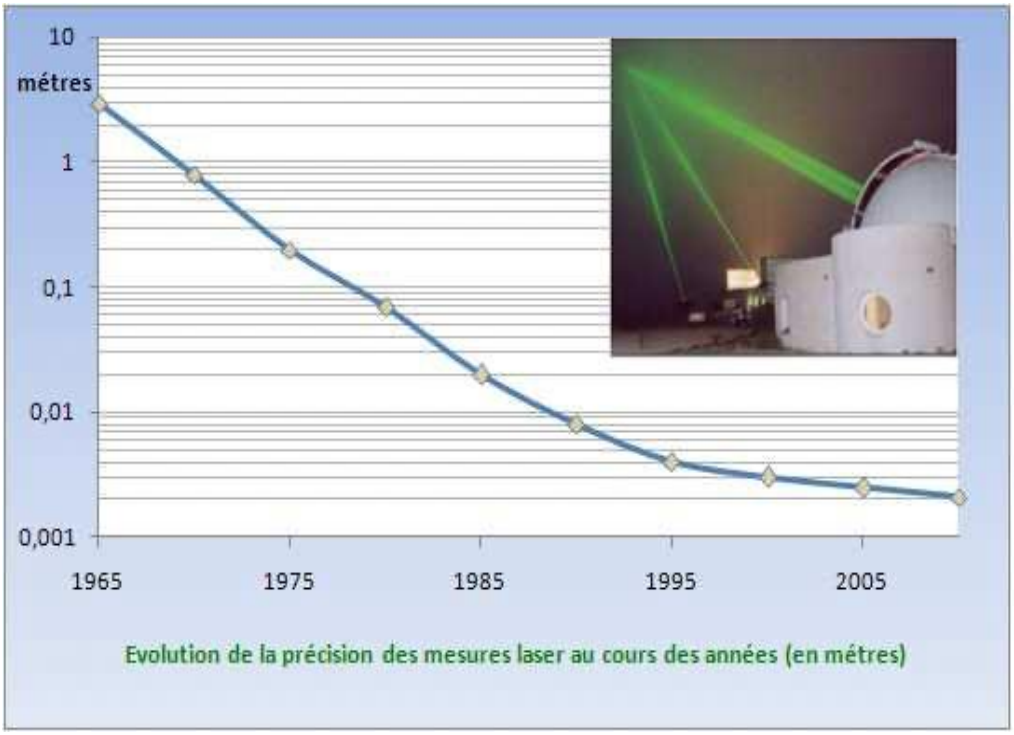
Sur le site Internet du GRGS, on peut retrouver l'ensemble des publications et des rapports d'activité des différentes équipes au cours des années aussi bien que les conclusions des groupes d'évaluation où des nouveaux projets spatiaux, à titre d'exemple le nouveau projet MARVEL où seraient installés des réflecteurs laser pour que les quatre techniques fondamentales de géodésie spatiale (Laser, Doris, GNSS, VlBI) puissent être utilisées conjointement, ce qui est essentiel pour l'étude des biais et des erreurs systématiques des différentes techniques géodésiques. La mission MARVEL (*Mass And Reference Variations for Earth Lookout)* de gravimétrie spatiale et de détermination du système de référence qui était entrée en phase zéro, au CNES début 2020, a été malheureusement arrêté en octobre 2021pour différentes raisons et dans le contexte actuel il n'est pas du tout sûr que le projet redémarre, sauf peut-être dans un autre contexte de financement et de coopération. Le lien internet du site du GRGS localisé à Toulouse est donné ci-dessous.
https://grgs.obs-mip.fr/sedoo-type-document/poster/

La télémétrie laser en France au CERGA à l'observatoire de Calern

Mesures régulières et systématiques de télémétrie laser sur satellites équipés de rétro réflecteurs

Dans ce contexte comme on l'a déjà dit il y eut une action très importante en France, à savoir la création du CERGA (Centre d'études et de recherches géodynamique et astronomiques) sous la direction de Jean Kovalevsky, CERGA qui débuta de manière opérationnelle à Grasse en 1974, et où une nouvelle génération de station laser de performance supérieure à la toute première fut développée et exploitée en France. La précision des mesures sera alors au départ de l'ordre de 20 cm avant finalement de tendre vers le niveau centimétrique. La station qui est devenue opérationnelle vers 1980, sera conçue pour des mesures de nuit et de jour.

Trois stations de télémétrie laser installés sur le plateau de Calern tirant simultanément sur Lageos à la fin des années 90. La figure donne la décroissance des incertitudes dans les mesures au cours du temps pour tendre vers le niveau centimétrique et aujourd'hui avec les nouvelles générations de stations laser vers le niveau millimétrique.



Crédit observatoire de la Côte d'Azur

Dans cet effort d'amélioration de la précision des mesures de télémétrie au plateau de Calern, le laser rubis sera remplacé le plus rapidement possible par un laser Nd-YAG dès 1983 portant de fait la précision à quelques centimètres près (F. Pierron avec l'équipe locale de Calern autour de cette station, J. Paris, J.L. Hatat, M. Laplanche, E. Cuot, M. Furia, H. Viot, A. Aimar et d'autres contributeurs). Ceci sera réalisé par le passage au laser YAG mode-locké avec des impulsions de 100/200 picosecondes, une fréquence de tir 5 à 10 Hertz, une impulsion de 100 millijoules d'énergie. Ce nouveau système sera utilisé régulièrement jusqu'à la fermeture de la station en 2005. Le télescope d'un mètre de diamètre sera alors transféré en Afrique du Sud dans le cadre d'une nouvelle coopération à Hartebeesthoek.

En parallèle des études de recherche et développement seront menées pour se préparer à une évolution de la télémétrie laser vers une précision de quelques millimètres en utilisant un laser avec une largeur d'impulsion de 30 picosecondes, une cadence de tir de 10-50 Hz, et permettant l'utilisation de deux longueurs d'onde pour les corrections de propagation dans l'atmosphère.
En 2003 des premières mesures expérimentales seront également faites avec des lasers Khz, une largeur d'impulsion de 10ps, et une capacité d'utiliser en parallèle plusieurs longueurs d'ondes pour encore mieux prendre en compte les perturbations des mesures de distance par l'atmosphère terrestre. Cet effort se poursuit encore aujourd'hui de manière concrète avec l'acquisition très récente d'un nouveau laser très performant dans ce domaine (2020) mais dans un cadre tout à fait différent et fondé désormais sur l'utilisation du télescope Laser-Lune profondément rénové (aujourd'hui télescope appelé Méo voir plus loin).

Mesures de télémétrie laser sur des réflecteurs lunaires à l'observatoire de Calern

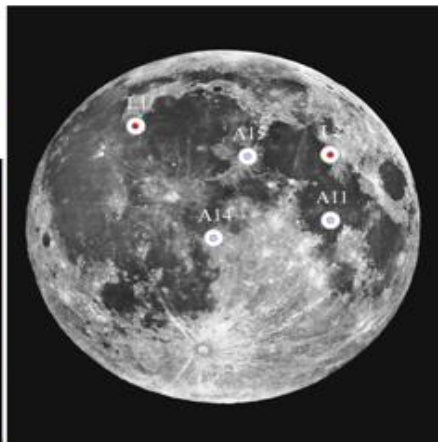
Parallèlement, au début du CERGA une station de télémétrie laser Lune (LLR) sera aussi construite et exploitée au CERGA pendant toute cette période, avec comme objectifs d'obtenir des échos sur les réflecteurs déposés sur la Lune par les astronautes américains lors des missions Apollo (lancements des missions : Apollo 11, le 16 juillet 1969 ; Apollo 14, le 31 janvier 1971 ; Apollo 15, le 26 juillet 1971) ; il y aura aussi les panneaux de réflecteurs laser déposés par les Rovers automatiques soviétiques autour des années 70 (Lancement des missions : Luna 17, le 10 novembre 1970 et Luna 21, le 8 janvier 1973) ; la durée du voyage vers la Lune sera en général entre quatre et cinq jours.

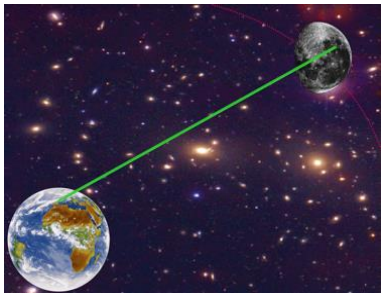
La station Laser-Lune, LLR, du CERGA utilisera un télescope récepteur de grand diamètre 1,54 m, ce qui lui permettra d'obtenir de très nombreux résultats, hier et encore aujourd'hui, de mesures de distance Terre-Lune la plaçant très largement en tête des stations ayant obtenus le plus de résultats dans ce domaine, grâce aussi à de nombreux acteurs qui se sont succédés au cours du temps (C.Veillet, J-F. Mangin, J-M. Torre, D. Féraudy, D. Albanese, H. Mariey, M. Aimar, D-H Phung, E. Samain, B. Chauvineau et encore beaucoup d'autres anciens contributeurs du LLR) ; cela a conforté de nombreuses études (ainsi encore récemment nouveaux résultats sur la rotation de la Lune et sa composition par exemple existence et caractéristiques d'un noyau liquide voir les références plus loin). Cette station Laser-Lune remplaçait alors une première station qui avait obtenu des premières mesures avec succès à l'Observatoire du Pic du Midi, mais dont l'obtention de résultats opérationnels était difficile compte tenu du caractère haute montagne de cette station. La précision des mesures de télémétrie sont aujourd'hui de niveau centimétrique et tendent vers le niveau millimétrique. Il est important de souligner que toutes les mesures acquises en télémétrie Laser seront toujours échangées instantanément avec les différents acteurs des projets grâce à des banques de données facilement accessibles, en Europe (*EDC, Eurolas Data Center at DGFI, Munich, Germany*) et aux Etats-Unis (*CCDIS, Crustal Dynamics Data Information System at NASA GSFC, Greenbelt, MD USA*), banques toujours en fonction. On reviendra encore plus loin l'évolution du télescope Laser-Lune qui deviendra alors plus tard le télescope MéO (Métrologie Optique) après une rénovation opto-mécanique complète faite en 2005 dans le cadre du projet T2000 soutenu par la région PACA, le CNES et l'INSU.

Station LLR du CERGA

Réflecteurs sur la Lune

Positions des réflecteurs





Crédit observatoire de la Côte d'Azur

La station laser ultra mobile pour l'étalonnage des altimètres radar au-dessus des océans

Comme on doit le souligner, la France n'a pas cessé de poursuivre des recherches et des développements dans ce domaine et elle continue encore de le faire aujourd'hui. Dans ce qu'elle a fait d'important, on doit citer la construction et la réalisation d'une petite station laser légère ultra mobile et très facilement transportable par camionnette ou en avion destinée à l'étalonnage des radars d'altimétrie durant les années allant de 1992 à 2012 ; l'objectif de ces missions spatiales avec un radar altimétrique à bord était de déterminer le niveau moyen des mers avec son évolution temporelle à l'échelle mondiale et régionale avec des précisions centimétriques voire millimétriques, ce qui implique des étalonnages réguliers dans le temps pour les différents satellites utilisés. Beaucoup de sessions d'étalonnage seront faites notamment en Corse (site permanent des étalonnages toujours en cours d'activité mais avec des moyens et des technologies différentes qui ont évolué), et aussi en Crète (Chania-la Canée en 2003), en Espagne (à San Fernando en 2004 pour une colocation), à Brest (pour l'étude de la surcharge océanique en 2004), en Tasmanie (2007-2008), en Polynésie française à Tahiti (2011) pour la colocalisation de plusieurs techniques et tout particulièrement avec la station laser américaine Moblas 8. La communauté française a joué et jouera plus généralement un rôle très important dans l'étude des océans par des moyens spatiaux. Dans l'étude du niveau moyen des mers par altimétrie et de ses variations temporelles dans le cadre d'une coopération Franco-Américaine on doit citer les satellites TOPEX/Poséidon (1992),

Jason 2 (2006), Jason 3 (2016) et d'autres qui suivront encore. Dans ce domaine une coopération européenne se développera aussi avec le lancement les satellites européens ERS-1(1991) et 2 (1995) et Envisat (2002) et d'autres qui seront encore lancés plus tard (série Sentinel).

Crédit observatoire de la Côte d'Azur

Pour donner quelques précisions complémentaires la station laser Ultra Mobile en anglais la « *French Transportable Laser Ranging System* » fut conçue par F. Pierron et M. Kasser ; elle est le plus compact des systèmes de télémétrie laser sur satellites jamais utilisé au monde (300 kg, diamètre du télescope 13cm) ; elle fut construite à l'observatoire de la Côte d'Azur avec le soutien du CNES du CNRS et de l'IGN en 1995/2000. Une thèse sera soutenue par Joëlle Nicolas sur les caractéristiques de cette station laser Ultra Mobile conçue pour l'obtention d'une exactitude centimétrique pour des fins d'applications à l'océanographie et à la géodésie spatiale; la thèse sera présentée en 2000 dans le cadre de l'Université de Nice Sophia Antipolis, thèse préparée sous la direction de F. Pierron et M. Kasser avec aussi la participation de Christian Thom de l'IGN.

Le système de télémétrie de cette station a été opérationnel et au meilleur niveau (volume de données et fiabilité) à partir de 2002 et jusqu'à sa fermeture en 2012, d'autres technologies fondées sur l'utilisation des GNSS étant alors devenues plus précises et plus faciles d'emploi; en résumé ce système de petite station laser mobile fut unique par la taille du télescope (13 cm) et sa compacité unique par le temps de déploiement sur site (quelques jours) ; ce fut réellement, il faut le souligner un défi technologique. Pour les projets scientifiques fondés sur son utilisation on peut donc les résumer en rappelant l'étalonnage des radars altimétriques du niveau des mers des satellites océanographiques, la contribution à la réalisation d'un système terrestre international de référence, l'étude de la charge océaniques et des mouvements de la croûte terrestre, la colocalisation de différentes techniques à Tahiti, des expériences de transfert de temps. La photo jointe ci-dessus de la station laser Ultra Mobile appelée aussi en anglais la FTLRS a été prise à Chania–la Canée en Crête en 2003.

Crédit observatoire de la Côte d'Azur

« Triple laser ranging collocation experiment at the Grasse observatory, France September - November 2001, Joëlle Nicolas, Pascal Bonnefond, Olivier Laurain, Francis Pierron, Pierre Exertier, Observatoire de la Côte d'Azur ».

Cette photo illustre bien l'activité de télémétrie laser au plateau de Calern autour de l'an 2000 et jusqu'en 2005 avec le fonctionnement simultané de la station Laser-Lune, de la station fixe laser satellites, de la petite station laser Ultra-Mobile sur satellites. Pourtant un tournant très important sera alors pris en 2005 tant pour des raisons d'évolution des objectifs scientifiques à satisfaire que pour des raisons de restriction budgétaire et de personnels disponibles.

La télémétrie laser en France, son futur et ses aspects nouveaux; le télescope Laser-Lune rénové et devenu le télescope Méo (Géoazur/Observatoire de la Côte d'Azur/Université de la Côte d'azur depuis 2020)

Les observations de télémétrie laser à des fins de trajectographie précise en vue d'application aux Géosciences et l'étude du système Terre-Lune se sont poursuivis comme on l'a dit au cours des décennies le plus continûment possible depuis la fondation du CERGA en 1974 à l'Observatoire de la Côte d'Azur cela tant le domaine des satellites artificiels que dans celui de la Lune. Mais en 2005, on a opéré un changement de stratégie ; on a renouvelé les objectifs scientifiques et non seulement on a cherché à télémétrer sur le même télescope les satellites artificiels et la Lune, mais en plus on a cherché à contribuer à de nouveaux objectifs, tels l'imagerie d'objets spatiaux, la maîtrise de la turbulence atmosphérique grâce à de l'optique adaptative ou la capacité de réaliser des télécommunications optiques spatiales à très haute cadence par technique laser entre la Terre et une sonde spatiale. Ainsi une première expérience avec un lien optique a été réussie le 22 juin 2015 avec une sonde japonaise Socrates avec à son bord le terminal SOTA *(Small Optical Terminal)* et la station MéO de l'Observatoire du plateau de Calern; cela implique une capacité de pointage extrêmement précis avec des objets se déplaçant rapidement ; le résultat permet alors une augmentation considérable du débit des données recueillies à bord de sondes spatiales interplanétaires par rapport aux liaisons radio en réduisant en même temps la puissance électrique nécessaire (voir ci-dessous la référence). Ces expérimentations ont été conduites par l'équipe Astrogéo de Géoazur/OCA pour le compte du CNES en coopération avec le NICT japonais (*National Institute of Information and Communication Technology)* et le consortium DOMINO (OCA, CNES AIRBUS, ONERA, Thales Alenia Space).

On a aussi cherché avec succès à observer par télémétrie laser le Lunar Orbiter américain (LRO) lancé en 2009 par la NASA et équipé de rétro réflecteurs laser. Jusqu'en 2018 et 2019 on n'avait pas réussi à le faire car c'était une prouesse technologique difficile à réaliser. Mais dans un article publié dans la revue Earth, Planets and Space, une équipe de chercheurs français et américains put rapporter les premiers échos laser réussis à l'Observatoire du Calern: deux fois le 4 septembre 2018 et deux fois encore entre le 23 août et le 24 août 2019 ; cela a été réalisé par les ingénieurs et les techniciens de Géoazur /OCA du télescope Méo (voir référence ci-dessous). Ce sont deux très beaux résultats.

Pour donner quelques informations complémentaires sur la manière d'atteindre ces objectifs difficiles on a dû réviser l'ensemble du système de poursuite du télescope Méo (Métrologie optique et ancien Laser-Lune) pour avoir la possibilité d'un mouvement très rapide du télescope incluant aussi le mouvement de la coupole. Ce faisant on s'est ainsi doté de la capacité d'assurer la poursuite de satellites d'altitude relativement basse, seulement quelques centaines de kilomètres, service assuré jusqu'alors par la station fixe laser-satellite. Aujourd'hui le même grand télescope de 1,54 m de diamètre appelé donc MéO peut ainsi servir différents objectifs ; on a alors fermé la station satellite tant pour des raisons d'économie notamment en personnel que pour redéfinir pour l'observation des satellites artificiels des objectifs scientifiques sur quelques satellites bien choisis. Le nombre de cibles laser augmentant au cours des années on ne pouvait de fait plus faire de la télémétrie laser sur tout ce qui passait dans le ciel et en même temps continuer à faire des développements

technologiques indispensables. Des choix et des priorités étaient à faire. Les observations sur satellites furent faites désormais sur la station Méo.
Dans ce contexte en 2020 un nouveau laser à haute cadence de tirs a été spécifiquement acquis pour répondre aux défis de la précision et de l'exactitude aujourd'hui nécessaires dans le domaine des applications de la télémétrie laser sur satellites artificiels. Des études ont été également menées pour la maîtrise des corrections de propagation du rayon laser dans l'atmosphère. Ces études pourront servir aussi à la définition des caractéristiques d'une nouvelle station de télémétrie laser de précision millimétrique et la plus automatisé possible avec l'analyse des points sensibles à maîtriser dont on souhaite le développement notamment sur le site de Tahiti de l'Université de Polynésie française. Le développement en parallèle des différentes techniques a ainsi changé le rôle spécifique de chacune d'entre elles. Il ne s'agit plus de tout faire en géodésie spatiale avec chaque technique mais de définir pour chacune d'elle son rôle spécifique. Pour rappel le rôle de la télémétrie laser reste essentiel dans la détermination de l'échelle de distance des systèmes de référence terrestre, la position du centre de masse de la Terre dans ces systèmes, les variations temporelles du champ de gravité terrestre définies par les variations des premiers termes du développement en harmoniques sphériques du champ de gravité de la Terre, (ainsi en premier lieu son aplatissement dynamique grandeur qui ne peut être obtenue avec précision par des missions comme Grace ou Grace Follow-On) ; ces dernières missions sont dédiées aux transfert de masse dans le système Terre, problème essentiel dans l'étude des variations du climat. Pour ce faire, on doit ainsi en priorité observer quelques cibles laser extrêmement massives pour diminuer l'effet des forces non-gravitationnelles agissant sur le satellite et des satellites comme Lageos ou encore Starlette ou Stella ou quelques autres qui seront à privilégier et à demeurer prioritaires dans les observations.

La station américaine Moblas 8 et son remplacement, pour faire de Tahiti une station géodésique fondamentale pour les réseaux de référence internationaux

Il faut maintenant situer une coopération franco-américaine dans le contexte de l'effort français en télémétrie laser dans une région très éloignée de la métropole, la Polynésie française. Au milieu des années 80, la NASA exprima au CNES son souhait d'installer une station de télémétrie dans cette région. Après études et discussions avec le CNES et les autorités gouvernementales locales, une station fut d'abord installée sur l'île de Huahine, puis ultérieurement à Tahiti où il y a toujours aujourd'hui une station américaine, la station Moblas 8. Grâce au dynamisme d'Alain Bonneville, professeur à l'Université de Polynésie française des accords successifs furent passés entre les partenaires, un bâtiment a été construit pour abriter les expériences géodésiques notamment celle de colocalisation du système allemand Prare et du système français Doris. Puis en 1997, un nouvel accord a été conclu entre la NASA, le CNES et l'Université qui était alors devenue l'Université de la Polynésie française (l'UPF avec en 2017 environ 4000 étudiants, 350 enseignants chercheurs, 40 doctorants) ; cet accord concerne en particulier la station de télémétrie laser Moblas 8. L'Observatoire géodésique de Tahiti fut ainsi crée dans le cadre de cet accord tripartite entre la NASA, le CNES, l'UPF. Il fut dirigé au départ pendant un an par Alain Bonneville et il est aujourd'hui (2020) dirigé par Jean-Pierre Barriot, professeur à l'UPF, depuis plusieurs années. Cet observatoire comprend des stations de localisation et de navigation types GNSS, des stations type Doris, un réseau de marégraphes pour surveiller l'arrivée d'un tsunami éventuel, un gravimètre Gphone sur le site CEA de Pamatai et cette station américaine de télémétrie laser ; malheureusement la station Moblas 8, est très ancienne comme on l'a dit et elle est en fin de course d'utilisation ; il faudrait donc la remplacer par une station moderne, la plus automatique possible pour en diminuer les coûts de fonctionnement et notamment une réduction en personnel.

MOBLAS- 8 TAHITI

Crédit Université de la Polynésie française

Des études ont montré que la réalisation d'une nouvelle station laser pourrait être faite par des sociétés industrielles locales de la Côte d'Azur proches de l'observatoire de Calern où il existe de fait une grande compétence historique dans le domaine de la télémétrie laser sur satellites et sur la Lune. Une telle station pourrait ensuite être installée à Tahiti dans le cadre de la coopération CNES –NASA- Université de la Polynésie française sans exclure de satisfaire des intérêts éventuels en Europe dans le cadre de coopérations dédiées. La station américaine Moblas 8 extrêmement ancienne en bout de course de son exploitation pourrait être donc remplacée. Les décisions de réalisation sont cependant encore à prendre. Le millimètre sur le long terme reste un défi qu'il faudra atteindre et qui est non évident à réaliser de manière routinière ; il faut garantir en plus une stabilité de 0,1 mm par an dans les coordonnées des stations au sol ; c'est pourquoi de nombreuses études continuent d'être menées à Géoazur à l'Observatoire de la Côte d'Azur pour apprendre comment l'obtenir et le garantir dans le temps. On doit alors noter ici que la NASA vient de proposer récemment au CNES, l'étude de l'implantation d'une station américaine VLBI à Tahiti en contrepartie de l'installation d'une station laser française de nouvelle génération donc la plus automatisée possible pour économiser les ressources humaines de fonctionnement. Tahiti en plein Pacifique sud avec en plus les autres techniques géodésiques existantes comme on l'a dit plus haut type GNSS, Doris avec aussi un réseau local en Polynésie de marégraphes pour surveiller le développement d'un tsunami éventuel, pourrait devenir ainsi une station géodésique fondamentale du réseau international de références terrestres., l'ITRF avec des implications majeures dans la surveillance du changement climatique (variation du niveau des mers, importance de la fonte mondiale des glaciers et des calottes glaciaires dans ce domaine à titre d'exemple). Ce serait une contribution française et de la Polynésie française de tout premier plan dans le domaine de la géodésie d'intérêt mondial et bien dans la continuité de ce qui a toujours été demandé et souhaité au niveau de l'ONU et de ses instances dans ce domaine. A ce stade, il est très important de rappeler qu'une Commission sur les infrastructures géodésiques à vocation nationale et internationale a été créée dans le cadre du Bureau des longitudes pour définir et proposer une politique d'investissements qui soit cohérente avec un certain nombre d'objectifs précis et qui doit en fixer les priorités. Cette commission présidée par l'un de nous, Claude Boucher, prend désormais en charge ce type de problèmes. Plusieurs documents prospectifs ont déjà été élaborés notamment par J-P Barriot, R.Biancale, P.Exertier et sont disponibles au Bureau des longitudes.

On doit encore souligner et rappeler que dans le cadre des mesures de distance Terre-Lune, les développements actuels permettent également une amélioration constante de la précision vers un niveau millimétrique en faisant des mesures à deux longueurs d'onde de l'impulsion laser dans le vert et dans l'infrarouge pour corriger des effets de propagation atmosphérique ; les mesures que l'on peut faire dans l'infrarouge augmente en outre aussi de manière très significative le rendement de la station de télémétrie sur la Lune au cours d'une lunaison, ouvrant l'obtention d'une plus grande quantité de données sur le long terme et aboutissant ainsi à une meilleure compréhension de la composition de la Lune et du comportement évolutif du système Terre-Lune. Ces mesures de distances Terre-Lune ont aussi un impact très positif dans l'élaboration globale des éphémérides planétaires du système solaire (éphémérides INPOP en collaboration avec l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, l'IMCCE). Le traitement des données Laser Lune est aussi fait avec des collaborations avec l'Observatoire de Paris (département du Syrte), voir les références bibliographiques ci-dessous.

Nous donnons ci-dessous des références bibliographiques récentes avec la liste des noms de tous les auteurs ce qui, permet en même temps de rendre hommage aux équipes actuelles en charge de la télémétrie laser à l'Observatoire de la Côte d'Azur et de Paris.

Recent Progress in Lunar Laser Ranging at Grasse Laser Ranging Station.
Chabé J., Courde C., Torre J.-M., Bouquillon S., Bourgoin A., Aimar M., Albanese D., Chauvineau B., Mariey H., Martinot-Lagarde G., Maurice N., Phung D.-H., Samain E. & Viot H.
Earth and Space Science 7(9):e2019EA000785, 2020. HAL

Asteroid masses obtained with INPOP planetary ephemerides.
Fienga A., Avdellidou C. & Hanus J
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 492(1):589-602, 2020. HAL

Observational Constraint on the Radius and Oblateness of the Lunar Core-Mantle Boundary.
Viswanathan V., Rambaux N., Fienga A., Laskar J. & Gatineau M.
Geophysical Research Letters 46(13):7295-7303, 2020.

The new lunar ephemeris INPOP17a and its application to fundamental physics.
Vishwanathan V., Fienga A., Minazzoli O., Bernus L., Laskar J. & Gastineau M.
Monthly Notices of the Royal Astronomucal Society 476(2):1877-1888, 2018. HAL arXiv WoS

Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station.
Courde C., Torre J.-M., Samain E., Martinot-Lagarde G., Aimar M., Albanèse D., Exertier P., Fienga A., Mariey H., Métris G., Viot H. & Viswanathan V.
Astronomy & Astrophysics 602:A90, 2017. DOC HAL WoS

Laser geodetic satellites: a high-accuracy scientific tool.
Pearlman, M., Arnold, D., Davis, M. Barlier, F.,Biancale, R.,et al. Laser geodetic satellites: a high-accuracy scientific tool.
J Geod. ***93,*** *2181–2194, 2019, https://doi.org/10.1007/s00190-019-01228-y*

First two-way laser ranging to a lunar orbiter: infrared observations from the Grasse station to LRO's retro-reflector array,

Erwan Mazarico, Xiaoli Sun, Jean-Marie Torre, Clément Courde, Julien Chabé, Mourad Aimar, Hervé Mariey, Nicolas Maurice, Michael K. Barker, Dandan Mao, Daniel R. Cremons, Sébastien Bouquillon, Teddy Carlucci, Vishnu Viswanathan, Frank G. Lemoine, Adrien Bourgoin, Pierre Exertier, Gregory A. Neumann, Maria T. Zuber and David E. Smith,

Earth Planets Space 72, 113, 2020, https://doi.org/10.1186/s40623-020-01243-w

Telecom & scintillation first data analysis for DOMINO-laser communication between SOTA onboard Japonese Socrates satellite, and MEO OGS,

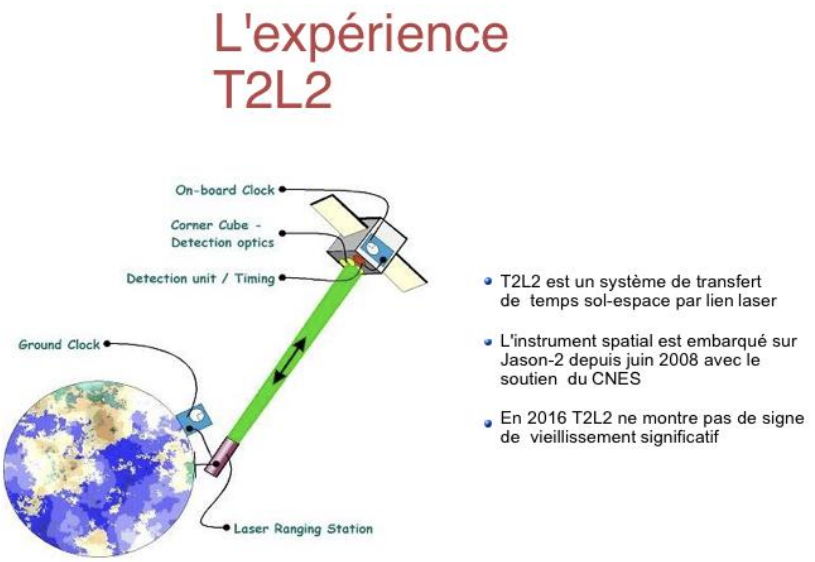
Phung, D. H., Samain, E., Maurice, N., Albanesse, D., Mariey, H., Aimar, M., Velluet, M. T.

In *2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)* (pp. 1-7). IEEE.

Le transfert de temps par lien laser

Une application importante reste maintenant à souligner ; elle concerne le transfert du temps fréquence par lien laser validant une méthode de synchronisation d'horloges atomiques de manière très précise à exprimer en picosecondes ; on doit d'abord citer les expériences historiques Lasso sur le satellite géostationnaire Méteosat P2 (1992) puis de manière beaucoup plus récente l'expérience T2L2 sur le satellite Jason 2 (2008) (principal investigateur Etienne Samain avec Pierre Exertier, Co-I.). Ces missions ont tout à fait atteint leurs objectifs : démontrer dans le transfert de temps l'obtention possible d'une précision de 3-4 pico secondes sur un intervalle de temps de 30 secondes, puis l'obtention d'une exactitude de 40 ps en local à l'observatoire de Calern dans le transfert de temps entre les deux stations laser, MéO et la station station laser ultra mobile, puis enfin l'obtention d'une exactitude de 120 ps dans le transfert de temps entre l'observatoire du Calern et l'observatoire de Paris, lors d'une campagne européenne incluant les stations laser de Herstmonceux, Wettzell et de Grasse en vision commune (Le tout a été contrôlé avec GPS lui aussi proprement calibré) ; Ces expériences ont été étendues avec succès en vision non commune avec la Chine ((référence ci-dessous avec Samain et al. 2018) . Demain des expériences similaires pourront être développées dans le cadre de la mission spatiale ACeS/Pharao sur la station internationale ISS en 2022 et au-delà (coopération en France de plusieurs organismes, ENS, Observatoire de Paris, Geoazur).

On peut aussi retenir de ces expériences utilisant un lien laser sol-espace pour synchroniser un oscillateur de référence au sol (souvent un H-Maser) avec l'oscillateur placé à bord, l'intérêt grandissant de caractériser des oscillateurs spatiaux, aussi bien pour DORIS (à bord de nombre de missions d'Observation de l'Océan) que pour les GNSS. L'ESA notamment mais aussi la Chine et les Etats-Unis, mettent au point des expériences de synchronisation afin de suivre le comportement temporel des oscillateurs des satellites GNSS et ainsi améliorer la navigation sur un plan général.



Crédit observatoire de la Côte d'Azur

Time Transfer by Laser Link: A complete analysis of the error budget,
Samain E., Exertier P., Courde C., Fridelance P., Guillemot Ph., Laas-Bourez M., Torre J.-M.
Metrologia 52, 423-432, 2015.

Time biases in laser ranging observations: a concerning issue of Space Geodesy
Exertier P**.**, A. Belli, J.M. Lemoine
JASR, 60, 948-968, 2017.

Time Transfer by Laser Link (T2L2) in non -common view between Europe and China,
.Samain E., Rovera G. D., Torre J-M., Courde C., Belli A., Exertier P., Uhrich P., Guillemot P., Sherwood R., Dong X., Han X., Zhang Z., Meng W. & Zhang Z.
IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 65(6):927-933, 2018.

L'international « Satellite Laser Ranging, l'ILRS » ou la coopération internationale en matière de télémétrie laser

Une station de télémétrie laser comme on a pu le voir qui ferait des mesures sans échange et sans concertation avec d'autres stations de télémétrie d'un réseau mondial, perdrait totalement son temps de manière évidente. Une coopération internationale est un impératif absolu bien compris depuis l'origine. Des banques de données ont ainsi été créées, une aux États-Unis(CCDIS), et une en Europe (Eurolas) comme déjà dit plus haut où toutes les mesures Laser sont envoyées en temps quasi-réel. Ceci a été réalisé dans le cadre d'une association internationale de géodésie, l'ILRS et cela existe pour toutes les différentes techniques géodésiques, type GNSS, DORIS, VLBI. Nous indiquons ci-dessous le rôle de l'ILRS comme indiqué sur le site Internet :

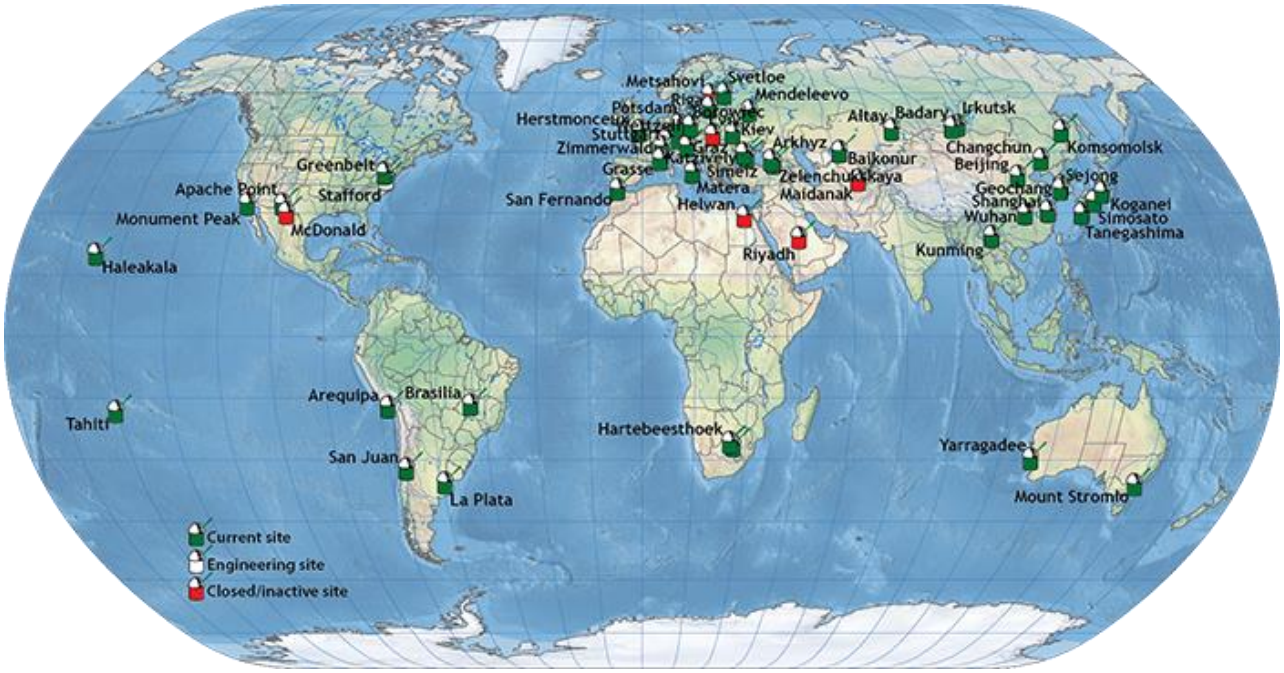
« The ILRS was organized as one of the IAG measurement services in 1998, with a charter to organize and coordinate world-wide Satellite Laser Ranging (SLR) and Lunar Laser Ranging (LLR) to support programs in geodesy, geophysics, and lunar and planetary science, and to provide the data products (Earth center of mass and scale) important to the maintenance and improvement of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF).
In 2021, the situation was as follows :
Governing Board Chair: Toshimichi Otsubo (Japan)
Central Bureau Director: Michael Pearlman (USA)
Central Bureau Secretary: Carey Noll (USA).
The primary mission of the ILRS is to support, through Satellite Laser Ranging (SLR) and Lunar Laser Ranging (LLR) data as well as related products, geodetic and geophysical research activities.
Web site : http://ilrs.gsfc.nasa.gov/

ILRS representatives to the IERS Directing Board : Erricos Pavlis, Jean-Marie Torre
IERS representative to the ILRS Governing Board : Daniela Thaller

Dans les rapports d'activité de l'ILRS à laquelle la communauté française a beaucoup participé on trouvera aussi de nombreuses références explicitant les travaux de cette communauté. La communauté internationale Laser a régulièrement organisé des ateliers sur cette technique, le premier atelier s'était tenu en 1973 à Lagonissi en Grèce ; la communauté française organisa ensuite pour sa part le sixième atelier laser à Antibes en 1986 (J. Gaignebet, organisateur) puis, en septembre 2007, l'observatoire de la Côte d'Azur organisa dans le cadre de l'ILRS, un colloque international plus spécialisé, centré sur certaines questions techniques et réunissant les acteurs de cette discipline (F.et M. Pierron organisateurs) ; il eut lieu à Grasse.

Compte tenu de son importance, cet aspect international des techniques géodésiques sera traité spécifiquement dans le cadre d'une autre note du Bureau des longitudes en lien avec la présentation des autres associations internationales de géodésie traitant de leurs applications nombreuses aux sciences de la Terre. On donne sur la figure jointe la répartition des stations de télémétrie laser dans le monde qui demeure malheureusement aujourd'hui encore géographiquement très asymétrique ce qui génère des biais dans l'acquisition des données. La station de Tahiti en plein Pacifique Sud occuperait de manière évidente à cet égard une position centrale très importante qu'il faut soutenir.

Réseau international de télémétrie laser sur satellites



Crédit ILRS

ISBN : 978-2-491688-12-7
ISSN : 2724-8372